

内置热流化床煤调湿装置中湿煤的流动特性研究

毛红蕾, 郁鸿凌, 杨东伟, 梁 勇, 余红霞

(上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093)

摘要: 选取平均粒径为 0.82 mm 的宽筛分烟煤为床料, 考察煤中水分(含水率)对煤在小型内热流化床煤调湿实验台中的流动特性的影响. 绘制流化床内流化速度与床层高度、床层压降的关系曲线并进行分析. 结果表明: 煤料的临界流化速度为 0.3~0.4 m/s; 高水分煤料(含水率为 16.3%~17.8% 的煤)的临界流化速度比低水分煤料(含水率为 12.4%~13.7% 的煤)的临界流化速度增加了 20%, 即含水率过高不利于煤的流化; 高水分煤在流化过程中甚至出现了腾涌现象, 使流化恶化, 故应将流化煤料的含水率控制在 14% 以下.

关键词: 煤调湿; 含水率; 流动特性; 临界流化速度

中图分类号: TQ 051.13 **文献标志码:** A

Flow Characteristics of Wet Coal in Fluidized Bed of Coal Moisture Control Device with Internal Heat

MAO Honglei, YU Hongling, YANG Dongwei, LIANG Yong, YU Hongxia

(School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: Selecting bituminous coal with average particle size of 0.82 mm as bed material and investigating the influence of the moisture of coal (namely, moisture content of materials) on its flow characteristics in a fluidized bed experiment rig, the relationship curves of fluidizing velocity vs bed height and bed pressure drop were drawn and analyzed. The results show that the critical fluidizing velocity of the coal is 0.3~0.4 m/s; compared with low moisture coal material (moisture content of the coal is 12.4%~13.7%), the critical fluidizing velocity of high moisture coal material (moisture content of the coal is 16.3%~17.8%) increases by 20%, namely, high moisture content is bad for the fluidization of coal; even the slugging phenomenon a high moisture coal may appear in the process of fluidization, which worsens the fluidization. Therefore, the moisture content of coal material should be controlled under 14%.

Keywords: coal moisture control; moisture content; flow characteristic; critical fluidizing velocity

收稿日期: 2015-08-08

第一作者: 毛红蕾(1990-), 女, 硕士研究生. 研究方向: 节能技术. E-mail: maohonglei1062@sina.cn

通信作者: 郁鸿凌(1953-), 男, 研究员. 研究方向: 热能工程、节能技术. E-mail: yuzhenyk@163.com

我国是焦炭生产和消费大国,20世纪90年代钢铁行业的快速发展使我国炼焦行业得以兴起,2001年之后,焦炭的生产能力和消费能力均迅速增长,其年均增长率分别为12.0%和12.9%^[1].炼焦业产能的迅速增长,致使煤的消耗量持续增长,但是,我国炼焦用煤的含水率普遍偏高,有些地区的炼焦煤含水率甚至高达15%以上^[2].未经预处理的高含水率的炼焦煤直接进入焦炉,会增加炼焦耗热量,破坏焦炉生产操作的稳定性,增加焦化废水排放量,污染环境.因此,炼焦业是一个典型的高能耗、高污染的行业,已被国家列为节能降耗的重点行业.为了实现焦化行业的可持续发展,必须从改进炼焦工艺技术、降低消耗、减少环境污染、提高焦炭质量和生成效率等方面展开研究^[3].煤调湿技术是近年来得到快速发展的炼焦用煤预处理技术,该技术不仅可以有效改善焦炭质量、提高焦炉生产能力,还可以降低能耗,同时有利于环境保护,是国家重点鼓励的节能环保项目^[4].

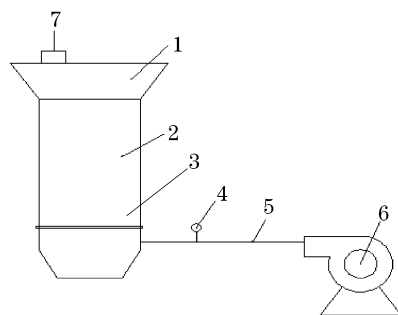
煤调湿工艺(coal moisture control,CMC)是指将炼焦用煤在装炉前利用外热进行加热干燥、脱水,达到煤的水分调节和控制.根据现有煤调湿技术存在的问题和炼焦工艺的特点^[5-8],上海理工大学和某企业共同研发了一整套新式的内置热流化床式煤调湿工艺,为将这一工艺很好地应用于工程实际,必须对其进行传热特性和流动特性两方面的研究.传热特性很大程度上是由流化床内的流动特性所决定.影响流动特性的因素有很多,如流化风速、流化床内部结构及床料的物理特性(密度、粒径、含水率)等.

