

气粉两相流壅塞现象的实验研究

王晓鸣, 李强, 邹宗树, 沈峰满

(东北大学材料与冶金学院, 辽宁 沈阳 110004)

摘要: 在均相流理论的基础上, 对气粉两相流喷管的壅塞现象进行了实验考察和理论分析. 选择金属铝粉、三氧化二铝粉、空心三氧化二铝粉为固相, 空气为气相, 通过喷管流动实验测定了不同粉剂与固气比下的气粉两相流达到壅塞的临界压强比, 计算得到了表观音速等参数, 并在此基础上定义了两相流的有效绝热指数和固相的有效热容. 结果表明, 在两相流未达到壅塞前, 质量流量与滞止压强呈三次曲线关系; 在壅塞后质量流量与滞止压强呈线性关系. 固相的浓度和物性对气粉两相流的临界参数有明显的影响, 固相的有效热容随固气比的增加而减小, 随固相导热系数的增大和粒度的减小而增大; 对确定的喷管和粉剂粒度, 固相的相对有效热容随其导热系数的增大而增大. 对常见的气粉两相流, 固相对混合物热容的贡献很小, 可以用气相的绝热指数按两相平衡流模型近似计算气粉两相流的表观音速.

关键词: 气粉两相流; 壅塞现象; 表观临界压强比; 表观音速; 有效绝热指数; 有效热容

中图分类号: TQ021.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-606X(2006)01-0591-06

1 前言

一般认为, 气粉两相流在某种程度上具有纯气流的可压缩性. 由此推断, 气粉两相流也应存在所谓的壅塞现象, 也即在气粉两相混合物通过喷管的流动过程中, 随背压的降低, 当流速达到其当地音速时, 其质量流量将达到最大的临界流量. 这一现象在粉料喷吹的供料分配控制中将具有重大的应用价值. 例如对炉前设有分配器的高炉喷煤系统而言, 由于从分配器到各风口沿程阻力损失差别很大, 导致各风口的煤粉流量不均匀, 可能引起炉况不顺. 若将分配器各出口做成喉口截面相同的喷管, 当满足临界压强而喉口处流动达到壅塞时, 则高炉各风口进煤量将保持相同. 因此, 对气粉两相流喷管流动进行系统的理论和实验研究, 探讨气粉两相混合物参数对流动临界参数的影响, 不仅可进一步完善气粉两相流理论, 而且具有直接的应用意义. 为此, 本课题组近年来逐步对这一问题进行了研究^[1-6]. 本工作在均相流的理论基础上, 针对壅塞现象, 通过实验研究了气粉两相流操作状态参数(如滞止压力、固气比、粉剂的物性)对热力学参数(如绝热指数、表观音速、有效热容等)的影响, 并对均相流理论的适用性进行了验证.

2 理论分析

对气粉两相混合物的喷管流动可以采用不同的研究方法, 包括两相平衡流模型(又称无滑移模型、单流体或均相流模型)、单颗粒动力学模型(单方程耦合模型)、两相非平衡模型(又称双方程耦合模型, 简称两相流模型)3 大类^[7-10]. 单颗粒动力学模型假定气相流动不

受颗粒相存在的影响, 颗粒在气相的带动下运动, 只适用于固相浓度很低的情况. 两相流模型又分双(多)流体法和离散(颗粒)-连续(气相)法, 但均需复杂的数值求解. 从应用角度讲, 两相平衡流是最简便可行的. 两相平衡流是指气相与颗粒的速度和温度彼此相等的两相流动, 是两相流动的一种极端情况. 通过喷管的一维两相平衡流动可以认为是一维定常等熵绝能流动^[11]. 对于渐缩喷管或等直径喷管, 在一定的入口滞止状态条件下, 气粉两相混合物的出口速度应受壅塞音速的限制, 即出口速度不会大于两相混合物的音速. 考虑实验研究的方便可行性, 不采用改变背压的方法, 而是通过滞止压强的改变来研究流量的变化, 从而对壅塞现象进行考察. 此时需要流量与滞止压强的关系式. 令两相平衡流等熵关系式中的两相平衡马赫数 $Ma=1$, 得出两相平衡流达到音速时进口临界滞止压强 p_* 与出口环境压强 p 的理论关系式为

$$\frac{p}{p_*} = \left(\frac{2}{\gamma_m + 1} \right)^{\frac{\gamma_m}{\gamma_m - 1}} \quad (1)$$

