

流化床反应室内铁矿石的临界流化特性

李志明, 韩跃新, 孙永升, 唐志东
(东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: U型反应室是悬浮焙烧装备的核心部件,明确其内物料的临界流化特性具有理论与实践意义. 为此,自行搭建了冷态试验系统,并以赤铁矿粉、氧化铝粉为原料,研究了松动风量、物料性质对物料临界流化特性的影响规律,并对原有经验公式进行了修正. 结果表明:临界流化气速随物料粒度、密度的增加而增加;在松动室床层为固定床的条件下,临界流化气速随松动风量的增大而减小;修正后的过程方程与试验数据吻合较好,可用于反应室内物料流化行为的预测. 研究结果利于悬浮磁化焙烧技术实体化,对该技术工业应用具有一定的指导意义.

关键词: 悬浮磁化焙烧炉;流化床反应室;冷态试验;减速法;临界流化特性

中图分类号: TD 925.7 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2024)04-0592-08

Critical Fluidization Characteristics of Iron Ore in Fluidized Bed Reactor

LI Zhi-ming, HAN Yue-xin, SUN Yong-sheng, TANG Zhi-dong

(School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: TANG Zhi-dong, E-mail: tangzhdong@mail.neu.edu.cn)

Abstract: The U-type reaction chamber is a core component of suspension roasting equipment, the critical fluidization characteristics of materials have both theoretical and practical significance. Therefore, this paper built a cold test system, and conducted research using hematite powder and aluminum oxide powder as materials to study the influence of aeration air volume, material properties on the critical fluidization characteristics, and modified empirical formula of critical fluidization characteristics based on the test. The results show that the critical fluidization gas velocity increases with the increase in particle size and density of materials. The critical fluidization velocity decreases with the increase of the aeration air volume under the condition of a fixed bed in the loosening chamber, the modified formula fits well with the experimental results and can be used to predict fluidization behavior. The research results are helpful to realize the integration of suspension roasting technology and equipment, and also have certain guiding significance for industrial applications.

Key words: suspension magnetizing roaster; fluidized bed reactor; cold test; deceleration method; critical fluidization characteristic

铁矿石是我国钢铁工业的保障性资源,属国家的重大战略需求,但由于我国铁矿石资源禀赋差、难利用导致我国铁矿石供应长期大量依赖进口,对我国钢铁工业安全运行造成了重大隐患^[1-2],因此实现复杂难选铁矿资源的开发利用、优化利用具有重要意义^[3]. 磁化焙烧是处理复杂

难选铁矿石的有效途径^[4-6],其中悬浮磁化焙烧技术与装备经实践证明是可行的,推广应用前景广阔^[7-9].U型反应室是悬浮磁化焙烧装备的核心反应部件,属于典型的流化床反应器^[10-12],明确其内部物料的流化特性对保证装备的运行状态以及物料的还原效果具有重要意义.与U型反应室

收稿日期: 2023-01-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52104251); 国家重点研发计划项目(2021YFC2902403).

作者简介: 李志明(1999-),男,河北邯郸人,东北大学博士研究生;韩跃新(1961-),男,内蒙古赤峰人,东北大学教授,博士生导师;孙永升(1986-),男,山东济南人,东北大学教授,博士生导师.

结构类似的U型返料阀常用于循环流化床中以调节和控制颗粒循环速率、防止烟气反窜^[13-14],国内外关于U型返料阀的研究工作较多,但不足以指导U型反应室中物料流态化行为的精确预测、过程控制等关键性科学问题,因为U型反应室除有以上功能之外,还是铁矿物蓄热还原的场所^[15].为获得良好的焙烧还原效果,需要更加关注物料和还原气体之间的接触效率,气固流动行为与物料流化质量至关重要.

在气固流动行为试验研究时,最重要的便是选择良好的测量手段,以保证对气固流动特征参数作出正确、合理的描述.测量手段的选择又需要综合考虑物料性质、操作因素、设备尺寸等多种因素.基于本试验的冷态系统等试验条件,将压力、压差作为流化床试验研究中的测量参数,以反映流化床内的综合动态信息.

临界流化气速(气体流速简称气速)是决定流化床反应器内物料能否流态化的主要参数,是流化床反应器设计的关键变量^[16].流化床的操作速度必须大于临界流化气速,工业生产中也常以操作速度是临界流化气速的若干倍来表示操作条件.理论上,在固定床的操作范围内,气速的增加将导致床层压降的不断增加,直到床层压降等于单位床层截面积上的颗粒质量,此时由于气体流动带给颗粒的曳力平衡颗粒的重力,导致颗粒被悬浮,床层开始进入流化状态,这时的气速称为临界流化气速(v_{mf}),此后,如果继续增加气速,床层压降将不再变化^[17]. v_{mf} 通过测定床层压降与气速的关系曲线得到,用升速法得到的床层压降曲线由于系统的迟滞效应而带有任意性,测量结果不理想,通常使用降速法来获得压降与气速的关系曲线.

