

中国颗粒学会第十一届学术年会 暨海峡两岸颗粒技术研讨会

会议摘要集

第
三
分
会
场

中国·厦门

二〇二〇年十月

目 录

03-001	微型流化床的壁效应及流体力学特性.....	1
03-002	气液固流化床的介尺度模型研究.....	3
03-003	高温液固流化床中溶胀及粘附性颗粒失流行为的实验及模拟.....	4
03-004	湍动床中颗粒聚团的动力学.....	6
03-005	颗粒群内摩擦力对流化床中参数测量的影响.....	7
03-006	旋风分离器减阻增效研究.....	9
03-007	Study on fine powders discharged from the hopper.....	11
03-008	流化床甲醇制芳烃技术进展.....	12
03-009	细颗粒流态化过程强化基础研究及工业应用.....	13
03-010	流化床反应器中煤与废塑料共气化过程的数值研究.....	14
03-011	稳约双流体模型的统计力学基础.....	15
03-012	费托合成铁基催化剂加压气固流化特性研究.....	17
03-013	湿颗粒气固床中单气泡行为的 CFD-DEM 模拟.....	18
03-014	循环流化床锅炉流动、燃烧和 NO _x 排放的 CPFD 模拟.....	19
03-015	流化床生物质气化反应器中气固流动、传热及气化特性数值模拟及优化研究.....	21
03-016	菱镁矿输送床煅烧反应特性及产物微观结构.....	22
03-017	液固流化床三维电极制备复合粉体.....	24
03-018	流态化气相沉积制备氮化钛粉体.....	26
03-019	微型流化床与喷动床中气体返混特性分析.....	27
03-020	气固两相流的“超可压缩性”.....	28
03-021	浆态床的介尺度模拟：从曳力模型到群体平衡模型.....	29
03-022	流态化制备超细碳化钨反应动力学及路径.....	32
03-023	高密度气固循环流化床颗粒聚团分布特性.....	33
03-024	不同粒度煤炭在循环流化床条件下的燃烧行为.....	34
03-025	气固流态化中“相共存”的统计热力学分析.....	35
03-026	基于上出料流化发料罐的高岭土粉体发料特性研究.....	36
03-027	油剂逆流接触催化裂化提升管进料混合结构研究进展.....	38
03-028	新型灵活焦化反应器颗粒浓度分布研究.....	39

03-029	EMMS 固相应力模型.....	41
03-030	气固两相圆湍射流颗粒运动特性研究.....	42
03-031	大型双流化床反应器的冷态试验研究.....	43
03-032	高含硫天然气旋风分离器结构优化设计.....	44
03-033	03-033 In-situ monitoring of coke content in methanol to olefins regeneration process by electrical capacitance tomography.....	45
03-034	喷动再生效率对新型耦合分离器的影响.....	46
03-035	微纳结构颗粒光热转换特性及太阳能热利用.....	48
03-036	合成吡啶碱新型反应器的数值模拟.....	49
03-037	笛卡尔网格下利用可压缩的 CFD-DEM-IBM 模拟.....	51
03-038	气固折流强化取热器内流动及换热特性研究.....	52
03-039	新型颗粒床-旋流耦合分离器内部流场分析.....	53
03-040	基于压力信号和数字图像分析的振动流化床气泡特性研究.....	55
03-041	脉动气固流化床最小流化速度研究.....	57
03-042	Study on the influence of pulsed airflow on cohesive powders flow properties.....	58
03-043	催化裂化再生器气固流动特性模拟研究.....	59
03-044	Fluidization characteristics for particles with different size distributions in a gas-solid dense-phase fluidized bed.....	61
03-045	ECT 技术对流化床内流体流动的三维图像重建研究.....	62
03-046	气固流化床光纤脉动信号的 R/S 分析.....	63
03-047	Revealing the chemical reaction properties of SiHCl ₃ pyrolysis by ReaxFF reactive molecular dynamics method.....	65
03-048	强化双颗粒混合-分离的两级化学链燃料反应器流动特性.....	66
03-049	华北石化重油催化裂化再生器分布器的数值模拟.....	67
03-050	吡啶碱合成流化床反应器气固体系接触效率.....	68
03-051	多旋臂气液旋流分离器 (GLVS) 分离特性研究.....	69
03-052	双层喷嘴进料提升管内气固流动混合特性的大型冷模实验研究.....	70
03-053	流化焦化反应器内新型焦粉分配器的结构优化.....	71
03-054	FCC 汽提器内气固流动与汽提效果的模拟研究.....	73
03-055	大差异二元颗粒空气分级特性的研究.....	74

微型流化床的壁效应及流体力学特性

韩振南, 付亮亮, 白丁荣, 许光文*

沈阳化工大学教育部资源与材料重点实验室, 沈阳市经济技术开发区 11 号街, 110142

*Email: gwxu@ipe.ac.cn

摘要正文:

流态化技术微型化是一种新型的微型化工(如微型通道反应器、微型混合器、微型换热器、微型分离器等)高新技术, 在能源转化、化工、生物医药、材料、精细化工等领域具有广泛的应用前景。由于体积小, 传质/传热速度快、使用方便、成本低等优势, 在化学反应特性评价、催化剂筛选、反应条件优化等方面具有很大的优势。特别是, 由于能够准确控制反应器内的温度及气固接触, 微型流化床可以有效提高反应的转化率和产品选择性, 因而在高附加值化学品生产合成方面, 必将发挥巨大作用。

微型流化床具有与大型流化床显著不同的流体力学特征, 如在初始流化前的压降过冲、流化状态下的压降补偿、最小流化、节涌、鼓泡流化延迟、湍动和快速流化提前等^[1,2]。由于单位床层体积的壁表面积增大造成的“壁效应”, 是微型流化床这些特征的主要因素。本文根据对相关文献数据的系统分析, 探讨了微型流化床的壁效应的机理及其表现形式。分析表明, “壁效应”主要是由壁面对气体和固体流动的作用力增大形成的, 表现为壁面与气体和颗粒的摩擦力(直接形式), 床层空套率增大和气流不均匀性(间接形式)等三种主要形式。根据床层尺寸和气流特性的不同, 这三种形式相关关联, 其平衡的结果决定了微型流化床流体力学特性的变化规律。

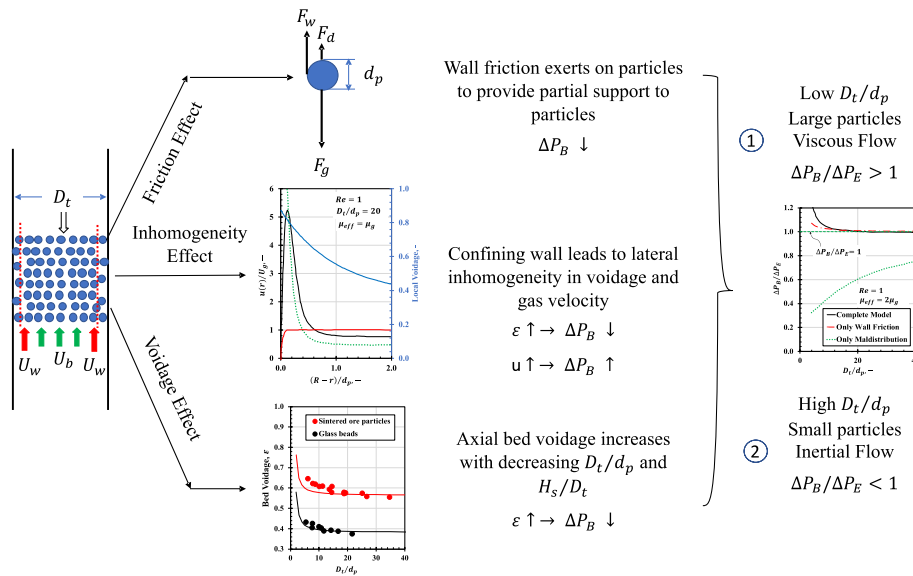


Fig. 1 Illustration of the wall effects occurring in small diameter beds

关键词：微型流化床；流体力学；壁效应

论文编号：03-001

On the Wall Effect and Hydrodynamics in Micro Fluidized Beds

Zhengen Han, Liangliang Fu, Dingrong Bai and Guangwen Xu*

Key Laboratory on Resources Chemicals and Materials of Ministry of Education

Shenyang University of Chemical Technology, 110142, Shenyang

Micro fluidized bed is a unique type of micro chemical systems (such as micro channel reactor, micro mixer, micro heat exchanger, micro separator, etc.). It has a great potential for a wide array of applications in energy, chemical, pharmaceutical, materials, and many other industries. Due to the features of small volume, fast rates of mass and heat transfer, linear scaleup ability and low costs in investment and operation, it is useful in characterizing various chemical reactions, screening catalyst and optimizing reaction conditions. In particular, the uniform temperature distribution, near plug flow of gas and high gas-solid contact efficiency allow the reactor be controlled accurately, so the conversion rate and product selectivity of the chemical reaction process can be significantly improved.

Numerous researches have well documented that micro fluidized beds exhibit unique hydrodynamic characteristics in comparison to their counterparts – large-scale or macro fluidized beds. The unique hydrodynamics include pressure drop overshoot prior to fluidization, pressure drop offset in fluidization state, delays in minimum, slugging and bubbling fluidization, the advanced turbulent and fast fluidization, etc. [1,2]. All of these special phenomena are believed to be caused by the “wall effect”, which becomes significant because the wall surface area per unit bed volume increases for small diameter beds. In this presentation, the mechanism and behavior of the wall effect of the micro-fluidized bed are discussed based on the relevant literature data. The analysis shows that the wall effect can behave in three ways, including the wall frictional forces on gas and solid flow, the bed voidage increase and the non-uniform gas and solid flow. Depending on the bed size and gas/solid characteristics, these three interrelated forms can vary and compete, the equilibrium state essentially determines the hydrodynamic characteristics of the micro-fluidized beds.

Keywords: Micro fluidized bed, hydrodynamics, wall effect

参考文献/References

- [1] WANG F, ZENG X, GENG S 等. Distinctive Hydrodynamics of a Micro Fluidized Bed and Its Application to Gas-Solid Reaction Analysis[Z]. American Chemical Society, 2018: 4096-4106(2018-04-19). DOI:10.1021/acs.energyfuels.7b03003.
- [2] GENG S, HAN Z, YUE J 等. Conditioning micro fluidized bed for maximal approach of gas plug flow[J]. Chemical Engineering Journal, 2018, 351: 110-118. DOI:10.1016/j.cej.2018.06.076.

气液固流化床的介尺度模型研究

马永丽^{1,*}, 刘明言^{1,2}

¹ 天津大学化工学院, 天津 300350

² 化学工程联合国家重点实验室(天津大学), 天津 300350

*E-mail: mayl@tju.edu.cn

摘要正文:

气-液-固三相流化床在过程工业具有广泛的应用。但是, 其内部多相流动结构的复杂性制约着该类反应器的科学设计放大、优化操作以及有效控制, 有必要运用新的理论和方法对其进行模型化研究。本文基于能量最小多尺度(Energy-Minimization Multiscale, EMMS)原理的介科学方法, 建立了描述气-液-固流化床内多相流动行为的全局及轴径向数学模型, 并对之进行实验验证。首先引入气泡和固体颗粒的加速度, 建立了改进的气-液-固流化床流动行为全局数学模型。与其他机理模型相比, 气泡与固体颗粒的加速度使得新模型能更加准确的预测相界面之间滑移速度和床层收缩现象。在低表观气速的拟稳态下, 气泡加速度随操作条件的变化而变化, 固体颗粒加速度则为 0 m/s^2 ; 较高表观气速下的情况与之相反。其次, 基于气泡尾涡对固体颗粒的夹带现象, 建立了气-液-固膨胀床的轴向流动介尺度模型。该模型证明了气泡尾涡对固体颗粒的夹带是轴向结构的形成机制。在促进气泡长大的操作气速和液速范围内, 轴向过渡段长度随着表观液速与气速的增大而增加。过渡段的起始点随表观液速的增加逐渐上移。同时, 进一步考虑颗粒团的流动行为, 建立了气-液-固循环流化床轴向流动介尺度模型, 首次预测了膨胀流化模式/循环流化模式/液体输送模式之间过渡点。在颗粒团相中, 固体颗粒的加速度受操作条件的明显影响, 且其最大值可以指示过渡段长度的变化。在固体颗粒的饱和夹带点, 固含率在轴向呈上稀下浓的“S”型分布, 其中, 稀相的起始点与操作条件有关。最后, 基于流体剪应力的径向分布, 建立了气-液-固流化床的径向流动介尺度模型, 准确预测了径向环-核结构。同时, 模型预测结果表明, 在径向环-核界面处达到最大值的悬浮输送能和流体剪切力可作为径向动量传递的指示性参数。

关键词: 气-液-固流化床; 能量最小多尺度; 介尺度; 机理模型; 介科学

参考文献

- [1] Li J. Multi-scale modeling and method of energy minimization for particle-fluid two phase flow [J]. PhD thesis, Institute of Chemical Metallurgy, Academia Sinica, 1987.
- [2] Fan L S, Tsuchiya K. Bubble wake dynamics in liquids and liquid-solid suspensions[M]. Butterworth-Heinemann, 1990.

高温液固流化床中溶胀及粘附性颗粒失流行为的实验及模拟

杨宁^{1,*}, 许秋石^{1,2}, 周荣涛^{1,2}

¹ 中国科学院过程工程研究所多相复杂系统国家重点实验室, 北京 100190

² 中国科学院大学, 北京 100049

*E-mail: nyang@ipe.ac.cn

摘要正文:

液固流化系统中固相颗粒在液相中一般呈现散式流态化行为^[1]。但在高温液固床中, 也会出现类似于高温气固系统中颗粒的粘结失流现象^[2-4]。例如, 在淤浆法聚烯烃生产工艺中, 反应器内局部温度过高致使溶剂中颗粒溶胀、黏附、聚集并堵塞反应器, 进而严重影响聚烯烃的正常生产^[5]。

本文针对液固流化床中溶胀粘性颗粒的失流现象分别进行了实验及模拟研究。在实验方面: 搭建了聚乙烯颗粒-白油体系的高温液固流化装置, 测量了不同操作流速下升温过程床层中固相颗粒的压降信号, 采用平均压降法等手段对压降信号进行分析, 得到了聚乙烯颗粒在高温液固床中流化行为的转变规律; 在模拟方面: 建立了适用于液固溶胀体系的CFD模型框架, 其中基于溶胀的双流体模型 (STFM) 用于描述溶胀液固系统基本流动特征, 组分输运方程 (STE) 用于描述烷烃分子向聚乙烯颗粒内部扩散的相间传质行为, 群平衡模型 (PBE) 用于描述溶胀颗粒的聚并行为。基于此模型框架模拟了搅拌槽和环管反应器中聚乙烯颗粒的溶胀失流现象。

实验结果表明: 床层升温过程中颗粒平均压降的变化可分为平稳、降低和无规律波动三个阶段, 如图1所示, 压降变化趋势的改变意味着颗粒流化行为的转变; 前后两个突变点所对应的操作温度分别为初始粘结温度^[1]、完全失流温度, 两个温度将升温过程液固流化床中颗粒的流化行为分为稳定流态化、粘结流态化、完全失流三个阶段。模拟结果表明: 液固溶胀体系的CFD模型能够成功捕捉到搅拌槽中由于颗粒溶胀聚并所导致的功率上升现象; 同时, 模型也预测出液固体系中固相粘度增加, 颗粒相平均直径增加的现象; 聚烯烃环管反应器的模拟结果显示新模型也成功捕捉到反应器流域转变、反应器中泵功率突增的现象, 与文献报导较为吻合。

实验和模拟对高温液固床中溶胀黏附颗粒的失流现象给出了较为合理的解释, 同时也为高温液固反应器的优化提供了指导。

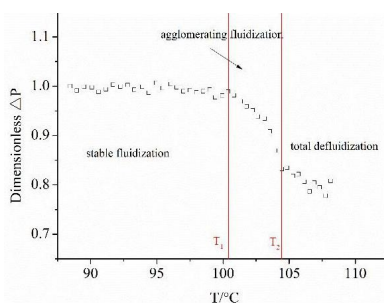


Fig. 1 Dimensionless pressure drop vs. temperature at $u_1 = 18.04$ mm/s (T_1 - initial sintering temperature; T_2 - total defluidization temperature)

关键词: 溶胀; 失流; 高温; 模型

参考文献

- [1] R.H.Wilhelm, M. Kwauk, Fluidization of solid particles. Chem. Eng. Prog. 1948, 44, 201-218.
- [2] J.P.K. Seville, Modelling of sintering in high temperature gas fluidization. Powder Technology. 1998, 97, 160-169
- [3] J.H.Siegell, High-temperature defluidization. Powder Technology. 1984, 38, 13 -22.
- [4] C. Lei, Q.S.Zhu, H.Z.Li, Experimental and theoretical study on the fluidization behaviors of iron powder at high temperature. Chemical Engineering Science 2014, 118, 50-59.
- [5] L.Fouarge, A.Lewalle, Swell control in slurry loop reactor. EP2005 1660230 B1.

论文编号：03-003

Experiments and simulations on the defluidization behavior of swelling or cohesive particles in high temperature liquid fluidization

Ning Yang^{1,*}, Qiushi Xu ^{1,2}, Rongtao Zhou^{1,2}

¹ State Key Laboratory of Multiphase Complex Systems, Institute of Process Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

A high-temperature liquid fluidization device with a polyethylene/paraffin oil two phase system was built, and the pressure drop signal of the particles during heating was measured to study the defluidization phenomenon of cohesive particles. A swelling-dependent two-fluid model (STFM) is developed for the liquid fluidization of swelling particles. Three types of fluidization behaviors in high-temperature liquid fluidized beds, i.e., stable fluidization, agglomerating fluidization, total defluidization have been identified by signal analysis. STFM was used to simulate the polyethylene particles swelling and defluidization in stirred tanks and loop reactors. This model captures the gradual increase of power consumption due to particle swelling and aggregation in a stirred tank or a slurry loop reactor, which agrees with the experiments.

湍动床中颗粒聚团的动力学

王海峰¹, 陈延佩^{1,*}, 王维^{1,2,†}

¹中国科学院过程工程研究所, 北京市海淀区北二条1号, 100190

²中国科学院化工学院, 北京市石景山区玉泉路19号, 100049

*Email: ypchen@ipe.ac.cn; †Email: wangwei@ipe.ac.cn

摘要正文:

利用高速相机对气固流化床进行拍摄, 通过对颗粒的识别和跟踪获得固相颗粒的位置场和速度场数据[Wang, 2018 #8839], 从而对湍动床介尺度结构展开动力学分析。首先根据颗粒Voronoi分布提出了一种判定团聚物的方法, 对湍动床中的团聚物平均速度、平均颗粒温度以及团聚物的尺寸分布等时均特性进行分析, 同时对团聚物的动态变化过程进行细致考察。分析团聚物聚并和破碎过程中相应颗粒性质的变化, 发现团聚物聚并颗粒动能变化过程可以使用扫雪机模型描述, 在本实验中颗粒动能的损失和聚团颗粒在聚并过程中所占面积减少量都与 $t^{3/2}$ 成正比; 而破碎过程中向上和向下运动颗粒动能增长趋势完全不同, 表明破碎过程中颗粒受力作用复杂。

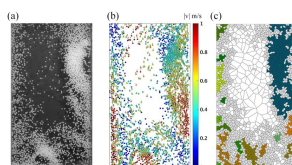


Fig. 1 图像处理与团聚物确定示意图 (a)原始照片; (b)颗粒速度矢量场图, 其中颜色代表颗粒速率, 箭头代表颗粒运动方向; (c) Voronoi划分图, 不同颜色代表不同Voronoi区域, 白色为稀相, 灰色为界面相, 其他彩色代表不同的团聚物

Fig. 1 Image processing and identification of the cluster phase: (a) original photo (b) the vector field of particle velocity (the color shows the speed of particles and the vector stands for the direction of motion) (c) colored Voronoi diagram, white for the dilute phase, gray for the interphase and other colors for different clusters

关键词: 湍动床; 聚团; 聚并; 破碎; 实验

参考文献

- [1] H. Wang, Y. Chen and W. Wang. Scale-dependent nonequilibrium features in a bubbling fluidized bed. *AIChE Journal*. 2018, 64, 7: 2364-2378.
- [2] H. Wang, Y. Chen and W. Wang. Clustering dynamic in gas-solid flows. unpublished manuscript.

颗粒群内摩擦力对流化床中参数测量的影响

朱全红¹，郝维康²，陶金亮²，黄青山^{1,*}，杨超^{3,*}

¹中科院青岛生物能源与过程研究所，青岛市崂山区松岭路 189 号，2661001

²河北工业大学，天津市北辰区西平道 5340 号，300401

³中科院过程工程研究所，北京市海淀区中关村北二街 1 号，100190

*Email: qshuang@ipe.ac.cn, chaoyang@ipe.ac.cn

摘要正文：

流化床反应器常用来处理气体和颗粒群之间的接触过程，比如气体吸附、过滤除尘，气固非催化和催化反应。对于流化床反应器而言，操作参数的选择至关重要，只有在合理的操作范围内，它才能发挥出最佳性能。选择操作参数的一个重要依据即是所使用颗粒的物性参数，比如最小流化速度等。如何在流化床中对这些参数进行准确测量是一个十分关键的课题。本文即是关注颗粒群内摩擦力对这些参数测量的影响，具体包括内摩擦力对最小流化速度测量的影响以及内摩擦力对双组份颗粒分级指数测量的影响。

所谓内摩擦力主要是指颗粒之间的静摩擦力。根据经典物理学，只要颗粒之间存在正压力，即可能存在静摩擦力。具体到流化床反应器中，内摩擦力只存在于固定床阶段，即表观气速小于最小流化速度时。在流化床阶段（表观气速大于最小流化速度时），由于曳力完全克服了颗粒的浮重，颗粒之间不再存在正压力，也就不存在内摩擦力。因此，对于在流化床阶段进行测量的参数，比如床层压降及其波动标准偏差，内摩擦力不会产生任何影响。但是对于测量过程涉及固定床阶段的参数，内摩擦力会对测量的准确性产生重要影响，比如最小流化速度和分级指数。

最小流化速度指的是升速过程中，曳力开始等于颗粒浮重时对应的表观气速，本应该根据升速压降曲线确定。但是文献中大都推荐使用降速压降曲线，原因主要在于升速压降曲线（主要是斜线段）的重复性比较差，进而导致得到的最小流化速度重复性比较差。升速压降曲线重复性比较差的原因主要在于一开始所使用的固定床的重复性比较差。最直观地，我们观察到一开始所使用的固定床可以呈现出不同的高度（不同的空隙率），即具有多态性。更进一步，固定床之所以具有多态性正是因为颗粒之间的内摩擦力。由于内摩擦力的作用，颗粒之间可以具有不同的堆积排列方式，使得颗粒之间的空隙率不同，外观表现即是床层高度不同。为了减小内摩擦力的影响，对于单组份颗粒，建议使用降速压降曲线确定最小流化速度。对于双/多组份颗粒，必须使用升速压降曲线确定最小流化速度，但是应采取合理措施获取测量升速压降曲线之前的固定床。

两种颗粒（密度或粒度不同）共流化时，根据操作气速不同，会存在不同程度的分级，即分级指数不同。分级指数的测量是流态化领域一个重要的研究课题，获取分级指数和操作气速之间的函数关系是分级研究的一个重要目标，希望最终可以类比气液相平衡。测量给定气速下分级指数的常规步骤是：首先获取可以代表该气速的稳态，然后突然关气得到固定床，最后取样分析。很明显，分级指数测量的关键在于获取可以代表该工况的稳态。操作气速较高时，这种稳态可以非常容易地获取。但是当操作气速较低时，获取想要的稳态却是一件十分困难的事情。此时，通常采用降速方式到达目标气速，获得对应的“稳态”。然而，我们的实验测量表明，不同的降速速率到达目标气速后得到的床层状态不一样，但都不是真正的稳态。这是因为在降速过程中，沉积组分开始逐渐失流化，导致颗粒间内摩擦力的产生，在内摩擦力的作用下，许多颗粒（包括沉积组分和浮升组分）在到达稳定平衡位置之前即失去运动状态，从而被困在亚稳定平衡位置。降速速率越慢，颗粒可以有更充足的时间逼近稳定平衡位置，得到的状态越接近真正的稳态。为了减小内摩擦力对分级指数测量的影响，首先应该采用降速法从更高气速到达目标气速，其次尽量减小气速的降低速率，给颗粒逼近稳定平衡位置提供时间，再次可以适当采用敲击或者震动的方式促使颗粒逼近平衡位置。

关键词：流化床；内摩擦力；最小流化速度；分级指数；测量准确性

参考文献

- [1] Philip, Gibbs. *Is glass liquid or solid?* <https://www.researchgate.net/publication/330141691>

旋风分离器减阻增效研究

孙国刚*, 王泽涛, 李树彦, 袁世威, 宋学玲

中国石油大学(北京)机械与储运工程学院过程装备实验室,
过程流体过滤与分离北京市重点实验室, 北京, 102249

*ggsuanbj@163.com

摘要正文:

旋风分离器当今仍然是最经济实用的一种气固分离设备,在石油催化裂化、循环流化床锅炉发电、煤气化等高温流态化工业过程中更是一种可长期工业运行的气固分离设备;其优点是结构简单、压降适中、效率较高。和过滤分离、静电除尘、湿法洗涤等其他高精度除尘技术相比,旋风分离器的最大缺点是对5微米以下细颗粒的分离捕集效率较低,要分离的颗粒越细需要的压降(能耗)越大。作者实验室坚持研究旋风分离器分离过程和分离器结构与性能的构效关系数十年,研究通过设计改进强化旋风分离器的性能,使旋风分离器的分离效率进一步提高、分离捕集的粒径进一步降低或压力损失进一步减少。本报告以作者实验室工作为主介绍近年旋风分离器减阻增效方面的研究进展。