比较两相平衡流滞止压强 p_0 与 p_* 的大小, 若 $p_0 > p_*$, 则两相平衡流出口压强 $p_{out} > p$; 反之则两相平衡流出口压强 $p_{out} = p$, 并且 p_{out}, p_0 遵守等熵关系式. 有了以上条件, 就可求出流量与滞止参数的关系. 当 $p_0 \leq p_*$ 时, $p_{out} = p$,

$$M = \frac{p_0}{\sqrt{R_m T_0}} \sqrt{\frac{2\gamma_m}{\gamma_m - 1} \left[\left(\frac{p_0}{p} \right)^{\frac{2}{\gamma_m}} - \left(\frac{p_0}{p} \right)^{\frac{\gamma_m + 1}{\gamma_m}} \right]} \quad (2)$$

收稿日期: 2005-01-27, 修回日期: 2005-05-08

作者简介: 王晓鸣(1956-), 男, 山东省黄县人, 博士研究生, 副教授, 粉体工程与冶金反应工程学专业; 邹宗树, 通讯联系人, Tel: 024-83687724, E-mail: zouzs@mail.neu.edu.cn.

可见, 随滞止压强的增加, 流量呈曲线增长, 出口速度小于气粉流音速. 而当 $p_0 > p_*$ 时,

$$\overline{U}_m = a_m, \quad (3)$$

$$p_{\text{out}} = p_0 \left[(\gamma_m + 1) / 2 \right]^{\frac{\gamma_m}{\gamma_m - 1}}, \quad (4)$$

$$M = \frac{p_0 A}{\sqrt{R_m T_0}} \sqrt{\gamma_m} \left[\frac{2}{\gamma_m + 1} \right]^{\frac{\gamma_m + 1}{2(\gamma_m - 1)}}. \quad (5)$$

可见, 当达到壅塞时, 随滞止压强增加, 流量与 p_0 呈线性关系, 出口速度等于气粉流的音速, 出口压强(大于环境压强)等于临界压强.

根据两相混合物热力学和音速的定义, 还可以给出两相混合物热力学和流动临界参数的表达式:

$$\text{绝热指数} \quad \gamma_m = \gamma_g \left(1 + \frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon} \frac{C_p}{C_{p,g}} \right) \left/ \left(1 + \frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon} \frac{C_p}{C_{p,g}} \gamma_g \right) \right. \quad (6)$$

$$\text{“气体”常数} \quad R_m = (1 - \varepsilon) / (1 - \phi) R_g. \quad (7)$$

$$\text{音速} \quad a_m = \sqrt{\frac{\gamma_m R_m T_m}{1 - \phi}}. \quad (8)$$

在实际的喷管流动中, 考虑到动量松弛和热量松弛的存在, 气粉两相不可能达到平衡. 尤其是考虑到热量松弛, 气相由于速度变化引起的温度变化来不及与固相进行充分的热交换, 气粉两相应该是远离平衡. 在上述两相平衡流模型中, 显然是假定了这种热交换充分进行, 固相热容全部贡献于混合物的热容. 在实际的喷管流动中, 由于两相混物流速很快, 流经喷管的时间很短, 气相由于速度变化引起温度变化后与固相之间只能进行部分热交换. 热交换进行的程度显然应与喷管的几何形状、颗粒相的物性和浓度有关. 喷管喉口上游段越长, 流经时间越长, 则热交换量应越多; 在确定的喷管和颗粒相浓度条件下, 颗粒的导热系数越大, 粒度越细(热交换面积越大), 则热交换量应越多. 考虑以平衡状态为基准的相对热交换量, 即定义实际热交换量与达到平衡的热交换量的比值为相对热交换量, 则相对热交换量还应受颗粒相的热容和密度的影响. 颗粒相的热容和密度越小, 导热系数越大, 则相对热交换量应越大.