综上所述,临界流化气速也是U型反应室流化性能的重要指标,本文在冷态试验系统上通过降速法分析松动风量、物料粒度和物料密度对U型反应室内物料临界流化行为的影响规律,并提出适用于U型反应室的临界流化状态方程,建立相应的临界流化气速关系式,以期探明不同因素作用下反应室内物料的流化特性,为实现悬浮磁化焙烧关键技术与工业装备一体化提供必要的理论基础.

1 试验物料和方法

1.1 试验物料

本试验所用物料分为两种:一种是流化性能

较好的高纯氧化铝粉,取自郑州新利耐磨材料有限公司,经筛分后得到<0.074 mm, 0.074~0.10 mm, 0.10~0.15 mm三个粒级;另一种是赤铁矿粉,由巴西赤铁矿富矿块制备而成,制备方法如下:采用XPC-60×100型颚式破碎机和XPSF-φ400×250型对辊破碎机两段破碎至<2 mm,经筛分分级得到<0.074 mm, 0.074~0.10 mm, 0.10~0.15 mm, 0.15~0.30 mm四个粒级.

物料粒度、物料密度是物料的基本性质,其测量工作是开展物料流化特性研究的第一步,针对分级后的氧化铝粉和赤铁矿粉,使用Malvern 2000激光粒度测试仪测试粒度,所得粒度分布曲线见图1.

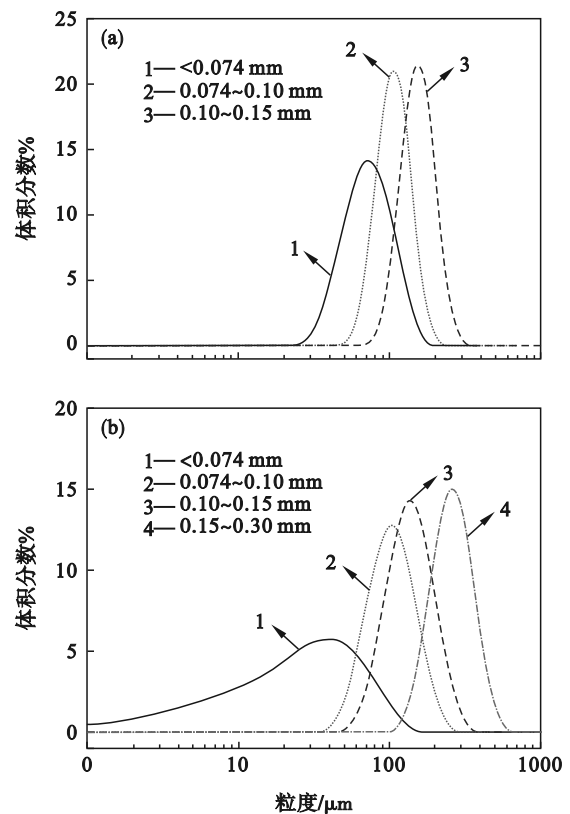


图1 试验物料粒度分布曲线

Fig.1 Particle size distributions of test materials

(a)—氧化铝粉; (b)—赤铁矿粉.

密度是物料的重要物性,是指单位体积物料的质量.根据密度基准体积的不同,可分为真密度、表观骨架密度和堆积密度,其中真密度指组成物料的固体物质的本身密度,是指物料在绝对密实状态下,单位体积的质量,不包含颗粒内外空隙的体积,一般采用比重瓶法测量;表观骨架密度的基准体积是指包括封闭细孔在内的体积,而不包括颗粒表面的凹下、裂缝、开口的孔洞,可通过排水置换法测得;堆积密度又称松散密度,其基准体积包括颗粒的实际体积、颗粒内孔和颗

粒间空隙的体积,可采用容器法测得.物料的密度从大到小排列依次为真密度、表观骨架密度、堆积密度,针对上述物料测量3~5次取平均值作为结果.

每个粒级的物料混匀后作为试验原料,具体物理性质见表1.

表1 试验物料的物理性质

Table 1 Physical properties of the test materials

| 固体物料 | 粒级/mm | 体积平均粒度/mm | 真密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) | 表观骨架密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) | 堆积密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) |
|------|------------|-----------|---------------------------------------|--|--|
| 氧化铝粉 | <0.074 | 0.071 | 2 398.89 | 2 135.68 | 1 200.18 |
| | 0.074~0.10 | 0.092 | 2 398.89 | 2 135.68 | 1 205.98 |
| | 0.10~0.15 | 0.147 | 2 398.89 | 2 135.68 | 1 242.49 |
| 赤铁矿粉 | <0.074 | 0.070 | 3 645.32 | 3 542.27 | 2 197.08 |
| | 0.074~0.10 | 0.093 | 3 645.32 | 3 542.27 | 2 214.56 |
| | 0.10~0.15 | 0.146 | 3 645.32 | 3 542.27 | 2 227.70 |
| | 0.15~0.30 | 0.215 | 3 645.32 | 3 542.27 | 2 241.63 |