旋风分离器的结构花样繁多,但其工作原理基本一样。切流反转式旋风分离器是最常见、应用最多、研究得最充分的一种。根据旋风分离器中某一位置颗粒所受的离心力与向心的流体曳力相平衡的基本原理,可得到分离

器的分离效率为50%的切割粒径 d_{c50} 的计算式: $d_{c50} = \sqrt{\frac{18\mu V_{rR_b} R_b}{(\rho_p - \rho_g) V_{tR_b}}}$ (R_b 为颗粒的平衡轨道半径, V_{rR_b} 、 V_{tR_b}

分别为 R_b 处的径向速度和切向速度)。经过进一步假设,则可计算出这个切割粒径。理论计算显示,改变分离器的结构尺寸、操作参数等,可使切割粒径达1微米,甚至0.1微米。这是否意味着几乎可以用旋风分离器解决所有的气粒分离问题?然而旋风分离器内的实际流动是三维强湍流,除基本的Rankine-Vortex旋流,还附加若干局部次级流动,十分复杂。这些局部的次级流动损害了分离性能,理论计算没有计及这些次级流动,因此,旋风分离器实际所能达到的分离效率与基本理论的计算相差甚远。抑制或消除这些局部次级流动,则可以改善分离器的性能,实现减阻增效。作者实验室研究试验了一系列设计改进措施,取得了较为明显的减阻增效效果。相关的设计改进包括:

(1) **轴对称进口** 常规单进口旋风分离器内流场偏心、非轴对称。改为轴对称进口(轴向导叶进口、多个切向进口),尽量使流场轴对称。在进气量相同,进口总面积相同的条件下,轴对称进口,最简单的为双进口,改善了单进口型流场的不对称性,双进口分离器的切向速度增大,径向速度明显减小,涡核变形小,排气管短路流量小,有利于固气分离,分离效率提高、切割粒径减小,且以双进口的两口面积和颗粒浓度相等为佳,但双进口的压降也高于单进口分离器;将双进口总面积设计为适当大于单进口面积,则可实现保效减阻或增效减阻。

(2) **螺旋内构件导流** 分离器内合理增加内构件导流可有效降低“上灰环”和排气管“短路流”,使筒体顶盖及排气管附近二次涡速度、湍动强度降低约20~40%,气速越高,效率越高,减阻增效效果越好;在处理气量相同的条件下,分离器压降降低30~40%。

(3) **排气管开缝导流、分流** 常规旋风分离器排气管内气流高速旋转,增加了分离器的能耗,但对分离效率的贡献较小;而且排气管下口径向速度最大、其下沿分离空间高度径向气速大小分布扭摆不均匀,排尘口附近径向气速较大,产生显著的“短路流”与“返混夹带”,降低分离效率。加大排气管插深且开逆旋流缝,可以降低径向气速沿分离空间高度分布的不均匀性,优化切向速度 V_t / 轴向速度 V_a 比,尽量使切向速度沿分离空间高度大小保持恒定不变。排气管侧缝具有导流惯性分离作用,气流携带颗粒绕排气管高速旋转,气流经侧缝进入排气管而颗粒因惯性被分离;此外,气流经侧缝分流进入了排气管,从而改变了排气管内气流分布,大幅降低排气管内气流旋转强度;同时进入分离空间的气量减少,分离空间气流旋转强度下降,压降降低。通过开缝面积比的大

小能有效控制侧缝进入排气管的气量大小，优化减阻提效幅度。

(4) **灰斗泄气** 大约20%的气量随被分离的颗粒进入灰斗，这部分气流有助被分离的颗粒从分离空间排出，但这部分气流从灰斗返回时会干扰已分离到边壁的颗粒下行排出，增加灰斗颗粒的返混夹带。抑制这一损害分离效率影响的简易措施之一是从灰斗泄气，采用适当的结构抽泄出部分气体（~10%处理气量）即可显著提高分离效率。

关键词：旋风分离器；减阻增效；设计改进；内构件

参考文献

- [1] 周雷，旋风分离器新型排气芯管的研究开发 [D]. 北京：中国石油大学（北京），2007.
- [2] 马强，旋风分离器排气管插深的试验与流场模拟[D]. 北京：中国石油大学（北京），2009.
- [3] 郭广军，旋风分离器排气管降阻增效试验和模拟研究[D]. 北京：中国石油大学（北京），2010.
- [4] 刘佳,单入口与轴对称多入口旋风分离器流场和性能的对比研究[D].北京：中国石油大学（北京），2011.
- [5] 张雪，旋风分离器内旋转流动的调控[D]. 北京：中国石油大学（北京），2015.
- [6] 韩晓鹏，造旋方式对旋风分离器流场与性能影响的研究 [D]. 北京：中国石油大学（北京），2017.
- [7] 毕文群，基于排气管开缝的旋风分离器减阻提效研究[D]. 北京：中国石油大学（北京），2017.

Study on fine powders discharged from the hopper

Haifeng Lu*, Jiakun Cao, Lizhuo Zhu, Xiaolei Guo, Haifeng Liu

Shanghai Engineering Research Center of Coal Gasification, East China University of Science and Technology, No. 130 Meilong Road, Shanghai, 200237

*Email: luhf@ecust.edu.cn

Abstract:

Powder flow is at the foundation of powder engineering, which builds the bridge between the granular properties and the design and exercise of the unit operations, such as powder storage, feeding, transportation, mixing and so on. However, flow issues such as flow stability and controllability may emerge for fine powders [1]. The introduction of inserts with simple structure into the hopper is a common mean to adjust the powder flow [2,3] which have been proven to change the internal flow of hoppers [4]. In this paper, experiments on a Perspex hopper at laboratory scale are presented. Powders with different properties are used as experimental materials. Results are provided in terms of the flow characteristics of discharged powders from a traditional hopper and from hoppers with the use of insert. Furthermore, experiments of kinds of aeration on powder discharge behaviours are conducted. Based on above, the effects of the physical properties of powders, of the flow channel structures and of the aeration on the solid flow rate are analyzed, and the potential of the use of inserts in process intensification of powder discharge from the hopper is revealed.

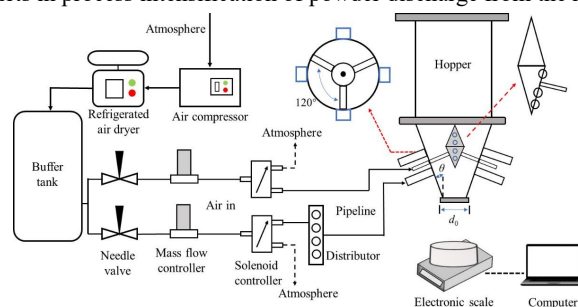


Figure .1 Schematic diagram of the flow chart of the discharge experiment.

References

- [1] Spink C D, Nedderman R M. Gravity discharge rate of fine particles from hoppers. *Powder Technology*, 1978, 21(2): 245-261.
- [2] Johanson J. The placement of inserts to correct flow in bins. *Powder Technology*, 1968, 1 (6): 328-333.
- [3] Mcgee E. Inserts overcome hopper flow problems. *Bulk Solids Handling*, 2008, 28: 320-322.
- [4] Volpato S, Artoni R, Santomaso A C. Numerical study on the behavior of funnel flow silos with and without inserts through a continuum hydrodynamic approach. *Chemical Engineering Research Design*, 2014, 92 (2): 256-263.

流化床甲醇制芳烃技术进展

蹇伟中, 魏飞

清华大学化工系, 100084, 北京

* Email: qianwz@tsinghua.edu.cn

摘要正文:

十三五期间, 我国的新兴煤化工技术取得了长足进步。到十四五, 只有甲醇制芳烃这个技术难度大, 产品短缺的技术路线仍在努力实现大工业化进程中。流化床甲醇制芳烃技术具有可适应过程快速移热, 控温, 对高温下的积碳进行连续反应再生等特点, 成为最先实现万吨级工业实验的技术路线。而清华大学发展的多段流化床技术, 则可以精细地调变不同反应区域的温度, 达到原料或中间反应物的转化活性与温域相匹配的效果, 从而可以大幅度降低液化气副产品, 减轻烷烃与同碳数烯烃的分离负担, 同时使芳烃中甲苯与三甲苯的量在下游实现匹配转化, 从而具有极大的技术发展空间与产品选择优势。

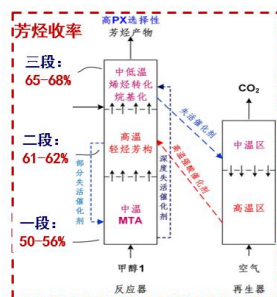


Fig. 1 Temperature shift, Multistage fluidized bed reactor technology for MTA

关键词: 甲醇制芳烃; 多段流化床; 变温操作; 高收率; 高选择性

参考文献

- [1] Z.H. Chen, Y.L. Hou, W.L. Song, W.Z. Qian. et al., High yield production of aromatics from methanol using a temperature shifting three stage fluidized bed. Chem Eng J 2019,379,639-46. Appl. Opt. 2006, 45: 4990-9.
- [2] Z.H. Chen, Y.L. Hou, Y.F. Yang, W.Z. Qian. et al., A multistage fluidized bed strategy for the enhanced conversion of methanol to aromatics. Chem Eng Sci. 2019, 204,1-8.

细颗粒流态化过程强化基础研究及工业应用

李军*, 朱庆山, 李洪钟

中国科学院过程工程研究所, 北京市海淀区中关村北二条 1 号, 北京, 100190

*Email: junli@ipe.ac.cn

摘要正文:

纳米和超细粉体因性能突出, 在化工、新材料、新能源、生物医药等领域具有非常广阔的应用前景, 实际使用过程常需对其进行表面修饰、包覆、氧化、还原等加工, 流化床被认为是处理纳米/超细粉体的理想反应器。然而, 由于纳米及超细粉体极易粘结团聚, 传统流化床在处理时通常发生严重的沟流或部分流化, 难以实现正常的流态化(图1中C区), 学术界将这种难以流化的粉体称为粘性粉体[1]。普通粉体在高温下由于表面软化、粘性新相产生、出现液相等原因转变为粘性粉体, 也会出现严重的粘结团聚。工业界通常采用造粒烧结增加颗粒粒度或剔除原料中细颗粒等方法来避免反应过程发生粘结失流。因此, 粘性粉体的高效流态化既是国际学术和产业界尚未解决的难题, 也是国际上流态化领域的前沿和研究热点。虽然发展了流体设计、外场、改变进气方式等粘性粉体流态化过程强化方法[2], 但多停留在实验室冷态模拟研究阶段, 对热态反应条件下粘性颗粒团聚机制的认识不清楚。针对上述问题, 面向我国特色矿产资源高效利用及战略新兴产业发展重大需求, 深入研究了粘性粉体粘结团聚机理, 揭示了粘性粉体流化过程聚团长大与破碎规律, 发明了颗粒自团聚、颗粒结构设计和添加磁场等粘性粉体流态化过程强化新技术, 实现了工业应用。

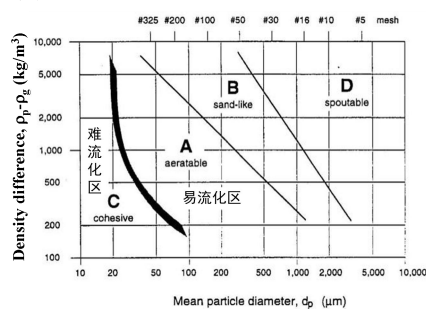


图1 常温下粉体的流化“相”图^[1]

关键词: 细颗粒, 粘性粉体, 流态化, 过程强化, 工业应用

参考文献

- [1] T. Kai, T. Tsutsui, S. Furusaki. Features of fluidized catalyst beds for proper design and operation of catalytic reactions. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 2004, 43: 5474-5482.
- [2] W. Zhang. A Review of Techniques for the Process Intensification of Fluidized Bed Reactors. *Chin. J. Chem. Eng.*, 2009, 17: 688-702.

流化床反应器中煤与废塑料共气化过程的数值研究

杜少华¹, 周强^{1,2,*}

¹ 西安交通大学化学工程与技术学院化学工程系, 西安 710049

² 西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 西安 710049

*Email: zhou.590@mail.xjtu.edu.cn

摘要正文:

伴随人类经济发展, 废塑料的迅速增加引起了严重的环境问题。传统的废塑料直接掩埋和焚烧法均会产生大量有害排放, 而气化工艺则能够将废塑料转化为合成气, 并显著抑制二噁英等有毒气体的排放。在此基础上, 煤/生物质与废塑料的共气化工艺则能进一步克服纯塑料气化过程中产生的颗粒粘连及有毒气体排放等问题, 且性能较强、工艺灵活性高, 已成为更有前景的废塑料处理方法^[1]。当前, 煤与废塑料共气化的实验研究已有报道, 而关于该过程中反应器内两相流动和反应过程的数值模拟则较为缺乏。本文基于Pohorely等人的实验^[2] (如图1), 对煤和PET塑料共气化过程进行了数值研究。数值模型同时考虑了气化过程中颗粒粒径和密度的变化。对共气化过程中的流动特性和尾气分布特征进行了分析。此外, 分别对进气速度、进料高度等工艺参数对流动及气化反应的影响进行探究。结果表明: 模拟数据与实验值吻合良好 (如图2); 煤和PET颗粒中的挥发分转化速度快, 而煤颗粒中的固定碳残留量较高; 随底部进气速度提高, 合成气摩尔分数下降, 但CO摩尔比例上升; 侧部进料口高度对于床层波动影响显著, 较高的进料高度会使得合成气受热不充分, 进而导致气相温度不均匀性增加。

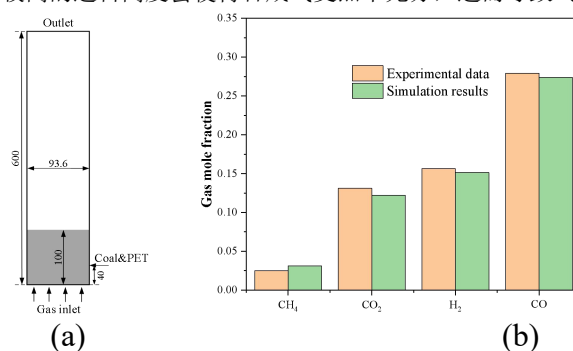


Fig.1 (a) Schematic diagram of fluidized bed reactor (unit: mm) and (b) comparison of the producer gas mole fractions obtained from simulation results and experimental data.

关键词: 废塑料; 煤; 共气化; 流态化; 数值模拟;

参考文献

- [1] Lopez G, Artetxe M, Amutio M, et al. Recent advances in the gasification of waste plastics. A critical overview[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2018, 82(1):576-596.
- [2] Pohorely M, Vosecky M, Hejdova P. Gasification of coal and PET in fluidized bed reactor[J]. Fuel, 2006, 85(17):2458-2468.

稳约双流体模型的统计力学基础

赵碧丹^{1, 2, 3}, 王军武^{1, 2, 3, *}

¹中国科学院过程工程研究所多相复杂系统国家重点实验室, 北京市海淀区中关村北二街1号, 100190

²中国科学院大学化学工程学院, 北京市石景山区玉泉路19号(甲), 100049

³中国科学院绿色过程制造创新研究院, 北京市海淀区中关村北二街1号, 100190

*Email: jwwang@ipe.ac.cn

摘要正文:

针对流化床内气固两相流系统中介尺度结构广泛存在的现象, 从连续介质力学角度, 洪坤等2012和王军武等2012因持有连续介质流体选择的不同观点, 提出了两个版本的基于EMMS原理的双流体模型(简称: 稳约双流体模型)。本工作尝试为两个版本的稳约双流体模型建立统一的统计力学基础: 首先基于能量最小度尺度(EMMS)模型将动态存在介尺度结构的气固两相流系统简化成由稀相流体和密相流体组成, 然后建立具有合理碰撞源项的四个玻尔兹曼方程, 并用其依次描述稀相颗粒、密相颗粒、稀相气体、密相颗粒的微观流动过程, 最后利用拓展的颗粒动理论推导出合理的稳约双流体模型的控制方程和本构关系。

关键词: 流态化; 多相流; 介尺度结构; 团聚物; 颗粒动理论

参考文献

- [1] K. Hong, W. Wang, Q. Zhou and J.W.Wang, An EMMS-based multi-fluid model (EFM) for heterogeneous gas-solid riser flows: Part I. Formulation of structure-dependent conservation equation, *Chemical Engineering Science* 2012,75, 376-389.
- [2] J.W.Wang, Q. Zhou, K. Hong, W. Wang,, An EMMS-based multi-fluid model (EFM) for heterogeneous gas-solid riser flows: Part II. An alternative formulation from dominant mechanisms, *Chemical Engineering Science* 2012,75, 349-358.

Statistical mechanics foundation of EMMS-based two-fluid model

Bidan Zhao^{1,2,3}, Junwu Wang^{1,2,3*}

¹State Key Laboratory of Multiphase Complex Systems, Institute of Process Engineering, Chinese Academy of Sciences, P.O. Box 353, Beijing 100190, P. R. China

²School of Chemical Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, P. R. China

³Innovation Academy for Green Manufacture, Chinese Academy of Sciences, P.O. Box 353, Beijing 100190, P. R. China

In response to the general existence of mesoscale structures in gas-solid fluidized beds, two versions of EMMS-based two-Fluid Model (EFM) (Hong et al., 2012; Wang et al., 2012a) have been proposed simultaneously from the viewpoint of continuum mechanics via different options of interpenetrating continua. In this study, an attempt was made to lay a unified statistical foundation of EFMs: The hydrodynamics of gas-solid flows with dynamic, heterogeneous and amorphous particle mesoscale structures was firstly assumed to be equal to that of static dilute-dense two-phase structure as in the energy minimization multi-scale (EMMS) model, four Boltzmann equations with the reasonable collisional source terms were used to describe respectively the kinetics of particles and gas molecules in either the dilute phase or the dense phase, then the governing equations of EFMs and their corresponding constitutive relations can then be derived theoretically by the extended kinetic theory.

Keywords: Fluidization; Multiphase flow; Mesoscale structure; Cluster; Kinetic theory;

费托合成铁基催化剂加压气固流化特性研究

卜亿峰*, 佟瑞利, 冯留海, 杜冰, 门卓武

北京低碳清洁能源研究院, 北京市昌平区未来科学城, 102211

*Email: yifeng.bu@chnenergy.com.cn

摘要正文:

煤间接液化技术能够实现煤炭高效清洁利用, 是煤化工领域重要的发展方向, 其关键技术是费托合成反应。传统的费托合成铁基催化剂浆态床活化技术存在生产能力小, 活化周期长, 活化后催化剂无法长期存储等缺点, 制约了费托合成装置整体的经济性能。若能开发气固流化床活化技术作为替代, 不仅活化能力能够提升2-3倍, 活化周期也可大大缩短, 技术经济效益显著。

本文在能够承压的不锈钢气固流化床反应器中, 研究了自主研发的费托合成(Fischer-Tropsch, F-T)铁基工业催化剂在高压(2.5MPa)气固流化床反应器中的流型转变速度, 对比了鼓泡和湍动两种流化形态下床层轴向的固含率分布和压差脉动标准偏差情况, 同时采用数值模拟考察了两种流化形态床层的膨胀过程及流化质量(图1a、b)。实验结果表明, 在2.5MPa压力条件下催化剂床层从鼓泡流化到湍动流化的流型转变速度约为0.38m/s; 表观气速为0.10m/s时, 鼓泡流化密相段的固含率约为0.45左右, 表观气速为0.48m/s时, 湍动流化密相段的固含率在0.3-0.4之间; 在床层密相段内, 鼓泡流化和湍动流化的压差脉动标准偏差都随着床层增高而增加, 其中湍动流化远大于鼓泡流化; 费托合成铁基催化剂在上述两种流型中均显示出较好的流化质量, 床层径向颗粒浓度分布呈现一定程度中心稀、边壁浓的“环-核结构”。

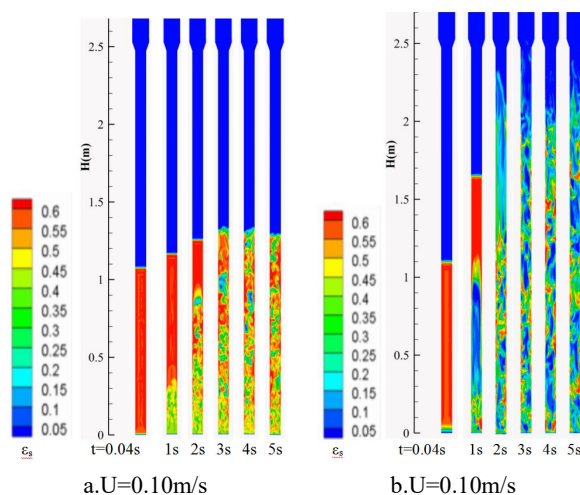


Fig.1 Nephogram of solid volume fraction distribution in the fluidized bed

关键词: 费托合成; 铁基催化剂; 加压流化床; 流化特性

参考文献

- [1] 冯留海, 冯钰琦, 赵杰, 等. 气固流化床内费托铁基催化剂的流化特性[J]. 过程工程学报, 2020, 20(3): 302-307.
- [2] 佟瑞利, 杨卓, 鲁波娜, 等. 工艺条件对费托铁基催化剂气固流化特性的影响[J]. 煤炭学报, 45(4):1282-1289.
- [3] B. Lu, Y. Niu, F. Chen, et al. EMMS-based meso-scale modeling and applications in gas-fluidized catalytic reactors[J]. Rev Chem Eng, 2019, 35: 879-915.
- [4] H. Luo, B. Lu, J. Zhang, et al. A grid-independent EMMS/bubbling drag model for bubbling and turbulent fluidization[J]. Chem Eng J, 2017, 326: 47-57.

湿颗粒气固床中单气泡行为的CFD-DEM模拟

华蕾娜¹, 杨宁^{1,*}

¹中国科学院过程工程研究所, 北京市海淀区中关村北二街1号, 100190

*Email: nyang@ipe.ac.cn

摘要正文:

包含湿颗粒的气固流态化在过程工业应用中广泛存在, 例如使用液体粘结剂进行颗粒涂层处理或药物制备、聚烯烃工艺中喷入冷凝液进行局部区域降温、湿度较高的周围环境气体使得颗粒发生粘结等^[1]。少量液体的添加造成湿颗粒气固床的行为模式与干颗粒气固床差别显著, 典型表现为颗粒运动特性可由流化质量较好的鼓泡床转化为流化质量较差的节涌或沟流状态^[2]。因此, 考察液体物性和液体添加量对颗粒间粘结力形成的作用及其对流化床整体行为的影响具有重要的研究价值。

本工作使用CFD-DEM方法模拟了干颗粒和湿颗粒气固床中单气泡行为, 重点探讨液体添加对气泡运动模式的影响。颗粒间持续存在的少量液体可产生两方面的主要作用: (1) 颗粒间碰撞弹性恢复系数显著减少。颗粒表面附着的薄层液膜可有效吸收颗粒碰撞动能, 则湿颗粒间的碰撞弹性恢复系数不再是干颗粒体系的常数, 而是一个与液体物性密切相关的函数^[3]; (2) 颗粒间形成的液桥力成为粘附作用的主导机制, 即使对于较细的A类颗粒, 液桥力的量级远大于由于分子间力形成的范德华力^[4]。在气固流态化的数值模拟中, CFD-DEM方法能够在颗粒尺度精细描述颗粒间作用力, 则成为研究颗粒间粘附力的有力工具^[5]。本工作首先在CFD-DEM中仅使用湿颗粒间的碰撞弹性恢复系数模型, 主要从能量损耗角度考虑液体对颗粒流态化行为的影响; 再次在颗粒的动量方程中添加液桥力, 以完整描述单个湿颗粒的受力体系。利用上述模型分别对实验室规模气固床中单气泡上升过程进行了模拟, 并与文献中相关实验数据对比以验证模型的有效性^[6], 包括气泡位置、注入体积和形状纵横比等随时间的变化。本工作还进而考察了液体粘度和添加量对单气泡行为的改变。结果表明少量液体的添加可明显改变气泡行为特性, 例如气泡上升速度减缓、形状更为扁平甚至在接近床层表面区域被分离成两个气泡或湮灭等。

关键词: 湿颗粒; 气固床; 液桥力; CFD-DEM

参考文献

- [1] C. M. Boyce. Gas-solid fluidization with liquid bridging: A review from a modeling perspective. *Powder Technology* 2018, 336: 12-29.
- [2] T. Yehuda and H. Kalman. Geldart classification for wet particles. *Powder Technology* 2020, 362: 288-300.
- [3] P. Darabi, et al. A novel coalescence model for binary collision of identical wet particles. *Chemical Engineering Science* 2009, 64(8): 1868-1876.
- [4] S. Strauch and S. Herminghaus. Wet granular matter: a truly complex fluid. *Soft Matter* 2012, 8(32): 8271-8280.
- [5] Y. Guo and J. S. Curtis. Discrete Element Method Simulations for Complex Granular Flows. *Annual Review of Fluid Mechanics* 2015, 47(1): 21-46.
- [6] C. M. Boyce, et al. Effect of liquid bridging on bubbles injected into a fluidized bed: A magnetic resonance imaging study. *Powder Technology* 2019, 343: 813-820.