由以上讨论可知, 若能确定实际气粉两相流喷管流动的 γ_m , 就可以很方便地由式(3)和(4)分别计算出音速和临界压强比. 问题是如何将实际气粉两相流喷管流动的 γ_m 与颗粒相的物性和浓度关联起来. 由于目前对高颗粒相浓度气粉两相流动量和热量松弛过程的理论分析计算手段还不成熟, 所以实验总结 γ_m 与颗粒相的物性和浓

度间的经验关系不失为一种可行的手段. 因此, 若通过测定壅塞质量流量进而换算出气粉两相流的壅塞速度(暂且称之为表观音速 a'_m)或临界压强比, 则可通过式(3)或(4)反算出绝热指数, 进而对不同颗粒相物性和浓度的数据进行拟合, 便可得到 γ_m 与颗粒相的物性和浓度间的经验关系. 更进一步, 在已知 γ_m 的条件下, 还可通过式(1)讨论颗粒相热容对混合物热容的贡献. 为此, 定义有关参数如下:

$$\text{混合物有效绝热指数} \quad \gamma'_m = \frac{(1 - \phi)(a'_m)^2}{R_m T}. \quad (9)$$

$$\text{固相有效热容} \quad C'_p = C_{p,g} \frac{\gamma_g - \gamma'_m}{\gamma_g (\gamma'_m - 1)} \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon}. \quad (10)$$

$$\text{固相相对有效热容} \quad C'_p = C'_p / C_p. \quad (11)$$

γ'_m , C'_p 和 C''_p 均是喷管几何形状、颗粒物性和粒度、颗粒相浓度的函数.

3 实验方法及设备

实验在自制的实验室规模的喷粉设备及粉料回收系统上进行, 实验装置示意图及用于流动分析的喷管解析示意图如图1所示, 所用粉剂物性如表1所示. 喷管内径 4.74 mm, 长 1000 mm. 参数计算步骤如下: (1) 由弹性梁、电阻应变片、电桥盒、电源、动态电阻应变仪、函数记录仪组成的测力系统测出所喷粉的质量流量 M_p ; (2) 由压力表、转子流量计组成的气体测量系统测出助吹气和主吹气质量流量 M_{g1} , M_{g2} ; (3) 固气比 $n = M_p / (M_{g1} + M_{g2})$; (4) 求滞止压强, 将两相流动量守恒方程式应用于本实验的喷管入口和滞止状态, 得到

$$M_p \overline{U}_p + M_{g1} \overline{U}_{g1} + p_1 A + M_{g2} \overline{U}_{g2} + p_2 A = p_0 A. \quad (12)$$

考虑水平方向的动量平衡, 取喷管出口方向为 X 坐标轴正向, 由于粉粒和助吹气初速与 X 轴垂直, 故在 X 轴方向粉粒和助吹气初速可认为是 0, 而 \overline{U}_{g1} 可根据主吹气的连续性方程求出, 故滞止压强

$$p_0 = p_1 + M_{g2} \overline{U}_{g2} / A + p_2. \quad (13)$$

由式(1)~(5)可知, 当未达到壅塞时, 随着滞止压强的增加, 流量随 p_0 呈曲线增加, 出口速度小于气粉流音速; 当达到壅塞时, 流量随 p_0 呈线性增加, 出口速度等于气粉流的音速, 出口压强(大于环境压强)等于临界压强. 实验中可根据流量与 p_0 曲线上转折点位置判断临界压强比的大小, 再由滞止压强得到出口压强, 进而得到出口密度, 最终可用下式求得表观音速:

$$a_m = M/(\rho_m A), \tag{14}$$

其中, $\rho_m = p_{out}/(R_m T)$, $p_{out} = p_0 \text{CPR}$. 临界压强比(CPR)的获得是本实验的关键.

已知定常两相平衡流的速度不会超过其音速, 有了此限制, 就可以估算动量传递的松弛时间和达到平衡所需要的管长. 假设单个球形颗粒在斯托克斯流状态下,

仅考虑阻力的作用^[7](本实验的颗粒平均直径范围为 23~70 μm), 则以平均直径代入松弛时间公式, 以本实验中最小固气比 10 代入音速公式求得最大音速, 得粉、气达平衡所需管长为

$$L = 4\tau_r a_m = 4 \times 0.003 \times 55 = 0.66 < 1 \text{ m}.$$

故可认为本实验条件下粉、气间已达到了动量平衡状态.