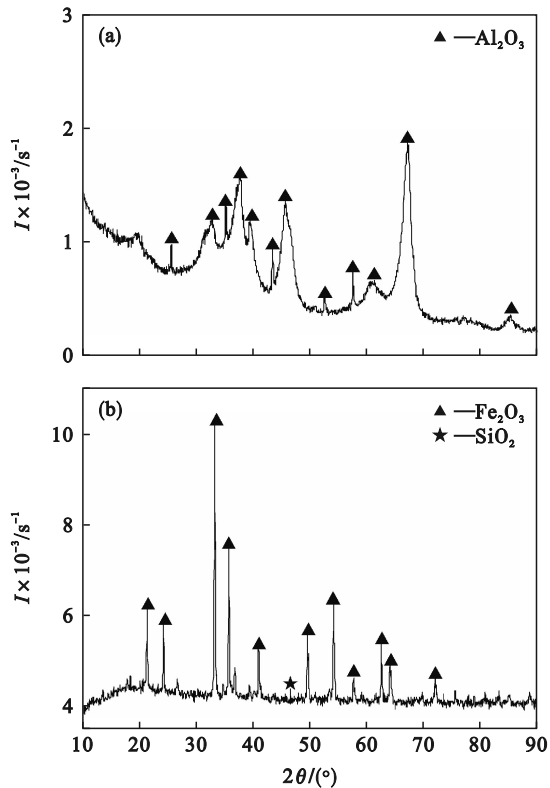


图2 氧化铝粉和赤铁矿粉XRD分析图谱

Fig. 2 XRD patterns of alumina and hematite powders (a)—氧化铝粉; (b)—赤铁矿粉.

为进一步查明赤铁矿粉的组成情况,对其进行化学多元素分析,结果如表2所示.由表2可知,矿石中的TFe品位为64.73%,FeO的质量分数为0.46%,主要脉石矿物为石英,质量分数为2.12%,其他矿物含量均极少.

1.2 试验方法

图3为试验所用的可视化U型反应室冷态试验系统,整个系统由U型反应室主体结构、螺旋

采用荷兰PANalytical B. V.生产的PW3040型X射线衍射仪对物料进行了矿物物相定性分析,结果如图2所示.由图2可以看出,氧化铝粉主要矿物为 Al_2O_3 ,纯度较高;赤铁矿粉的主要矿物为 Fe_2O_3 和 SiO_2 ,其他矿物由于含量较少在XRD图谱中无法显示.

给料系统、气体供给系统、压力信号采集系统四部分组成.为方便观察反应室内的气固流动状态,U型反应室主体结构采用透明、高光洁度、耐磨损的有机玻璃材料制成.

表2 赤铁矿的化学成分分析(质量分数)

Table 2 Chemical composition of hematite ore (mass fraction) %

| TFe | FeO | SiO_2 | Al_2O_3 | CaO | MgO | P | S | 烧失 |
|-------|------|----------------|-------------------------|------|------|------|-------|------|
| 64.73 | 0.46 | 2.12 | 1.27 | 0.21 | 0.26 | 0.09 | 0.094 | 3.25 |

U型反应室的工作原理为:在铁矿石悬浮焙烧过程中,经由旋风分离器的物料从松动室上部入口进入松动室,在松动室底部累积,当其高度超过水平通道时,一部分颗粒会通过水平通道流入左侧流化室,并逐渐在流化室底部累积.随着固体物料的不断给入,反应室(见图4)内物料量逐渐增加,直到水平通道被填满.此时,由松动室底部通入少量松动风,使得松动室底部靠近气体分布板处的物料处于松散状态并流入流化室.需要注意的是,通入的松动风量不能超过松动室内物料的临界流化气量,否则,松动室内物料会被流化并向上运动,甚至从松动室顶部溢出,导致反应室的密封作用失效.然后,通入适当的流化风(反应气体),由于水平通道内始终充满物料,形成料封,气体不能向松动室逆向流动,因此流化室内的气流方向只能向上.当流化室内的固体颗粒与上升的气体接触后会发生化学反应,弱磁性的铁矿物(赤铁矿、褐铁矿等)转变成强磁性铁矿物(磁铁矿),此时实现了它的反应器功能.