循环流化床锅炉流动、燃烧和NO_x排放的CPFD模拟

常剑*, 王信

¹华北电力大学, 能源动力与机械工程学院, 102206, 北京, 北京

*Email: changjian@ncepu.edu.cn

摘要正文:

循环流化床(CFB)锅炉是一种优秀燃煤锅炉, 具有燃料适应性好, 燃烧效率高, 污染物排放低等优点。但在日益严格的环保要求下, 循环流化床锅炉NO_x排放逐渐达不到环保要求, 进一步降低其NO_x排放成为目前研究的挑战。本文基于欧拉-拉格朗日框架, 建立了某220t/h循环流化床锅炉包括气固流动, 传热和燃烧反应在内的综合CFD模型。并且, 进行模型参数研究以验证气固曳力模型, 网格无关性和颗粒云分辨率影响。然后, 对其仿真结果进行讨论。结果表明: 循环流化床具有典型的环流结构, 底部为密相区, 中间为过渡区, 顶部为稀相区; 密相区中, 颗粒体积分数呈现中间低两边高的径向分布, 并且在炉膛中高度越低, 标准差越大; 密相区颗粒体积分数约为1.5%; 碳燃尽率约为94%, 密相区的平均温度约为950 °C, 床层温度保持稳定; NO_x在密相区的上部生成, 然后在炉中被CO还原, 浓度逐渐降低, 炉膛出口CO浓度约为50 ppm, NO_x浓度约为295 mg/m³。此外, 还对其变工况进行了模拟: 一次风量会显著影响炉中的NO_x分布和出口处的NO_x浓度, 一次风量增大10%, 出口NO_x浓度大约增加8%; 二次风量不变时, 上下二次风比率对NO_x浓度分布影响较小; 煤的粒径对NO_x生成也有一定的影响, 更小的煤颗粒可以增大密相区CO浓度, 减少NO_x生成。

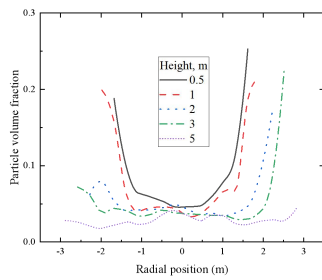


Fig. 1 Particle volume fraction profile

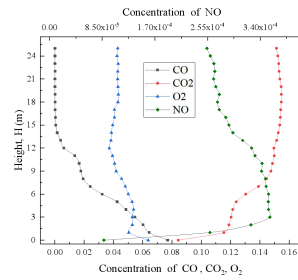
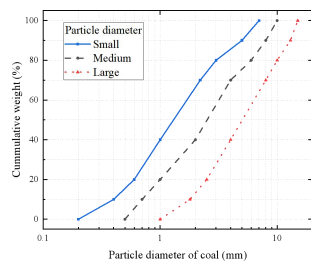
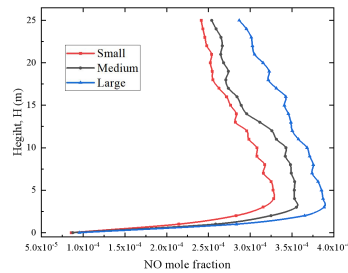


Fig. 2 Concentration of main gas composition profile



(a)



(b)

Fig. 3 Influence of different coal particle distribution on NO production

(a) Coal particle distribution (b) NO axial distribution

关键词: 循环流化床锅炉; 低氮燃烧; 数值模拟; NO_x排放

参考文献

- [1] 程乐鸣,许霖杰,夏云飞,王勤辉,骆仲决,倪明江,岑可法,聂立,周棋,苏虎. 600MW超临界循环流化床锅炉关键问题研究. 中国电机工程学报, 2015, 35(21):5520-5532.
- [2] 宋景慧,汪涛,高静,肖显斌,胡笑颖,董长青. 50MW生物质循环流化床炉膛燃烧二维模拟. 工业炉, 2013, 35(03):8-11.
- [3] 杜鹏飞,白杨,李竞岌,刘青. 300MWe循环流化床锅炉SNCR系统优化设计. 沈阳工程学院学报(自然科学版), 2015, 11(01):19-24.
- [4] 黄中,孙献斌,江建忠,时正海,肖平. CFB锅炉温度场及氧量场测试与数值模拟. 中国电力, 2013, 46(09):6-11.
- [5] 杨梅. 循环流化床烟气SNCR脱硝机理和实验研究. 上海交通大学, 2014.
- [6] 李德波,宋景慧,徐齐胜. 50MW生物质循环流化床锅炉三维冷态流动和磨损规律的数值模拟. 动力工程学报, 2014, 34(02):97-102+127.
- [7] 王威. 循环流化床锅炉SNCR脱硝数值模拟研究. 东南大学, 2016.
- [8] 刘汉周,卢啸风,唐家毅. 300MW循环流化床锅炉分离器入口烟道气固流动特性研究. 中国电机工程学报, 2009, 29(32):6-11.
- [9] 王超,程乐鸣,周星龙,郑成航,王勤辉,骆仲决,周棋,聂立. 600MW超临界循环流化床锅炉炉膛气固流场的数值模拟. 中国电机工程学报, 2011, 31(14):1-7.
- [10] G. Yue, R. Cai, J. Lu, H. Zhang. From a CFB reactor to a CFB boiler - The review of R&D progress of CFB coal combustion technology in China. Powder Technology. 2017, 316:18-28.
- [11] 刘静,王勤辉,骆仲决,岑可法. 600MWe超临界循环流化床锅炉的设计研究. 动力工程, 2003(01):2179-2184+2204.
- [12] 岳光溪,吕俊复,徐鹏,胡修奎,凌文,陈英,李建锋. 循环流化床燃烧发展现状及前景分析. 中国电力, 2016, 49(01):1-13.
- [13] 苏铭德. 大涡模拟——研究湍流的一种新手段. 力学进展, 1984, 14(4):60-71
- [14] M.J. Andrews, P.J. O'Rourke. The Multiphase Particle-in-cell (MP-PIC) Method For Dense Particulate Flows. Int J Multiphas Flow. 1996, 22:379-402.
- [15] S. Karimipour, T. Pugsley. Application of the particle in cell approach for the simulation of bubbling fluidized beds of Geldart A particles. Powder Technology. 2012, 220:63-9.
- [16] X. Chen, J. Wang. A comparison of two-fluid model, dense discrete particle model and CFD-DEM method for modeling impinging gas-solid flows. Powder Technology. 2014, 254:94-102.
- [17] Q. Wang, H. Yang, P. Wang, J. Lu, Q. Liu, H. Zhang, et al. Application of CPFD method in the simulation of a circulating fluidized bed with a loop seal, part I-Determination of modeling parameters. Powder Technology. 2014, 253:14-21.
- [18] Q. Wang, H. Yang, P. Wang, J. Lu, Q. Liu, H. Zhang, et al. Application of CPFD method in the simulation of a circulating fluidized bed with a loop seal Part II-Investigation of solids circulation. Powder Technology. 2014, 253 822-828.
- [19] H. Liu, J. Li, Q. Wang. Simulation of gas-solid flow characteristics in a circulating fluidized bed based on a computational particle fluid dynamics model. Powder Technology. 2017, 321:132-42.
- [20] Z. Wan, S. Yang, Y. Sun, Y. Wei, J. Hu, H. Wang. Distribution and particle-scale thermochemical property of biomass in the gasifier of a dual fluidized bed. Energy Conversion and Management. 2020, 209.
- [21] S. Yanga, X. Liua, S. Wangb. CFD simulation of air-blown coal gasification in a fluidized bed reactor with continuous feedstock. Energy Conversion and Management. 2020 213.
- [22] Y. Du, L. Zhang, A.S. Berrouk. Exergy analysis of propane dehydrogenation in a fluidized bed reactor: Experiment and MP-PIC simulation. Energy Conversion and Management. 2019, 202.
- [23] J. Gu, W. Zhong, A. Yu. Three-dimensional simulation of oxy-fuel combustion in a circulating fluidized bed. Powder Technology. 2019, 351 16-27

流化床生物质气化反应器中气固流动、传热及气化特性数值模拟及优化研究

周业丰

湘潭大学

摘要正文：

鼓泡-喷动流化床反应器具有气固相间接触效率高、热质传递速率快、适用于粗颗粒流化等特点，在固体燃料气化领域具有广泛的应用，极具发展潜力。反应器内气固流动、热质传递和气化反应三者间的高度耦合，给传统实验检测带来巨大的挑战。因此，越来越多学者采用数值模拟的方法来研究并揭示气固流动、传热及反应三者间的相互作用规律。本文采用欧拉-拉格朗日和欧拉-欧拉数值模拟方法，系统探究反应器设计参数(流化气进口开度)和操作参数(喷动气速、流化气速、颗粒密度-粒径、轻质颗粒质量分率及细颗粒质量分率)对鼓泡-喷动流化床生物质气化过程中气固流动、传热及气化反应特性的影响，主要研究工作总结为以下三个方面：

1. 采用CFD-DEM (Computational Fluid Dynamics-Discrete Element Method)方法，系统考察了操作参数对鼓泡-喷动流化床反应器气固流动时均特性，周期特性及混合特性的影响。研究结果表明：(1) 随着喷动气速的增加，颗粒循环速率显著提高；随着流化气速的增加，环隙区颗粒床层整体的流动性增强，而随着颗粒密度或颗粒粒径的增加，环隙区颗粒床层整体的流动性降低；同时，适当增加小而轻的颗粒质量分率，有利提高颗粒床层整体的流动性；(2) 不同区域颗粒能量的功率谱分析表明，控制床层总颗粒质量不变时，随着喷动气速，颗粒密度，颗粒粒径增加，功率谱主频均增加，表明反应器流动状态由喷动流化向喷动转变；而随着流化气速，小而轻的颗粒质量分率的增加，功率谱主频均降低，表明反应器流动状态由喷动向喷动流化转变；(3) 随着喷动气速，颗粒密度或颗粒粒径增加，床层整体混合速率均加快，而随着流化气速增加，床层整体混合速率降低。

2. 采用CFD-DEM方法，系统考察了操作参数对鼓泡-喷动流化床反应器局部和整体传热特性的影响。研究结果表明：(1) 不同区域颗粒-颗粒间接触导热贡献占总颗粒-颗粒间接触导热贡献分别为：环隙区(约50%)>喷动区(约30%)>喷泉区(约20%)；不同区域颗粒-流体-颗粒间导热贡献占总颗粒-流体-颗粒间导热贡献分别为：环隙区(约60%)>喷动区(约20%)>喷泉区(约20%)；不同区域颗粒-流体对流传热贡献占总颗粒-流体对流传热贡献分别约为喷动区(约70%)>环隙区(约20%)>喷泉区(约10%)；(2) 对流传热机制居于主导地位，而颗粒-流体-颗粒间导热速率和颗粒-颗粒间接触导热速率约为对流传热速率的2%和0.2%，因此，均可忽略不计。

3. 采用KTGM (Kinetic Theory of Granular Mixture)方法，系统考察了鼓泡-喷动流化床生物质气化反应器(Bubbling-Spouting Fluidized Bed Biomass Gasifier ,BSFBG)流化气进口开度(A_m/A)和辅助气速(U_f)对反应器内流动、传热和反应特性的影响。研究结果表明：(1) 控制进口气体总质量流量不变时，随着 A_m/A 的增大，反应器内局部区域的颗粒循环结构更加复杂，各相温度及颗粒浓度在反应器中分布更加均匀；反应器出口关键产气组分的体积分数和低温热值逐渐增加，生物质气化效率增加；(2) 同均匀气体分布条件($A_m/A=100%$)相比，在较小气体进口开度下($A_m/A \leq 50%$)/采用较高的辅助气速,或在较大气体进口开度下($A_m/A \geq 75%$)/采用较低的辅助气速，两者均有利于强化燃烧区、热解区和气化区之间的传热和促进密相床中上部区域各相温度及颗粒浓度的均匀分布，进而显著提高关键产气组分的产率和生物质的气化效率。综合研究分析表明，在 $A_m/A=75%$ 和 $U_f=1.0U_{mf}$ 的气体分布形式下，反应器出口关键产气组分和LHV最高，气化反应器性能达到较优状态。

菱镁矿输送床煅烧反应特性及产物微观结构

韩振南^{1,*}, 孙聪¹, 刘雪景¹, 许光文^{1,2,*}

¹ 沈阳化工大学资源化工与材料教育部重点实验室, 沈阳市经济技术开发区 11 号街, 110142

² 中国科学院过程工程研究所多项复杂系统国家重点实验室, 北京市海淀区中关村北二街 1 号, 100190

*Email: hanzhennan1989@163.com; guwu@ipe.ac.cn

摘要正文:

我国菱镁矿（主要成分 $MgCO_3$ ）资源丰富，占世界总储量的26%，但菱镁矿轻烧/煅烧作为菱镁产业源头，几十年来一直沿用传统固定床工艺，仅能使用块状原料、单台规模小、生产能耗高。本文利用微型流化床探索了菱镁矿流化床煅烧工艺可行性，发现在 $850\text{ }^\circ\text{C}$ 反应条件下菱镁矿粉（ $150\text{--}270\text{ }\mu\text{m}$ ）仅需3秒即可完全分解，进而提出菱镁矿输送床煅烧工艺。利用高温烟气加热实验室规模输送床模拟工业输送床反应器，研究了煅烧条件和原料粒径对菱镁矿粉分解转化率和产品活性的影响，揭示了煅烧过程中产物微观结构变化特性。菱镁矿粉（ $150\text{ }\mu\text{m}$ 以下）煅烧反应为秒级快速反应，仅需1-2秒菱镁矿中 $MgCO_3$ 分解率即可达98%以上，验证了输送床煅烧技术的可行性。输送床煅烧产物的柠檬酸显色时间为17-55 s，其反应活性显著高于固定床煅烧产物（显色时间294 s）；煅烧过程中产物 MgO 晶粒尺寸逐渐增大，表面结构由疏松多孔变为致密光滑，该结构变化可在数秒内完成。

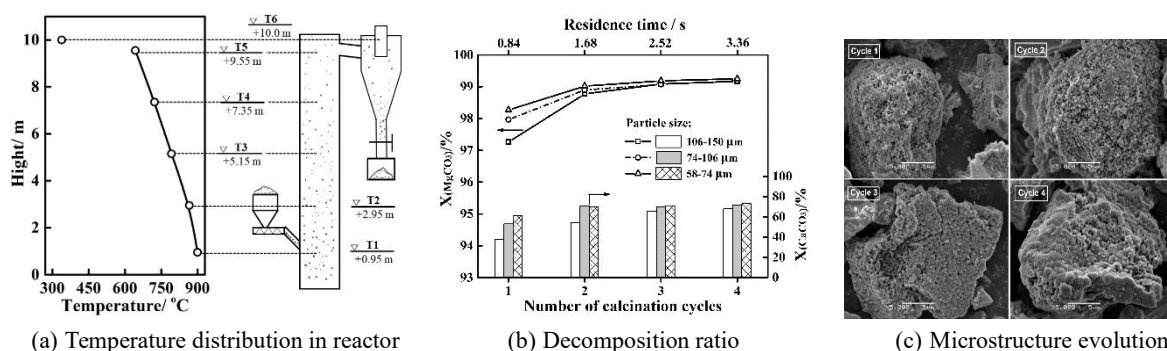


Fig. 1 Characteristics of reaction and product microstructure during magnesite calcination in transport bed

关键词：菱镁矿；煅烧；微型流化床；输送床；微观结构

参考文献

- [1] A. Teklay, C. Yin, and L. Rosendahl. Flash calcination of kaolinite rich clay and impact of process conditions on the quality of the calcines: A way to reduce CO₂ footprint from cement industry. *Applied energy*, 2016, 162: 1218-1224.
- [2] J. Zhu, N. Ye, J.W. Liu, and J.K. Yang. Evaluation on hydration reactivity of reactive magnesium oxide prepared by calcining magnesite at lower temperatures. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 2013, 52, 6430 – 6437.

Characteristics of reaction and product microstructure during magnesite calcination in transport bed

Zhennan Han^{1,*}, Cong Sun¹, Xuejing Liu¹, Guangwen Xu^{1,2,*}

¹Laboratory on Resources Chemicals and Materials of Ministry of Education, Shenyang University of Chemical Technology, Shenyang, 110142

²State Key Laboratory of Multi-phase Complex Systems, Institute of Process Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100190

Abstract:

A gas-heating laboratory transport bed was adopted to simulate the industrial transport bed reactor for magnesite calcination. The study investigated how the conversion and product activity as well as microstructure vary with reaction conditions including temperature, particle size and times of re-calcination for powder magnesite. Magnesite powder (<150 μm) calcination is a quick reaction that reaches 98% decomposition of its containing MgCO₃ in 1-2 s, corroborating the feasibility of magnesite calcination in transport bed reactors. The coloration time given by the Citric acid chromogenic method was 17-55 s and 294 s for the obtained products from transport and fixed beds, respectively. This proves the obviously higher activity and thus improved microstructure of the product from transport bed. Nonetheless, even in the seconds of reaction time, the grain size of formed MgO crystal grew continuously and the particle surface changed from loose porous to dense smooth.

Keywords: Magnesite; calcination; micro fluidized bed; transport bed; microstructure

液固流化床三维电极制备复合粉体

杨海涛^{1*}，程佳鑫¹，朱庆山¹，武丽荣²，吴志文²

¹中国科学院过程工程研究所，北京市海淀区中关村北二条1号，100190

²中科院过程工程研究所南京绿色制造产业创新研究院，南京市江宁区麒麟人工智能产业园，211135

*Email: yhtao@ipe.ac.cn

摘要正文：

液固流化床电极具有比传统电化学反应更高数量级的电极活化面积和良好的传质能力等独特的性能，在复合粉体的制备领域有显著的优势。传统的制备复合粉体的方法有许多，包括：化学镀法、溶胶凝胶法、湿式加压氢还原、化学气相沉积法等，但综合考虑加工过程，反应条件，镀层质量，生产成本等多方面因素均无明显的优势。采用液固流化床电极成功制备出了不同粒径范围的Ni/Cu、Ni/石墨等复合粉体，其反应条件温和（常温常压）、以清洁的电能为还原剂、复合粉体的镀层厚度可进行调控，单位体积产率高，通过SEM、EDS等表征分析也表明了其优良的镀层质量。

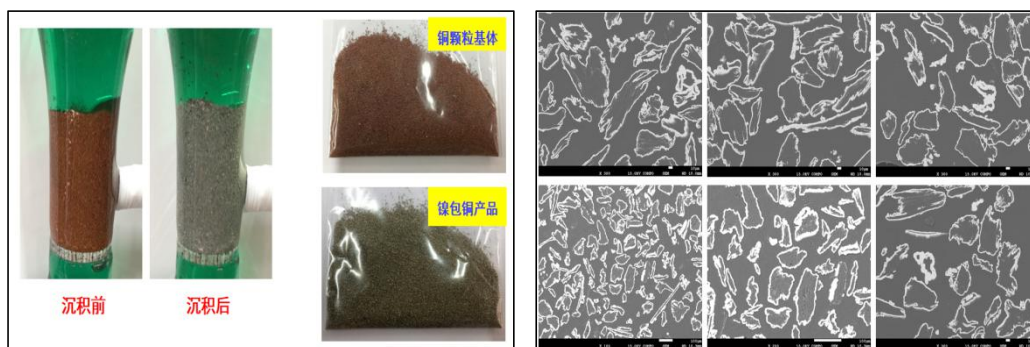


图1 (a)流化床电极制备镍包铜复合粉;(b)流化床电极制备镍包石墨复合粉

Fig. 1 (a) Preparation of nickel-coated copper composite powder with fluidized bed electrodes; (b) Preparation of nickel-coated graphite composite powder with fluidized bed electrodes

关键词：液固流化床；流化床电极；三维电沉积；镍包铜复合粉；镍包石墨复合粉

参考文献

J. X. Cheng, H. T. Yang, C. L. Fan, et al Review on the applications and development of fluidized bed electrodes. *J Solid State Electrochem.* 2020, 24: 2199–2217.

Preparation of composite powder using liquid-solid three-dimensional fluidized bed electrodes

Haitao Yang^{1,*}, Jiabin Cheng¹, Qingshan Zhu¹, Lirong Wu², Zhiwen Wu²

¹State Key Laboratory of Multiphase Complex Systems, Institute of Process Engineering, Chinese Academy of Sciences,
P. O. Box 353, Beijing 100190,

²Nanjing IPE Institute of Green Manufacturing Industry, Nanjing 211135

The liquid-solid three-dimensional fluidized bed electrodes have unique properties, such as a higher order of magnitude of electrode activation area and superior mass transfer than traditional electrochemical reactions, bringing significant advantages in the preparation of composite powders. There are many methods for preparing composite powders, including: electroless plating, sol-gel, wet pressurized hydrogen reduction, chemical vapor deposition, etc. However, these methods have no obvious advantages considering the processing process, reaction conditions, coating quality, production cost and other factors. Using liquid-solid three-dimensional fluidized bed electrodes, composite powders of Ni/Cu and Ni/graphite with different particle size ranges have been successfully prepared. This process uses clean electric energy as a reducing agent under normal temperature and pressure, and the thickness of the coating layer of the composite powder can be adjusted, importantly, the yields of per unit volume is pretty attractive. Furthermore, Characterization by SEM and EDS shows the high quality of the coating.

流态化气相沉积制备氮化钛粉体

向茂乔^{1,2*}, 桑元^{1,3}, 朱庆山^{1,3}

¹中国科学院过程工程研究所, 北京市海淀区中关村北二条1号, 100190

²南京绿色制造产业创新研究院, 南京市江宁区麒麟人工智能产业园5号楼, 211135

³中国科学院大学化工学院, 北京市石景山区玉泉路19号(甲), 100049

*Email: mqxiang@ipe.ac.cn.

摘要正文:

氮化钛(TiN)是一种典型的非化学计量比的金属氮化物, 具有硬度大、熔点高等特性, 在超硬、高温等特殊服役环境中展现出巨大优势^[1]。通常高质量的TiN粉体需要满足粒径小、粒径分布窄、纯度高且N/Ti比为1的要求^[2]。然而, 目前低成本制备高质量TiN粉体还存在较大困难。化学气相沉积工艺(CVD)能够从原子或分子尺度调控反应, 是制备高质量粉体的重要手段^[3]。然而, 传统固定床CVD制备TiN存在均相成核难度大, 难以获得TiN粉体的问题。本文提出了流态化化学气相沉积工艺(FBCVD)制备高质量TiN粉体的新思路, 即将往复流动的TiN种子暴露于TiCl₄, N₂, H₂的气氛中, 并捕捉TiCl₄-N₂-H₂体系释放出的新生TiN晶核, 形成新生TiN包覆TiN的粉体, 并调控过饱和度, 突破难以均相形核的壁垒, 获得均相形核的高质量TiN粉体^[4]。实验发现, 当TiN种子粉体粒径大于52.95μm时, 即使在1000℃沉积2h也不会失流, 在种子粉体表面获得了亚微米的新生TiN_{0.96}颗粒, 且氧杂质含量相对原始种子粉体降低了约40%。在此基础之上, 开发出了预还原-氮化的改进FBCVD工艺, 在气相中成功的获得了均相形核的超细TiN粉体(平均粒径为137.3 nm)。

关键词: 氮化钛; 流态化; 气相沉积

参考文献

- [1] S. Nagakura, T. Kusunoki, F. Kakimoto, et al., Lattice parameter of the non-stoichiometric compound TiN_x. *J. Appl. Cryst.*, 1975, 8(1): 65-66.
- [2] J. P. Dekker, P. J. van der Put, H. J. Veringa, et al., Vapour-phase synthesis of titanium nitride powder. *J. Mater. Chem.*, 1994, 4(5): 689-694.
- [3] G. W. Elger, D. E. Traut, G. J. Slavens et al., Preparation of submicron titanium nitride powder by vapor-phase reactions. *Metallurgical Transactions B*, 1989, 20(4): 493-497.
- [4] 桑元, 向茂乔, 宋淼, 朱庆山, 流化床化学气相沉积法制备近化学计量比的 TiN 粉体, *化工学报*, 2020, 71(6): 2743-2751.

致谢

感谢中国科学院前沿局(ZDBS-LY-JSC041)和南京绿色制造产业创新研究院(E0010708)的支持。

微型流化床与喷动床中气体返混特性分析

胡丹丹^{1,2,3}, 曾玺^{3*}, 王芳³, 岳君容³, 许光文^{1,2,3*}

¹能源与化工产业研究院, 沈阳化工大学, 辽宁 沈阳 110142

²辽宁科技大学化学工程学院, 辽宁 鞍山 114051

³中国科学院过程工程研究所多相复杂系统国家重点实验室, 北京 100190

*Email: xzeng@ipe.ac.cn; gwxu@syuct.edu.cn;

摘要正文:

利用脉冲示踪法结合轴向扩散模型及卷积处理方法, 考察了微型流化床与微型喷动床的反应器结构(内径 D)和操作参数(进气口气量 Q 、颗粒初始静态床高 H_s)对气体停留时间分布(RTD)的影响, 对气体偏离平推流的程度进行了定性分析, 并揭示其返混差异性。实验结果显示, 轴向扩散模型在两种微型反应器中具有较好的适用性, RTD曲线的峰高和方差以及相对平均停留时间差可以定量反应器内的返混大小。当相对平均停留时间差为10%时, 喷动床所用气量小于流化床, 有助于微量气体产物的检测。采用相同的操作条件时, 喷动床内的气体返混程度低于流化床。

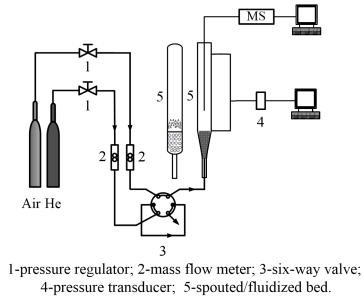


Fig. 1 A schematic diagram of experimental apparatus

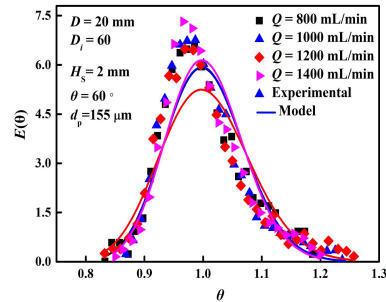


Fig. 2 $E(\theta)$ curves in spouted bed for different Q

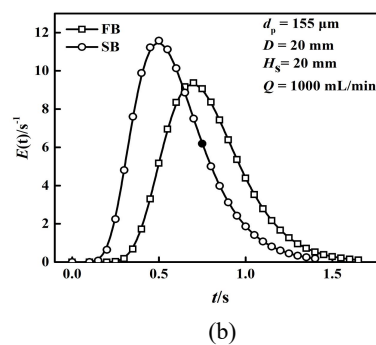
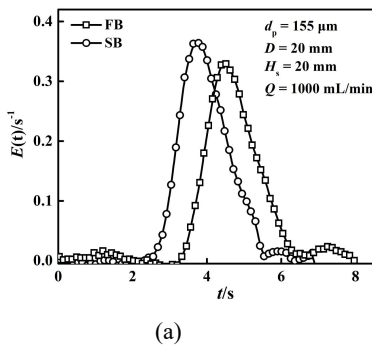


Fig. 3 $E(t)$ curves in spouted/fluidized system (a) and in bed (b) at same conditions

关键词: 返混, 气体停留时间分布, 平推流, 微型流化床, 微型喷动床

参考文献

- [1] Sun S L, Bao X J, Wei W S. Gas Residence Time Distributions in a Spouted Bed. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2005, 13, 3: 291-296.
- [2] Geng S L, Han Z N, Yue J R, et al. Conditioning micro fluidized bed for maximal approach of gas plug flow. Chemical Engineering Journal, 2018, 351, 121: 110-118.

