

不同含水率下污泥流化特性试验研究

顾晨恺, 李 烨, 惠建明, 李瑞阳, 郁鸿凌

(上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093)

摘要: 在流化床试验台上, 对某造纸厂污泥颗粒在 9 种不同含水率下的流化特性进行了研究。试验结果表明: 随着污泥含水率的增大, 临界流化速度 u_{mf} 逐渐增大, 床层压降波动变大, 流化变得不稳定, 流化状态由散式流化向聚式流化过渡。当含水率大于 38% 时, 穿孔和沟流极易发生, 污泥无法流化。由于不同种类的污泥流化性质差异较大, 前人试验条件各不相同, 有关 u_{mf} 的计算还没有统一的公式。基于试验数据, 介绍了两类常用的 u_{mf} 经验公式, 比较后采用更优的模型推导出了此类污泥的 u_{mf} 计算公式。其他种类污泥的 u_{mf} 计算公式可参考本文方法较快得到。

关键词: 污泥; 流化床; 含水率; 临界流化速度

中图分类号: TQ 515 **文献标志码:** A

Experimental study on fluidization characteristics of sludge under different moisture contents

GU Chenkai, LI Ye, HUI Jianming, LI Ruiyang, YU Hongling

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

Abstract: On the experimental system of fluidized bed, the fluidization characteristics of sludge under 9 different moisture contents from a papermaking plant were studied. The experimental results show that with the increase of moisture content, the minimum fluidization velocity u_{mf} of sludge increases, the fluctuation of pressure drop increases, thus the fluidization becomes unstable, and the fluidization state transits from particulate fluidization to aggregative fluidization. When the moisture content is greater than 38%, the perforation and groove flow are easy to occur and the sludge can not be fluidized. Because the fluidization characteristics of sludge are quite different and the previous studies vary greatly, there is still no uniform formula for calculating u_{mf} . Therefore, based on the experimental data, two kinds of commonly used empirical formulas of u_{mf} were introduced and a better model was used to derive the calculation formula of u_{mf} after comparison. The calculation formula of u_{mf} for other sludge can be obtained quickly by referring to this method.

Keywords: sludge; fluidized bed; moisture content; minimum fluidization velocity

随着经济的快速发展, 城市和工业污泥的产量日益增多, 污泥的处置问题受到越来越多的重视。污泥是污水处理的终端产物, 未经处理的污泥含水率高、体积庞大、成分复杂, 处置不当易造成二次污泥^[1-2]。在众多处置方法中, 流化床焚烧技术因其燃烧充分、处理速度快、污染物排放低等显著优点在污泥处理行业得到了广泛的应用^[3-5]。湿污泥直接燃烧会导致热损失的增加, 因此污泥干化是污泥处置过程中重要的步骤。流化床干化具有脱水率高、污染小、操作简单等优点, 是污泥深度脱水的有效方式^[6-7]。在污泥流化床干化技术中, 临界流化速度 u_{mf} 是其重要的参数之一, 对流化床的设计和运行有着指导作用。

在预测物料的 u_{mf} 方面, 国内外学者做了大量的研究, 得到了许多 u_{mf} 的经验公式。但由于物料性质和试验条件的不同, 得出的经验公式有很大差异, 至今还没有统一的 u_{mf} 计算公式。在污泥流化研究中发现, 含水率是影响 u_{mf} 的重要因素之一。而前人有关 u_{mf} 的试验, 研究对象多为玻璃球、石英砂、煤样等, 影响因素多为床温、粒径、压力等。有关污泥含水率对 u_{mf} 影响的研究较少。为此, 本文研究了不同含水率下污泥的流化特性, 介绍了 u_{mf} 经验公式的推导过程, 其他种类污泥可以参考本文方法, 通过简单的试验快速得到 u_{mf} 的计算公式。

