

2015 年度山东省优秀博士学位论文（获得者吴曼）

研究生：吴曼

导师：郭庆杰 教授

论文题目：导向管喷动流化床形状不规则粘附颗粒流动特性

主要研究内容及创新性：在内径 160mm 的柱锥形导向管喷动流化床中，结合试验与模拟方法，对其高温流动特性进行了系统深入的研究，并提出了形状不规则颗粒的喷动流化质量改善措施。主要研究内容如下：

(1) 在导向管喷动流化床中，基于数字图像和压力信号快速傅里叶转变，对床内流型进行了区分，定义了六种主要的气固流动结构，分别为：固定床、导向管内喷动、射流流化、充气喷动、喷动流化和不稳定喷动。各流型给出了具体的图像、压降波动和压降频谱信号示例，绘制了流型。总结了床内流型的转变规律：随静床高降低，充气喷动和喷动流化的气速范围减小；且随喷口直径的增大，喷动流化的气速范围减小；而卷吸高度和导向管直径的增大，使不稳定喷动操作气速降低。

(2) 温度对导向管喷动流化床内流型、最小喷动速度 (U_{ms}) 和最小喷动流化速度 (U_{msf}) 等流动特性参数有重要影响。随温度的升高，充气喷动及喷动流化两种流型的气速范围减小，不稳定喷动气速范围增大。在流化气速很小时，喷动气进入到环形区的气量随温度的升高而增大，因此床内最小喷动气速也随之增大；但当流化气速高于 0.020m/s 时，温度升高使流化气进入导向管内的气量增大，从而造成最小喷动速度的降低。同时，随操作温度的升高，环形区颗粒最小流化速度的降低，进一步引起床内最小喷动流化速度的降低。

(3) 导向管喷动流化床的最小喷动速度和最少喷动流化速度均随静床高、导向管直径、卷吸区高度及粒径的增大而增大。随流化气速及喷口直径的增大，最小喷动流化速度呈增大趋势，而最小喷动速度则呈降低趋势。在所考察的影响因素中，物料粒径对最小喷动速度和最小喷动流化速度影响最大。基于大量试验数据，提出了高温下导向管喷动流化床内的最小喷动速度及最小喷动流化速度关联式，并通过与文献试验结果的对比较验证了该组关联式的准确性。

(4) 导向管喷动流化床中，流化气和辅助流化 PP 颗粒的添加，显著改善了床内形状不规则的线路板非金属颗粒 (NPCB) 的流态化质量。单组份 NPCB 较差的流化性，造成了床内沟流的存在，从而阻碍了喷动的产生。在引入 PP 颗粒量占混合颗粒总质量的比例不小于 40% 时，床内混合颗粒有较好且稳定的喷动

流化质量。其流态化质量改善机制在于 PP 颗粒的流动带动了 NPCB 颗粒的共流化，且 NPCB 和 PP 颗粒间较小的密度差异，提高了混合颗粒的稳定性，抑制了分层现象。在混合颗粒中 PP 质量分数为 40%-80% 时，NPCB/PP 二元混合颗粒的 U_{ms} 随流化气速和混合颗粒中 NPCB 质量分数的增加而降低。混合颗粒流型图显示，不稳定喷动及不稳定喷动流化状态在一个较大的气速范围内存在，且这两种流型的气速操作范围随混合颗粒中 NPCB 质量分数的增加而扩大。

(5) 利用欧拉双流体模型 (TFM) 对导向管喷动流化床内的气固流动进行了模拟，固体体积分数云图随时间的变化，显示了床内流型的形成及发展过程，且与试验观察现象一致。对于气固交互作用活跃的导向管底部卷吸区，模拟清晰的展示了喷动气对环形区气固流的卷吸及携带。充气喷动流型的模拟结果显示，由于喷动气流对颗粒的卷吸，随轴向高度增大，导向管及喷泉中心区固体体积分数也随之增大，与 PV-6A 测定的颗粒浓度试验值一致。随喷动和流化气速的增大，床层下部的固体体积分数降低；而在导向管上部区域，固体体积分数则随喷动气速增大而增大。TFM 对导向管喷动流化床的气固流动可进行较好的预测，为该反应器的设计提供了理论支持。

博士学位论文创新性：

在建立的导向管喷动流化床流动特性多功能试验系统上，采用高分辨率数字图像、高精度差压信号等方法，对导向管喷动流化床的流动特性进行了系统研究，创新点如下：

(1) 试验研究了高温床内复杂的气固两相流动结构，对不同气固流动结构及其特征进行定义和描述，明确了温度对床内流型的影响，并讨论了流型随操作参数的转化规律。

(2) 试验研究了操作温度对床层压降、喷动气旁路支率、最小喷动速度和最小喷动流化速度等流动参数的影响。基于大量试验数据，提出了高温下最小喷动速度和最小喷动流化速度的预测关联式，并探讨了操作参数、尺寸参数对这两个速度特征值的影响。