气固两相流的“超可压缩性”

张晨曦*, 王垚, 蹇中伟, 魏飞

北京市绿色化学反应工程和技术重点实验室, 清华大学化工系, 北京, 100084;

*Email: cxzhang@mail.tsinghua.edu.cn

摘要正文:

气固两相流因其既具有类似气体的优异流动性又得益于颗粒碰撞带来的优异传递能力而广泛应用于化学工业。本书围绕气固两相流优异流动性和传递能力的显著特点, 抓住其与低温物理“超流”的相似性, 提出气固两相流的“超可压缩性”, 借鉴朗道准粒子模型, 建立描述气固两相流“超可压缩性”这一宏观量子效应的理论框架。在理解气固两相流“超可压缩性”特征的基础上, 面向气固两相流相结构调控这一核心问题, 基于实验建立颗粒相压力、颗粒温度和固体颗粒体积分数的定量关系, 对于不同颗粒温度的体系指导通过颗粒相压力的变化调控气固相结构。基于气固两相的“超可压缩性”, 深刻理解气固一维变截面流的噎塞与二维钝体绕流的类脱体激波现象, 面向生产实践设计了一维多孔板和二维伞型构件, 实现了气固流化床反应器内停留时间分布的精准调控。

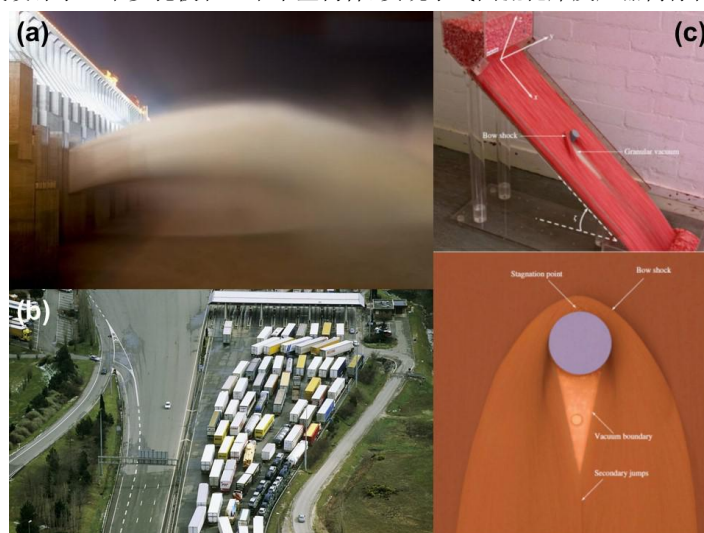


图1. (a)可压缩流过孔加速现象;(b)不可压缩流过窄孔噎塞现象;(c)颗粒流圆柱绕流脱体激波现象

关键词: 气固流态化; 超流; 可压缩性; 激波

参考文献

- [1] 张晨曦, 蔡达理, 贾翌, 崔宇, 王垚, 罗国华, 蹇伟中, 魏飞*. 化工进展, 2019, 28: 155-170.
- [2] Chenxi Zhang, Qi Wang, Zhao Jia, Usman Muhammad, Weizhong Qian, Fei Wei*. AIChE Journal, 2016, 62: 4251-4258.
- [3] Chenxi Zhang, Weizhong Qian, Fei Wei*. Chemical Engineering Science, 2017, 173: 187-195.
- [4] Chenxi Zhang, Peilong Li, Chao Lei, Weizhong Qian, Fei Wei*. Chemical Engineering Science, 2018, 176: 515-523.
- [5] Chenxi Zhang, Weizhong Qian, Yao Wang, Guohua Luo, Fei Wei*. The Canadian Journal of Chemical Engineering, 2019, 97: 636-644.
- [6] Chenxi Zhang*, Qi Xu, Abdennour Bourane, Musaed Ghrami, Ibrahim Abba, Fei Wei*. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2020, 59: 6707-6715.

浆态床的介尺度模拟：从曳力模型到群体平衡模型

管小平¹，安敏¹，杨宁^{1*}

¹中国科学院过程工程研究所，北京市海淀区中关村北二街1号，100190

*Email: nyang@ipe.ac.cn

摘要正文：

气含率和气泡粒径分布的准确模拟对合理预测多相流模拟中的传质及传热现象至关重要。亲水性颗粒加入气液系统后往往会减小气含率和增加平均气泡尺寸。目前，该现象的准确模拟还比较困难考虑到颗粒对气泡行为的复杂影响，包括增加浆态相表观密度和有效黏度，减少气泡聚并过程中的液膜排干时间和衰减湍流耗散率。本报告将从介尺度思路建立浆态床的曳力模型和群体平衡模型，也将比较浆态床的CFD-PBM模拟中上述三个颗粒影响机制。表明，在CFD模拟中结合固体影响的介尺度曳力模型能合理预测气含率的降低，而在CFD-PBM模拟中联合EMMS-PBM模型和湍流衰减因子关联式可以合理预测浆态床反应器中气含率减小及气泡粒径增加现象。

关键词：浆态床；介尺度；CFD；固体颗粒

在最近的几十年中，浆态床反应器在固体催化的多相反应过程（例如费托合成）中的广泛应用引起越来越多的学术界和工业界的关注。大量的实验表明，将亲水性颗粒添加到气液流中通常会导致气含率减少和气泡尺寸增加。然而，浆态床反应器中气含率和气泡粒径分布的模拟仍面临挑战¹。在浆态床反应器的CFD或者CFD-PBM模拟中，应考虑不同的固体颗粒影响，包括增加浆液黏度，减少气泡聚并过程中液膜的排干时间以及衰减浆液相湍流。本工作旨在评估不同颗粒影响对浆态床反应器中气含率和气泡粒径分布模拟的影响，然后尝试建立合适的曳力模型或者PBM模型。

模型：

CFD（TFM）用于模拟流场和相含率，而PBM模型用于模拟气泡粒径分布。本实验将Tyagi和Buwa²利用电导探针测量的不同固含率情况下的气含率及气泡粒径分布作为模拟的实验验证。对于气液系统，通过耦合EMMS-PBM模型³来实现气液系统中气泡粒径分布的准确模拟。然后逐步研究固体颗粒影响，包括增加表观密度和黏度，在聚并速率模型⁴中考虑液膜排干时间加速因子，和在PBM核函数中考虑湍流耗散率的衰减因子⁵。

结果与讨论：

EMMS-PBM模型基于EMMS模型的稳定性条件，为PBM中的核函数提供了新的约束³。图1（a）表明，Luo / Luo-Svendsen核函数在EMMS-PBM约束下，预测的气泡粒径分布与气液系统中的实验非常吻合。实际上，EMMS-PBM方法也可以用于Prince-Blanch / Luo-Svendsen函数，这也反映了此模型的灵活性和适用性。在EMMS-PBM约束的基础上，图1（b）进一步评估了气液固系统中不同颗粒影响。具有表观浆液密度和粘度的气泡粒径分布仅向左轻微移动，这与实验中向右移动相反。根据Ojima模型⁴校正液膜排干时间几乎不会改变预测的气泡粒径分布。在液膜排干模型中进一步修改校正因子会导致聚并速率和大气泡分数的增加，但仍会高估小气泡分数。在PBM模型中考虑湍流耗散率衰减因子⁵同时降低了破碎速率并增加了聚并速率，从而有效地提高了预测的气泡粒径分布。由于没有将湍流耗散率与固体浓度相关联的通用模型，因此本研究基于气泡粒径分布的实验²，提出了湍流耗散率的衰减因子与固体浓度之间关系的新关联式。

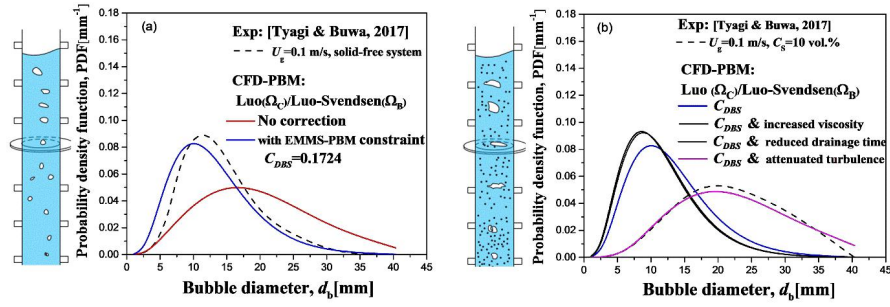


Fig. 1 Predictions of bubble size distribution with EMMS-PBM constraint and different particle effects: (a) a gas-liquid system; (b) a gas-liquid-solid system.

参考文献

- [1] E. M. Lakhidissi, I. Soleimani, C. Guy and J. Chaouki. Simultaneous Effect of Particle Size and Solid Concentration on the Hydrodynamics of Slurry Bubble Column Reactors, *Aiche J.* 2020, 66 (2): 1-16.
- [2] P. Tyagi, and V. V. Buwa. Dense Gas-Liquid-Solid Flow in a Slurry Bubble Column: Measurements of Dynamic Characteristics, Gas Volume Fraction and Bubble Size Distribution, *Chem. Eng. Sci.*, 2017, 173: 346-362.
- [3] N. Yang, and Q. Xiao. A Mesoscale Approach for Population Balance Modeling of Bubble Size Distribution in Bubble Column Reactors, *Chem. Eng. Sci.* 2017, 170: 241-250.
- [4] S. Ojima, S. Sasaki, K. Hayashi, and A. Tomiyama. Effects of Particle Diameter on Bubble Coalescence in a Slurry Bubble Column. *J. Chem. Eng. Jpn.*, 2015, 48 (3): 181-189.
- [5] K. D. Squires, and J. K. Eaton. Effect of Selective Modification of Turbulence on 2-Equation Models for Particle-Laden Turbulent Flows. *J. Fluids Eng.* 1994, 116 (4): 778-784.

论文编号：03-021

Meso-scale Simulation of Slurry Bubble Columns: from Drag Model to Population Balance Model

Xiaoping Guan¹, Min An¹, Ning Yang^{1,*}

¹Institute of Process Engineering, CAS, No.1, North Second Street, Zhongguancun, Haidian District, Beijing, 100190

Abstract:

Prediction of gas holdup and bubble size distribution is of paramount importance for modeling mass and heat transfer in multiphase reactors. Addition of hydrophilic particles into gas-liquid systems usually decreases gas holdup and increases bubble size. It is difficult to predict these phenomena in view of the complex effects of solid particles on gas-liquid flows, e.g., the increase of slurry apparent density and viscosity, the reduced film drainage time during bubble coalescence, and the attenuation of liquid turbulent dissipation rate. This work attempts to establish drag model or PBM model based on meso-scale, and the effects of the well-known three mechanisms on CFD-PBM are compared. It is indicated that the meso-scale drag model taking account of solid effect can capture the decrease of gas holdup in TFM modeling, and Combining EMMS-PBM and the attenuation factor in turbulence can well predict the gas holdup and BSD in slurry bubble columns.

Keywords: slurry bubble column, Meso-scale, CFD, particles

流态化制备超细碳化钨反应动力学及路径

潘锋^{1,*}, 刘家义^{1,2}, 杜占¹, 朱庆山^{1,3}

¹中国科学院过程工程研究所, 北京市海淀区中关村北二条1号, 100190

²天津大学化工学院, 天津市海河教育园区雅观路135号, 300350

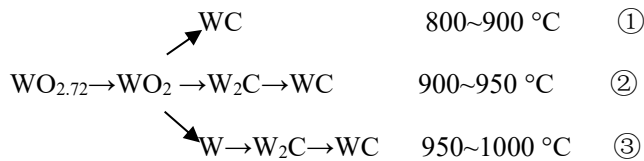
³中国科学院大学化工学院, 北京市石景山区玉泉路19号(甲), 100049

*Email: qszhu@ipe.ac.cn, fpan@ipe.ac.cn.

摘要正文:

碳化钨(WC)是制备硬质合金的重要组成部分, 其晶粒尺寸大小对硬质合金和金属陶瓷的性能有显著影响, 随着 WC 晶粒尺寸减小, 硬质合金的强度、模量及耐磨性均有显著提高。为强化碳化剂和钨源之间的传质和反应过程, 有利于形成超细碳化钨粉体, 采用流化床作为反应器, CO作为碳化剂, 以紫钨为原料在较低温度下“一步法”制备纳米级WC。本文主要考察了碳化钨制备过程的反应动力学及反应路径, 结果表明, 800-900℃条件下的失氧过程主要受表面反应控制, 而在900-1000℃则受扩散控制; 碳含量随时间变化曲线呈现“s”型, 经历诱导期、快速增长期和诱导期, 其含量增长速率表达式为: $y = \frac{k}{1 + e^{b+at}}$ ($k, 6.6394 \sim 7.0889$; $a, 4.4167 \sim 4.9580$;

$b, -0.0940 \sim -0.0810$); 根据物相变化过程可知, 其反应路径在不同的温度范围表现出不同的反应路径:



关键词: 超细碳化钨; 流态化; 动力学; 反应路径

参考文献

- [1] Z.Z. Fang, X. Wang, T. Ryu, K.S. Hwang, H.Y. Sohn, Synthesis, sintering, and mechanical properties of nanocrystalline cemented tungsten carbide - A review, *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials* 27(2) (2009) 288-299.
- [2] T. Ryu, Y.S. Hong, K.S. Hwang, Z.Z. Fang, Plasma synthesis of tungsten carbide nanopowder from ammonium paratungstate, *Journal of the American Ceramic Society* 92(3) (2010) 655-660.
- [3] F. Pan, Z. Du, S. Li, J. Li, Q. Zhu, Preparation of nano-sized tungsten carbide via fluidized bed, *Chinese Journal of Chemical Engineering* 28(3) (2020) 923-932.
- [4] F. Pan, Q. Zhu, S. Li, M. Xiang, Z. Du, Decomposition-carbonization of ammonium paratungstate in a fluidized bed, *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials* 72 (2018) 315-322.
- [5] C. Wang, X. Sun, G. Long, X. Xiong, K. Kohler, The Formation Mechanism Investigations of Nano Tungsten Carbide Powder, *Journal of Nanoscience and Nanotechnology* 20(2) (2020) 1269-1277.

致谢

感谢国家自然科学基金委员会(项目编号: 21878305)的支持, 感谢江钨赣州华茂钨材料有限公司提供的原料支持。

高密度气固循环流化床颗粒聚团分布特性

王成秀 (教师), 苏鑫, 罗梦杰, 蓝兴英*, 高金森

重质油国家重点实验室, 中国石油大学 (北京), 北京市昌平区府学路 18 号, 102249

*Email: lanxy@cup.edu.cn

摘要正文:

高密度气固循环流化床 (High-Density Circulating Fluidized bed, HDCFB) 具有气固通量大、气固作用强烈、传热、传质效率高等优异的性能, 在石油化工、能源转化以及环境保护等领域具有良好的应用前景。目前, 针对 HDCFB 的基础研究多集中在气固宏观流动, 有关 HDCFB 多尺度特性尤其是颗粒聚团特性的研究则相对缺乏。本研究在自行搭建的高 18 m 冷模实验装置上, 利用实验室开发的聚团识别方法对高密度操作条件下聚团特性进行了系统表征, 定量研究了颗粒聚团的时均特性及动态特性, 具体包括聚团时间分数、聚团浓度、聚团尺寸、聚团速度等参数。在此基础上, 研究了操作条件 (表观气速为 5-9 m/s 及颗粒循环速率为 100-1400 kg/m² s) 对聚团分布特性的影响。

结果表明, 颗粒聚团产生的时间分数与颗粒聚团浓度在径向上均呈现中间低边壁高的分布特点。随颗粒浓度的增加, 各径向颗粒聚团的时间分数与颗粒聚团的浓度均增加。颗粒聚团运动速度与聚团尺寸在径向上呈现中间大边壁小的分布特点。当 $G_s = 100 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$ 时, 较小表观气速下边壁位置的颗粒聚团向下运动。当 G_s 增至 1400 kg/m² s 时边壁区的聚团均沿床壁向上运动 (如图 1 所示)。此外, 中心位置颗粒聚团的弦长可以达到 10-15 mm, 而边壁区仅为 2-3 mm, 随着 G_s 的增加, 颗粒聚团的弦长呈现先降低后稍有增加的变化趋势。对比不同 G_s 下颗粒聚团特性参数可以发现, 在高密度操作条件下, 更易形成颗粒聚团, 形成的颗粒聚团更浓, 而且颗粒聚团的运动速度更慢, 尺寸更小。而当 $G_s > 1400 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$ 时, 颗粒聚团时间分数明显变小。这意味着在这种超高颗粒循环量下, 颗粒聚团数量降低。

总之, 高密度循环流化床 ($G_s < 1400 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$) 内随着 G_s 增加, 颗粒更易团、且聚团浓度更高、但尺寸更小、运动速度更慢。而当更高颗粒通量 $G_s > 1400 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$ 时, 颗粒聚团时间分数则显著降低, 聚团浓度也基本维持稳定, 再次说明 HDCFB 反应器内更高颗粒通量下气固混合更均匀, 接触效率更高, 反应器性能更优。总之, HDCFB 是一种高效的反应器形式, 研究意义和应用前景良好。

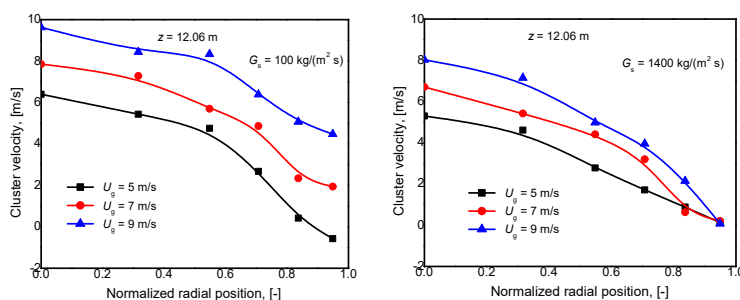


Fig. 1 Radial distributions of particle cluster velocity under various superficial gas velocities

关键词: 高密度; 循环流化床; 颗粒聚团; 介尺度结构

不同粒度煤炭在循环流化床条件下的燃烧行为

付亮亮¹, 白浩隆¹, 白丁荣^{1,*}, 许光文^{1,2,*}

¹沈阳化工大学能源化工与材料教育部重点实验室, 辽宁沈阳, 110142

²中国科学院过程工程研究所多项复杂系统国家重点实验室, 北京 100190

*Email: just4email@qq.com

摘要正文:

循环流化床是清洁的燃烧技术, 近年来在基础理论和工程实践方面取得了极大的进步。随着高效和清洁利用水平的不断提高, 目前循环流化床燃烧技术逐渐向细颗粒方向发展。由于传统的循环流化床注重宽粒度燃料的燃烧, 对在循环流化床条件(900℃左右)下细粒度燃料的燃烧行为缺乏研究。据此, 本研究在微型流化床反应器上模拟工业循环流化床运行温度, 开展了不同粒度煤燃料的燃烧实验, 通过快速在线质谱检测和分析, 获取不同粒度煤粉燃烧行为和动力学特征。研究表明, 微型流化床可以有效揭示燃煤颗粒升温、快速热解、热解气燃烧和焦炭燃烧四个阶段。对较大粒径颗粒, 燃烧阶段区分越明显, 燃烧过程受焦炭燃烧控制; 随着燃煤粒径减小, 热解、挥发分燃烧和焦炭燃烧速率接近, 各燃烧阶段趋于一致。研究结果对准确认识煤粉燃烧过程, 指导新型循环流化床锅炉设计具有重要意义。

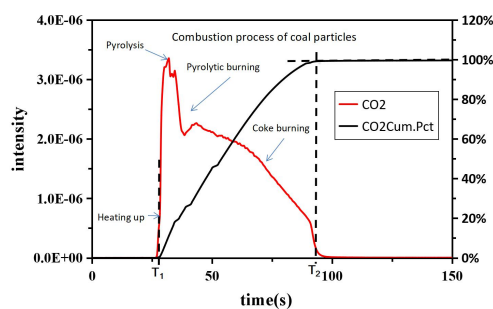


Fig. 1 Burning out time of large particle coal

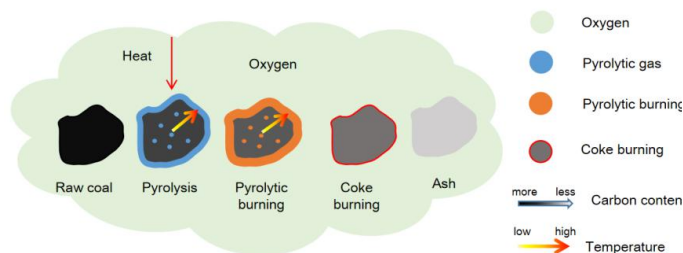


Fig. 3 Combustion process of coal particles

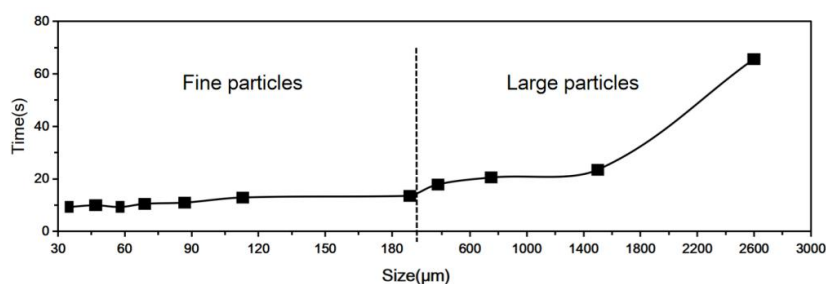


Fig. 2 Variation of burning out time with coal particle size

关键词: 微型流化床, 燃烧特性, 燃烧动力学, 燃煤粒径

气固流态化中“相共存”的统计热力学分析

鲁峰*, 张晨曦, 王垚, 蹇伟中, 魏飞

北京市绿色化学反应工程和技术重点实验室, 清华大学化工系, 北京, 100084

*Email: thu_feng@mail.tsinghua.edu.cn

摘要正文:

气固流态化中类液相的颗粒聚团(cluster)和类气相的空穴相(void)的两相共存对流化床内的传递特性包括颗粒混合、气体混合、颗粒扬析、传质和传热都会起着决定性的作用。本文基于颗粒的微观运动行为, 借鉴可描述气液相变的van der Waals三次方程形式, 利用统计热力学方法分析颗粒在流态化过程中的两相共存的稳定性, 获得颗粒流的相状态方程。这里, 颗粒流的“负可压缩”特性导致了颗粒的两相分离行为: 不稳定的拟均相(亚稳态的解)会分解为两个稳态解, 即颗粒密度较小的空穴相和颗粒密度较高的颗粒聚团; 而稳定性的边界为临界压力 p_c 和临界颗粒温度 T_c , 使得当压力 $p > p_c$ 和 $T < T_c$ 时, 颗粒出现相共存行为消失的现象, 分别对应了高压和细颗粒气固流态化失流的问题。在此基础上, 通过冷态实验验证所建立的颗粒相共存理论模型, 最终形成稳定性相图实现了对气固流态化中颗粒聚团和空穴相的调控。

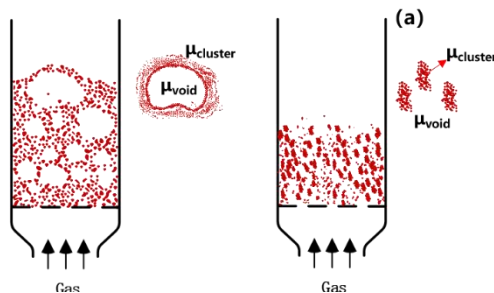


Fig. 1 Co-existence of void and cluster in fluidization

关键词: 气固流态化; 两相相共存; 统计热力学方法; 颗粒流相状态方程; 相图。

参考文献

- [1] C. Cartes, M. G. Clerc, and R. Soto, van der Waals normal form for a one-dimensional hydrodynamic model. *Phys. Rev. E*, 2004, 70: 031302.
- [2] R. Liu, Y. Li, and M. Hou, van der Waals-like phase-separation instability of a driven granular gas in three dimensions. *Phys. Rev. E*, 2007, 75: 061304.
- [3] E. Khain, B. Meerson, and P. V. Sasorov, Phase diagram of van der Waals-like phase separation in a driven granular gas. *Phys. Rev. E*, 2004, 70: 051310.
- [4] M. Argentina, M. G. Clerc, and R. Soto, van der Waals-Like Transition in Fluidized Granular Matter. *Phys. Rev. Lett.* 2002, 89(4): 044301.

