

文章编号: 1004-0609(2004)02-0204-06

固气两相流雾化工艺规律^①

陈振华, 陈 刚, 严红革

(湖南大学 材料科学与工程学院, 长沙 410082)

摘 要: 采用高压氮气为气相雾化介质, 分别以 NaCl 颗粒和 Fe 粉为固相雾化介质, 对 AlSi 合金、金属 Zn 进行固气两相流雾化实验, 系统研究了工艺参数对粉末平均粒度和形貌的影响规律。结果表明, 固气两相流雾化存在最佳的固/气流率比, 采用的固体介质颗粒只有既达到较高的浓度又具有较高速度, 才能极大地提高雾化效果。同时, 较高密度的固体介质、低金属液流量有利于获得平均粒度细小、形貌复杂、粒度分布更集中的金属粉末。

关键词: AlSi 合金; 锌; 雾化; 粉末; 介质

中图分类号: TF 124.1

文献标识码: A

Process regularities of solid-gas dual media atomization

CHEN Zhen-hua, CHEN Gang, YAN Hong-ge

(College of Materials Science and Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: AlSi alloy and metal zinc were selected as the samples to study the effects of atomization parameters on mean particle size, particle size distribution and particle morphology of the atomized powder with N₂ employed as the gas atomization medium and NaCl, Fe particle as solid atomization medium respectively. The results show that the metal powder with finer mean particle size and narrow particle size distribution can be produced under the conditions of proper mass flow rate of solid to gas in atomization medium, higher density of solid medium and lower metal mass flow rate.

Key words: AlSi alloy; Zinc; atomization; powder; medium

固气两相流雾化工艺^[1, 2]是在气体雾化过程中改变雾化介质组成, 即在雾化气体中加入可除去的固体颗粒, 形成固气两相流, 对金属或合金熔体进行充分破碎, 以获得微细金属粉体的一种新型雾化方式。固体雾化能获得比常规气体雾化细一倍左右的粉末, 能量利用率明显提高, 且粉末微观组织细小^[3-5]。气体雾化过程工艺参数众多, 影响规律较为复杂^[6]。固气两相流雾化引入了固体介质颗粒, 其熔体破碎机理发生了本质变化, 影响规律更为复杂。本文作者研究了固/气介质流率比、固体介质密度等工艺参数对粉末粒度、形貌及粒度分布的影响规律, 以探索最佳的工艺方案, 有望为该工艺的产业化提供指导。

1 实验

金属或合金采用感应加热炉或电阻炉熔炼, 除渣、除气后备用。采用自行研制的高压密相气力输送粉末装置, 获得高压固气两相流, 通过特制的环缝限制式喷嘴对金属流进行雾化; 由水环喷射出水流直接对喷射流进行冷却获得粉末浆料; 经冲洗、过滤和干燥, 最终制得粉末。工艺过程如图 1 所示。

送粉罐为密闭流态化结构, 高压氮气通入送粉罐, 带出其中的固体粉末, 形成固气两相流。通过螺杆的升降调节流化床高度来改变流化室中固相颗粒的含量, 以调节固气流中固/气流率比。实验分别采用食盐颗粒、铁粉充当固体颗粒进行固气两相

① 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50174025); 博士点基金资助项目

收稿日期: 2003-04-18; 修订日期: 2003-08-29

作者简介: 陈振华(1945-), 男, 教授, 博士, 博士生导师。

通讯作者: 陈 刚, 副教授, 博士研究生; 电话: 13873120655; E-mail: chengang811@163.com

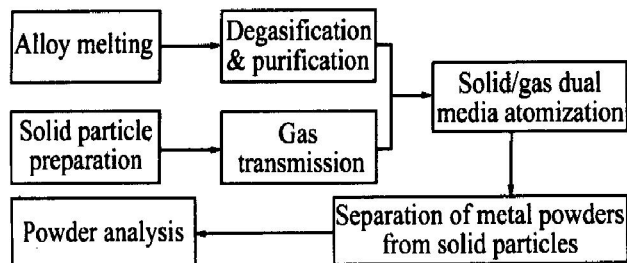


图 1 固气二相流雾化工艺流程图

Fig. 1 Flow chart of solid-gas dual media atomization process

流雾化。食盐可通过水洗、溶解除去; 铁粉可采用磁选法除去, 并可循环使用。粉末粒度采用分筛和激光衍射粒度测定仪测定, 粉末形貌在 KY-2800 扫描电镜上观察。

氮气所产生的气体动态压力为 0.8 MPa, 输出的气流流量为 $3 \text{ m}^3/\text{min}$ 。在固体雾化和气体雾化过程中, 输送的气体压力和流量均不变, 以保证雾化介质的总输出能量不变。各种材料均在电阻炉中熔炼, 过热度为 150 K。