目前针对内置热流化床的流动特性的理论研究和实验研究了已不少,如罗国民等^[9]实验研究了生产实际用炼焦煤的不同粒径和不同初始料层高度对流动特性的影响.阎维平等^[10]通过实验研究了压力与温度对临界流化速度的影响.张廷龙^[11]还研究了气泡行为对流动特性的影响.但这些研究者并未考虑到所选物料的水分对流动特性的影响,或者所选的实验材料为石英砂、玻璃球类的干物料,因此,本文研究煤中水分对煤在内置热流化床实验台内的流动特性的影响.根据实验数据,绘制不同含水率的湿煤的流化速度与床层高度、床层压降的关系曲线,对比其临界流化速度、床层阻力的大小,分析水分对煤流动特性的影响,为优化内置热流化床煤调湿工艺技术设计及工程化应用提供理论依据.

1 实验材料与方法

1.1 实验系统

实验采用小型内置热流化床实验台装置,实验台系统如图1所示.实验台的主体是直四棱柱流化床反应器,横截面积为310 mm×230 mm,内有16根长为190 mm、管径为25 mm的电加热管,呈水平错列布置;反应器底部设置布风板结构.布风板采用平板多孔式,错列布置,风孔布置在板中央,小孔风向与板垂直.反应器的上下部位分别是沉降室和风室,其截面呈上宽下窄的两个倒梯形.沉降室的倒梯形截面使得床层上部自由空间的截面增大,气流速度降低,有利于气流携带颗粒重新回落到床层,降低出口气流的含尘量,减轻布袋除尘器的负荷.风室的倒梯形截面主要起导流和稳流作用.实验采用离心式鼓风机将环境中的空气通过进风管道引入风室,引入的空气流将置于布风板上的床料鼓动,使其进入流化状态.鼓风机联接有高性能矢量变频器,变频器通过控制鼓风机的转速来改变引入风室的空气流量,并通过LUGB-65涡街流量计对空气流量进行监控.此外,实验过程中床层的高度以及床层压降分别由米尺和压差变送器测定.



1. 沉降室 2. 流化床反应器 3. 风室 4. 涡街流量计
5. 进风管道 6. 离心鼓风机 7. 出风管道

图1 实验台系统简图

Fig.1 System diagram of the test bench

1.2 实验原理

固体流态化现象是一种由于流体向上流过固体颗粒堆积的床层,使得固体颗粒具有一般流体性质的现象^[12].本实验研究气-固流化过程,图2画出了实验中4种具有代表性的流型示意图.随着气流速度从零开始逐步升高,固体颗粒床层发生一系列流态变化.当气体通过床层的气流速度较低时,物料颗粒静止不动,床层高度不变,这种状态称为固定床.固定床压降非常稳定,波动极小,并且压降随气

流速度的增加而增加.继续增加气流速度,直到颗粒开始被流体吹起并悬浮于流体中作自由运动,颗粒间相互碰撞,床层高度上升,颗粒开始进入流化状态,相应的速度称为临界流化速度 u_{mf} .若继续增加气流速度,床层压降几乎保持不变,额外的流化气体将作为气泡进入颗粒床层,这些气泡在布风板上开始形成小气泡,之后很快合并,并且向上穿过颗粒层,引起流化床粒子的强烈混合^[13],颗粒进入鼓泡流化状态.若进一步增大气流速度,就会出现腾涌现象.通常腾涌使出口气体含尘量加剧,气固接触效率和操作稳定性降低.