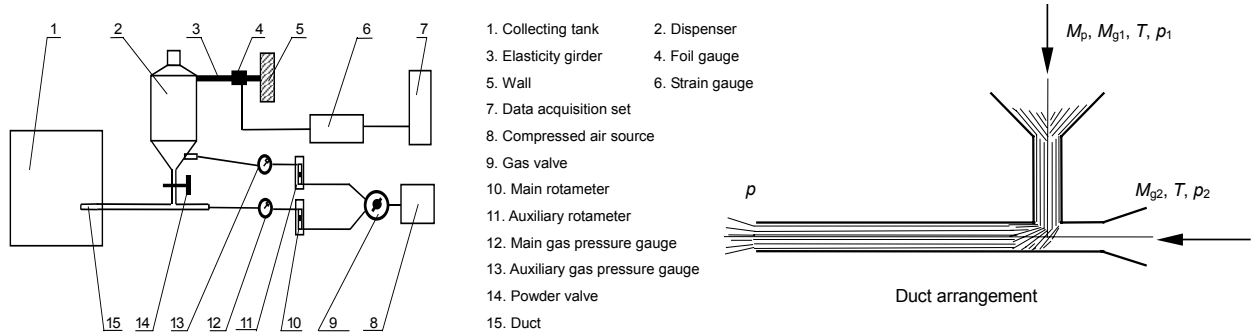


图 1 实验装置和喷管示意图
Fig.1 Experimental apparatus and the duct

表 1 粉剂的物理性质

Table 1 Physical properties of testing powders

Powder	Density, ρ (kg/m ³)	Specific heat capacity, C_p [J/(kg·K)]	Thermal conductivity, λ [W/(m·K)]	Mean diameter (μm)	St number
Alumina	3900	758	38	23	0.633
H-alumina	700	758	38	70	1.053
Aluminum	2700	900	204	44	1.604

4 结果与讨论

4.1 质量流量和滞止压强

图 2 给出了不同固气比下实验测得的质量流量滞止压强的变化规律. 由图可见, 在两相流未达到堵塞前, 质量流量和滞止压强呈近似三次曲线关系; 在堵塞后, 质量流量和滞止压强呈线性关系. 对实验数据运用如下形式的方程进行了回归:

$$\text{堵塞前: } M = d_1 + d_2 p_0 + d_3 p_0^2 + d_4 p_0^3, \text{ 堵塞后: } M = d_5 + d_6 p_0.$$

4.2 临界压强比

图 3 给出了 3 种粉剂的固气比和表观临界压强比的关系. 从图可知, 3 种粉剂的表观临界滞止压强都随固气比的增加而增加. 由氧化铝和漂珠(空心氧化铝)的对比可知, 二者重合较好. 同时由表 1 可知, 这两种粉剂的密度差较大(氧化铝 3900 kg/m³, 漂珠 700 kg/m³), 其他性质几乎相同. 由此推断粉剂的密度对表观临界压强比影响不大. 又由铝粉与氧化铝和漂珠的对比可知, 在很大的固气比范围内, 均是铝粉的临界压强比大于二者, 即铝粉达到堵塞时的压强比氧化铝和漂珠的小. 由

于粉剂的密度对临界压强比几乎没有影响, 而 3 种粉剂的最大差别在于铝粉的导热系数是氧化铝和漂珠的 5.4 倍, 这说明粉剂的导热系数对气粉两相流的表现临界压强比有很大影响. 这是由于粉剂导热系数越大, 有效绝热指数越小, 由式(1)可知表现临界压强比也就越大.

4.3 音速

图 4 为音速和固气比的关系. 从图可以看出, 在堵塞状态下, 气粉两相流的实际表观音速远低于根据两相混合物热力学计算出的理论音速, 在实验采用的喷管结构和固气比范围内, 由铝粉和空气构成的两相流动的实际表观音速只有理论计算值的 0.5~0.7 倍, 随固气比的增加而减小(其余粉剂构成的两相流也有类似的规律). 原因显然是流经喷管的气粉两相流不是简单的所谓两相平衡流, 而是一个气相在自身加速和降温的同时对颗粒相加速和冷却的非平衡过程. 即使假定稳态流动下固气比不变, 由于加速过程使气固间产生温度差, 使固相热容不能全部贡献于按等熵计算所需的混合物的绝热指数, 从而造成实际表观音速低于两相平衡流计算所得的理论音速.