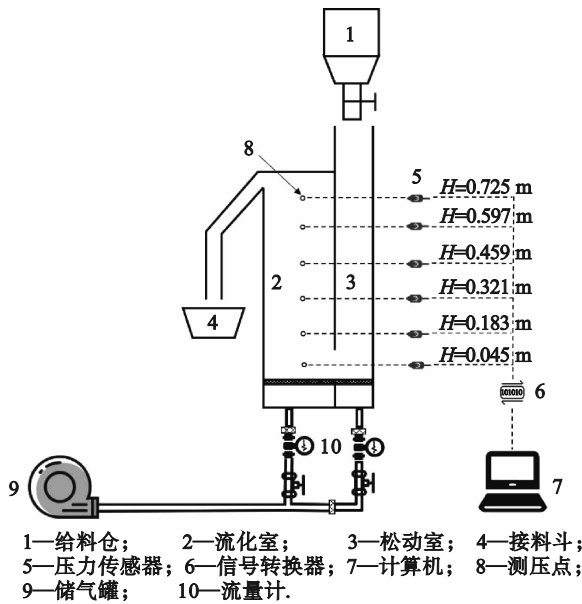


图 3 U 型反应室冷态试验系统示意图

Fig. 3 Diagram of cold test system for the U-type reactor

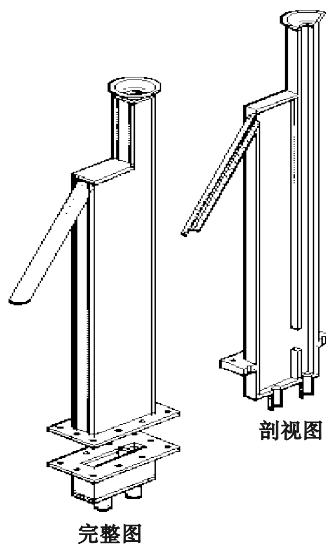


图 4 U 型反应室三维结构示意图

Fig. 4 Three-dimensional structure diagram of U-type reactor

本试验系统中的流化室和松动室单独供风, 松动风、流化风均为压缩空气, 并均采用流量计来控制气量, 气量与风速的关系如下:

$$Q = 3\ 600v \cdot A \approx v. \quad (1)$$

式中: Q 为气量, m^3/h ; v 为风速, m/s ; A 为布风板开孔面积, m^2 .

使用降速法测量临界流化风速 v_{mf} , 通过调节气量将床层从流化状态缓慢地复原到固定床, 同时记录相应的流化气量及压降, 并作计算. 临界流化风速由流化床压降曲线与固定床压降曲线的交点来确定. 具体操作步骤如下: 首先在空床

条件下标定各压力传感器, 得到 p_b , 然后打开气体供给系统检查整个系统是否漏气, 确认无误后关闭. 向反应室中给料, 通过调节松动风和流化风使反应室内充填一定初始高度的物料, 按照降速法进行测量, 通过流量计调节气量, 达到预定工况保持 2 min, 待系统稳定后运行压力信号采集系统, 采样频率 80 Hz, 采样时间 60 s, 共计 4 800 个点, 完成数据采集后, 关闭压力信号采集系统, 清空反应室内物料. 按照式 (2) 得到测压点动态压强值:

$$p_i = 12.5I - 515\ 762.5. \quad (2)$$

式中: p_i 为对应的压强值, Pa; I 为压力传感器采集值, mA. 对采集到的数据进行滤波消噪, 并按式 (3) 计算压降:

$$\Delta p = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n p_i - p_b. \quad (3)$$

式中: Δp 为床层压降, Pa; p_b 为空床下的压强, Pa; n 为采样个数.

2 试验结果与讨论

2.1 物料密度对临界流化特性的影响

U 型反应室作为悬浮磁化焙烧装备的核心反应部件, 需要实现不同密度矿石的流态化及还原, 本试验采用粒度为 $<0.074\ \text{mm}$, $0.074\sim 0.10\ \text{mm}$ 和 $0.10\sim 0.15\ \text{mm}$ 的氧化铝和赤铁矿粉作为床料, 在初始床层高度 (H_0) 为 $0.45\ \text{m}$, 松动风量 Q_0 为 $0\ \text{m}^3/\text{h}$ 的条件下, 考察等粒度情况下物料密度对物料临界流化特性的影响规律, 其中氧化铝粉的表现骨架密度为 $2\ 135.68\ \text{kg}/\text{m}^3$, 赤铁矿粉的表现骨架密度为 $3\ 542.27\ \text{kg}/\text{m}^3$. 两种物料床层压降与风速的关系曲线如图 5 所示.

图 5 中实线代表氧化铝粉, 虚线代表赤铁矿粉. 其中图 5a 的相同符号曲线代表同一测压点, 可以看出在不同高度的测压点下, 床内物料由固定床转变为流化床所对应的临界流化风速一致, 说明应用降速法测量临界流化风速时, 测压点所在位置对所得结果影响不大. 图 5b 选取测压点高度 $H_p=0.045\ \text{m}$ 处的压力数据, 其中相同图例符号代表同一粒度, 可以明显地看出, 对于相同粒级的物料, 密度大的赤铁矿粉的 v_{mf} 更大. 这是因为物料的密度越大, 重力越大, 对应的流化所需曳力增大, 床层由固定床向流化床转变所需的气速便随之增大, 即 v_{mf} 变大. 该结果可应用临界流化风速方程式 (4) 来定性分析.