基于上出料流化发料罐的高岭土粉体发料特性研究

马驰¹, 朱海鹏¹, 高健¹, 王威宇¹, 徐惠斌^{1,2*}

¹江苏大学能源与动力工程学院, 江苏 镇江 212013

²镇江市计量检定测试中心, 江苏 镇江 212000

* Email: huibin_xu@ujs.edu.cn

摘要正文:

火力发电是我国目前主要的发电方式, 固体燃料如低质煤、城市固废生活垃圾等, 在燃烧过程中释放的微量重金属随锅炉烟气进入环境后, 将影响和破坏生态, 最终威胁人体健康。高岭土及其改性粉体有望作为低成本高效吸附剂, 用于吸附现役燃煤锅炉烟气中的重金属蒸气有害物^[1-2]。但由于高岭土细粉颗粒间常存在较强的范德华力与液桥力, 容易聚团结块, 螺旋给料等难以实现稳定发料。本文针对高岭土易粘结特性, 开发了一种新型上出料流化发料罐, 通过在发料罐侧壁引入脉冲风, 实现辅助破拱下料。建立了筒体内径400mm、高度750mm的柱锥形发料罐实验系统, 研究了工业用800目、1250目高岭土粉体的流化发料特性。结果表明, 脉冲风的引入, 能够有效的破除发料罐内高岭土粉体的聚团结块, 改善粘性粉体在发料罐中的流动性, 新型流化罐发料系统可以较稳定的运行; 流化风速一定时, 随着脉冲风速的增加, 粉体质量流量呈现先增加后减小的趋势; 脉冲风速一定时, 随着流化风速的增加, 粉体质量流量同样呈现先增加后减小的趋势; 在流化风速 v_f 为0.79m/s-2.36 m/s, 脉冲风速 v_{pulsed} 为0.09m/s-0.46 m/s的工况范围条件下, 高岭土粉体发料质量流量达到140.05-273.22kg/h, 固气比达到6.73-20.79kg/m³。

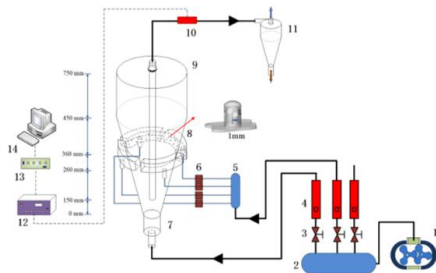


Fig.1 Experimental system diagram of the top discharging blow tank

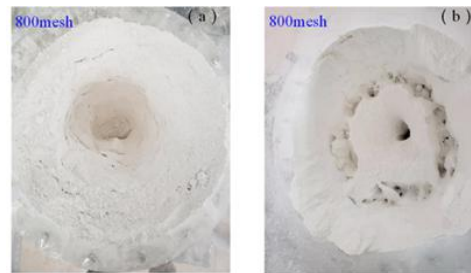


Fig.2 Kaolin powders state in the discharging blow tank

(a) No pulsed gas; (b) with pulsed gas.

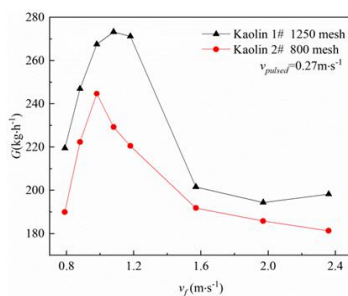


Fig.3 Effect of fluidization gas velocity on the mass flow rate of kaolin powders ($v_{pulsed} = 0.27$ m/s)

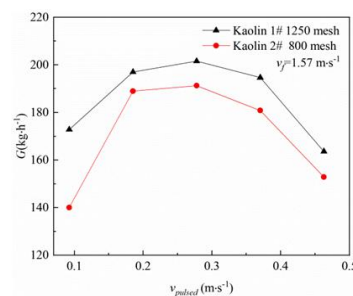


Fig.4 Effect of pulsed gas velocity on the mass flow rate of kaolin powders ($v_f = 1.57$ m/s)

关键词: 上出料式流化发料罐; 气力输送; 高岭土粉体; 脉冲风; 流化风

基金项目: 国家重点研发计划 (2018YFB0605102)、国家自然科学基金 (51806088)

参考文献

[1] X.Wang, M.Chen, C.Liu, et al. Typical Gaseous Semi-Volatile Metals Adsorption by Meta-Kaolinite: A DFT Study[J], International

Journal of Environmental Research and Public Health ,2018,15(10):2154

[2] H. Xing, H. Liu, X. Zhang, et al. In-Furnace Control of Arsenic Vapor Emissions Using Kaolinite during Low-Rank Coal Combustion: Influence of Gaseous Sodium Compounds[J], Environmental Science & Technology,2019,53(20):12113-12120.

油剂逆流接触催化裂化提升管进料混合结构研究进展

Research Progress of Countercurrent Contact FCC Feed Injection Scheme

Yan Zihan, Fan Yiping, Lu Chunxi*

State Key Laboratory of Heavy Oil Processing, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China

*Email: lcx725@sina.com

Fluid catalytic cracking process (FCC) plays an important role in modern refining industry. Feed injection zone is the initial contact area of feed oil with catalyst particles, which is quite important for the whole FCC process. By analyzing the flow field in the feed injection zone, a new type of FCC feed injection scheme in which feed are downward injected into riser to realize a countercurrent contact of feed oil with catalysts is proposed. The trajectories of feed main flow and secondary flow are calculated based on the experimental results and the jet theory. The helium tracer method is used to investigate the residence time distribution and flow patterns of feed spray in feed injection schemes. The gas-solid dynamic behaviors in the feed injection zone are investigated by analyzing the solids holdup fluctuation signals. Good performance of the new type of feed injection scheme is obtained based on above analysis.

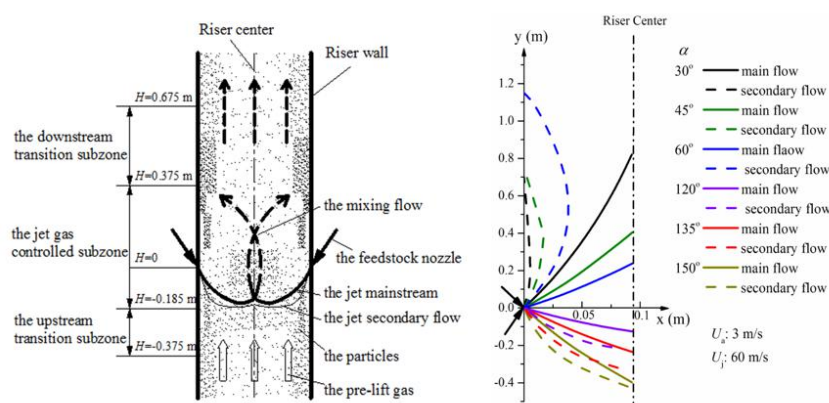


Fig. 1 Sketch of flow structure in the countercurrent contact FCC feed injections scheme

Key Words: FCC; Riser; Feed injection zone; Jet; Cluster

References

- [1] Fan Y, E C, Shi M, Xu C, Gao J, Lu C. Diffusion of feed spray in fluid catalytic cracker riser. *AIChE Journal*, 2010, 56: 858-868.
- [2] Yang T Y, Leu L P. Multiresolution analysis on identification and dynamics of clusters in a circulating fluidized bed. *AIChE Journal*, 2009, 55: 612-629.
- [3] Wang J W. High-resolution Eulerian simulation of RMS of solid volume fraction fluctuation and particle clustering characteristics in a CFB riser. *Chemical Engineering Science*, 2008, 63(13): 3341-3347.
- [4] Guenther C, Breault R. Wavelet analysis to characterize cluster dynamics in a circulating fluidized bed. *Powder Technology*, 2007, 173(3): 163-173.
- [5] Breault R W, Ludlow C J, Yue P C. Cluster particle number and granular temperature for cork particles at the wall in the riser of a CFB. *Powder Technology*, 2005, 149(2-3): 68-77.
- [6] Xu J, Zhu J S. A new method for the determination of cluster velocity and size in a circulating fluidized bed. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2012, 51(4): 2143-2151.

新型灵活焦化反应器颗粒浓度分布研究

钟旭东, 朱碧才, 刘梦溪*

中国石油大学(北京)重质油国家重点实验室, 北京, 102249

*E-mail: mengxiliu@sina.com

摘要正文:

劣质重油加工工艺主要包括脱碳和加氢两条线路, 其中焦化方案是脱碳路线中最重要的工艺。延迟焦化由于其优良的经济效益, 是现在应用最广泛的焦化工艺。近年来, 随着我国对环境排放的要求日益苛刻, 延迟焦化产生的大量高重金属高含硫焦炭无法通过燃烧处理, 这直接威胁到了延迟焦化的生存。在20世纪50年代初, 开发出一种连续操作的流化焦化工艺, 主体设备由一个焦化反应器和燃烧器组成^[1]。随后在其基础上增加了一个气化器^[2], 开发出灵活焦化工艺, 将焦炭转换为低热值合成气, 同时高效脱除污染物。灵活焦化工艺的经济效益显著、对环境友好, 具有巨大的应用潜力。

现存的灵活焦化反应器, 在进料部分容易湿料, 从而结成较大焦块, 导致装置失流化停工。本文提出了一种新型灵活焦化反应器, 如图1所示。为提高颗粒更新速率, 将水平喷嘴改为斜向下30°, 射流使焦炭颗粒在库塔-茹科夫斯基升力的作用下^[3]向中心运动, 增加了焦炭颗粒在反应器中的停留时间, 保证接触了新鲜原料的焦炭颗粒不会在边壁立即重复接触原料, 从而避免了湿料问题的发生, 提高了装置长周期运行能力。

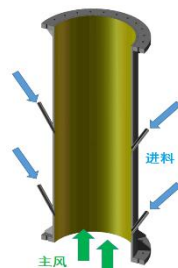


Figure 1 Schematic diagram of the novel flexi-coking reactor

本文采用了光纤法测量了焦化反应器内的颗粒浓度分布。由于石油焦颗粒表面呈现黑色, 不利于光纤测量, 选用FCC催化剂作为替代颗粒进行研究。通过一系列无量纲参数, 可以将FCC催化剂与石油焦在反应器中的流动特性进行动力学相似的关联^[4]。实验操作过程中, 维持主风表观气速为0.2m/s不变, 通过改变射流速度来调控流化床内表观气速到达0.3~0.6m/s。基于颗粒浓度的分析结果, 结合统计矩一致性原理^[5]和高于起始流化固含率作为识别聚团的判据^[6], 分析了新型灵活焦化反应器内颗粒聚团分布随射流速度的变化, 明确了反应器内结块问题出现的高风险区域。

关键词: 灵活焦化; 颗粒更新速率; 颗粒浓度分布, 颗粒聚团

参考文献

- [1] Robert W.Pfeiffer, Bronxville N.Y., Daniel S.Borey, and Charles E.Jahnig. Fluid coking of heavy hydrocarbons: US2881130[P]. 1959-04-19.
- [2] Edward C. Luckenbach. Gaseous products of gasifier used to convey coke to heater: US3702516[P]. 1972-11-14.
- [3] Yiping Fan, Chenglin E, Mingxian Shi, Chunming Xu, Jinsen Gao, and Chunxi Lu. Diffusion of Feed Spray in Fluid Catalytic Cracker Riser[J]. ALCHE Journal, April 2010, 56(4): 858-868.
- [4] Xuqi Song, Hsiaotao Bi, C.Jim Lim, John R. Grace, Edward Chan, Brian Knapper, Craig McKnight. Hydrodynamics of the reactor section in fluid cokers[J]. Powder Technology, November 2004,147: 126-136.
- [5] Hsiaotao T. Bi, and Peng-Cheng Su. Local Phase Holdups in Gas-Solids Fluidization and Transport[J]. ALCHE Journal. September

2001, 47(9): 2025-2031.

[6] Li Niu, Yahang Huang, Zhimin Chu, Min Cai, and Mengxi Liu. Identification of Mesoscale Flow in a Bubbling and Turbulent Gas-Solid Fluidized Bed[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2019, 58: 8456-8471.

EMMS固相应力模型

贺明明^{1,2}, 赵碧丹^{1,2}, 王军武^{1,2,3*}

¹中国科学院过程工程研究所多相复杂系统国家重点实验室, 北京, 100190

²中国科学院大学化工学院, 北京, 100049

³中国科学院绿色过程制造创新研究院, 北京, 100049

*Email: jwwang@ipe.ac.cn

摘要正文:

采用连续介质模型对气固流进行粗网格模拟需要子网格模型来考虑其中非均匀结构存在的影响。已有大量工作证明EMMS曳力模型可以较好地描述CFB提升管内的气固非均匀流动的介尺度结构对气固曳力的影响,但是相应的固相应力模型却鲜有涉及。本研究从EMMS曳力模型[1]出发,将其拓展成可以预测稀相颗粒温度、密相颗粒温度和聚团尺度颗粒温度的模型,同时基于多尺度分析的思想,提出了一个颗粒相应力模型。根据拓展的EMMS模型提供的包含稀密相颗粒温度及聚团尺度颗粒温度在内的结构参数,可以对连续介质模型中的颗粒压力和颗粒剪切粘度进行预测。模型计算结果与实验测量数据[2][3]吻合较好,合理预测了颗粒温度、颗粒压力、颗粒剪切粘度随平均固含率的变化规律,反映了本模型有效地考虑到了介尺度结构对固相应力的影响,至此建立了一个适用于CFB提升管非均匀气固流的统一的基于EMMS模型的本构模型。

关键词: 流态化; 气固流; 双流体模型; 固相应力

参考文献

- [1] Wang, J., Ge, W., Li, J., 2008. Eulerian simulation of heterogeneous gas–solid flows in CFB risers: EMMS-based sub-grid scale model with a revised cluster description. *Chem. Eng. Sci.* 63 (6), 1553–1571.
- [2] Gidaspow, D., Huilin, L., 1996. Collisional viscosity of FCC particles in a CFB. *AIChE J.* 42 (9), 2503–2510.
- [3] Gidaspow, D., Huilin, L., 1998. Equation of state and radial distribution functions of FCC particles in a CFB. *AIChE J.* 44 (2), 279–293.

论文编号：03-030

气固两相圆湍射流颗粒运动特性研究

巴忠仁^{1,2}, 赵建涛^{1*}, 封凯^{1,2}, 胡东海^{1,2}, 聂伟¹, 郝振华¹, 房倚天¹

¹ 中国科学院山西煤炭化学研究所 煤转化国家重点实验室, 山西 太原 030001

² 中国科学院大学, 北京 100039

*Email: zrba1274@163.com; zhaojt@sxicc.ac.cn

摘要正文:

采用PIV颗粒图像测速仪和光纤探针分别对稀相和稠密气固两相圆湍射流进行了实验研究, 考察了圆锥形喷嘴收缩角对颗粒运动特性的影响。结果表明, 在喷嘴出口附近, 由于相间存在较大的滑移速度, 颗粒轴线速度分布存在一个“驼峰”, 颗粒向射流轴线聚集, 形成一个局部浓相区。不同气体射流速度下喷嘴收缩角对颗粒速度分布和浓度分布具有不同影响。当 $U_{g,e} < 15.85$ m/s时, 收缩角为 40° 的喷嘴射出的颗粒峰值速度和浓度最大; 收缩角增大, 颗粒浓相区向喷嘴靠近, 而收缩角对颗粒加速距离几乎无影响。当 $U_{g,e}$ 增大至25 m/s时, 收缩角为 60° 的喷嘴对颗粒的加速能力最优。

关键词: 圆湍射流; 收缩角; 颗粒速度; 颗粒浓度

论文编号：03-031

大型双流化床反应器的冷态试验研究

林煜斌¹, 王勤辉^{1*}, 叶超², 朱瑶¹

¹浙江大学能源清洁利用国家重点实验室, 浙江杭州, 310013

²浙江科技学院, 浙江杭州, 310023

*Email: qhwang@zju.edu.cn

摘要正文:

在我国推行节能减排战略的背景下, 基于双流化床反应器的煤炭热解燃烧多联产工艺越来越受到重视。双流化床反应器的设计开发过程中, 对物料循环流率和反应器内流场参数分布的研究有着重要意义。本文自主搭建了主体最大高度为21.6m的双流化床冷态试验平台, 分别研究了燃烧炉风速、热解炉风速、初始床料量及颗粒粒径对物料循环流率的影响。结果表明, 物料循环流率与燃烧炉风速、热解炉风速和初始床料量呈正相关而与颗粒粒径呈负相关。另外, 本文还研究了前述变量对流场参数分布的影响。本文研究结果可以为大型双流化床物料循环系统的设计和运行提供参考。

关键词: 双流化床; 物料循环流率; 流场参数; 大型

论文编号：03-032

高含硫天然气旋风分离器结构优化设计

潘君明, 吴峰*, 闫渊, 魏利平, 马晓迅

西北大学化工学院, 陕西西安, 71600

*Email: wufeng@nwu.edu.cn

摘要正文:

针对高含硫天然气工况,降低出水量与固态硫沉积可以保证高含硫气田稳定安全生产。旋风分离器是高含硫天然气净化系统的重要分离单元,是实现高效气固分离的关键结构。对于解决产出水和析出硫给地面集输系统带来腐蚀和硫沉积堵塞问题,保障高含硫气田集输系统安全、高效、平稳运行具有重要意义。在之前的研究当中,主要选定的单管旋风分离器的结构为圆柱形下体且无锥形下体,这也导致了颗粒随着气流向向下流动的过程中难以依靠离心力发生分离。本文通过数值模拟方法,对单管旋风分离器的下体进行结构优化,将圆柱下体设计为圆锥形下体,并选取合适的锥体长度,提高颗粒的离心力,从而提高分离效率。

关键词: 旋风分离器; 单管旋风分离器管; 结构优化; 分离效率

In-situ monitoring of coke content in methanol to olefins regeneration process by electrical capacitance tomography

Kai Huang^{1,2}, Shuanghe Meng¹, Mao Ye^{1,*}

¹Dalian National Laboratory for Clean Energy and National Engineering Laboratory for MTO, Dalian Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Dalian 116023, China

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

*Email: huangkai@dicp.ac.cn, maoye@dicp.ac.cn

Abstract:

The methanol-to-olefins (MTO) reaction over SAPO-34 catalyst suffers rapid deactivation due to coke deposition. It is important to restore catalyst activity by burning off coke. In-situ and real-time monitoring of coke content during the regeneration process is of great importance considering the relationship between coke content and light olefins selectivity. In this work, an electrical capacitance tomography (ECT) sensor mounted on the micro-fluidized-bed reactor is first used to real-time and in-situ monitor coke content during the MTO regeneration process. The ECT measurements show that electrical property of catalyst within different coke content is stable. Therefore, it is able to build relationship between coke content and relative capacitance. With the help of thermogravimetric analyzer measurements, relationship between coke content and sum of non-adjacent electrodes relative capacitance is constructed which can be used to measure coke content in situ and real time.

喷动再生效率对新型耦合分离器的影响

付金壮、常明、范怡平*、卢春喜*

(中国石油大学(北京)重油国家重点实验室, 北京, 102249)

摘要正文:

旋风分离器和颗粒床除尘器是重要的气固分离设备, 被广泛应用于工业生产中。旋风分离器对10 μm左右的固体颗粒物不能完全除尽, 不适用于5 μm以下固体颗粒物的分离^[1-4]; 颗粒床除尘器对细微粉尘具有高效的除尘效率, 但在短时间内, 床层粉尘持量达到饱和状态后会造较大的压降。因此单一的过滤器已经不能满足实际生产的需求^[5-6]。本实验装置为颗粒床-旋风分离器一体的新型耦合分离器, 研究了提升管-喷动再生效率与新型耦合分离器装置压降、除尘总效率和床层粒度分布之间的关系。

本研究采用硅微粉 (D_{50} , ~13 μm) 作为粉尘颗粒, 气体采用常温常压状态下空气, 用于模拟所需处理的含尘气体。粉尘颗粒的粒径分布和中位粒径由LS-909激光粒度分析仪(珠海欧美克仪器有限公司)测定, 颗粒床捕集颗粒采用由UOP公司生产的13X-APG(8×12目)空分专用分子筛吸附剂产品。实验装置系统主要分为三部分, 分别是耦合分离器设备, 加尘系统和提升管-喷动再生系统。

提升风量在68 m³/h时, 喷动再生器内环隙速度较小, 而环隙速度要高于粉尘的带出速度时, 粉尘颗粒才会被带出。部分粉尘颗粒粘结成小块, 对环隙速度要求更大, 导致再生效率较低。提升风量继续增大到85 m³/h时, 喷动再生器内环隙速度明显大于粉尘带出速度, 大部分粉尘被分离并收集, 再生效率迅速提升40%。继续增大风量, 再生效率增速变缓, 因为大部分粉尘已被分离, 少许粉尘随捕集颗粒循环进入内置颗粒床, 所以粉尘无法完全带出; 但风量小时能耗较高, 综合再生效率与能耗来看, 装置总提升风量在98 m³/h时为最佳操作条件。

装置运行时间达到1000 s后, 压降趋于平稳, 因为粉尘的扩散效应, 长时间运行后压降有小幅提高。提升气量越大, 装置压降平衡越快。提升风量在68 m³/h时, 再生效率为35.60%, 喷动再生器内分离的粉尘较少, 床层内粉尘含量较高, 床层孔隙率小, 所以装置压降最大。提升风量从83 m³/h提升到98 m³/h时, 喷动再生效率提升35%左右, 新型耦合分离器装置压降约下降30%, 装置压降与再生效率出现反比关系。

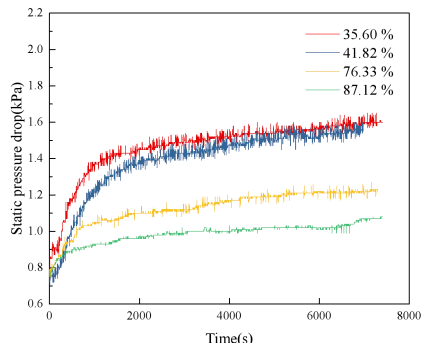


Fig. 1 The pressure drop of the coupled separator with different spouted-regeneration efficiency

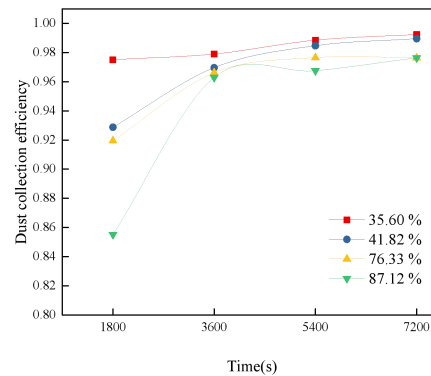


Fig. 2 The collection efficiency with different spouted-regeneration efficiency

提升风量越大, 起始状态总效率越低, 装置加尘运行3600 s后总除尘效率稳定。提升风量在68 m³/h时, 总除尘效率很快稳定接近98%, 但随着提升风量的提高, 装置总除尘效率略微下降。此结果与王苗等^[7]研究得出的结论增大氮气流量, 旋风分离器和颗粒床两级除尘总效率随氮气流量的增加略有减小一致。当提升气量升高时, 再生效率提高, 喷动再生器内未分离出的粉尘较少, 其随捕集颗粒循环进入颗粒床, 导致内置颗粒床的空隙率变大, 捕集粉尘的能力变弱, 内置颗粒床的除尘效率变低, 所以出口管含尘气体浓度升高, 装置总除尘效率下降。

喷动再生器再生效率随提升风量的提高而提高, 且效率曲线的切线斜率逐渐变大。旋风耦合分离器装置压降与再生效率成反比, 在最佳操作工况 98 m³/h, 旋风耦合分离器装置压降为 1.2 kpa。粉尘分离总效率随提升风量

的增高略微下降,在能耗最低的情况下,分离总效率平均可达 98.37%。提升管风量的增加,会导致颗粒磨损加剧,磨损会影响内置颗粒床的除尘效率。

关键词: 新型耦合分离器; 喷动床; 再生效率; 压降;

参考文献

- [1] Saxena S C, Henry R F, Podolski W F. Technology status of particulate removal from high-temperature high-pressure combustion gases[J]. *Aerosol Science & Technology*, 1982, 1(2): 235-257.
- [2] Dirigo J, Leith D. Cyclone collection efficiency: comparison of experimental results with theoretical predictions[J]. *Aerosol Science & Technology*, 1985, 4(4): 401-415.
- [3] Hoffmann A C, Stein L E. *Gas Cyclones and Swirl Tubes: Principles, Design and Operation*[M]. 2nd ed. Berlin: Springer, 2007.
- [4] 陈建义.切流反转式旋风分离器分离理论和优化设计方法的研究[D].北京:中国石油大学,2007.
- [5] 杜鑫,黄茂丽,齐彬彬,等.粉煤热解含尘干馏气两级净化实验研究[J].*煤炭学报*,2018,43(10):2911-2917.
- [6] Du X, Li Y, Qi B B. Eperimental research of coal dust removal system at high temperature[J]. *Chemical EngineeringTransactions*, 2017, 16: 1021-1026.
- [7] 王苗,杜鑫,王毅.旋风-颗粒床过滤器两级除尘的分析与优化[J].*化学工程*,2020,48(4):55-59.