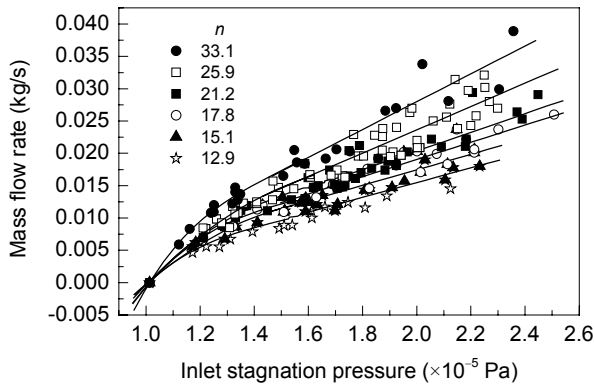


图2 在不同固气比下质量流量随滞止压强的变化
Fig.2 Variation of mass flow rate with stagnation pressure under different solid mass loadings

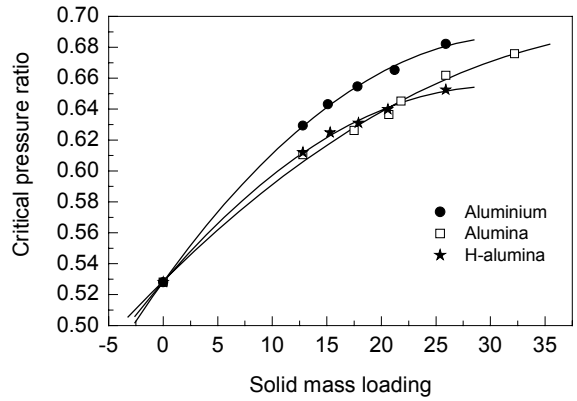


图3 表观临界压强比随固气比的变化
Fig.3 Variation of apparent critical pressure ratio with solid mass loading

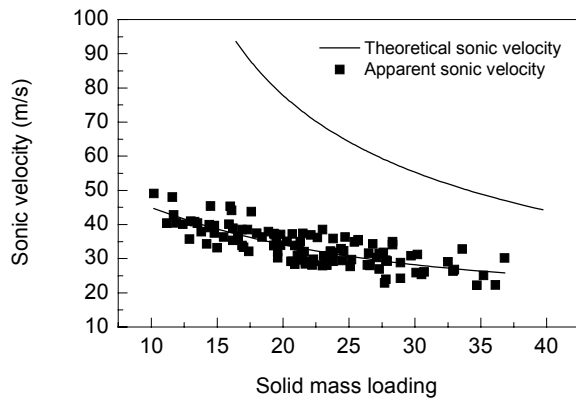


图4 音速与固气比的关系
Fig.4 Relationship between sonic velocity and solid mass loading

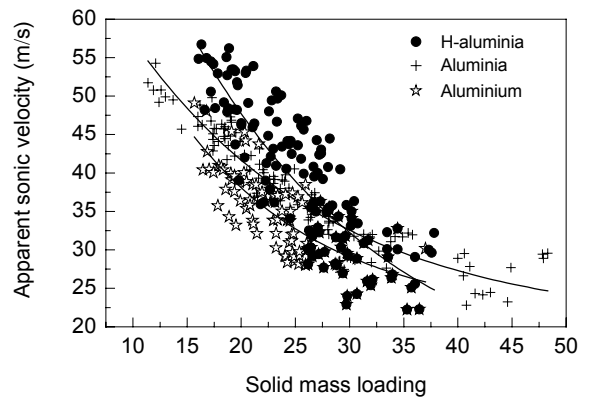


图5 表观音速随固气比的变化
Fig.5 Variation of apparent sonic velocity with solid mass loading

图5是3种气粉流的实际表观音速随固气比的变化。从图可以看出，3种气粉流随固气比的变化规律相同，都是随固气比的增加而减小。

由氧化铝与漂珠的对比可以看出，当固气比较小时，两种粉剂实际表观音速的差别不大，但随固气比的增加，密度相对较小的漂珠(700 kg/m^3)的音速下降速度比密度相对较大的氧化铝(3900 kg/m^3)的音速下降速度快，在固气比较大时密度的影响较大。密度的影响通过容积分数起作用，固气比较小时，容积分数相差较小，随着固气比的增加，容积分数相差越来越大，对音速的影响也将增加。所以在固气比较大时，漂珠和氧化铝的音速间存在较大差距，因而在相同固气比下的两相流中，颗粒的密度越小，则颗粒的容积分数就越大，音速越小。但这与均相流模型所得结论相反。因为根据两相平衡混合物的音速定义，颗粒的容积分数越大，则其音速也越大。存在相反的变化趋势是由于当容积分数不远小于1时，均相流模型的假设已不合适。