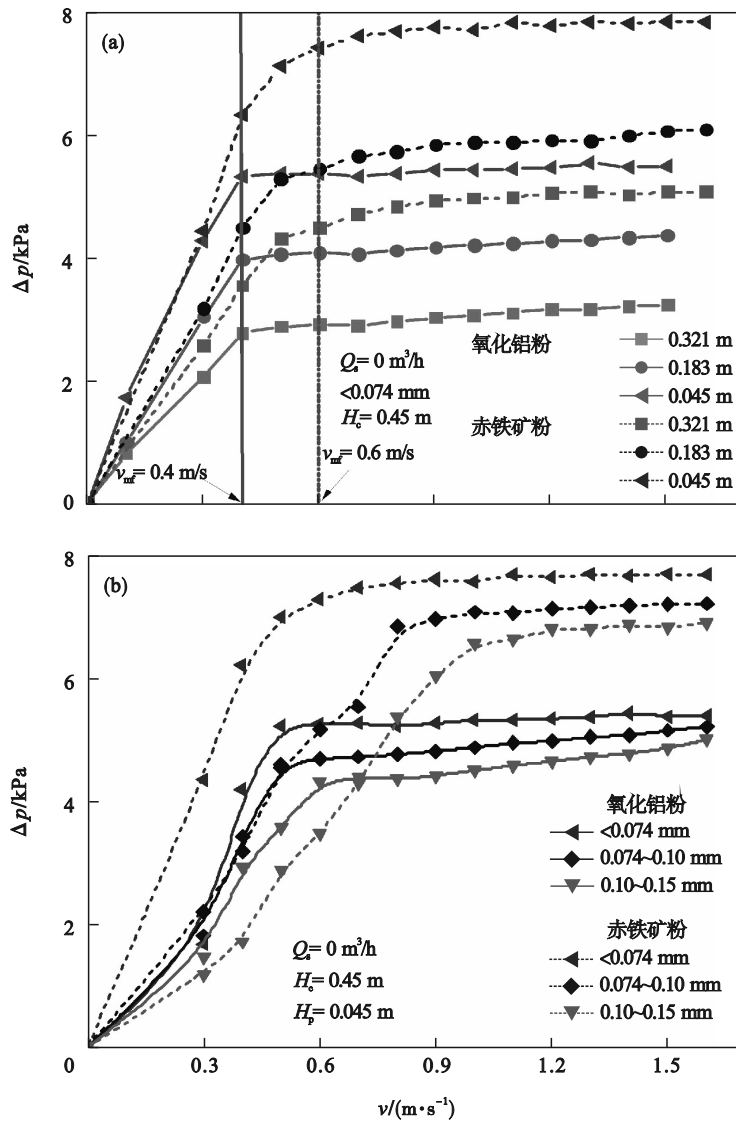


图5 不同密度物料 Δp 与 v 的关系

Fig. 5 Plot of Δp against v under different particle density

(a)—在不同测压点高度下; (b)—在不同粒级下.

$$v_{mf} = \frac{\sqrt{d_p(\rho - \rho_f)g\varepsilon_{mf}^3\phi_s}}{6300\rho_f} \quad (4)$$

式中: v_{mf} 为临界流化风速, m/s; d_p 为颗粒粒度, m; ρ 为物料密度, kg/m^3 ; ρ_f 为流体密度, kg/m^3 ; ε_{mf} 为临界流化空隙率; ϕ_s 为颗粒球形度.

由式(4)可以看出, 临界流化风速与物料密度呈正相关, 即物料密度越大, 其值越大. 这是因为密度的增大会导致颗粒重力的增加, 对应的流化所需曳力也增加, 因而床层进入流化床时所对应的临界流化风速 v_{mf} 增加; 进入流化床后, 床层压降等于单位床层截面积上的颗粒质量, 可以观察到较高密度的赤铁矿粉此时具有较高的床层压降.

2.2 物料粒度对临界流化特性的影响

物料粒度决定着 U 型反应室内物料流态化

的基本性质与行为, 不同粒度下, 物料的流化特性存在较大差异, 在工业生产中容易造成反应不同步, 焙烧产品质量不均匀等问题.

以赤铁矿粉为研究对象, 在初始床层高度为 0.45 m、松动风量为 $0 \text{ m}^3/\text{h}$ 的条件下, 选取 $H_p = 0.045 \text{ m}$ 处的压力数据来考察物料粒度对物料临界流化特性的影响, 赤铁矿粉床层压降与风速的关系曲线见图 6.

由图 6 可以清楚地看到, 随着物料粒度的增大, v_{mf} 逐渐增加, 当赤铁矿由 $<0.074 \text{ mm}$ 增大为 $0.15 \sim 0.30 \text{ mm}$ 时, v_{mf} 由 0.60 m/s 提高至 1.60 m/s , 变化显著, 表明物料粒度是影响 v_{mf} 的主要因素. 该结果同样可以由式(4)解释, 物料粒度是影响 v_{mf} 的主要因素, 粒度的增大造成物料的重力增加, 对应的流化所需曳力增加, 因而其进入流化

状态时所对应的临界流化气速 v_{mf} 增加. 在同样的工况下, 粒度小的物料会优先由固定床向流化床转变.

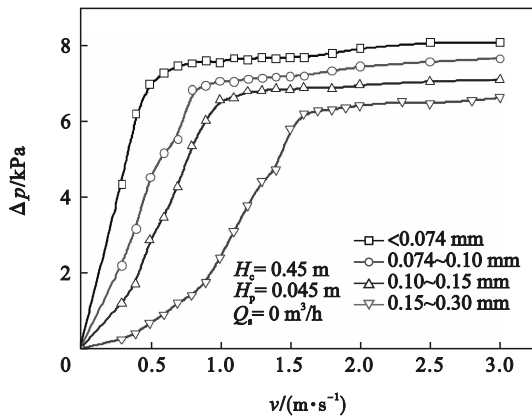


图 6 不同粒度赤铁矿粉 Δp 与 v 的关系

Fig. 6 Plot of Δp against v under different particle size for hematite powder bed

2.3 松动风量对临界流化特性的影响

松动风的存在对于 U 型反应室的正常运行具有重要的意义, 这部分气体具有双重作用: 一方面使松动室内的物料相对松散, 利于物料向下流动; 另一方面为物料通过底部水平通道进入流化室提供驱动力, 避免物料在水平通道处堆积. 本试验采用 0.074~0.10 mm, 0.15~0.30 mm 的赤铁矿粉, 在初始床层高度为 0.45 m 的条件下, 选取 $H_p=0.045$ m 处的压力数据探究了松动风量对物料临界流化特性的影响规律, 赤铁矿粉床层压降与气速的关系曲线如图 7 所示.