微纳结构颗粒光热转换特性及太阳能热利用

汪新智¹, 何玉荣^{1,*}

¹ 哈尔滨工业大学, 哈尔滨市南岗区西大直街 92 号, 150001

*Email: rong@hit.edu.cn

摘要正文:

太阳能作为一种覆盖广泛的绿色清洁能源, 其开发利用成为缓解当前能源问题的有效途径。同时, 随着纳米技术的发展, 微/纳米级结构颗粒的量子尺寸效应、小尺寸效应、光谱吸收特性和表面效应等特性使得微纳结构颗粒可被用于太阳能的开发利用中。以太阳光利用为背景, 开发了一种刺猬形微/纳结构颗粒 (Hedgehog Particles, HP), 通过负载等离子体金纳米颗粒 (Au NPs) 的手段, 调节等离子体HP-Au复合颗粒的光谱吸收性能, 并开展了基于等离子体HP-Au复合颗粒的太阳能热利用研究。基于微纳结构自组装方法, 以聚苯乙烯微球为核, 在微球表面得到了近似法向生长的六棱柱结构的氧化锌纳米棒阵列, 形成刺猬形微/纳复合结构颗粒。进一步, 将Au纳米颗粒通过静电吸附自组装的方式, 修饰到HP颗粒的氧化锌纳米棒上, 调节HP颗粒的光谱响应, 获得了宽吸收光谱的等离子体HP-Au复合颗粒。以HP-Au颗粒为光热吸收转换介质制备了可漂浮的混合纤维膜/刺猬颗粒/金纳米颗粒 (MCE-HP-Au) 多孔太阳能集热薄膜, 它具有良好的粗糙度, 一方面, 为水蒸发相变提供了更多的核心; 另一方面, 微结构孔隙对入射光进行多次散射, 改善了等离子体MCE-HP-Au膜的抗反射和太阳光捕获, 使得等离子体MCE-HP-Au膜具有较高的光-热转换效率。进一步, 利用其进行直接太阳能光热产蒸汽实验, 结果显示MCE-HP-Au薄膜具有良好的太阳能产蒸汽性能, 这种漂浮式的太阳能产蒸汽过程保证了热量在相变界面处的集中, 减少了能量损失。

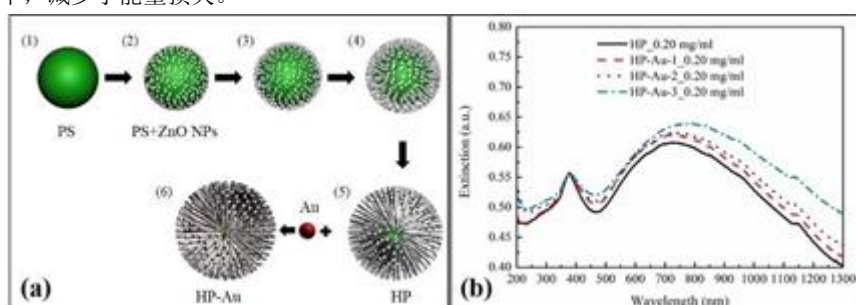


Fig. 1 (a) The formation of HP and HP-Au particles, (b) the UV-Vis spectra of HP-Au particles.

关键词：太阳能；微/纳结构颗粒；光热转换；等离子体共振

参考文献

- [1] X. Wang, Y. He, X. Liu, J. Zhu Synthesis of hierarchical flower-like particles and its application as super-hydrophobic coating. Powder Technol. 2017, 319: 408-414.
- [2] X. Wang, Y. He, X. Liu Synchronous steam generation and photodegradation for clean water generation based on localized solar energy harvesting. Energ. Convers. Manage. 2018, 173: 158-166.
- [3] X. Wang, Y. He, M. Chen, Y. Hu ZnO-Au composite hierarchical particles dispersed oil-based nanofluids for direct absorption solar collectors. Sol. Energ. Mat. Sol. C. 2018, 179: 185-193.

合成吡啶碱新型反应器的数值模拟

孔双祝¹, 刘梦溪^{1,*}

¹ 中国石油大学(北京), 北京市昌平区府学路18号, 102249

*Email: mengxiliu@sina.com.cn

摘要正文:

吡啶和3-甲基吡啶是吡啶碱生产工艺的主要产物, 因其具有较高的化学和生物反应活性, 被广泛地用于合成医药、农药、香料等^[1]。传统“醛氨法”合成吡啶碱反应器装置存在内部结焦问题, 严重影响生产安全性和稳定性。Zhou^[2]按照“提升管-床层反耦合反应器”的思路设计反应器装置, 并成功在大型冷态装置实验中检验了其用于气固两相流动的可行性。由于受到实验条件和测量手段限制, 反应器内部流体力学无法深入分析研究。本文在其实验研究基础上, 通过数值模拟的方法对该合成吡啶碱新型反应器进行进一步研究。

该反应器装置由下至上依次是预提升段、提升管段、湍流床段, 其中预提升段反应器高2 m, 内径140 mm; 提升管段反应器高12.5 m, 内径80 mm, 湍流床段反应器高5 m, 内径290 mm。实验装置主要结构如图1所示。根据装置结构, 运用ICEM-CFD建立模型、划分网格, 并采用Fluent V16.2进行数值模拟。采用欧拉-欧拉双流体模型, 以及基于结构的EMMS曳力模型^[3,4]。模拟中所采用的固体颗粒为FCC催化剂, 平均粒径为70 μm, 密度为1500 kg/m³, 流化介质为空气, 平均密度为1.225 kg/m³, 粘度为1.7×10⁻⁵ kg/(m·s), 气体采用无滑移边界条件, 固体滑移系数为0.05, 离散方法为二阶迎风模式, 计算步长0.0005 s, 计算时长为30 s, 最后10 s进行均时统计。

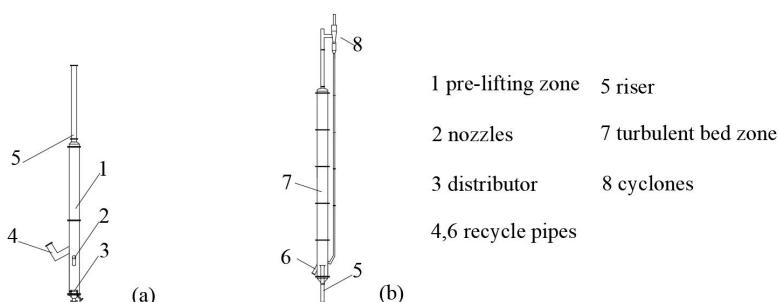


Fig. 1 Structure of pre-lifting zone(a) and turbulent bed zone(b) of the coupled reactor

通过改变喷嘴气速、催化剂颗粒循环强度等操作条件, 对耦合反应器内气固两相流动状态进行分析, 得出以下结论:

1. 预提升段反应器喷嘴射流对于该反应器内固含率轴向分布影响较大, 随着向下的喷嘴气速的增加, 喷嘴射流影响区逐渐向下拓展, 固含率因此下降; 在喷嘴射流影响区以下, 固含率较高; 向上通过喷嘴射流影响区, 固含率降低; 再向上进入颗粒输送区, 固含率得到一定回升, 随后平缓降低;

2. 通过改变喷嘴气速控制预提升段反应器内的表观气速, 发现表观气速对于预提升反应器内颗粒流动存在较大影响。表观气速越大, 催化剂颗粒的轴向速度越大, 而由于催化剂颗粒的循环强度保持不变, 反应器内的整体固含率则越小;

3. 催化剂颗粒的循环强度对预提升反应器和提升管段反应器内的颗粒流动也存在较大的影响。催化剂颗粒的循环强度越大, 在预提升段反应器内的整体固含率越大, 颗粒轴向速度越小, 提升管段变化与之类似;

4. 由于结构的不对称性, 以及底部流化风的影响, 湍流床反应器内出现较多涡旋, 一定程度上会影响传质效率。后期改善可优先改进底部流化风入口分布器以及各接管的对称性, 或者合理增加内构件对该区域两相流动进行进一步优化。

关键词: 吡啶碱; 耦合反应器; 数值模拟

参考文献

- [1] A. E. Tschitschibabin, M. P. Oparina. Über die Synthese des Pyridins aus Aldehyden und Ammoniak[J]. Journal für Praktische Chemie, 1924, 107: 154–158.
- [2] S. Zhou, S. Liu, Y. Wei, X. Li, M. Liu, C. Lu, and X. Bi. Coupled fluidized bed reactor for pyridine synthesis[J], Industrial & Engineering Chemistry Research, 2018, 57: 7466-7475.
- [3] S. Hu, X. Liu. A general EMMS drag model applicable for gas-solid turbulent beds and cocurrent downers[J]. Chemical Engineering Science, 2019, 205:14-24.
- [4] S. Hu, X. Liu, N. Zhang, J. Li, W. Ge, W. Wang, Quantifying cluster dynamics to improve EMMS drag law and radial heterogeneity description in coupling with gas-solid two-fluid method[J]. Chemical Engineering Journal, 2017, 307: 326-338.

笛卡尔网格下利用可压缩的CFD-DEM-IBM模拟 复杂几何体内热传导

赵鹏¹, 王军武^{1,*}

¹中国科学院过程工程研究所多相复杂系统国家重点实验室, 北京 100190

²中国科学院大学化工学院, 北京 100049

³中国科学院绿色过程制造创新研究院, 北京 100049;

*Email: jwwang@ipc.ac.cn, zhaopeng@ipc.ac.cn

摘要正文:

传统的CFD-DEM方法模拟复杂几何体内气固流动与传热采用非结构贴体网格,但是由于非结构网格的复杂性,如何应用该方法准确模拟工业流化床是一个挑战。本研究采用笛卡尔(Cartesian)网格计算复杂几何体内传热,其中气相与复杂边界的相互作用通过浸没边界法(immersed boundary method, IBM)来描述,该方法已经被Tukovic(2012)等人在OpenFOAM®中实现,Zhao et. al(2020)将其应用至模拟气固流化床内的流动。本研究在此前流动研究基础上,将该方法扩展至模拟流化床内的传热过程。首先通过模拟不同雷诺数以及马赫数下的单相圆柱扰流来验证CFD-IBM方法的准确性,然后结合DEM方法模拟埋管流化床中的传热过程。尽管模拟得到的局部热传导系数(heat transfer coefficient, HTC)最大值出现的位置与实验结果稍有不同,但是局部热传导系数大小以及其平均值与实验吻合较好。以上模拟结果表明该CFD-DEM-IBM方法是研究复杂几何体内气固传热的有效工具。

关键词: 热传导; 浸没边界法; 气固两相流; 颗粒技术

参考文献

- [1] Tukovic, Z., Jasak, H., 2012. Immersed boundary method in OpenFOAM. In: 7th OpenFOAM® Workshop. Technische Universität Darmstadt, Germany, URL: <http://openfoamwiki.net/index.php/Extendbazaar/Toolkits/ImmersedBoundary>, pp. 25–28.
- [2] Zhao, P., Xu, J., Ge, W., Wang, J., 2020. A CFD-DEM-IBM method for Cartesian grid simulation of gas-solid flow in complex geometries. *Chemical Engineering Journal* 389, 124343.

气固折流强化取热器内流动及换热特性研究

李建涛，姚秀颖*，刘璐，卢春喜*

中国石油大学（北京）重质油国家重点实验室，北京市昌平区，102249

*Email: xyiao2014@126.com; lcx725@sina.com

摘要正文：

气固流化床取热器由于其高的传热性能和均匀的床层温度分布，在国内外石油化工领域获得了广泛应用。随着全球资源与环境问题的日益突出，如何最大限度提高能源利用率受到越来越多研究者的重视。因此，对于气固流化床换热过程，提高其换热效率变得至关重要。目前，国内外对气固流化床换热器的研究主要集中于气固流化床取热器的换热机理方面，研究发现，流化床和浸没表面的换热过程主要与颗粒团在换热表面的停留时间和时间分率相关。而在密相流化床内，颗粒团停留时间起主导作用。在实际工业应用中，工程技术人员通常采用调节取热器的颗粒外部循环速率来灵活调节取热负荷，而大部分实验室研究均未涉及颗粒外部循环速率对取热特性及调控规律的影响。本文作者通过对带有颗粒外部循环的流化床与管束间的换热研究发现，循环催化剂颗粒在取热器内分布不均，部分催化剂没有与换热管进行换热就离开取热器，存在换热短路流。基于上述研究，本文设计了一种新型的折流式流化床取热器，相比于传统气固流化床取热器，在壳程安装了若干独特的倾斜布置的开孔折流板，以期强化气固流化床取热器的换热性能。尽管折流板被广泛应用于单相换热器内以强化壳程液体的湍流，但其在气固多相流换热体系的研究和应用尚未见报道。因此，需要针对气固多相流体系的流动特点，对折流板进行特殊的设计。为了防止颗粒在板上的堆积，折流板采用倾斜布置，其倾斜角度大于颗粒堆积角；为了防止床层压降过大，折流板采用适宜的开孔处理；同时，为了减小其所受应力，增加其稳定性，折流板的安装位置避开了分布器影响区。实验结果表明，在相同操作条件下，相对于传统的取热器，折流式取热器的换热系数可提高70%。对比两种流化床取热器内的气泡性质，发现新型折流式流化床取热器的折流板作为流化床的内构件，起到了破碎气泡的作用，同时，折流板的开孔对气泡起到了再分配作用，从而有效降低了换热管附近的气泡尺度、增加了局部气泡频率，这种小尺度高频率的气泡，增强了颗粒团在换热管表面的更新频率，降低了颗粒团在换热管表面的平均停留时间。此外，折流板的存在，改变了颗粒的流动路径，实现了颗粒的有序流动，改善了颗粒在取热器内的停留时间分布，从而弱化了换热短路流。

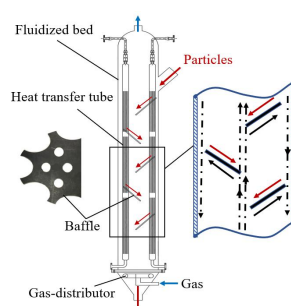


Fig. 1 Schematic diagram of the baffle fluidized bed heat exchanger

关键词：气固流化床；换热特性；流体动力学；折流强化

参考文献

- [1] H. Mickley and C. Fairbanks Mechanism of heat transfer to fluidized beds. *AIChE J.* 1955, 1: 374-384.
- [2] X. Y. Yao, X. Han, Y. M. Zhang and C. X. Lu Systematic study on heat transfer and surface hydrodynamics of a vertical heat tube in a fluidized bed of FCC particles. *AIChE J.* 2014, 61: 68-83.
- [3] 李建涛,姚秀颖,刘璐,卢春喜,气固流化床外取热器内流动和换热特性分析[J].*化工学报*, 2020, 71(7):3031-3041.

新型颗粒床-旋流耦合分离器内部流场分析

常明、范怡平*、卢春喜*

中国石油大学（北京）重油国家重点实验室，北京，102249

摘要正文：

催化裂化三旋催化剂细粉中含有较多重金属元素且颗粒直径小于 $40\ \mu\text{m}$ ，尤其是含有粒径小于 $3\ \mu\text{m}$ 的细粉^[1]。催化裂化装置的再生烟气进入烟机的温度为 $570\sim 710\ ^\circ\text{C}$ ，需要严格控制催化剂细粉质量浓度小于 $150\ \text{mg}/\text{m}^3$ ，细粉浓度超标容易在烟机叶片表面烧结结垢，影响烟机的正常运行。此外，高温烟气中的催化剂细粉的高效脱除还有利于保护下游烟气脱硫单元的操作，保证工业装置长周期平稳运行。但在实际生产过程中，常规除尘设备—旋风分离器对于 $5\ \mu\text{m}$ 以下颗粒的分离能力不尽如人意^[2]。因此，合理耦合其他除尘机理可以弥补当前催化裂化三旋的固有弊端，对不同粒径分布颗粒均进行高效分离。本研究针对一种将旋流与错流式颗粒床过滤耦合的气固分离器开展实验研究，实现了离心分离、惯性碰撞和直接拦截等多种除尘机理的耦合协同。旋风分离器对 $5\sim 10\ \mu\text{m}$ 以上颗粒物的离心分离作用，率先脱除一部分较大粒径的粉尘；含尘气流切向进入内置颗粒床，捕集颗粒对小粒度粉尘进行二次拦截“过滤”，通过惯性碰撞和直接拦截等分离机理捕集 $5\ \mu\text{m}$ 以下细颗粒粉尘，进一步提高气固分离的效果。旋风分离器环形空间顶部的二次流、排气管末端的短路流以及灰斗与排尘口的返混都会影响旋风分离器的性能，而这些现象都与旋风分离器内部流场分布密切相关，因此研究设备内部流场特性并通过对流场的改善可指导耦合分离器的结构优化。时铭显、魏耀东^[3,4]、陈建义^[5]等人在冷态试验装置中测量了顶旋升气管外和环形空间内的流场；宋健斐^[6]通过模拟发现旋转中心偏离几何中心的距离和方位在不同轴向位置而不同，最大约 $0.07R$ ；赵建涛^[7]研究了沉积粉尘对局部气体过床的阻力和捕集单元除尘效率的变化；陈允华^[8]认为错流风速足够大时移动床内将出现“空腔”和“贴壁”等现象，空腔的发展过程造成压降随时间出现稳定、微波脉动和大幅波动3种变化。本研究在一套中试规模的冷模实验装置上进行，主要考察新型耦合分离器内部的流场以及静压的分布特性，对耦合分离器除尘机理进行分析。实验中采用五孔探针以及差压传感器对装置内部的流场和静压进行测量。实验结果表明：（1）与旋风分离器类似，气体经蜗壳式入口结构进入设备内部产生的旋流场，在周向上存在非对称分布的现象，这也导致内置颗粒床过滤效果的沿周向的差异性；随着轴向长度的增加，静压和流体速度均逐渐减小；（2）环形空间 180° 方位角处静压值达到最小值，存在短路流现象，颗粒层的存在可将这部分粉尘捕集，但会导致灰尘过多的沉积在颗粒床表面，易导致颗粒床内出现堵塞等不利工况；（3）随着无因次径向位置的减小，静压减小，靠近壁面处测点的静压有“逆增长”的现象。气流在错流穿过颗粒床，在壁面处有部分动能由于与壁面碰撞而转化成了气体静压；（4）切向速度在颗粒床表面上达到最大值，对颗粒床表面形成的滤饼起到剪切作用，有效抑制其自由生长，实现“自清洁”；（5）设备锥段及灰斗部分流场保持稳定，并未出现强烈的涡核摆动现象，表明内置颗粒床下料管的稳涡效果显著，遏制了灰尘返混现象；（6）根据内部流场分布，将颗粒床表面沿轴向分为错流扩散区和夹带作用区两部分，明确各区除尘机理，为后续建立耦合分离器分离效率模型提供理论基础。

关键词：颗粒床；旋流；耦合；静压分布；速度场

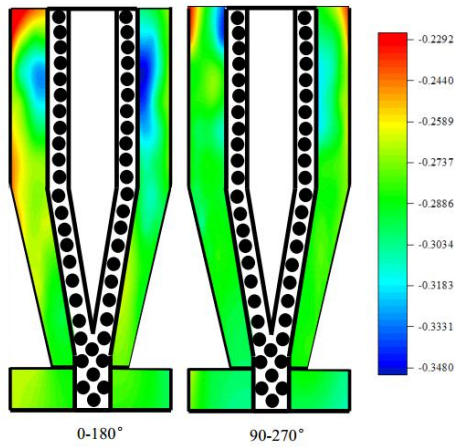


Fig.1 Static pressure distribution in the coupled separator

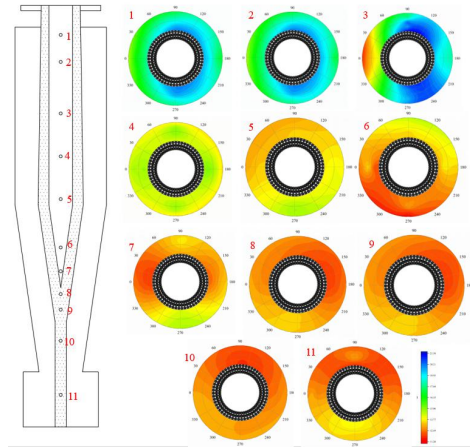


Fig.2 The flow velocity distribution, $V_{in}=9.06$ m/s

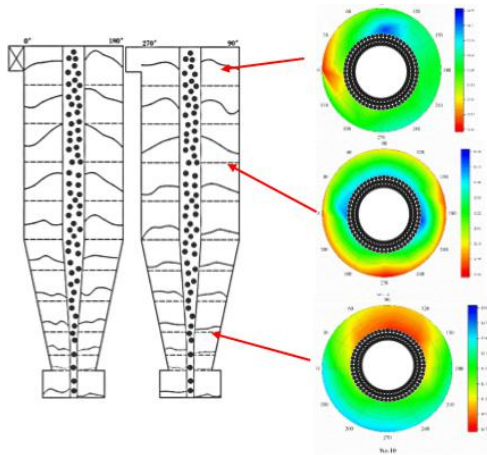


Fig.3 The dimensionless tangential velocity distribution

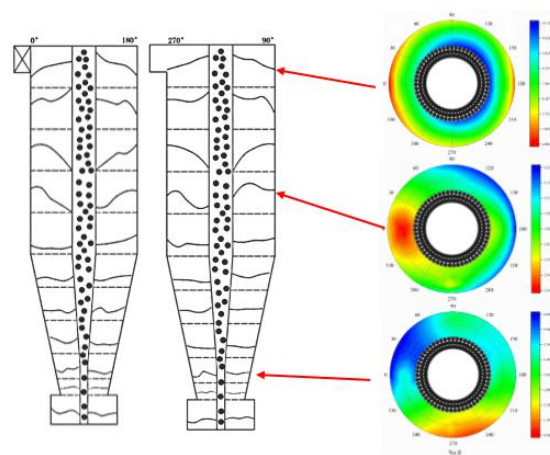


Fig.4 The dimensionless axial velocity distribution

参考文献

- [1] Albert Podgórski, Bałazy A, Leon Gradoń. Application of nanofibers to improve the filtration efficiency of the most penetrating aerosol particles in fibrous filters[J]. Chemical Engineering Science, 2006, 61(20):6804-6815.
- [2] P. V. Aravind, W. De Jong, Evaluation of high temperature gas cleaning options for biomass gasification product gas for Solid Oxide Fuel Cells, Prog. Energy Combust. Sci. 38 (2012) 737-764.
- [3] 魏耀东,燕辉,时铭显.重油催化裂化装置沉降器顶旋风分离器升气管外壁结焦原因的流动分析[J].石油炼制与化工, 2000(12):36-39.
- [4] 宋健斐,魏耀东,时铭显.催化裂化装置沉降器内结焦物的基本特性分析及其形成过程的探讨[J]. 石油学报(石油加工), 2006, 22(002):39-44.
- [5] 陈建义.切流返转式旋风分离器分离理论和优化设计方法的研究[D]. 2007.
- [6] 宋健斐,魏耀东,时铭显.蜗壳式旋风分离器气相流场的非轴对称特性的模拟[J].化工学报, 2005(08):1397-1402.
- [7] 赵建涛,黄戒介,吴晋沪,等.错流移动颗粒床高温除尘模拟和操作特征分析[J]. 中国电机工程学报, 2007(14):18-23.

基于压力信号和数字图像分析的振动流化床气泡特性研究

张亚东¹, 赵跃民^{1,*}, 董良¹, 段晨龙¹, 杨旭亮¹, ...

¹中国矿业大学, 江苏省徐州市大学路1号, 徐州, 221116

*Email: zyd0729@cumt.edu.cn

摘要正文:

本文利用数字图像处理 and 信号分析方法研究鼓泡流态化状态下, 气泡在振动-气流力场中的动力学特征及振动能量对气泡运动行为的抑制作用机理。通过对压力信号和气泡特征图像的对比分析, 结果表明, 气泡的聚并行为会引起压力信号产生突变峰值, 破裂行为会造成压力信号的降低。当床层完全流化, 高幅值的压力信号主要分布在0-12Hz范围内, 且幅值范围为480-1354 Pa。当床层剧烈鼓泡时, 0-12Hz内气泡引起的压力信号幅值降低, 且高幅值压力信号的频带向高频带转移。振动能量的引入对气泡的动力学行为具有重要的影响, 且当振动频率 $f=20\text{Hz}$, $v=0.32\text{m/s}$, $A=2\text{mm}$ 时, 床层底部气泡的形状多为扁条状, 且气泡数量分布少, 气泡尺寸小, 床层空隙率和空隙率标准差均较低, 床层流化质量均匀稳定。

关键词: 振动流化床; 气泡; 信号分析; 图像分析

参考文献

- [1] F. Xu, K. F. Ren, and X. Cai Extension of geometrical-optics approximation to on-axis Gaussian beam scattering. I. By a spherical particle. *Appl. Opt.* 2006, 45: 4990-9.
- [2] 薛明华, 苏明旭, 蔡小舒, 超声多信号融合表征颗粒两相流实验研究[J]. *上海理工大学报*, 2009, 31(1):35-44.
- [1] J.R.V. Ommen, S. Sasic, J.v.d. Schaaf, et al, Time-series analysis of pressure fluctuations in gas-solid fluidized beds – A review, *International Journal of Multiphase Flow*. 2011, 37: 403-428.
- [18] X. Yang, Y. Zhang, Y. Yang, et al, Fluidization of Geldart D type particles in a shallow vibrated gas-fluidized bed, *Powder Technology*, 2017, 305: 333-339.
- [19] A. Acosta-Iborra, F. Hernández-Jiménez, M.d. Vega, et al, A novel methodology for simulating vibrated fluidized beds using two-fluid models, *Chemical Engineering Journal*, 2012, 198:261-274.
- [20] A. Acosta-Iborra, C. Sobrino, F. Hernández-Jiménez, et al. Experimental and computational study on the bubble behavior in a 3-D fluidized bed, *Chemical Engineering Science*, 2011, 66:3499-3512.
- [21] P. Vishwanath, S. Das, D. Fabijanic, et al, Qualitative comparison of bubble evolution in a two dimensional gas-solid fluidized bed using image analysis and CFD model, *Materials Today Proceedings*, 2017, 4: 5290-5305.

论文编号：03-040

Study on bubble characteristics in a vibrated fluidized bed based on pressure signal and digital image analysis

Yadong Zhang¹, Yuemin Zhao^{1,*}, Liang Dong¹, Chenlong Duan¹, Xuliang Yang¹

¹School of Chemical Engineering & Technology, China University of Mining & Technology, Xuzhou, 221116,

Abstract:

Through a comparative analysis of the pressure signal and the bubble characteristic images, the results show that the bubble coalescence causes a sudden peak value of the pressure signal, and fracturing causes a decrease of the pressure signal. When the bed is fully fluidized, the high-amplitude pressure signal is mainly distributed in the range of 0-12 Hz, and the amplitude range is 480-1354 Pa. When the bed bubbles violently, the pressure signal amplitude caused by the bubbles in 0-12 Hz decreases, and the frequency band of the high-amplitude pressure signal shifts to a high-frequency band. When $f = 20\text{Hz}$, $v = 0.32\text{m/s}$, and $A = 2\text{mm}$, the shape of bubbles at the bottom of the bed is mostly a flat strip, and the number of bubbles is less evenly distributed, the size of the bubbles is small, the bed voidage and its standard deviation is low.