1 试验装置及步骤

1.1 试验工况及样品

临界流化速度 u_{mf} 是流化态操作的最低速度。本文认为, 床料的物性(密度、粒径分布、表面粘性等)和流化气体的物性(密度、动力粘度等)直接影响 u_{mf} , 温度、压力等外因通过影响床料和气体的物性间接影响 u_{mf} 。实际工程中流化床干燥设备的运行压力为常压, 运行温度在 100 ℃ 以下。由于试验中测得温度在 100 ℃ 以下时, 污泥颗粒的密度、粘性等随温度变化较小, 且 Saxena^[8]对白云石(20~500 ℃)的研究也表明温度对 u_{mf} 影响较小, 故选定试验温度为 30 ℃, 试验压力为 0.1 MPa。

试验样品为东莞某造纸厂的造纸污泥, 主要组成有纤维素、造纸填料、化工助剂和水。造纸污泥已经过机械压滤和破碎处理, 初始含水率为 48%, 密度为 1 269 kg/m³, 呈颗粒状。污泥粒度分布列于表 1, 按质量百分比法计算污泥颗粒的质量

平均直径 d_p 为 1.96 mm^[9]:

$$d_p = \sum_{i=1}^n x_i d_i$$

式中: d_i 为颗粒直径; x_i 为质量百分比。

表 1 污泥粒度分布
Tab.1 Size distribution of sludge

粒径范围/mm	0~0.5	0.5~0.7	0.7~1	1~1.4	1.4~2	2~2.8	2.8~4
质量分数/%	5.8	4.5	11.9	9.9	21.6	24.6	21.7

将收到的初始污泥颗粒置于 105 ℃ 的烘箱内干燥 8 h, 得到全干污泥, 通过前后的质量差计算得到初始污泥的含水率为 48%。在制备不同含水率的污泥时, 首先取一个空托盘称重, 再将适量含水率为 48% 的初始污泥置于托盘中, 称量其总质量, 计算烘干到目标含水率时这份污泥应该达到的目标质量。将污泥放入 60 ℃ 的烘箱内干燥, 每 10 min 取出称重并混合均匀, 直至达到目标质量, 取出密封保存。使用同样的方法分别得到不同含水率的污泥样品, 不同含水率下污泥密度参数列于表 2。烘箱干燥的过程中会有部分颗粒破碎, 为了防止粒度分布发生改变对试验结果造成影响, 将干燥后的污泥筛分, 按原粒度分布重新混合后用于试验。

表 2 不同含水率下污泥密度
Tab.2 Density of sludge with different moisture contents

含水率/%	0	5	10	15	20	25	30	35	40	48
密度/(kg·m ⁻³)	660	695	733	776	825	880	943	1 015	1 100	1 269

1.2 试验装置

图 1 为试验装置简图。装置主要由流化床反应器、压差变送器、涡街流量计和离心式鼓风机组成。反应器的主体是一个直四棱柱流化室, 其中一面设有有机玻璃, 可观察流化室内流化情况, 横截面积 310 mm×230 mm, 有效高度 60 cm。流化室底部设置有布风板、2 层 18 目筛网和压板, 布风板采用平板多孔式, 错列布置, 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。沉降室上宽下窄的结构使气体表观速度降低, 有利于气流携带的细颗粒重新落回流化室内, 减少细颗粒被气流带走而引起的压降变化; 风室起导流和稳流的作用, 使气流进入流化室时分布均匀。压差变送器一端布置于风室内接近布风板处, 一端连接大气。离心式鼓风机配有高性能矢量变频器,