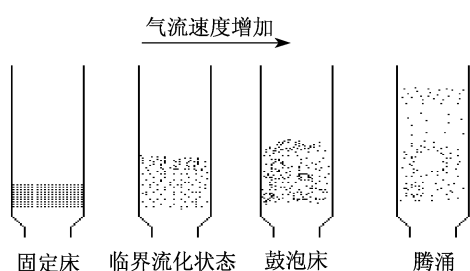


图2 气固流态化不同阶段的状态

Fig.2 States in various stages of gas-solid fluidization

1.3 实验方法及临界流化速度理论值的计算

实验煤种选用烟煤,用规格分别为 300,500 μm 、1.0,1.4,2.0,2.8 mm 的筛子筛分煤料.具体的宽筛分煤料粒度分布如表 1 所示.取一定量的宽筛分煤料,加入一定质量的水,搅拌使两者完全混合,提取煤样将其置于 45 $^{\circ}\text{C}$ 干燥箱干燥 8 h 来测取煤的外水,进而求得煤中的含水率,实验制得含水率分别为 13.7 % 和 17.8 % 的两种湿煤.本实验中煤的含水率主要指煤的外水分,因该流化实验是在常温下进行,煤的内水分不会逸出,不会对煤流化造成影响.将两种含水率不同的湿煤倒入流化床实验台中进行流化实验,实验过程中改变气流速度,记录不同气流速度下的床层阻力和床层高度.

表1 宽筛分煤料的粒度分布

Tab.1 Particle size distribution of wide screening coal

粒径/mm	质量/g	质量分数
0.3~0.5	426.7	18.5
0.5~1.0	676.5	29.3
1.0~1.4	348.3	15.1
1.4~2.0	569.1	24.6
2.0~2.8	289.8	12.5
总质量	2 310.4	100

流化床的颗粒总是形状各异且存在一定的粒度

分布,在实际计算时要采用平均当量直径.对于本实验,床层颗粒的比表面积起重要作用^[14],选用比表面积平均直径 d_p 作为煤料平均当量直径的计算公式.

$$d_p = \frac{1}{\sum_{i=1}^{n+1} X_i/d_i}$$

式中: n 为标准筛层数; X_i 为某一筛上的残留质量分数; d_i 为某一残留质量所在的筛孔直径与上一筛孔直径的几何平均值, $d_i = \sqrt{d_i' d_{i+1}'}$.

根据表 1 得到宽筛分煤料的粒度分布情况,计算得到宽筛分煤料的平均当量直径 $d_p = 0.82$ mm,如表 2 所示. d 为粒径.

表2 宽筛分煤料的平均当量直径

Tab.2 Average equivalent diameter of wide screening coal

d/mm		$X_i/\%$	d_i/mm	d_p/mm
上限	下限			
0.5	0.3	18.5	0.39	0.82
1.0	0.5	29.3	0.71	
1.4	1.0	15.1	1.18	
2.0	1.4	24.6	1.67	
2.8	2.0	12.5	2.37	

本文选择了满足实验条件的 Wen 和 Yu 经验公式作为实验的数学模型^[7],通过对其进行重新整合,得到

$$u_{mf} = 0.294 \frac{d_p^{0.584}}{v_g^{0.056}} \left(\frac{\rho_p - \rho_g}{\rho_g} \right)^{0.528} \quad (1)$$

由于煤料实密度 ρ_p 远远大于空气密度 ρ_g ,因此,式(1)简化为

$$u_{mf} = 0.294 \frac{d_p^{0.584} \rho_p^{0.528}}{v_g^{0.056} \rho_g^{0.528}} \quad (2)$$

由式(1)计算得到临界流化速度的理论值 $u_{mf} = 0.34$ m/s.计算所需宽筛分煤料和气体的物性参数如表 3 所示.

表3 宽筛分煤料和气体的物性参数

Tab.3 Physical parameters of wide screening coal and gas

参 数	数 值
煤料实密度 $\rho_p/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	1 300
煤料堆积密度 $\rho_g'/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	750
空气温度 $t_g/^{\circ}\text{C}$	10
空气密度 $\rho_g/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	1.248
空气运动黏度 $v_g/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	1.42×10^{-3}
空气动力黏度 $\mu_g/(\text{Pa} \cdot \text{s})$	1.76×10^{-3}

2 实验结果与分析

2.1 床层阻力 ΔP 与气流速度 u 的特性曲线

床层阻力直接影响颗粒流化状态. 在实际的实验过程中, 采用床层阻力与气流速度的关系曲线来确定临界流化速度^[15].

如图 3(a)所示, 气-固系统的流化状态呈现固定床和流态化这 2 个基本状态. 由图中可直接读出, 在流化过程中, 含水率 13.7 % 的煤料的最小流化速度 u_{mf} 为 0.31 m/s, 其床层阻力 ΔP 在 1 970 ~ 2 060 Pa 范围内波动. 流化后煤料含水率降至 12.4 %.