脉动气固流化床最小流化速度研究

董良^{1,2}, 李妍娇^{1,2,*}, 赵跃民^{1,2}, 周晨阳^{1,2}

¹中国矿业大学煤炭加工与高效洁净利用教育部重点实验室, 江苏徐州, 221116

²中国矿业大学化工学院, 江苏徐州, 221116

*Email: dongl@cumt.edu.cn

摘要正文:

流化床技术在化工和选煤领域起着至关重要的作用。为提高流化稳定性, 将气流周期性地引入气固流化床中, 形成脉动气固流化床。最小流化速度作为主要的流化特性, 可以反映脉动流化床中颗粒处于临界流化状态的变化规律, 直接影响着后续床层中两相分布的研究。现有的脉动流化床中最小流化速度研究尚缺少深层次的理论研究。因此, 本文采用离散单元法中的软球模型来表征堆积颗粒状态, 建立弹簧-阻尼模型和脉动气流作用下的共振力模型。结合颗粒的受力分析, 推导出适用于脉动气固流化床的最小流化速度理论模型。通过试验对最小流化速度理论模型进行了修正, 修正后的理论模型对最小流化速度的预测误差控制在15%内, 预测精度较好, 为脉动流化床的工业化应用提供理论指导。

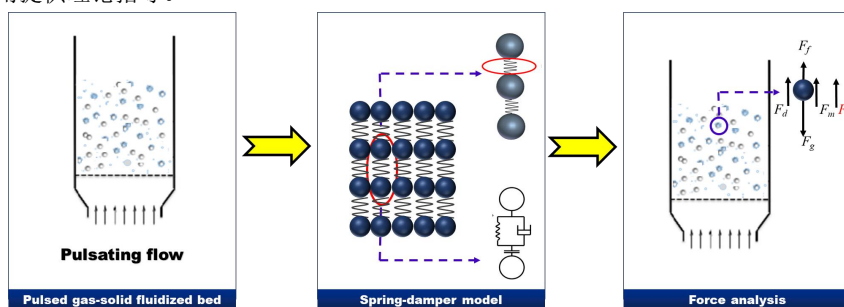


Fig. 1 The spring-damper model and forces analysis on a particle

关键词: 最小流化速度; 脉动流化床; 共振力; 脉动频率

参考文献

- [1] W. Ge, Q. Chang, C. Li, J. Wang. Multiscale structures in particle–fluid systems: Characterization, modeling, and simulation. *Chem. Eng. Sci.* 2019, 198; 198-223.
- [2] L. De Martín, C. Ottevanger, J.R. van Ommen, M.O. Coppens. Universal stability curve for pattern formation in pulsed gas-solid fluidized beds of sandlike particles. *Phys. Rev. Fluids.* 2018, 3; 34303.
- [3] F. Fotovat, X.T. Bi, J.R. Grace. Electrostatics in gas-solid fluidized beds: A review. *Chem. Eng. Sci.* 2017, 173; 303-334.
- [4] K. Wu, V. Francia, M.O. Coppens. Dynamic viscoplastic granular flows: A persistent challenge in gas-solid fluidization. *Powder Technol.* 2020, 365; 172-185.

Study on the influence of pulsed airflow on cohesive powders flow properties

Lizhuo Zhu, Haifeng Lu, Haifeng Liu*

Shanghai Engineering Research Center of Coal Gasification, East China University of Science and Technology, No. 130 Meilong Road, Shanghai, 200237

*Email: hfliu@ecust.edu.cn

Particulate solids are widespread in many industries, and the bottleneck of powder processing and production operations is the flow of cohesive powder. Cohesive powders have strong interparticle forces, extremely poor fluidity, and cannot flow smoothly, which greatly restricts the large-scale industrial development [1]. It is of great significance to develop methods to improve the fluidity of cohesive powders. Pulsed airflow has been adopted in fluidization to enhance mass and heat transfer and proved to be effective [2]. But it has not been used to improve the fluidity of cohesive powders. In this paper, we modified the air supply system of the FT4 rheometer, combined with its blade control system and mechanical detection system, and carried out the fluidity test of cohesive powders under pulsed airflow. The flow energy and downward drag force are taken to characterize the fluidity. The effects of pulse frequency, pulse amplitude, and duty cycle of pulsed airflow on the flow properties of cohesive powders are analyzed. This research provides new insights for external field excitation to improve the fluidity of cohesive powders.

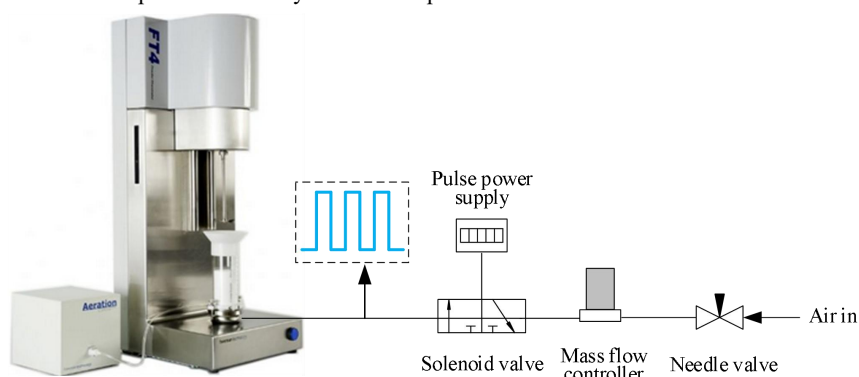


Fig. 1. Sketch of experimental setup.

References

- [1] Ghadiri M, Pasha M, Nan W, et al. Cohesive Powder Flow: Trends and Challenges in Characterisation and Analysis. *KONA Powder and Particle Journal*, 2020, 37: 3-18.
- [2] Saidi M, Basirat Tabrizi H, Grace J R. A review on pulsed flow in gas-solid fluidized beds and spouted beds: Recent work and future outlook. *Advanced Powder Technology*, 2019, 30(6): 1121-1130.

催化裂化再生器气固流动特性模拟研究

程锋, 李建, 刘梦溪*, 严超宇

中国石油大学(北京)重质油国家重点实验室, 北京, 102249

*Email: mengxiliu@sina.com

摘要正文:

再生器内的气固流化质量对催化剂的烧焦强度和装置的长周期稳定运行有着重要的影响,某厂同轴式催化裂化再生器在运行过程中床层温度波动较大,密相床层密度分布不均,且两侧主风分布器压降差异较大,严重影响装置的长周期平稳运行和产品收率。针对以上存在的问题,采用数值模拟的方法对再生器的风分布器布气性能、循环催化剂的分配和再生催化剂抽出位置对密相床催化剂分布的影响进行研究。

本文研究对象是同轴式单段再生催化裂化再生器,密相直径为8550 mm,高度为8000 mm,稀相直径11050 mm,密相部分主要构件有待生剂套筒及分配器、两组外取热器、再生剂抽出口和7组两级旋风分离器料腿。模拟中采用的固体颗粒密度为FCC催化剂,平均粒径为75mm,密度为1500kg/m³,流化介质为690 °C, 293 kPa(表压)的空气,密度为1.3732 kg/m³,粘度为4.153×10⁻⁵ kg/(m·s)。考虑到再生器内构件较多布置不规则,采用ICEM生成非结构网格,并对局部网格进行加密,网格数量为715万。模拟流动时间为21s,床层在13s完全流化,再经8s稳定后,取13到21s之间的数据进行统计平均。

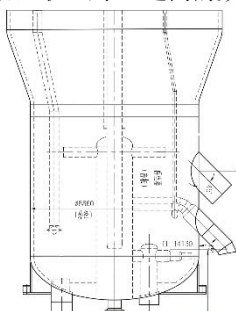


Fig 1. Schematic diagram of regenerator

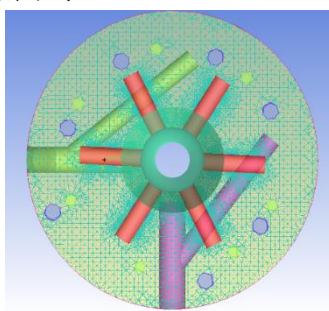


Fig 2. Grids of regenerator

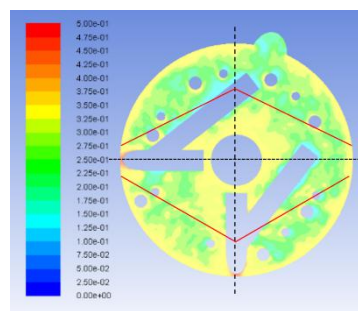


Fig 3. Contours of solid holdup

通过对结果的分析,待生催化剂主要分配在径向截面的内侧,远大于分配到外侧的催化剂量,导致床层密度在径向分布不均;两组外取热循环催化剂主要分配在第二、第四象限,且分布于内侧的催化剂量是外侧的16.5倍。从模拟数据可以看出,外取热分配器下部500 mm截面的第二、第四象限内侧的密度高于外侧密度。再生剂抽出口位于第一象限,抽出量为1400 t/h,由于抽出口位于第一象限,距第三象限最远,第三象限的催化剂需要流经第二、四象限,才能到达抽出口,所以第三象限催化剂流出再生器的阻力也最大,密度相对较高,而第一象限受再生剂抽出口影响较大,密度比其他三个象限都低。同时抽出口距第四象限更近,第四象限内侧密度相较于其他象限密度更低。根据模拟研究结果,对催化剂分配器和再生器抽出口位置提出改造建议,当抽出口位于再生器底部时,抽出口更靠近截面中心,催化剂由各个象限流入抽出口时不容易产生偏流,催化剂分配也更加均匀。

关键词: 气-固流化床; 数值模拟; 结构优化; 固含率

参考文献

- [1] LV X, LI H, ZHU Q. Simulation of gas-solid flow in 2D/3D bubbling fluidized beds by combining the two-fluid model with structure-based drag model [J]. Chemical Engineering Journal, 2014, 236(1): 149-57.
- [2] 李凌霄.工业催化裂化装置再生器环流强化技术的 CFD 模拟研究[D]; 中国石油大学(北京), 2019.
- [3] Mengxi Liu, Chunxi Lu. Hydrodynamic Characteristics and Mixing Characteristics of a New Type Particle Mixer. J Chem. Eng.Jpn. 2015 (48), 564-574.

- [4] 严超宇,卢春喜,王德武,等.气-固环流反应器内瞬态流体力学特性的数值模拟[J].化工学报,2010,61(9):2225-34.
- [5] 卢春喜. 催化裂化流态化技术 [M]. 中国石化出版社, 2002.

论文编号: 03-044

Fluidization characteristics for particles with different size distributions in a gas-solid dense-phase fluidized bed

Yanhong Fu^{a, b}, Yuemin Zhao^{a, b*}, Liang Dong^{a, b}, Wei Chen^{a, b}

(a Key Laboratory of Coal Processing & Utilization (China University of Mining and Technology), Ministry of Education., Xuzhou 221116, Jiangsu, P.R.China.

b School of Chemical Engineering & Technology, China University of Mining and Technology, Xuzhou, 221116, Jiangsu, P.R.China)

*Email: ymzhao_paper@126.com

Abstract:

The gas-solid dense-phase fluidized bed includes a complex multiphase fluid-particle system, different complex exchanges significantly affect the stability of the fluidized bed. To elucidate the characteristics of fluidization in a gas-solid dense-phase fluidized bed, this study used experimental performance tests to obtain the static density characteristics, the reattachment and flow characteristic of the dense medium. The results indicate that the bulk density of the dense medium increases first and then decreases with the increase of particle size. The air rate difference is used to quantify the wall attachment characteristics of dense medium and the average pressure gradient in the axial direction of the bed is approximately 20 Pa/mm under the fluidization results. At the same settlement location, with the decrease of fluidization number, the settlement velocity of large and small particles becomes slower, the boundaries of settlement displacement and location probability are gradually confused, and the falling velocity of particles with a radius of 20 mm is faster than that of 15 mm. This work also established theoretical basis for regulating the stability and separation characteristics of gas-solid dense-phase fluidized bed.

Keywords: Fluidized bed, Different size particles, Fluidization characteristics, Flotation bubbles, Settling motion

ECT技术对流化床内流体流动的三维图像重建研究

申敬敬^{1,2}, 孟霜鹤¹, Wuqiang Yang³, 叶茂^{1,*}

¹中国科学院大连化学物理研究所, 辽宁省大连市, 116023

²中国科学院大学, 北京, 100049

³ The University of Manchester, Manchester, M13 9PL, UK

*Email: maoye@dicp.ac.cn

摘要正文:

在固体颗粒流态化过程中, 传热传质效率高, 因此流态化广泛存在于化工、电力、冶金、医药等各行各业中。但是其也存在着流动形态复杂多变等特点, 流动参数随时间变化较大。因此实时测量气固两相流动力学参数及确定其流动形态对于系统设计和监控有着十分重要的作用。实际的流态化过程中是一个三维的过程, 为了在不干扰流动的情况下, 得到流化床内部的流动信息, 我们选择了电容层析成像 (ECT) 对流态化过程进行研究。

使用ECT技术重建测量区域的3D图像主要包括两种方式, 如图1所示。一种是利用单层电极传感器, 它的原理是将连续时间内得到的2D图像进行插值或叠加从而得到3D图像, 前提是假设被测物质在轴向上均匀分布。另一种是利用多层电极传感器, 采集不同层间电极的电容信号, 并用其直接进行三维可视化。

每一种方式都有各自的优势, 但在应用到实际的测量过程时也出现了很多问题。我们分别对这两种方式进行了讨论, 用已知形状的简单模型进行测试, 优化技术参数, 提高重建的3D图像的质量。并将优化后的多层电极传感器技术初步应用到了流化床测量过程中。

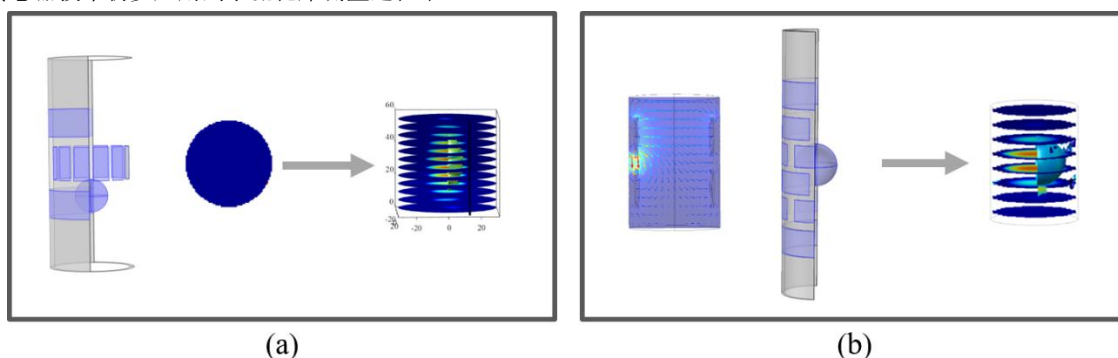


Fig. 1 3D image reconstruction with ECT technique.

关键词：三维图像重建；ECT；流化床

气固流化床光纤脉动信号的R/S分析

蔡敏，牛犁，褚智敏，刘梦溪*

中国石油大学（北京）重质油国家重点实验室，北京，102249

*Email: mengxiliu@sina.com

摘要正文：

气固流化床反应器由于传质、传热效率高，可流化的颗粒尺寸分布范围广，结构简单等优点，被广泛应用于石油、化工等行业。流化床内的气固两相流具有动态时空多尺度结构，波动信号中蕴含了流化床内大量的动态信息，越来越多的学者将R/S分析应用到流化床信号的研究中来解释两相流动行为。研究发现，若信号的R/S分析结果的痘形图不是以其Hurst指数H值为斜率的直线，而是出现了波动，则表明信号存在周期成分，且周期成分越强，波动越大。

本文采用的实验装置为气固流化床冷模实验装置。装置总高5460mm，床体尺寸为 $\Phi 300\text{mm} \times 7\text{mm}$ ，高2900mm。实验采用的固体颗粒为FCC催化剂和FCC催化剂-硅微粉（5%）混合颗粒，气体介质为常温空气，表观气速范围为0.1m/s至0.5m/s，其中从鼓泡床到湍动床的过渡速度为0.4m/s。实验采用PV-6D型颗粒浓度、速度两用测量仪分别测量了两种颗粒床层不同轴、径向位置处的瞬时固含率光纤脉动信号。

本文采用R/S分析对流化床的光纤脉动信号进行解耦，绘制痘形图、计算Hurst指数H值。结果显示痘形图并非完全贴合其以H值为斜率的直线，而是存在波动，表明气固流化床光纤脉动信号中存在周期成分。同时采用基于统计矩的多重解耦方法对光纤脉动信号进行解耦，通过对两种解耦结果进行对比，发现气固流化床光纤脉动信号中的周期成分代表了流化床中的气泡。通过H值和光纤脉动信号的标准差考察了表观气速、床层径向位置，以及颗粒粒径对流化床流化质量的影响。研究发现，混合颗粒的H值小于FCC颗粒，随着床层径向位置的增加，H值逐渐增大，信号标准差逐渐减小。在混合颗粒鼓泡床中，随着表观气速的增大，H值逐渐减小，信号标准差逐渐增大，到达湍动床后，随着表观气速的增大，H值逐渐增大，信号标准差逐渐减小。表明在气固流化床中，床层中心处的气泡波动幅度大于边壁处，并且混合颗粒流化床比FCC颗粒流化床具有更好的流化质量。在鼓泡床中，气速的增大会使得气泡的运动越来越剧烈，持续升高气速，信号波动幅度会达到一个极大值，床层进入湍动床，然后随着气速的升高而减小。

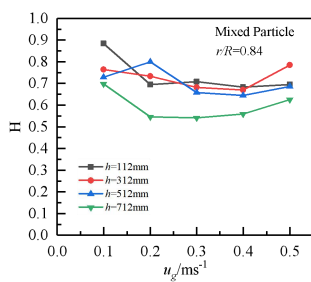


Figure 1. H as a function of the superficial gas velocities in various bed heights of mixed particle

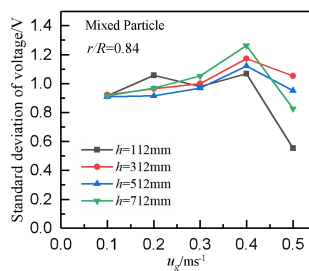


Figure 2. Standard deviation of voltage as a function of the superficial gas velocities in various bed heights of mixed particle

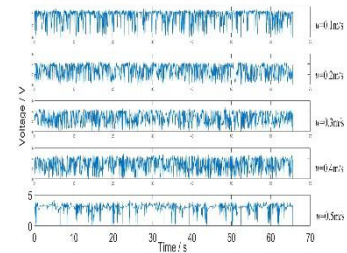


Figure 3. Voltage as a function of the superficial gas velocities in $h=112\text{mm}$ of mixed particle

关键词：R/S分析；Hurst指数；光纤脉动信号；气固流化床

参考文献

- [1] B. B. Mandelbrot, J. R. Wallis, Some long-run properties of geophysical records[J]. Water Resources Research, 1969, 5(2): 321-340.

- [2] B. B. Mandelbrot, J. R. Wallis, Robustness of the rescaled range R/S in the measurement of noncyclic long run statistical dependence[J]. *Water Resources Research*, 1969, 5(5): 967-988.
- [3] L. Niu, Y. H. Huang, Z. M. Chu, M. Cai, and M. X. Liu. Identification of Mesoscale Flow in a Bubbling and Turbulent Gas-Solid Fluidized Bed [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2019, 58, 8456-8471.
- [4] 金涌, 流态化工程原理[M], 清华大学出版社, 2002.

Revealing the chemical reaction properties of SiHCl_3 pyrolysis by ReaxFF reactive molecular dynamics method

Yanping Li^{1,2}, Dazhou Yan^{1,2,3,*}, Tao Yang^{1,2}, Guosheng Wen^{1,2}, Xin Yao¹

¹ China ENFI Engineering Corporation, Beijing 100038, PR China

² National Engineering Laboratory of Polysilicon Manufacturing Technology, Luoyang 471000, PR China

³ China Silicon Corporation LTD., Luoyang 471000, PR China

*Email: yandz@enfi.com.cn

Abstract:

SiHCl_3 is widely used to deposit polysilicon for photovoltaic and electronic industry. In this work, with help of ReaxFF MD, mechanisms of SiHCl_3 pyrolysis were systematically investigated by long-time isothermal simulations, aimed at confirming dominant intermediates and effects of temperature. It was found that pyrolysis temperature affected the complexity of reaction environment, including the total number of elementary reactions, and kinds of pyrolyzates. Relatively large and complex pyrolyzates were generated at low temperature, while small and simple ones were appeared at high temperature. Meanwhile, the total number of elementary reactions at low temperature was much more than that at high temperature. Beyond the common understanding, SiHCl_3 appeared in the dominant pyrolyzates (SiHCl_3 , $\text{Si}_2\text{H}_2\text{Cl}_6$, SiHCl_4 , $\text{Si}_2\text{H}_2\text{Cl}_5$, HCl), and acted not only as a reactant, but also as a product to establish the complicated reaction network. This work uncovers the overall scenario and detailed reactions of SiHCl_3 pyrolysis, and provides guidance for polysilicon deposition process.

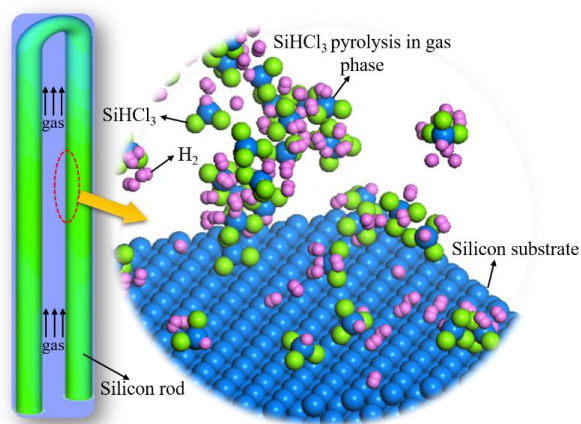


Figure 1. The chemical vapor deposition process of polysilicon.

强化双颗粒混合-分离的两级化学链燃料反应器流动特性

宋鸣航¹, 王涛¹, 刘晶晶¹, 刘永卓^{1*}, 郭庆杰²

¹ 青岛科技大学化工学院清洁化工过程山东省重点实验室, 山东省 青岛 266042

² 宁夏大学煤炭高效利用与绿色化工国家重点实验室, 宁夏省 银川 750021

*E-mail: yzliu@qust.edu.cn

摘要正文:

化学链是一种新型的化学转化和能源利用技术, 用于煤炭资源的清洁利用可以降低烟损、实现 CO₂ 低耗捕集、同时抑制 NO_x 产生^[1]。因此, 煤化学链燃烧/气化引起了广泛关注^[2], 化学链在制氧、制氢、发电、化学品生产工艺中也有非常大的潜力^[3]。固体燃料的化学链燃烧仍面临许多挑战^[4]: 1) 载氧体-固体燃料颗粒之间的良好混合和反应; 2) 挥发分从燃料反应器的逸出降低了 CO₂ 捕集效率; 3) 载氧体颗粒与未反应煤焦的分离。针对以上挑战, 本实验室设计了一种新型的强化双颗粒混合-分离的两级化学链燃料反应器, 新型串行流化床将燃料反应器设计为不同流型的两段, 即快速的混合反应段和低速的未反应碳分离段。混合反应段的射流进料强化了物料的混合, 可以实现颗粒性质差异大的载氧体-固体燃料间的充分混合反应; 未反应碳分离段代替了碳捕获器的作用, 降低了反应装置的复杂性。

基于新设计的串行流化床, 在实验室搭建了一套冷模装置(如图1所示), 并对其流动和分离特性进行了研究。研究表明: 冷态系统连续运行平稳, 当 U_{FR-1} 从 4.82 m/s 到 8.03 m/s, U_{FR-2} 从 0.131 m/s 到 0.218 m/s, U_{AR} 从 0.175 m/s 到 0.262 m/s, 载料量 9-15 kg 之内装置皆可稳定运行。快速的混合反应段固含率 $\epsilon_s > 0.1$, 属于高密度流化状态, 有利于载氧体-固体燃料间的反应。另外, 颗粒浓度随着表观气速增加而降低, 随着载料量的增加而增大, 固体循环率随着表观气速和载料量的增加而增大, 但会受上流动密封阀锁料的影响。

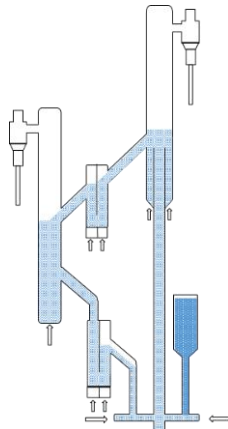


Fig. 1 Schematic diagram of cold model

关键词: 化学链燃烧, 固体燃料, 两级燃料反应器, 射流, 流动特性

参考文献

- [1] 刘永卓, 郭庆杰, 化学链基础理论及其在节能减排中的应用[J]. 工程研究-跨学科视野中的工程, 2015, 7 (04): 404-412.
- [2] 刘永卓, 郭庆杰, 田红景, 煤化学链转化技术研究进展[J]. 化工进展, 2014, 33 (06): 1357-1364.
- [3] 史晓斐, 杨思宇, 钱宇, 化学链技术在煤炭清洁高效利用中的研究进展[J]. 化工学报, 2018, 69 (12): 4931-4946.
- [4] Tao S, Laihong S. Review of reactor for chemical looping combustion of solid fuels[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2018, 76: 92-110.