由图 7 可以看到, 随着松动风量的增大, 床层压降逐渐增大. 这是因为随着 Q_s 的增大, 松动室底部的物料逐渐松散, 部分松动风会携带少量物料通过底部水平通道流入流化室内, 使得流化室内床层空隙率减小, 由 Ergun 公式(式(5))^[18]可知床层压降随之增大.

$$\frac{\Delta p}{H} = 1.75 \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3} \frac{\rho_f v^2}{\phi_s d_p} + 150 \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \frac{\mu_f v}{(\phi_s d_p)^2}. \quad (5)$$

式中: H 为床层高度, m; ε 为床层空隙率; μ_f 为流体动力黏度, Pa·s.

根据图 7 的试验结果可以得到不同工况下的临界流化气速, 见表 3. 由表 3 可知, 在一定的范围内, 随着松动风量的增加, 流化室临界流化气速呈现减小的趋势. 这是因为此时松动室内物料为固定床的状态, 会有一部分气体通过底部水平通道进入流化室内, 这相当于增大了流化室的表观风量, 所以相应的临界流化气速会减小. 基于此, 可以得出结论: 在松动室内物料处于固定床的条

件下, 流化室内物料的 v_{mf} 随松动风量的增大而减小.

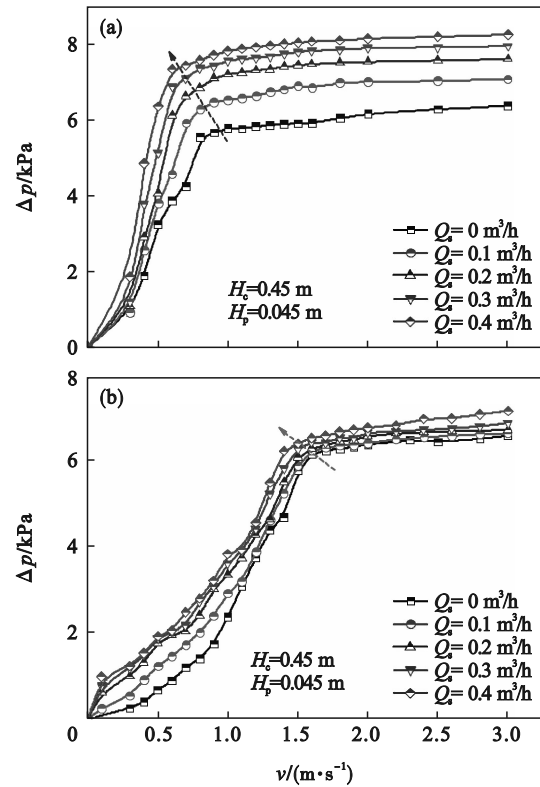


图 7 不同松动风量下赤铁矿粉 Δp 与 v 的关系

Fig. 7 Plot of Δp against v under different aeration gas volume for hematite powder bed (a)—0.074~0.10 mm; (b)—0.15~0.30 mm.

表 3 不同松动风量对 v_{mf} 的影响

Table 3 Effect of aeration gas volume on v_{mf}

| 床料 | 粒度/mm | 松动风量/(m³·h⁻¹) | v_{mf} /(m·s⁻¹) |
|------|------------|---------------|-------------------|
| 赤铁矿粉 | 0.074~0.10 | 0.0 | 0.80 |
| | | 0.1 | 0.75 |
| | | 0.2 | 0.68 |
| | | 0.3 | 0.64 |
| | | 0.4 | 0.60 |
| | 0.15~0.30 | 0.0 | 1.60 |
| | | 0.1 | 1.58 |
| | | 0.2 | 1.52 |
| | | 0.4 | 1.50 |
| | | 0.6 | 1.48 |

2.4 临界流化气速理论计算

临界流化气速是气固流态化重要的特征参数之一, 固定床层压降与气速的关系可用经典 Ergun 公式(式(5))表示. 在忽略气固两相的加速效应及流体、颗粒与反应室壁面的摩擦力的前提下, 可认为床层压降全部转化为流体对床层的曳力, 如式(6)所示:

$$\Delta p \cdot A = A \cdot H [\rho(1 - \varepsilon_{mf})g + \rho_f \varepsilon_{mf}g]. \quad (6)$$

在临界流化气速的条件下,床层压降等于单位截面积床层的总质量,当 $v = v_{mf}$, $\varepsilon = \varepsilon_{mf}$ 时,联立式(5)和式(6),可得出关于 v_{mf} 的二次方程:

$$\frac{1.75}{\phi_s \varepsilon_{mf}^3} \left(\frac{d_p v_{mf} \rho_f}{\mu_f} \right)^2 + \frac{150(1 - \varepsilon_{mf})}{\phi_s^2 \varepsilon_{mf}^3} \left(\frac{d_p v_{mf} \rho_f}{\mu_f} \right) = \frac{d_p^3 \rho_f g (\rho - \rho_f)}{\mu_f^2}. \quad (7)$$