通过控制鼓风机转速来控制引入风室的一次风量，通过 LUGB-65 涡街流量计测量空气体积流量，然后计算得到流化室内表观气体流速。

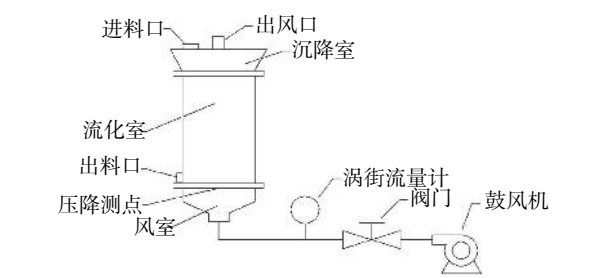


图 1 流化床试验台示意图
Fig.1 Schematic diagram of fluidized bed

1.3 试验步骤

首先，测定空床状态下的布风板阻力，在空床状态下，调节变频器逐渐增大一次风量，在每个风量下维持 2 min，待系统稳定后，记录相应的布风板压降，直到增至最大风量。其次，称取 10 kg 污泥颗粒床料，均匀加入至流化室内，关闭进料口，检查反应器的气密性是否良好。再次，开启变频器，启动风机，将风量调至最大，透过有机玻璃观察流化室内物料的流化状态，确认床内物料已完全流化，维持 5 min 等待系统稳定。然后，调节变频器逐渐减小一次风量，在每个风量下，维持 2 min 待系统稳定后，记录相应的压差变送器和涡街流量计读数，直至风量为零(变频器可调最大频率为 50 Hz，每次以 2 Hz 逐步递减进行调节，共 25 组数据)。最后，待流化结束、床层高度较流化前略有增大时，记录此刻的床层高度，以用于计算料层空隙率。打开出料口，清空物料，换不同含水率的污泥重复以上步骤。

2 试验结果及分析

2.1 布风板阻力特性

试验已经测得了不同的一次风量下布风板的压降。风速 u 的计算如下：

$$u = \frac{Q_g}{A_c} \tag{1}$$

式中： Q_g 为一次风量； A_c 为床层截面积(经计算为 0.0713 m^2)；

图 2 为布风板压降曲线，拟合得到布风板压降 ΔP_c 与表观风速 u 的函数关系为

$$\Delta P_c = -0.00497 + 0.04749u + 0.54944u^2 \tag{2}$$

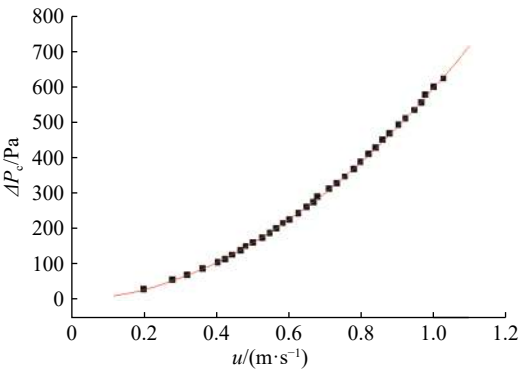


图 2 布风板压降曲线
Fig.2 Pressure drop curve of air distributor

2.2 临界流化速度的确定

由固定床阶段进入流化阶段时需克服颗粒之间的作用力，升速法所得压降曲线由于体系的迟滞效应而带有任意性，因此颗粒的最小流化速度通常用降速法测定^[10-11]。本试验采用降速法，即先增大一次风量至床层完全流化，再逐次减小风量，并记录相应数据。试验可以测得污泥颗粒在不同表观风速 u 下，床层与布风板的压降之和，减去对应风速下空床布风板压降 ΔP_c ，即可得到床层压降 ΔP 随表观风速 u 的变化规律。将固定床阶段压降曲线与流化阶段压降曲线的切线交点定为临界流化点。图 3 为污泥含水率为 0% 时的风速-压降曲线，图中点 A 为临界流化点，对应的表观风速为临界流化速度 u_{mf} ^[12]。