比较漂珠和铝粉可知，在固气比较小时二者的音速相差较大。引起这种差别的原因是导热系数，即单位时间内气粉两相流间的热交换能力存在差别。也即在相同固气比下，导温系数越大[漂珠 $38 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ ，铝粉 $204 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$]，有效热容就越大，有效绝热指数越小，从式(8)可知音速越小。由氧化铝与漂珠的对比可知，随着固气比的增加，密度的影响将起主导作用，使密度小的漂珠(700 kg/m^3)的音速下降得比铝粉(2700 kg/m^3)快，从而在固气比较大时其数值较接近。

综上所述，当固气比较小时，粉剂的导热系数越大，音速值就越小，而密度的影响很小；但固气比较大时，粉剂导热系数的影响减小，甚至可忽略，而密度的影响增大，密度越小，容积分数越大，音速就越小。

最后再以铝粉和氧化铝的实验结果来检验。从以上分析及粉剂的物理性质可知，在较小固气比时，铝粉的导热系数大，则音速小。在较大固气比时主要看密度的影响，铝粉的密度小，则音速小。实验结果的规律与

以上分析是一致的。

4.4 有效热容和有效绝热指数

图 6 是由表观音速得到的 3 种气粉流的有效绝热指数随固气比的变化。由图可见，随着固气比的增加，有效绝热指数增加。由于粉剂的物理性质不同，所以由图可看出粉剂的物理性质对有效绝热指数的影响。由表 1 可知，漂珠和氧化铝的热容和导热系数相同，但密度不同，因此可以说漂珠和氧化铝曲线不同的原因是密度造成的。而对于漂珠和铝粉，可认为其热容是接近的，在固气比较小时，导热系数的影响显著，在固气比较大时密度的影响又显著了，因此得到的漂珠和铝粉的曲线形状基本相同，但是数值具有一定差距。

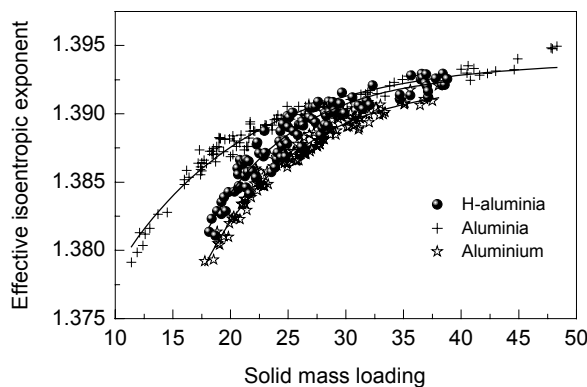


图 6 出自表观音速的有效绝热指数随固气比的变化
Fig.6 Variation of effective isentropic exponent from apparent sonic velocity with solid mass loading

图 7 是由表观音速得到的 3 种气粉流的有效热容随固气比的变化。由图可见，固气比与有效热容呈反比关系。随固气比的增加，颗粒相的有效热容下降，说明混合物中颗粒相的浓度是影响传热的重要因素。从图还可以观察到氧化铝和漂珠的曲线基本重合，而从氧化铝和

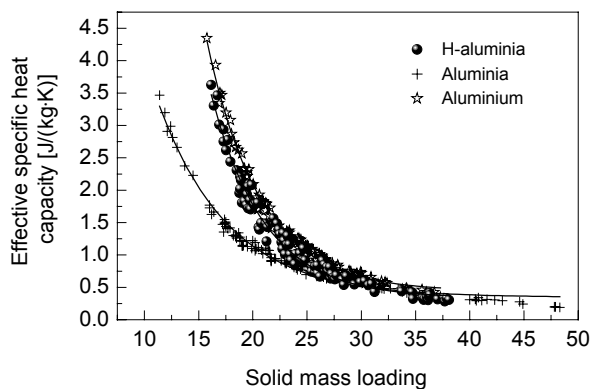


图 7 出自表观音速的有效热容随固气比的变化
Fig.7 Variation of effective specific heat from apparent sonic velocity with solid mass loading

漂珠的物理性质来看，其热容和导热系数相同，只有密度不同，这说明颗粒相的密度对混合物中颗粒相的有效热容基本无影响。由于密度的作用很微小，而铝粉和漂珠、氧化铝的热容较接近，但导热系数差别较大，所以颗粒相的导热系数对混合物中颗粒相的有效热容有一定影响。图中有效热容随固气比的变化存在一定的敏感区间，在此区间里，有效热容随固相浓度增加迅速降低。