Wen 等^[19]发现,对于各种不同的系统均有如下近似关系式成立:

$$\frac{1}{\phi_s \varepsilon_{mf}^3} \approx 14,$$

$$\frac{1 - \varepsilon_{mf}}{\phi_s^2 \varepsilon_{mf}^3} \approx 11.$$

引入雷诺数 Re_{mf} 与阿基米德数 Ar 简化方程:

$$Re_{mf} = \frac{d_p v_{mf} \rho_f}{\mu_f},$$

$$Ar = \frac{d_p^3 \rho_f g (\rho - \rho_f)}{\mu_f^2}.$$

式(7)可简化为

$$Re_{mf} = \sqrt{C_1^2 + C_2 Ar} - C_1. \quad (8)$$

式中: $C_1 = 33.7$; $C_2 = 0.0408$.

最终推导出临界流化气速的简化方程如式(9)所示:

$$v_{mf} = \frac{Re_{mf} \mu_f}{d_p \rho_f}. \quad (9)$$

通过式(9)可计算得到不同物料的临界流化气速,结果见表4.

由表4可以得知,本文测得的临界流化气速与 Wen-Yu 经验公式的计算结果存在一定的偏差.这是因为该经验公式假设空隙率和球形度等参数为固定值,对窄级别筛分物料偏差较小,且只满足常规流化床装置,对于其他不同的物料及流化床装置,计算结果具有较大误差.因此,有必要对该经验公式进行修正,以得到适用于U型反应室内物料临界流化气速的关系式.Zheng 等^[20]报道了在不同温度条件下 $350 \sim 1410 \mu\text{m}$ 颗粒的临界流化气速测量结果,将其数据与本试验测得的 v_{mf} 数据整合进行分析,可有效弥补本试验中物料粒度较小、无大粒度临界流化气速测量结果的缺憾,使所建立的关系式具有更广泛的应用性.因此,基于 $Re_{mf} = \sqrt{C_1^2 + C_2 Ar} - C_1$ 的形式,综合 Zheng 和本试验测量结果,拟合得到 Ar 与 Re_{mf} 之间的关系如图8所示.

通过最小二乘法参数估值的方法,求得了 Ar

表4 计算和试验的固体物料临界流化气速
Table 4 Calculated and measured v_{mf} of solid particles

| 固体物料 | 粒度 | 平均粒度 | $v_{mf}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$ | |
|------|------------|-------|---|------|
| | mm | mm | 计算值 | 试验值 |
| 氧化铝粉 | <0.074 | 0.071 | 0.11 | 0.40 |
| | 0.074~0.10 | 0.092 | 0.23 | 0.45 |
| 赤铁矿粉 | 0.10~0.15 | 0.147 | 0.48 | 0.53 |
| | <0.074 | 0.070 | 0.15 | 0.55 |
| 赤铁矿粉 | 0.074~0.10 | 0.093 | 0.29 | 0.78 |
| | 0.10~0.15 | 0.146 | 0.65 | 1.08 |
| | 0.15~0.30 | 0.215 | 1.31 | 1.40 |

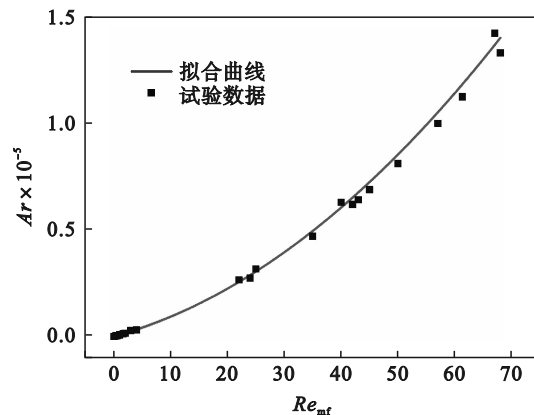


图8 Ar 和 Re_{mf} 的拟合关系曲线

Fig. 8 Fitting relation curve of Ar and Re_{mf}

和 Re_{mf} 之间的修正关系式:

$$Re_{mf} = \sqrt{18.63^2 + 0.0512 Ar} - 18.63.$$

由此,可以得到适用于U型反应室内物料临界流化气速的经验式:

$$v_{mf} = \frac{\mu_f}{d_p \rho_f} \left(\sqrt{18.63^2 + 0.0512 Ar} - 18.63 \right).$$

3 结 论

1) 悬浮磁化焙烧装备是处理难选铁矿石的有效途径,其核心反应部件U型反应室是典型的流化床反应器,兼具还原铁矿石的作用.在冷态试验系统的基础上,采用降速法明确了物料性质、操作因素对该流化室内铁矿石临界流化特性的影响,对于U型反应室的作用实现具有指导意义.

2) 根据床层压降-气速曲线观察到U型反应室内物料的临界流化气速随物料密度的增大而增大,测压点的位置对于临界流化气速的测定影响不大,另外赤铁矿粉最终的床层压降高于氧化铝粉的.