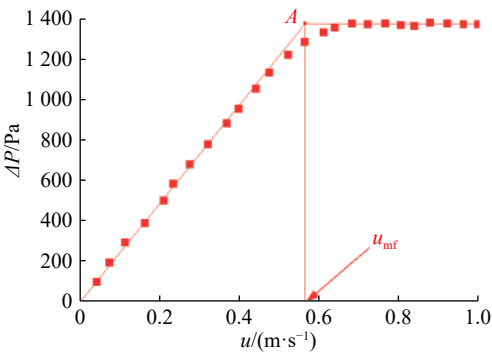


图 3 床层压降随风速的变化
Fig.3 Variation of pressure drop with gas velocity

2.3 含水率对污泥流化的影响

图 4 为污泥含水率分别为 15% 和 35% 时流化过程现场图。图 5 给出了 9 种不同含水率污泥流化的风速-压降曲线。

结合图 4 和图 5，分析可知，随着污泥含水率的增大， u_{mf} 呈上升趋势，流化状态由散式流化向聚式流化过渡。一方面，含水率的增大使污泥颗粒

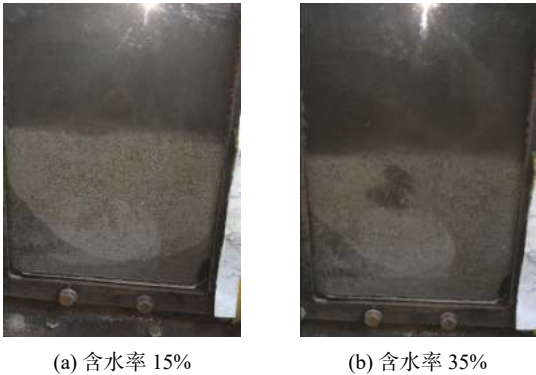


图 4 部分流化过程照片

Fig. 4 Partial fluidization process photos

的密度增大, 而 u_{mf} 与颗粒密度呈正相关, 因此 u_{mf} 随含水率的增大而增大。另一方面, 在烘箱干燥过程中发现, 试验所用造纸污泥含有许多絮状纤

维, 随着含水率的增大, 污泥质地变软, 且颗粒表面吸附了更多的水分, 颗粒黏性和颗粒聚团能力明显增强。这使得污泥流化时颗粒与颗粒之间、颗粒与反应器壁面间的相互作用力均增大, 流化阻力增大, 从而使 u_{mf} 增大。由图 5 还可知, 含水率的增大使污泥流化稳定性降低。图 5 中不同含水率下的流化曲线表明: 低含水率的污泥颗粒流化状态稳定, 所得流化曲线平稳, 在固定床阶段向流化阶段过渡时有平滑的拐点, 试验观测流化室内呈散式流化; 而高含水率的污泥颗粒流化状态逐渐恶化, 所得流化曲线有较大波动, 固定床阶段向流化阶段过渡的拐点不易确定, 试验观测流化室内呈聚式流化。试验测得造纸污泥在此粒度分布下可流化的最大含水率约为 38%, 含水率高于 38% 时流化极不稳定, 容易出现穿孔和沟流。

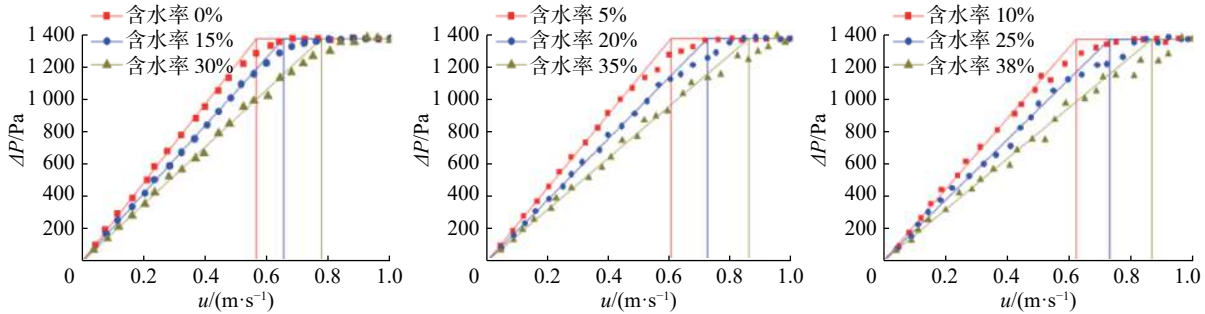


图 5 不同含水率污泥流化曲线

Fig.5 Fluidization curves under different moisture contents

2.4 临界流化速度经验公式

国内外学者对 u_{mf} 做了大量研究, 得出很多 u_{mf} 的经验公式, 表 3 为部分学者得出的经验公式及公式适用条件^[8,13-18]。

表 3 中, Ar 为阿基米德数; Re_{mf} 为临界流化时的雷诺数。

图 6 为本文 u_{mf} 试验值与这些经验公式计算值的对比图, 其中序号 1~7 分别对应于表 3 中的经验公式序号, 红色粗实线为 u_{mf} 随含水率的变化趋势。分析可知, 由于物料流化性质的差异, 直接使用这些经验公式来计算试验所用污泥的 u_{mf} 会产生较大偏差, 需选择合适的方法重新拟合经验公式。