华北石化重油催化裂化再生器分布器的数值模拟

李建¹，程锋²，刘梦溪*，严超宇

^{1,2} 中国石油大学（北京）重质油国家重点实验室，北京，102249

*Email: mengxiliu@sina.com.cn

摘要正文：

华北石化重油催化裂化装置内发生流化质量差、床层密度波动大、操作不平稳的现象，该现象与主风分布器的布气效果密切相关，因此对主风分布器的流场进行模拟研究，寻找气体偏流的关键原因，并提出解决方案。

该装置采用的是树枝状气体分布器，一般用于大型流化床。本研究采用数值模拟的方法，对该分布器进行几何构建与网格划分，分布器为南北对称结构，喷嘴总数为1110个，经过两次改造后堵去204个喷嘴，实际有效喷嘴为906个。模拟条件为纯气相流场，主管入口压力为370 kPa，分布器北侧压降为11.7 kPa，考虑到分布器结构的对称性，选择分布器的北侧作为数值模拟的计算模型。

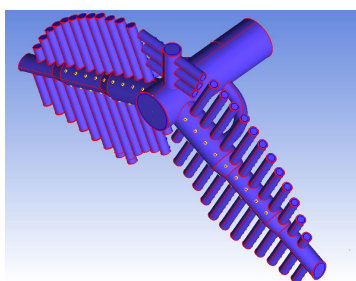


Fig. 1 Geometric model of distributor

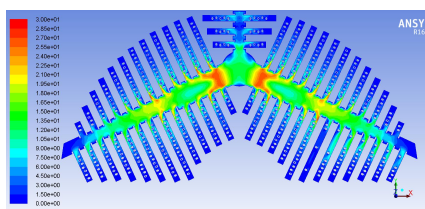


Fig. 2 Velocity nephogram

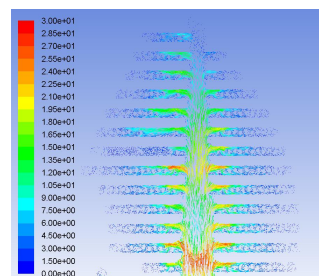


Fig. 3 Velocity vector diagram

模拟结果表明，由于分支管长度、喷嘴数量分布不均，当气体经过喷嘴数量多的长分支管时，流量突然增大，而短分支管的流量很低，但是平均到每个喷嘴后，长分支管上的喷嘴的气体流量又变小，导致长短分支管上的喷嘴出口速度分布不均匀；长分支管和短分支管相比，在同一位置编号的喷嘴，短分支管上喷嘴出口气流平均速度较大；气流在距离分支管入口320 mm内的迎风侧形成低压区，背风侧形成回流区，并在该处发生转向，导致偏流现象；各分支管的1号喷嘴处于分支管气体的回流区，会导致喷嘴内涡流严重，引起颗粒回流，进而影响气体分布。

提出以下改造建议：适当减小各分支管的长度差以及喷嘴的数量差，减少使气体流量分配不均的因素；适当增加支撑弯管，使支管中后段也能得到一定的气体补充，改善支管末端气体流量过少的问题；适当增加短分支管上的喷嘴数，降低短分支管喷嘴的平均风速；将各分支管上1号喷嘴的位置设置在距离分支管入口320 mm外的区域，使其处于非回流区，减少由该喷嘴内的涡流引起的颗粒回流。

关键词：气体分布器；偏流；流场；数值模拟

参考文献

- [1] 卢春喜, 王祝安. 催化裂化流态化技术[M]. 北京: 中国石化出版社, 2002: 64-99.
- [2] 杨光福, 孙文勇. 重油催化裂化装置再生器主风分布器的磨损及其危害分析[J]. 安全, 2010, 31(10): 11-14.
- [3] 李旭光. 双列叶片式气体分布器的性能研究[D]: (硕士学位论文). 天津: 天津大学, 2007.
- [4] Kenneth E P, Quasim H A, Ahmed H et al. Gas distribution in shallow packed beds[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 1993, 32(10): 2408-2417.
- [5] Méndez C, Irusta R, Castro F et al. Study of the gas velocity field generated by a multi-tuyere fluidization gas distributor in the absence of particles[J]. Powder Technology, 1998, 98(1): 54-60.

吡啶碱合成流化床反应器气固体系接触效率

周帅帅^{1*}, 乔聪震¹, 刘梦溪², 卢春喜²

¹河南大学, 河南省开封市龙亭区, 475003

²中国石油大学(北京), 北京市昌平区府学路18号, 102249

*Email: 10150173@vip.henu.edu.cn

摘要正文:

吡啶碱合成过程一般在流化床反应器内进行^[1-4]。其中, 流化床内气、固两相的接触效率对其反应结果具有重要影响^[5]。本文通过采用三套吡啶碱合成反应系统进行实验, 考察了吡啶碱合成反应器内气、固接触效率。本文定义了表观接触效率因子, 并用其来量化气、固体系的接触效果。在定义表观接触因子过程中, 本文建立理想反应器模型。基于实验结果和理想反应器模型, 本文获得了三套反应系统的表观接触因子。对于实验室规模反应系统, 其流动型态为湍流床, 对应的平均表观接触因子为0.55。对于中试规模反应系统, 其流动型态为快速床, 对应的平均表观接触因子为0.86。对于工业规模的反应系统, 其流动型态为鼓泡床, 对应的平均表观接触因子为0.19。基于此, 本文给出了表观接触因子的预测模型, 模型预测平均误差为8%。

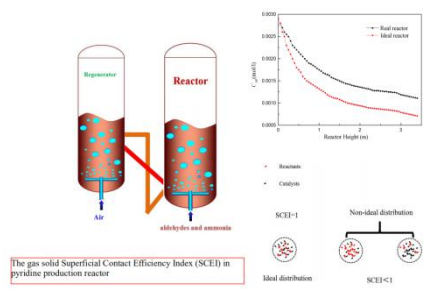


Fig. 1 Gas solid contact efficiency in pyridine production reactors

关键词: 吡啶碱; 流化床反应器; 接触效率; 模型预测

参考文献

- [1] F. Xu, K. F. Ren, and X. Cai Extension of geometrical-optics approximation to on-axis Gaussian beam scattering. I. By a spherical particle. *Appl. Opt.* 2006, 45: 4990-9.
- [2] K. S. K. Reddy, I. Sreedhar, and K. V. Raghavan Kinetic studies on vapour phase pyridine synthesis and catalyst regeneration studies. *Can. J. Chem. Eng.* 2011, 89: 854-863.
- [3] S. Zhou, Z. Liu, D. Qin, X. Yan, M. Liu, C. Lu, and G. Jin Investigation of pyridine synthesis in a fast fluidized bed reactor. *Ind. Eng. Chem. Res.* 2018, 57, 1179-1187.
- [4] S. Zhou, S. Liu, Y. Wei, X. Li, C. Lu, M. Liu, and X. Bi Coupled fluidized bed reactor for pyridine synthesis. *Ind. Eng. Chem. Res.* 2018, 57, 7466-7475.
- [5] S. Zhou, Z. Liu, X. Yan, D. Qin, M. Liu, C. Lu, and G. Jin Optimal reaction conditions for pyridine synthesis in a riser reactor. *Chin. J. Chem. Eng.* 2018, 26, 1499-1507.
- [6] R. W. Breault A review of gas-solid dispersion and mass transfer coefficient correlations in circulating fluidized beds. *Powder Technol.* 2006, 1-2: 9.

多旋臂气液旋流分离器（GLVS）分离特性研究

李子轩，周闻，鄂承林*，卢春喜*

中国石油大学（北京）重质油国家重点实验室，北京，102249

*E-mail: akari.i@qq.com

摘要正文：

随着石油资源的日益减少，以及人类对保护生态环境要求的严格，世界对洁净液体燃料的需求急剧增加，为了满足这种需求，各国科研工作者致力于研究开发洁净燃料油生产技术，其中以费托合成(Fischer-Tropsch Synthesis)技术最受瞩目^[1]。但目前学者普遍研究费托合成工艺路线，在设备方面开展的研究工作较少。费托合成分离装置中存在着许多待解决的问题，严重制约了费托合成装置的长期安稳运行，已成为装置满负荷运行的瓶颈。因此，一种适合其操作参数的新型气液分离装置的需求已经刻不容缓。

SVQS系统有着分离效率高、处理量大、各旋流臂布气均匀和不易结焦等优点^[2]，可以解决费托合成工艺中使用的循环换热分离器结蜡堵塞和分离性能低的问题^[3]。故此考虑将SVQS系统的经验借鉴到煤制油领域，SVQS应用到气液分离时，通过增大进料管直径和旋流臂出口面积来降低进料管和旋流臂的出口流速，以期避免液体的破碎现象，使液体的粒径分布在进入分离器时保持相对稳定^[4]。参照SVQS气固旋流快分系统的设计方法，结合气液分离体系，设计出了多旋臂气液旋流分离器GLVS-1。

通过大型冷模实验来研究GLVS的总压降和分离效率，分析了旋流臂出口流速和液相浓度对分离性能的影响，并根据实验结果和现象进行了相应的结构优化。实验结果表明，隔流筒和隔流盖板结构不适用于气液分离设备，这会加剧气流的湍流强度，同时引起液滴的大量夹带，不利于分离过程的进行。优化后的GLVS-2去除了隔流筒、隔流盖板结构并将出口管（竖直）管径增加100 mm，与GLVS-1相比，优化后总压降降低50%，分离效率提升10%。GLVS-2会在旋流头顶部形成水环结构，被夹带的液滴会增加聚并形成大液滴或进入液流的可能性，有利于二次分离的进行。液相浓度的增加会使分离效率略微提升，但在达到临界浓度后，气体速度就成为了影响分离效率的重要因素。GLVS-2在旋流臂出口流速为16.95 m/s时的分离效率相较其它气速降低约5%，此时夹带高度接近出口管（水平），会使分离效率降低。优化后的GLVS-3增加了320 mm的进料管内插深度，在高气速下夹带高度远离了出口管（水平），降低了夹带的不良影响，在总压降不变的同时使GLVS-3能够在大气速、高浓度的操作条件下保持高效稳定的分离性能。GLVS设备压降与旋流臂出口流速呈现出良好的2次抛物线关系，与传统旋风分离器压降方程相似。可以通过线性拟合得到 Eu 数，且拟合关系良好，说明设备压降具有较好的可预测性。同时GLVS设备总压降主要受旋流臂出口流速影响，液相浓度对总压降的影响较小。

关键词：气液分离；分离效率；总压降；GLVS

参考文献

- [1] 姜岳林. 费托合成工艺研究进展及现状[J]. 中国化工贸易, 2018, 010(028):84.
- [2] 卢春喜, 范怡平, 刘梦溪, et al. 催化裂化反应系统关键装备技术研究进展[J]. 石油学报(石油加工), 2018, v.34(03):15-28.
- [3] 刘吉平, 罗文保. 费托合成循环换热分离器运行中存在问题及技术改造[J]. 科技创新与应用, 2017(26):46-47.
- [4] 金向红, 金有海, 王建军, et al. 气液旋流器的分离性能[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2009, 33(5):124-129.

双层喷嘴进料提升管内气固流动混合特性的大型冷模实验研究

许峻¹, 范怡平¹, 闫子涵¹, 卢春喜¹

¹ 中国石油大学(北京)重质油国家重点实验室, 北京 102249

摘要正文:

为了改善催化裂化工艺的产品分布, 提出了一种双层喷嘴提升管进料方案, 即在原有向上进料的喷嘴层下方加设2个对称的“副喷嘴”, 且副喷嘴采用向上和向下两种结构方案。通过一套大型冷模实验装置, 采用光纤法和连续示踪法, 考察上述两种进料结构组合对提升管进料段内气固两相流动混合状况的影响。实验结果表明, 与传统单层喷嘴进料结构相比, 两种双层喷嘴结构均能缩短进料段影响区, 加快气固相混合接触。同时向下的副喷嘴射流对上层主喷嘴射流影响较小, 结合Kutta-Joukowski横向力和提升管内射流二次流理论^[1], 向下的副喷嘴二次流有向上、向中心运动的趋势, 有助于将边壁催化剂颗粒向提升管中心输送。

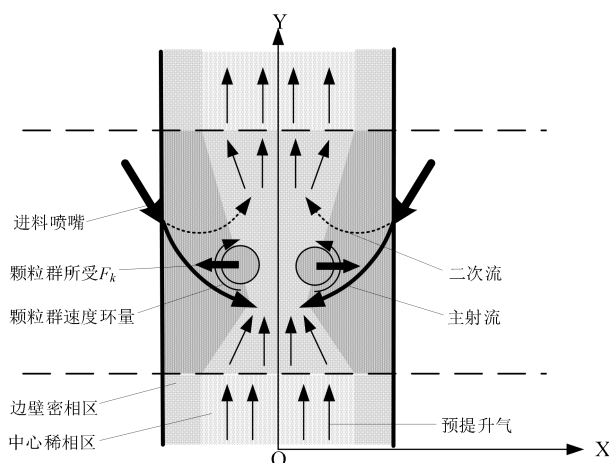


Fig. 1 Schematic diagram of gas-solid phase mixing process of nozzle upward riser feed section

关键词：提升管；双层喷嘴；射流二次流

参考文献

[1] 许峻,范怡平,钱筱婕,等. 催化裂化提升管进料段喷嘴射流运动-扩散特性的分析[J]. 化工学报, 2020, 71(4): 1450-1459.

流化焦化反应器内新型焦粉分配器的结构优化

苗雨¹,刘梦溪^{1*}

中国石油大学（北京）重质油国家重点实验室，北京，102249

*E-mail: mengxiliu@sina.com

摘要正文：

近年来我国炼化行业加工原油日趋重质化和劣质化，同时我国对环境保护的要求也在不断提高，这些都对重油加工工艺提出了更高的挑战和要求^[1]，因此提高重油加工深度、增加轻质石油产品成为了当前炼油工业的重大问题^[2]。重油加工工艺中，焦化工艺是处理油砂沥青、委内瑞拉油、超稠油等劣质重油的理想手段，具有工艺简单、投资低、不需要氢气等优点，是世界上使用最为广泛的渣油升级转化技术。灵活焦化具有连续性生产、原料适应性强、连续操作、工艺灵活性好、装置可靠性高、液收高、经济效益好、环境污染小等优点^[3]。但是在沉降器结焦、热焦粉的分布、进料、高效汽提等一系列问题上，灵活焦化仍存在着一些需要改进的地方。基于以上问题，中国石油大学（北京）提出了一种高效的新型流化焦化反应器。

为了解决流化焦化反应器中热焦粉的分布问题，本文采用Fluent软件对新型流化焦化反应器内的气固流动行为进行模拟研究，考察反应器内的固含率分布与颗粒速度分布，并对焦粉分配器进行结构优化，为未来工业流化焦化或灵活焦化装置的设计提供指导。本研究采用模型的是曹斌^[4]等研究的曳力模型，有效聚团直径 d_p^* 为125 μm 。模拟实验装置中的焦粉分配器如图1所示。

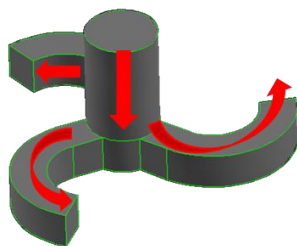


Fig. 1 Diagram of New coke powder distributor

模拟中采用颗粒的平均粒径为75 μm ，密度为1423 kg/m^3 ，流化介质为空气，平均密度为1.225 kg/m^3 ，黏度为 $1.7 \times 10^{-5} \text{ kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$ ，操作条件为密相区表观气速0.2 m/s ，藏量250 kg 。模拟采用Gambit生成网格，Fluent进行计算，采用了三种不同的网格尺寸，分别为8 mm ，10 mm ，20 mm ，进行了网格无关性考察，气体采用无滑移边界条件，颗粒设置滑移系数为0.5，离散方法为二阶迎风模式，计算时间步长为0.001，计算时长为30 s ，取最后10 s 进行时均统计。

通过以下三种方式优化焦粉分配器的结构：（1）改变悬臂出口面积；（2）缩短悬臂直管段长度；（3）减小悬臂旋转角度。改变结构后，通过比较颗粒从悬臂出口下落0.5 m 的高度后，考察在该平面处的固含率分布，从而得到以下结论：

- （1）扩大悬臂出口面积，悬臂出口处颗粒速度明显减小，沿边壁下流颗粒减少，稀相颗粒分布较为均匀，优化效果最好；
- （2）缩短悬臂直管段长度，悬臂出口处颗粒速度几乎不变，大量颗粒仍沿边壁下流，稀相颗粒分布略有提升，优化效果一般；
- （3）减小悬臂旋转角度，悬臂出口处颗粒速度明显增大，颗粒迅速打至边壁后沿边壁下流，稀相颗粒分布仍然不均匀，优化效果差。

关键词：流化焦化；焦粉分配器；颗粒分布；数值模拟

参考文献

- [1] 候芙生. 发展重油加工提高轻质产品收率[J]. 石油炼制与化工, 1995, 26(1): 1-6.
- [2] 韩崇仁. 加氢裂化工艺与工程[M]. 北京: 中国石化出版社, 2001
- [3] 晁可绳. 一种重油加工新方法——灵活焦化[J]. 石油炼制, 1980(8): 33-38. 65.
- [4] 曹斌. 大差异多元颗粒气固流化床流动规律的研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2006.

FCC汽提器内气固流动与汽提效果的模拟研究

吴宁¹, 刘彪², 刘梦溪^{1*}

^{1,2} 中国石油大学（北京）重质油国家重点实验室，北京，102249

*E-mail: mengxiliu@sina.com

摘要正文：

汽提器是催化裂化装置中连接反应与再生系统的重要中间环节^[1]，在整个装置的平稳高效运行中起着十分重要的作用。在催化裂化过程中，待生催化剂从提升管反应器出来后进入气固分离器，这部分油气的质量约为产品质量的2%-4%^[2]，数量较为可观。若这部分油气不能被有效回收，势必会加剧沉降器的结焦，同时会降低轻质油收率、增加再生器的负荷，影响装置的长周期运行。研究表明，如果从待生催化剂上汽提出全部的可汽提烃类，焦炭产率将减少20.0%-40.0%^[3]。为提高汽提效率，研究人员在汽提工艺过程和汽提段结构改进方面进行了大量的研究。

目前，国内外正在开发或正在采用的汽提段结构主要有挡板结构和填料结构，例如：石油化工科学研究院开发的高效导向板式汽提器^[4]，UOP公司开发的水平挡板汽提器^[5]，Mobil公司开发的“Dyna Flux”汽提器技术^[6]等。除此之外，中国石油大学（北京）卢春喜课题组提出环流汽提器的结构，该汽提器结构简单，汽提效率高，操作弹性大^[7]。基于待生催化剂间隙中油气和内孔中油气汽提的难易程度及特点，刘梦溪等^[8]将环流汽提技术与错流挡板汽提技术组合，开发出MSCS（Multi stage circulation stripper）汽提器，目前该汽提器已应用于多家石化企业，取得了较显著的效果。

为了进一步了解MSCS汽提器内气固流动及接触情况，以前人对汽提器的研究为基础，采用双流体模拟手段对工业尺度的MSCS汽提器进行模拟研究，该汽提器为组合式汽提器，上部为锥环形挡板结构，下部为两段环流结构，导流筒区设置锥形分布器，环隙区设置环管式分布器。整个装置总高约16m，内径 Φ 3.8m，挡板区（不包含锥形筛板）总高3.99m，环流区总高4.2m。分析其流场特点及气固流体力学行为，考察汽提段内颗粒体积分布、速度分布及组分浓度分布等细节，为汽提过程的研究及工艺优化奠定基础。

流动模拟结果显示原汽提器存在一些缺陷，例如：相邻环形挡板与锥形挡板之间存在明显的蒸汽短路，蒸汽经过挡板之后不能被合理的分配等现象。而MSCS汽提器强化了环流与汽提效果，流化效果明显提高。分析挡板区不同高度处颗粒浓度分布云图可以看出每层挡板上催化剂浓度较高，基本呈“S”型流动轨迹，蒸汽在挡板下方会有一定积累，因此挡板下方的催化剂浓度都较低。另一方面，蒸汽穿过挡板的过孔速度较大，催化剂很难穿过开孔进入挡板下方，蒸汽并不是依次通过环形挡板和锥形挡板。即汽提蒸汽经挡板后并不能被合理分配，相邻环形挡板与锥形挡板之间存在明显的气相短路，不利于气固两相在挡板上的错流接触。

关键词：催化裂化；汽提段；数值模拟；双流体模型

参考文献

- [1] 刘英杰, 杨基和, 蓝兴英, 等. RFCC 化学汽提过程的模拟研究[J]. 化工学报, 2016, 67(08): 3244-3250
- [2] 张玉龙. 高效汽提器在重油催化裂化装置上的应用[J]. 石化技术与应用, 2005, 23(2): 131-132.
- [3] 卢春喜. 环流技术在石油炼制领域中的研究与应用[J]. 化工学报, 2010, 61(09): 2177-2185.
- [4] 计海涛, 朱丙田, 龙军, 等. 新型填料式汽提器的开发和实验研究[J]. 石油炼制与化工, 2007, 38 (6) : 62-65.
- [5] Koebel J P, Zurich L, et al. Stripping process with horizontal baffles: US, 6680030[P]. 2001.
- [6] McCarthy S J, Raterman M F, Smalley C G, et al. FCC Technology Upgrades: A Commercial Example [C]. San Antonio, Texas: NPRA Annual Meeting, AM-97-10, 1997.
- [7] 卢春喜. 环流技术在石油炼制领域的研究和应用[J]. 化工学报, 2010, 61 (9) : 2177-2185.
- [8] 刘梦溪, 卢春喜, 王祝安, 等. 组合式催化剂汽提器: 中国, 2006100889263.2[P]. 2009.

大差异二元颗粒空气分级特性的研究

卢道铭，唐钊艇，范怡平*，卢春喜*

中国石油大学（北京）重质油国家重点实验室，北京，102249

*E-mail: fanyipin2002@yahoo.com

摘要正文：

颗粒空气分级因兼顾分离效率高、经济性好、环境适应性强等特点，在催化剂制备、矿物加工、粉体精选等行业有着广泛的应用。其中静态分级装置操作弹性大，流场和结构简单，但分离效率较低^[1]。近年来，各国科研工作者通过在分离腔中增设内构件或实现多级分离显著提升了静态分级装置的效率^[2]，但目前国内外的相关研究多使用水平挡板或水平格栅内构件，压降较大，容易造成颗粒堆积^[3]；且多以流化性能较好的Geldart A-B&A-D类颗粒为研究对象，还未见到以流化性质差异较大的C-D类颗粒为实验介质的相关研究。因此，开发新型低压降大差异颗粒高效分级装备已经刻不容缓。

在石化行业有着非常重要和广泛应用的约翰逊网具有开孔率高，耐腐蚀，表面光滑，颗粒不易粉碎等优点^[3]，本研究考虑采用锥形约翰逊网结构用于分散颗粒，强化气固接触效率。如图1所示，由颗粒入口管进入的物料首先经过锥形分散约翰逊网分散和汽提；之后落入分离腔内，与自下而上的气流充分接触；最后落在锥台型收集约翰逊网表面得到再次汽提。大颗粒最终由颗粒出口管排出装置；小颗粒在运动期间被气流携带着向上运动，从装置上部单侧气体出口管排出装置外。本研究搭建了一套中试规模冷模实验装置，以硅微粉（ $D_{50}=13.2\ \mu\text{m}$ ，Geldart C类颗粒）和UOP分子筛吸附剂（ $D_{50}=2.07\ \text{mm}$ ，Geldart D类颗粒）为研究介质，分析了连续操作条件下，自由床（结构一）与增加锥形分散约翰逊网（结构二）两种结构对该机型分离性能的影响。

结构一中，颗粒从入口管进入装置后直接呈自由落体运动，只在筒体中心形成致密的颗粒流；而在结构二中，颗粒首先经过分散，与器壁碰撞后继而弥漫在整个分离腔内。实验结果表明，在较低的增加速率与较高的分子筛循环量下，结构一的分离效率更高，最高分离效率89.79%；而较高的增加速率与较低的分筛循环量下，结构二的分离效率更高，最高分离效率90.67%，说明两种结构各有适用的范围。在结构一下，较大的增加速率使得装置下方收集约翰逊网表面硅微粉积累，装置压降骤增；增设结构二后，虽然总体压降增大了一倍，但颗粒首先在进料处进行充分分散及一次分级，减轻了后续过程的分级负担，使得收集约翰逊网表面结块状况得到很大缓解，装置能够在高加尘量下保持稳定的分离性能。对床内不同轴向高度上的粉尘浓度进行采样分析，发现结构一从上至下平均粉尘浓度依次降低；而结构二粉尘浓度最大处位于分散约翰逊网下方，说明分散约翰逊网对上升气流有阻拦作用，在约翰逊网下方形成“气垫”，使得气垫下方的粉尘容易被带到气垫上方，而随大颗粒下降的粉尘则很难被带到气垫下方，一定程度上减小了粉尘夹带量。通过对气体出口处粉尘粒径测量，发现结构二下能够分离出来的粉尘粒径更小，平均 D_{50} 为 $15\ \mu\text{m}$ ，结构一为 $20.5\ \mu\text{m}$ ，同样证明结构二改善了硅微粉颗粒的粘黏，有效地分离出附着在大颗粒表面的粉尘，减少夹带；但通过对大颗粒出口处粉尘粒径的测量，发现这些未能分离出来的粉尘的粒径随操作条件变化不大，平均 D_{50} 为 $5\ \mu\text{m}$ 左右，说明装置对直径小于 $5\ \mu\text{m}$ 的超细粉体分级能力有限。

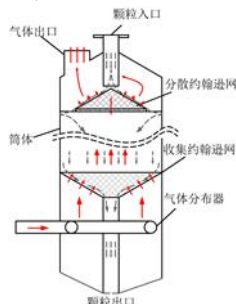


Fig. 1 Schematic diagram of large difference particle classifier

关键词：大差异颗粒；空气分级；自由床；约翰逊网；分离性能

参考文献

- [1] 许建蓉, 王怀法. 分级技术和设备的发展与展望[J]. 洁净煤技术, 2009, 15(02): 25-27,60.
- [2] C.S. CHYANG, K. T. WU, T. T. MA. Particle segregation in a screen baffle packed fluidized bed. Powder Technology, 2002, 126(1): 59-64.
- [3] 陈丽丽. 挡板流化床离析分级机理的研究[D]. 北京:中国石油大学(北京), 2012.
- [4] 汪洋. 约翰逊网数控焊接机的设计及研究[D]. 武汉:华中科技大学,2013.