3) U型反应室内物料的临界流化气速随物

料粒度的增大而增大,表明物料粒度也是影响物料临界流化特性的主要因素,在气量逐渐增加条件下,细粒级的床层会优先由固定床转变为流化床。

4) 物料的临界流化风速随松动风量的增大而减小,表明松动风量作为一种操作因素会对U型反应室内物料的临界流化风速产生作用。

5) 对临界流化风速常规经验公式进行了修正,修正临界流化风速公式的计算结果与试验结果吻合较好,适用于U型反应室内物料的流化行为预测。

参考文献:

- [1] 邢凯,朱清,邹谢华.我国铁素资源供给态势分析[J].中国国土资源经济,2022,35(8):27-37.
(Xing Kai, Zhu Qing, Zou Xie-hua. Analysis of supply situation of iron resources in China [J]. *Natural Resource Economics of China*, 2022, 35(8): 27-37.)
- [2] 王琼杰.难选铁矿资源绿色高效利用不再难[N].中国矿业报,2022-08-09(4).
(Wang Qiong-jie. Green and efficient utilization of refractory iron ore resources is no longer difficult [N]. *China Mining Journal*, 2022-08-09(4).)
- [3] 韩跃新,高鹏,李艳军,等.我国铁矿资源“劣质能用、优质优用”发展战略研究[J].金属矿山,2016(12):2-8.
(Han Yue-xin, Gao Peng, Li Yan-jun, et al. Development strategies of available use of inferior quality and optimal use of high quality for domestic iron ore resources [J]. *Metal Mine*, 2016(12): 2-8.)
- [4] Yuan S, Zhou W T, Han Y X, et al. Selective enrichment of iron particles from complex refractory hematite-goethite ore by coal-based reduction and magnetic separation [J]. *Powder Technology*, 2020, 367: 305-316.
- [5] Tang Z D, Xiao H X, Sun Y S, et al. Exploration of hydrogen-based suspension magnetization roasting for refractory iron ore towards a carbon-neutral future: a pilot-scale study [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2022, 47(33): 15074-15083.
- [6] 韩跃新,张小龙,高鹏,等.中国铁矿石选矿技术发展展望[J].金属矿山,2024(2):1-24.
(Han Yue-xin, Zhang Xiao-long, Gao Peng, et al. Development and prospect of iron ore processing technologies in China [J]. *Metal Mines*, 2024(2): 1-24.)
- [7] Sun Y S, Zhu X R, Han Y X, et al. Iron recovery from refractory limonite ore using suspension magnetization roasting: a pilot-scale study [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 261: 121221.
- [8] Yuan S, Zhou W T, Han Y X, et al. Individual enrichment of manganese and iron from complex refractory ferromanganese ore by suspension magnetization roasting and magnetic separation [J]. *Powder Technology*, 2020, 373: 689-701.
- [9] Zhang X L, Han Y X, Sun Y S, et al. Innovative utilization of refractory iron ore via suspension magnetization roasting: a pilot-scale study [J]. *Powder Technology*, 2019, 352: 16-24.
- [10] Tang Z D, Gao P, Sun Y S, et al. Experimental study on fluidization characteristics of different-sized particles in a U-type reduction chamber [J]. *Advanced Powder Technology*, 2019, 30(10): 2430-2439.
- [11] Tang Z D, Gao P, Sun Y S, et al. Studies on the fluidization performance of a novel fluidized bed reactor for iron ore suspension roasting [J]. *Powder Technology*, 2020, 360: 649-657.
- [12] Tang Z D, Han Y X, Gao P, et al. Fluidization characteristics of a U-type reduction chamber in a suspension roaster [J]. *Powder Technology*, 2019, 345: 64-73.
- [13] Chinsuwan A. A mathematical model for predicting the flow behavior through a CFB reactor U type loop-seal [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2021, 177: 121541.
- [14] Stollhof M, Penthor S, Mayer K, et al. Influence of the loop seal fluidization on the operation of a fluidized bed reactor system [J]. *Powder Technology*, 2019, 352: 422-435.
- [15] Gao P, Tang Z D, Han Y X, et al. A pressure drop model of U-typed reduction chamber for iron ore suspension roasting [J]. *Powder Technology*, 2019, 343: 255-261.
- [16] Fu Z J, Zhu J, Barghi S, et al. Minimum fluidization velocity growth due to bed inventory increase in an Air Dense Medium Fluidized Bed [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2019, 359: 1372-1378.
- [17] 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.
(Jin Yong, Zhu Jing-xu, Wang Zhan-wen, et al. Principles of fluidization engineering [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2001.)
- [18] Ergun S. Fluid flow through packed columns [J]. *Journal of Materials Science & Chemical Engineering*, 1952, 48(2): 89-94.
- [19] Wen C Y, Yu Y H. A generalized method for predicting the minimum fluidization velocity [J]. *AIChE Journal*, 1966, 12(3): 610-612.
- [20] Zheng Z X, Yzmazaki R, Jimbo J. Minimum fluidization velocity of large particles at elevated temperatures [J]. *Kagaku Kogaku Ronbunsha*, 1985(11): 1387-1398.