如图 3(b)所示, 气-固系统的流化状态呈现固定床和流态化这 2 个基本状态. 由图中可直接读出, 在流化过程中, 含水率 17.8 % 的煤料的最小流化速度 u_{mf} 为 0.37 m/s, 床层阻力 ΔP 在 2 060 ~ 2 210 Pa 范围内波动. 流化后煤料含水率降至 16.3 %. 与低水分(含水率为 12.4 % ~ 13.7 %)煤相比, 高水分(含水率 16.3 % ~ 17.8 %)煤的临界流化速度增加了 20 %.

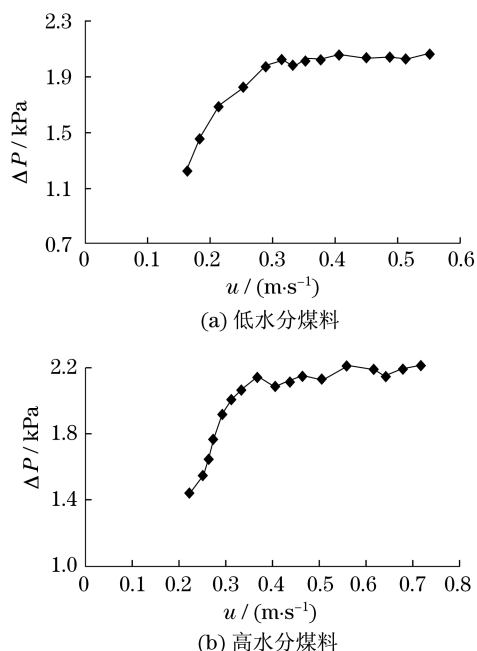


图 3 床层阻力 ΔP 与气流速度 u 的特性曲线
Fig.3 Characteristic curve of bed's resistance vs gas flow rate

对比图 3 的 2 条流化曲线, 高水分的煤较低水分的煤达到流化状态所需的最小流化速度增大, 床层阻力增加, 可见煤中水分阻碍了煤的流化. 一方

面, 煤料表面含水量增大, 粘度增大, 会增加煤料运动阻力; 另一方面, 由于料层重力作用, 底部料层还会结块, 颗粒也会粘附于壁面和布风板形成死区, 致使床层阻力增大, 加大流化的难度, 临界流化速度增大.

2.2 床层高度 H 与气流速度 u 的特性曲线

随着气流速度的增大, 流化床高度逐渐增加, 结合 $\Delta P - u$ 特性曲线, $H - u$ 的特性曲线为判断流化状态的又一判据.

如图 4 所示, 当气流速度小于 0.31 m/s 时, 煤颗粒处于固定床阶段, 床层高度基本不变, 随着气流速度的进一步增大, 床层高度开始随气流速度的增加不断增高, 因此, 该煤料的临界流化速度 u_{mf} 为 0.31 m/s, 与图 3(a)相符.

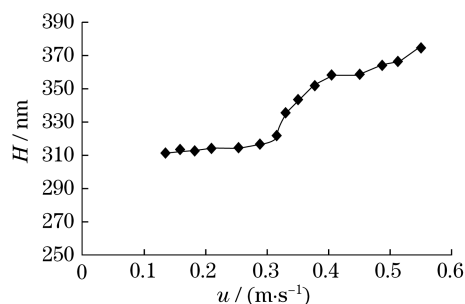


图 4 低水分煤料床层高度 H 与气体流速 u 的特性曲线
Fig.4 Characteristic curve of bed's height vs gas flow rate for coal with low moisture

实验未能测得高水分煤的 $H - u$ 特性曲线. 因为, 煤料中水分过高, 使颗粒粘性过大, 煤料流化困难, 增大气流速度, 出现腾涌现象, 难以得到平稳的流化操作状态. 所以, 当煤料含水率过高时, 不宜直接进行流化, 应采用合理手段降低其含水率, 再进行流化.

3 结 论

通过床层阻力 ΔP 与气流速度 u 的特性实验研究, 可知平均粒径为 0.82 mm 的宽筛分煤料的临界流化速度范围可确定为 0.3 ~ 0.4 m/s, 理论计算值为 0.34 m/s. 实验值和理论值相差不大, 所以, Wen 和 Yu 的经验公式可以对内置热流化床煤调湿装置内流化煤料的临界流化速度进行合理预测.