4.5 相对有效热容

图 8 为出自表观音速的相对有效热容与固气比的关系。经计算，相对有效热容 C_p/C_p 均小于 0.5%。说明在气粉两相流中固体的热容只有很少的一部分发生了作用。这是因为气粉两相流的速度很高，而在给定的喷管条件下，对于热量变化，气相还未来得及传递给固相颗粒就已经流出喷管，即所谓的热量松弛现象。经计算混合物的有效绝热指数 γ_m 与气体的绝热指数相差较小。因此可用气体的绝热指数近似计算混合物的音速。

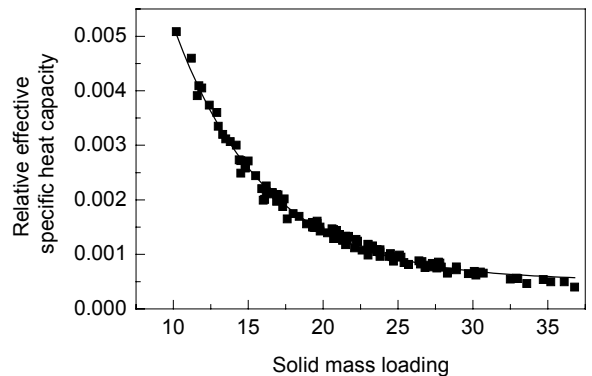


图 8 出自表观音速的相对有效热容与固气比的关系
Fig.8 Relationship between relative effective specific heat capacity from apparent sonic velocity and loading

5 结论

以铝粉、三氧化铝粉、空心三氧化二铝粉为固相，空气为气相，在均相理论的基础上，对气粉两相流喷管的堵塞现象进行了实验考察与理论分析，得到如下结论：

- (1) 气粉流堵塞现象确实存在。
- (2) 在未达到堵塞之前，气粉流的质量流量与滞止压强近似呈三次曲线关系；当达到堵塞时，与滞止压强呈直线关系。
- (3) 两相平衡流理论与实验所得气粉流的表观音速比较，两相流的实际音速只有理论表观音速的 60%左右，与纯气流相比差别更大。当固气比为 25 时，两相流的音速只有纯气流的 1/10 左右。
- (4) 通过对 3 种粉剂的实验结果对比，可得到粉剂

的物理性质对实际表观音速的影响。当固气比较小时,粉剂的导热系数影响较大,密度影响很小;但固气比增大时,粉剂的导热系数的影响变小,而密度的影响增大。实际上导热系数是通过有效热容作用于实际表观音速,而密度是通过容积分数作用于实际表观音速。

(5) 对3种粉剂的实验结果对比,可进一步得到粉剂的物理性质对有效热容和有效绝热指数的影响。粉剂的密度对两相流中颗粒相的有效热容基本无影响,而粉剂导热系数对颗粒相的有效热容有一定影响。

(6) 由于气粉两相流的有效热容和固相的热容相比较小(<0.5%),在计算气粉两相流时,可用气相的绝热指数近似计算气粉两相流的绝热指数,从而得出气粉两相流的表观音速近似值。

符号表:

A	管的横截面积 (m^2)	a_m	实验算得表观音速 (m/s)
a_m	均相流速 (m/s)	C_p	颗粒相热容 [$\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$]
C_p	颗粒有效热容 [$\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$]	C_p^*	颗粒相对有效热容
$C_{p,g}$	气体恒压热容 [$\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$]	$d_1\sim d_6$	回归系数
L	管长 (m)	M	混合物的质量流量 (kg/s)
M_{g1}	助吹气体的品质流量 (kg/s)	n	固气比
M_{g2}	主吹气体的品质流量 (kg/s)	p_0	滞止压强 (Pa)
M_p	固体的品质流量 (kg/s)	p_2	主吹气体截面的压强 (Pa)
p	环境压强 (Pa)	p_{out}	喷管出口压强 (Pa)
p_1	助吹气体截面的压强 (Pa)	R_g	气体常数 [$\text{J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$]
p_*	临界滞止压强 (Pa)	R_m	两相混合物的气体常数 [$\text{J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$]
R_g	气体常数 [$\text{J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$]	T	温度 (K)
R_m	两相混合物的气体常数 [$\text{J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$]	T_0	滞止状态温度 (K)
\bar{U}_{g1}	助吹气体的速度向量 (m/s)		
\bar{U}_{g2}	主吹气体的速度向量 (m/s)		
\bar{U}_m	两相平衡流的速度向量 (m/s)		
\bar{U}_p	颗粒相速度向量 (m/s)	γ	气体的绝热指数