(3) 基于颗粒动力学理论，在欧拉坐标下建立了导向管喷动流化床湍流气固流动模型。在试验值和模拟值对比的基础上，选择合适的计算模型和参数，对床内的颗粒浓度分布，速度分布等流动参数进行了研究。

(4) 通过添加辅助流化聚丙烯颗粒的措施对形状不规则 NPCB 颗粒的流态化质量进行改善。对导向管喷动流化床中，不同质量配比 NPCB/PP 混合颗粒的压降特性、气固流型转变及最小喷动速度、最小喷动流化速度等流动参数进行了探讨，并绘制了 PP/NPCB 混合颗粒的流型图。

攻读博士学位期间取得成果：

期刊论文:

[1] **Man Wu**, Qingjie Guo, Luyan Liu. Hydrodynamic Performance of a Spout-Fluid Bed with Draft Tube at Different Temperatures. *Industrial Engineering Chemistry Research*, 2014, 53(5): 1999-2010. (IF=2.235)

[2] **Man Wu**, Qingjie Guo, Guojia Fu. Preparation and characteristics of medicinal activated carbon powders by CO₂ activation of peanut shells. *Powder Technology*, 2013, 247: 188-196. (IF=2.024)

[3] **Man Wu**, Qingjie Guo, HenglaiXie, Luyan Liu. A new Empirical Equation to Minimum Spouting/Spout-fluidization Velocity in Draft Tube Spout-fluid Beds at Elevated Temperature. *Canadian Journal of Chemical Engineering*. (Accepted)

[4] Qingjie Guo, **Man Wu**, Kai Wang, Liang Zhang, Xiufeng Xu. Catalytic Hydrodeoxygenation of Algae Bio-oil over Bimetallic Ni-Cu/ZrO₂ Catalysts. *Industrial Engineering Chemistry Research*, 2015, 54: 890-899. (IF=2.235).

[5] Qingjie Guo, Xiude Hu, Yongzhuo Liu, Weihua Jia, Mingming Yang, **Man Wu**, Hongjing Tian, Ho-Jung Ryu. Coal chemical-looping gasification of Ca-based oxygen carriers decorated by CaO. *Powder Technology*, 2015, 275: 60-68. (IF=2.024).

[6] 谢恒来, **吴曼**, 赵军, 陈义忠, 郭庆杰. 导向管喷动流化床废弃印刷线路板非金属颗粒包覆改性. *化工学报*, 2015, 66(03): 1185-1193.

[7] 张亮, **吴曼**, 杨雅, 张秀丽, 徐秀峰, 郭庆杰. 小球藻热解油在 Ni-Cu/ZrO₂ 催化剂上的加氢脱氧. *化工学报*, 2014, 65(8): 3004-3012.

[8] 刘鲁艳, 郭庆杰, **吴曼**, 刘新民, 谢恒来, 王许云. 废旧聚丙烯/废弃印刷线路板非金属粉复合材料的制备及性能. *化工学报*, 2014, 65(04): 1495-1502.

[9] 韩敏, 曲健林, **吴曼**, 徐秀峰, 郭庆杰. 一步法制备生物质活性炭 Co 基制氢催化剂. *太阳能学报*. (接收)

会议论文:

[1] **Man Wu**, Guo Qingjie. Determining critical factors affecting the minimum spouting/spout-fluidization velocity in draft tube spout-fluid beds at elevated temperature. *The 7th World Congress on Particle Technology*, Beijing, 2014.5. (Abstract)

[2] **吴曼**, 刘鲁艳, 王许云, 郭庆杰. 废弃线路板非金属颗粒在声场流化床中的流化行为. *中国颗粒学会第八届学术年会*, 2012.

[3] 刘鲁艳, 吴曼, 郭庆杰, 刘新民, 王许云. 废线路板非金属粉/聚丙烯复合材料的力学性能研究. 中国化工学会会议. 南京, 2013.

授权专利:

[1] 郭庆杰, 吴曼, 王许云, 刘鲁艳, 田红景, 刘永卓. 一种废弃线路板非金属颗粒流化床装置包覆及方法. 专利号: ZL201210322024.X.

获奖:

[1] 2013年获得山东省研究生优秀科技创新成果三等奖一项: 张璇, 吴曼, 岳学海, 刘兴倩, 孔维芳. “新型流化床制氢关键技术研究”。

[2] 2013年获得青岛科技大学“优秀研究生”。

[3] 2013年获得研究生国家奖学金奖励。

[4] 2013年获得青岛科技大学第六届研究生“学术之星”。

[5] 2014年获得研究生国家奖学金奖励。

[6] 2014年获得第三届“青科大年度人物”。