结合 $\Delta P - u$ 和 $H - u$ 特性曲线分析, 若要求煤料在该实验装置中得到很好的流化效果, 必须保证煤料的含水率小于 14 %. 煤料的含水率是影响其流化行为的一个关键因素, 含水率的增加会加大颗

粒的流化难度。因此,若煤料含水率过高(大于14%),应采用合理的手段降低煤料的含水率,再进行流化。

综上所述,本文对煤流动特性的研究为操作内置热流化床煤调湿装置提供理论参考。

参考文献:

- [1] 崔荣国,郭娟.保护我国炼焦用煤刻不容缓[J].国土资源情报,2012(8):9-12.
- [2] 谭绍栋,施沛润.煤调湿技术在柳钢应用的思考[J].柳钢科技,2009(2):11-14.
- [3] 中国能源网.我国炼焦煤资源相对较少,主要依靠进口[EB/OL].[2011-03-02].<http://news.qq.com/a/20110301/001468.htm>.
- [4] 武荣成,许光文.焦化过程煤调湿技术发展与应用[J].化工进展,2012,31(S):149-153.
- [5] 孙业新,葛腾飞,张士齐.炼焦煤调湿技术及综合评价[J].莱钢科技,2010(5):5-8.
- [6] 胡新亮.煤调湿技术及存在的问题[J].节能与环保,2006(9):31-32.
- [7] 钟英飞.对各种炼焦工艺及无回收焦炉的评述[J].燃料与化工,2001,32(2):57-61.
- [8] 李向波.炼焦工艺及用煤技术发展研究[J].技术与市场,2014(6):347-348.
- [9] 罗国民,周子民,刘克辉.炼焦煤调湿流化床料层流化特性实验研究[J].中南大学学报(自然科学版),2014,45(8):2864-2870.
- [10] 阎维平,李皓宇,吴威,等.宽筛分颗粒高压热态最小流化速度的实验研究[J].华北电力大学学报,2012,39(5):65-71.
- [11] 张廷龙.大颗粒二维流态化床流体动力学特性的试验研究[D].西安:西安建筑科技大学,2003.
- [12] 国井大藏,列文斯比尔.流态化工程[M].华东石油学院,译.北京:石油化学工业出版社,1977.
- [13] 袁一,王世广,贺高红,等.化工原理[M].北京:高等教育出版社,2002.
- [14] Hartman M, Trnka O, Pohořelý M. Minimum and terminal velocities in fluidization of particulate ceramsite at ambient and elevated temperature[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2007, 46(22):7260-7266.
- [15] 金涌,祝京旭,汪展文,等.流态化工程原理[M].北京:清华大学出版社,2001.

(编辑:石 璞)

(上接第136页)

- [6] 梁平,龙新峰,楼波,等.电站立式给水加热器传热强化及无铜化运行研究[J].上海理工大学学报,2001,23(3):274-278.
- [7] 鲍伟,马虎根,张希忠.流体在螺旋管内对流换热和降压性能的数值模拟[J].上海理工大学学报,2011,33(1):84-88.
- [8] 吉富英明,大场一马,有马芳雄.螺纹管的传热与压力损失[J].火力原子力发电,1976,27(2):171-182.
- [9] 王泽宁,周强泰,张华.螺旋槽管管内换热与阻力试验研究[J].中国电机工程学报,1996,16(1):59-62.
- [10] 黄渭堂,刘天才,孙中宁,等.螺纹槽管传热与阻力特性的实验研究[J].哈尔滨工程大学学报,1998,19(1):29-34.
- [11] 张华,周强泰.螺旋槽管强化管内换热试验研究[J].发电设备,2003,17(4):24-27.
- [12] 邓颂九,谭盈科,庄礼贤,等.轧槽管传热与流体阻力的研究[J].化学工程,1980(6):1-8.
- [13] 李向明,叶国兴,邓颂九.高效换热元件——螺旋槽管的研究及应用[J].化工学报,1982,33(4):359-367.
- [14] Cao K, Dong Q W, Liu M S, et al. Experimental investigation on heat transfer and flow resistance characteristics of spirally fluted tubes[C]// The 2nd International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2011:4956-4959.

(编辑:丁红艺)