γ_m	混合物的绝热指数	γ_m'	混合物的有效绝热指数
ε	质量分数	ϕ	容积分数
λ	导热系数 [$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$]	ρ_m	混合物密度 (kg/m^3)
τ_v	动量松弛时间 (s)		

参考文献:

- [1] Tan S M, Liu A H, Zou Z S. Theoretical and Experimental Study on Choking Phenomenon of Gas-Particle Flow [A]. Halman H, Levy A, Hubert M. The 3rd Israeli Conference for Conveying and Handling of Particulate Solids Jointed with the 10th International Freight Pipeline Symposium [C]. The Dead Sea: The Israeli Electric Company Ltd., 2000. 11.51-58.
- [2] 谭胜名, 邹宗树, 刘爱华. 气粉两相流堵塞现象的理论和实验研究 [J]. 东北大学学报, 1998, 19(S1): 106-110.
- [3] 刘爱华, 谭胜名, 邹宗树. 气粉两相流堵塞现象的实验研究及在高炉喷煤中的应用 [J]. 包头钢铁学院学报, 1999, 18(3): 183-187.
- [4] 李强. 气粉两相流的堵塞现象的理论和实验研究 [D]. 沈阳: 东北大学, 2001. 42-58.
- [5] 李强, 冯明霞, 邹宗树. 气粉两相流堵塞现象初探 [J]. 安徽工业大学学报, 2003, 20(4): 76-81.
- [6] 王晓鸣, 李强, 邹宗树, 等. 气粉两相流热力学初探 [A]. 中国工程热物理学会. 中国工程热物理学会多相流学术会议论文集 [C]. 2003. 426-432.
- [7] Han T, Levy A, Kalman H, et al. Model for Dilute Gas-Particle Flow in Constant-area Lance with Heating and Friction [J]. Powder Technol., 2000, 112(3): 283-288.
- [8] Rudinger G. Fundamentals of Gas-Particle Flow [M]. New York: Elsevier Scientific Publishing Company, 1980. 40-76.
- [9] 岑可法, 樊建人. 工程气固多相流动的理论及计算 [M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1990. 369.
- [10] 郭烈锦. 两相与多相流动力学 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2002. 574-597.
- [11] 方丁酉. 两相流体力学 [M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 1988. 21-24, 159-162.

Experimental Study on Choking Phenomenon of Gas-Powder Flow

WANG Xiao-ming, LI Qiang, ZOU Zong-shu, SHEN Feng-man

(School of Material and Metallurgy, Northeastern University, Shenyang, Liaoning 110004, China)

Abstract: Based on the theory of two-phase homogeneous equilibrium model (HEM), the choking phenomena of gas-powder flow were experimentally studied and theoretically analyzed. Experiments were conducted in a horizontal constant cross-section duct with three kinds of powder: Al_2O_3 , hollow Al_2O_3 and Al, with different densities, specific heat capacities and thermal conductivities, in order to understand the relationship between the mass flow-rate and the inlet stagnant pressure. Applying the choking principle, the apparent critical pressure ratio and apparent sonic velocity (ASV) of gas-powder flow were determined. Considering the thermal relaxation of the two-phase flow, the effective specific heat capacity (ESHC) of solid phase, the effective isentropic exponent (EIE) of the mixture and the relative effective specific heat capacity (RESHC) were defined. The experimental results show that, with the increase of the stagnation pressure, the mass flow rate increases as a cubic polynomial function before choking and linearly after choking. The influence of the physical properties of powders on ASV of gas-powder flow is obtained by the comparison between experimental results of different powders. When solid mass loading (SML) is small, ASV is mainly affected by the thermal conductivity of the powder. When SML is large, the density of the powder affects ASV instead. ESHC of the solid phase decreases with the increase of its loading. The thermal conductivity is the main factor to affect ESHC, while density is hardly so. ESHC of the solid phase is very small (<0.5%), and may be ignored. Therefore, the isentropic exponent of the gas phase can be used as that of the mixture to calculate the ASV of gas-particle flow.

Key words: gas-particle flow; choking phenomenon; apparent critical pressure ratio; apparent sonic velocity; effective isentropic exponent; effective specific heat capacity