表 3 临界流化速度经验公式

Tab.3 Empirical formulas of u_{mf}

序号	学者	经验公式	试验条件
1	Wen 等 ^[13]	$Re_{mf} = \sqrt{33.7^2 + 0.040\ 8Ar} - 33.7$	0.04~20 mm, 室温, $0.001 < Re_{mf} < 4\ 000$
2	Saxena 等 ^[8]	$Re_{mf} = \sqrt{25.28^2 + 0.0571Ar} - 25.28$	0.088~1.41 mm, $6 < Re_{mf} < 102$
3	Babu 等 ^[14]	$Re_{mf} = \sqrt{25.25^2 + 0.065\ 1Ar} - 25.25$	0.05~2.87 mm, 室温, $0.02 < Re_{mf} < 170$
4	Godard 等 ^[15]	$Re_{mf} = \sqrt{25.7^2 + 0.036\ 5Ar} - 25.7$	—
5	Thonglimp 等 ^[17]	$Re_{mf} = \sqrt{31.6^2 + 0.0425Ar} - 31.6$	0.11~2.12 mm
6	Doichev 等 ^[16]	$Re_{mf} = 0.001\ 08Ar^{0.947}$	0.09~2.2 mm, $\rho_p = 2\ 650\ \text{kg/m}^3$
7	Barbosa 等 ^[18]	$Re_{mf} = 0.0019Ar^{0.87}$	—

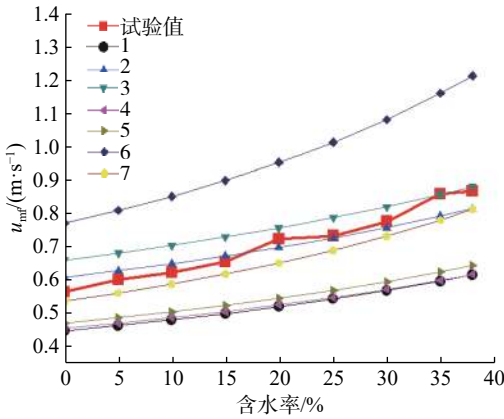


图6 u_{mf} 试验值与经验公式计算值比较

Fig. 6 Comparison between calculation and experimental results of u_{mf}

计算 u_{mf} 的经验公式虽多,但从公式的推导过程来分,基本可以分为以下两类。

2.4.1 第一类经验公式

此类公式以 Wen 等人的经验公式为代表,由床层压降与表观风速的厄贡方程推导而来。厄贡方程假设在临界流化状态时,床层压降近似等于气体对固体颗粒的拽力,忽略气体及床料与床壁间的摩擦力及内力。

在固定床阶段,床层压降与表观风速的关系式,可由厄贡方程准确表示为

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{150(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \frac{u\mu}{(\Phi d_p)^2} + \frac{1.75(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3} \frac{\rho u^2}{\Phi d_p} \quad (3)$$

式中: L 为床层高度; ε 为料层空隙率; u 为气体流速,即表观风速; Φ 为颗粒球形度; ρ 为气体密度; μ 为气体动力黏度。

在临界流化状态时,床层压降等于单位面积上的料层重量,即

$$\frac{\Delta P}{L_{mf}} = (1-\varepsilon_{mf})(\rho_p - \rho)g \quad (4)$$

式中: ρ_p 为物料颗粒密度; 下标 mf 表示处于临界流化状态。

将式(3)和式(4)联立,并引入准则数

$$Ar = \frac{d_p^3 \rho (\rho_p - \rho) g}{\mu^2}, Re_{mf} = \frac{\rho d_p u_{mf}}{\mu}$$

化简整理得到

$$Ar = \frac{1.75}{\Phi \varepsilon_{mf}^3} Re_{mf}^2 + \frac{150(1-\varepsilon_{mf})}{\Phi^2 \varepsilon_{mf}^3} Re_{mf} \quad (5)$$

将式(5)看作 Re_{mf} 的一元二次方程,正根为

$$Re_{mf} = \sqrt{C_1^2 + C_2 Ar} - C_1 \quad (6)$$

式中: $C_1 = \frac{42.86(1-\varepsilon_{mf})}{\Phi}$; $C_2 = \frac{\Phi \varepsilon_{mf}^3}{1.75}$ 。只需确定式中 ε_{mf} 和 Φ 即可。

ε_{mf} 和 Φ 的确定方法参考闫维平等^[9]所述: ε_{mf} 为临界流化状态时的床层空隙率,略大于固定床时的空隙率。它实际上相当一个几乎没有重量的填充床的最疏松状态,可以由随意填充试验来测量。 ε_{mf} 取流化结束时的床层空隙率为

$$\varepsilon_{mf} = 1 - \frac{10}{L_{mf} A_c \rho_p} \quad (7)$$

考虑到若 ε_{mf} 在各个含水率取不同值, Φ 的值将很难确定,且测得不同含水率时的 ε_{mf} 变化很小,因此通过试验测得 ε_{mf} 算术平均值为 0.414。将不同含水率下的污泥物性参数、 u_{mf} 的试验值及 ε_{mf} 的算术平均值代入式(6),通过试凑法得到 Φ 的近似值。最后代入得到 $C_1=16.09$, $C_2=0.0445$,进而得到 u_{mf} 的经验公式。

由于低含水率的污泥颗粒比高含水率时流化稳定,试验偏差小,使用低含水率的几组数据拟合得到经验公式

$$Re_{mf} = \sqrt{16.09^2 + 0.0445 Ar} - 16.09 \quad (8)$$

u_{mf} 试验值与式(8)计算值的对比如图7所示,显然,计算值与试验值偏差很大。分析原因是由于此类公式在应用厄贡方程时假设了床层压降等于气体对固体颗粒的拽力,而忽略了床料颗粒之间的内力。当试验样品为玻璃珠、石英砂等非黏性物料时计算较为准确。造纸污泥在低含水率时黏性较小,与上式偏差不大,但随着含水率

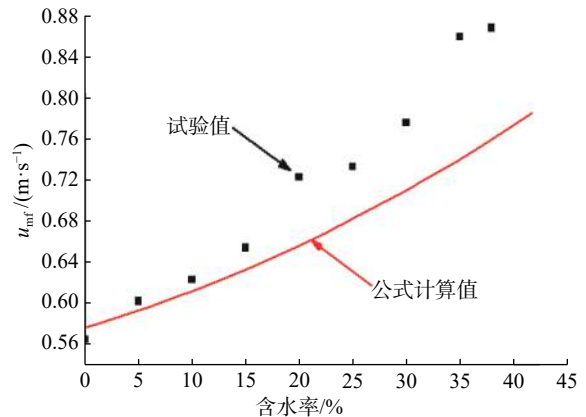


图7 u_{mf} 试验值与式(8)计算值对比

Fig. 7 Comparison between calculated value in formula (8) and experimental value of u_{mf}

的增大,污泥黏性增大,部分颗粒聚团,物料之间的内力足够大已不能忽略。因此试验值比计算值大,且含水率越高,偏差越大。

2.4.2 第二类经验公式

此类公式由单颗粒受力分析推导而来。

在临界流化现象发生时,单颗粒或颗粒团在床内主要受到3个力的作用,分别为颗粒本身的重力 F_g 、气体的浮力 F_f 、流化气体的拽力 F_y ,且这3个力相互平衡,即

$$F_g - F_f = F_y$$

$$\rho_p g \frac{\pi}{6} d_p^3 - \rho g \frac{\pi}{6} d_p^3 = C_d \frac{\pi}{4} d_p^2 \frac{u_{mf}^2}{2} \rho \quad (9)$$

式中, C_d 为拽力系数。

两边同乘 $\frac{\rho}{\mu^2}$,并引入准则数 Ar 和 Re_{mf} ,化简整理得到

$$Ar = \frac{3}{4} C_d Re_{mf}^2 \quad (10)$$

该公式应用于多粒子系统时会有偏差,为了消除这种偏差,将式(10)整理成^[19]

$$Re_{mf} = a Ar^b \quad (11)$$

此类公式最早由前苏联学者费多罗夫提出,此后学者们针对不同情况得到许多组 a 、 b 值,我国《层状燃烧及沸腾燃烧工业锅炉热力计算方法》中推荐的公式就属于此类。

基于试验数据,拟合得到经验公式

$$Re_{mf} = 0.001 25 Ar^{0.91} \quad (12)$$

u_{mf} 试验值与式(12)计算值的对比如图8所示,可以看到计算值与试验值偏差较小,离散程度在5%以内,因此式(12)可用于此造纸污泥的 u_{mf} 计算。

需要说明的是,由于城市及工业污泥种类繁多,流化性质差异很大,其他种类的污泥若直接套用式(12),可能造成一定偏差,甚至此造纸污泥在不同的粒度分布下, u_{mf} 也可能不同。虽然此式不具备广泛通用性,但其他种类的污泥可参考式(11),通过几组流化试验来确定 a 和 b ,即可得到可用的 u_{mf} 计算公式。

3 结 论

本试验在常压0.1 MPa和常温30℃下,以空气为流化气体,测量了含水率从0%~38%的造纸

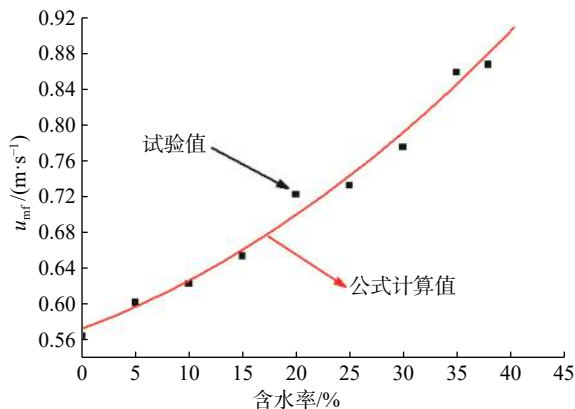


图8 u_{mf} 试验值与式(12)计算值对比

Fig. 8 Comparison between calculated value in formula (12) and experimental value of u_{mf}

污泥临界流化速度 u_{mf} 。此外,将试验结果与现有经验公式进行对比与分析后,选用合适的方法重新拟合了 u_{mf} 的经验公式,得到如下结论:

a. 造纸污泥在试验粒度分布下,低含水率时呈散式流化,随着含水率的增大,逐渐向聚式流化过渡,含水率高于38%时难以流化,此时极易发生穿孔和沟流;

b. 污泥颗粒的 u_{mf} 随含水率的增大而增大;

c. 此造纸污泥的 u_{mf} ,可以用公式 $Re_{mf}=0.001 25 Ar^{0.91}$ 来计算,误差在5%以内;

d. 在主流的两类经验公式中,形如 $Re_{mf}=a Ar^b$ 的经验公式在计算污泥的 u_{mf} 时误差较小。

参考文献:

- [1] 吕蕾,时兰翠,黄海兵,等.造纸污泥无害处理现状与展望[J].林业机械与木工设备,2014,42(6): 6-8.
- [2] 伍峰,周少奇,陈杨梅.造纸污泥资源化研究现状与前景[J].中华纸业,2009,30(7): 97-100.
- [3] 李晓东,岑宇虹.污泥流化床焚烧技术的研究及应用[J].燃烧科学与技术,2002,8(2): 159-162.
- [4] 严莉萍,夏平.循环流化床焚烧污泥技术的发展现状分析[J].企业技术开发,2014,33(8): 5-6.
- [5] 黄毅,朱建国,吕清刚,等.城市下水污泥循环流化床焚烧工艺分析[J].工业加热,2013,42(3): 37-39.
- [6] 邵志伟,黄亚继,严玉朋,等.流化床中污泥干燥特性[J].环境工程学报,2014,8(9): 3965-3970.
- [7] SHIN Y S, KIM H C, CHUN H S. Drying of water treatment process sludge in a fluidized bed dryer[J]. Korean Journal of Chemical Engineering, 2000, 17(1): 22-26.
- [8] SAXENA S C, VOGEL G J. The measurement of incipient fluidization velocities in a bed of coarse dolomite at temperature and pressure[J]. Trans IChemE, 1977, 55:

184–189.

- [9] 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, 86.
- [10] 陈振东, 陈晓平, 吴烨, 等. 热态临界流化速度研究[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(14): 21–25.
- [11] 金涌, 祝京旭, 汪展文. 流态化工程原理[M]. 北京:清华大学出版社, 2001: 21–23.
- [12] 张茂根, 翁志学, 黄志明, 等. 颗粒统计平均粒径及其分布的表征[J]. 高分子材料科学与工程, 2000, 16(5): 1–4.
- [13] WEN C Y, YU Y H. A generalized method for predicting the minimum fluidization velocity[J]. *AIChE Journal*, 1966, 12(3): 610–612.
- [14] BABU S P, SHAH B A, TALWALKAR A. Fluidization correlation for coal gasification materials — minimum fluidization velocity and fluidized bed expansion ratio[J]. *AIChE Symposium Series*, 1978, 176: 176–186.
- [15] GODARD K, RICHARDSON J F. Correlation of data for minimum fluidising velocity and bed expansion in particulate fluidised systems[J]. *Chemical Engineering Science*, 1969, 24(2): 363–367.
- [16] DOICHEV K, AKHMAKOV N S. Fluidisation of polydisperse systems[J]. *Chemical Engineering Science*, 1979, 34(11): 1357–1359.
- [17] THONGLIMP V, HIQUILY N, LAGUERIE C. Vitesse minimale de fluidisation et expansion des couches fluidisées par un gaz[J]. *Powder Technology*, 1984, 38(3): 233–253.
- [18] LIN C L, WEY M Y, YOU S D. The effect of particle size distribution on minimum fluidization velocity at high temperature[J]. *Powder Technology*, 2002, 126: 297–301.
- [19] 张晓杰, 韩志华, 刘文弘. 临界流化速度的计算及应用[J]. 东北电力技术, 1999(1): 16–20.

(编辑: 董伟)

(上接第 21 页)

- [8] MICHELSEN B, STROBL S, PARTELI E R J, et al. Two-dimensional airflow modeling underpredicts the wind velocity over dunes[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 16572.
- [9] 周晓斯, 王元, 李志强. 小尺度新月形沙丘背风侧流场特性的大涡模拟分析[J]. 西安交通大学学报, 2013, 47(7): 114–119.
- [10] HARGREAVES D M, WRIGHT N G. On the use of the $k-\varepsilon$ model in commercial CFD software to model the neutral atmospheric boundary layer[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2007, 95(5): 355–369.
- [11] ZHANG X. CFD Simulation of neutral ABL flows[R]. Roskilde: Technical University of Denmark, 2009.
- [12] TAPIA X P. Modelling of wind flow over complex terrain using OpenFoam[D]. Gävle: University of Gävle, 2009: 35–42.
- [13] CLAUDIN P, WIGGS G F S, ANDREOTTI B. Field evidence for the upwind velocity shift at the crest of low dunes[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2013, 148(1): 195–206.
- [14] BLOCKEN B, STATHOPOULOS T, CARMELIET J. CFD simulation of the atmospheric boundary layer: wall function problems[J]. *Atmospheric Environment*, 2007, 41(2): 238–252.
- [15] YAN B W, LI Q S, HE Y C, et al. RANS simulation of neutral atmospheric boundary layer flows over complex terrain by proper imposition of boundary conditions and modification on the $k-\varepsilon$ model[J]. *Environmental Fluid Mechanics*, 2016, 16(1): 1–23.
- [16] VERSTEEG H K. An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method[M]. 2nd ed. Harlow: Pearson Education Limited, 2007.
- [17] JASAK H. Error analysis and estimation for the finite volume method with applications to fluid flows[D]. London: Imperial College, 1996.
- [18] 陶文铨. 数值传热学[M]. 2 版. 西安: 西安交通大学出版社, 2001.
- [19] WIGGS G F S, LIVINGSTONE I, WARREN A. The role of streamline curvature in sand dune dynamics: evidence from field and wind tunnel measurements[J]. *Geomorphology*, 1996, 17(1/3): 29–46.

(编辑: 丁红艺)