研究盐流量与粉末性能的关系时, 以 Al-30% Si (质量分数) 合金和工业纯 Zn 为对象。雾化 Al-30% Si 合金时, 金属液流直径为 6 mm; 雾化工业纯 Zn 时, 金属液流直径为 4.2 mm。研究金属液流量与粉末性能的关系, 选取工业纯 Zn 为对象, 盐流量为 140 g/s, 金属液流直径分别为 4.2 mm, 3 mm 和 2.5 mm。研究不同固体雾化介质与粉末性能的关系时, 选取 Al-30% Si 合金为对象, 金属液流直径为 6 mm, 固体雾化介质分别为食盐粉末和铁粉。

2 结果及分析

2.1 盐质量流率与粉末性能的关系

气体雾化时, 气体质量流率会影响粉末的粒度^[7, 8], 在固气两相流雾化中, 固体介质的质量流率也会对粉末产生很大的影响。粉末的平均粒度、粒度分布和粉末形貌随固体介质的质量流率的变化分别示于图 2, 3 和 4。

从图 2 可以看出, 采用食盐颗粒为固体介质时制得粉末的粒度随着盐流量的增加而减小, 当盐流量增大到一定值后, 进一步增大盐流量, 粉末平均粒度会逐步变大。

根据气力输送规律, 随着输送物料的增加, 物料速度就会减慢^[9]。当加入少量固体粒子时, 虽然

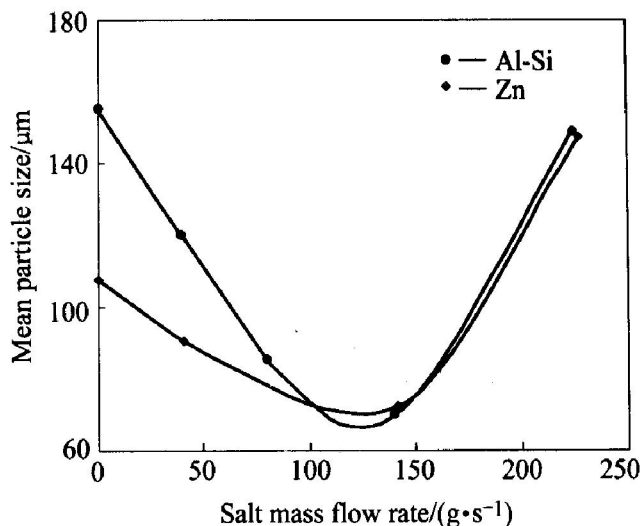


图 2 盐流量与粉末平均粒度的关系

Fig. 2 Mean particle size vs salt mass flow rate curves

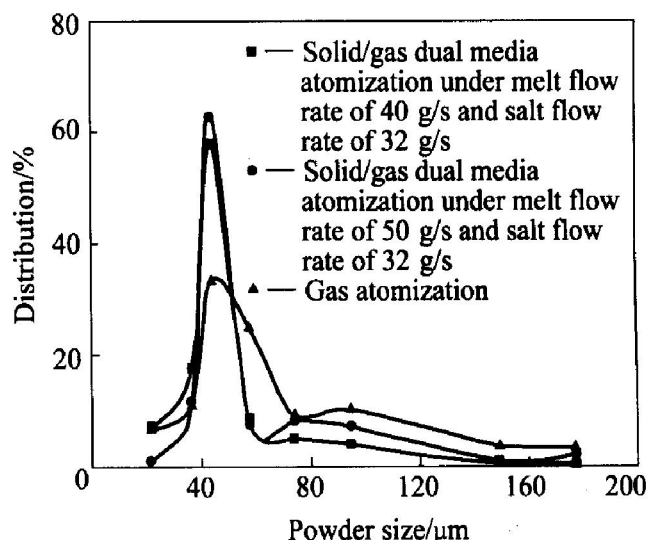


图 3 普通气体雾化与固气两相流雾化所得 Al-Si 粉末粒度分布

Fig. 3 Al-Si powder size distribution under gas atomization and gas-solid dual media atomization

固体粒子流速很高, 但是固体介质浓度低, 与液滴碰撞次数少, 不能充分破碎液流, 雾化过程主要由气体完成, 得到粉末的粒度和气体雾化所得粉末的粒度相差不大; 当加入较多固体介质时, 分配到单个固体颗粒的能量变小, 速度减慢, 同时当固体介质浓度达到一定值时, 固体颗粒与液流的碰撞几率不再随浓度增高而增加, 破碎效果不好, 同时也使气体流速降低, 雾化更不充分, 所得粉末较粗, 甚至比普通气体雾化的粉末还要粗; 只有当输送的固体介质既拥有足够击穿液滴的速度, 又有一定浓度, 能充分撞击、撕裂金属液流, 才能达到最佳的雾化效果。在雾化实践中, 通过调整盐流量的大小

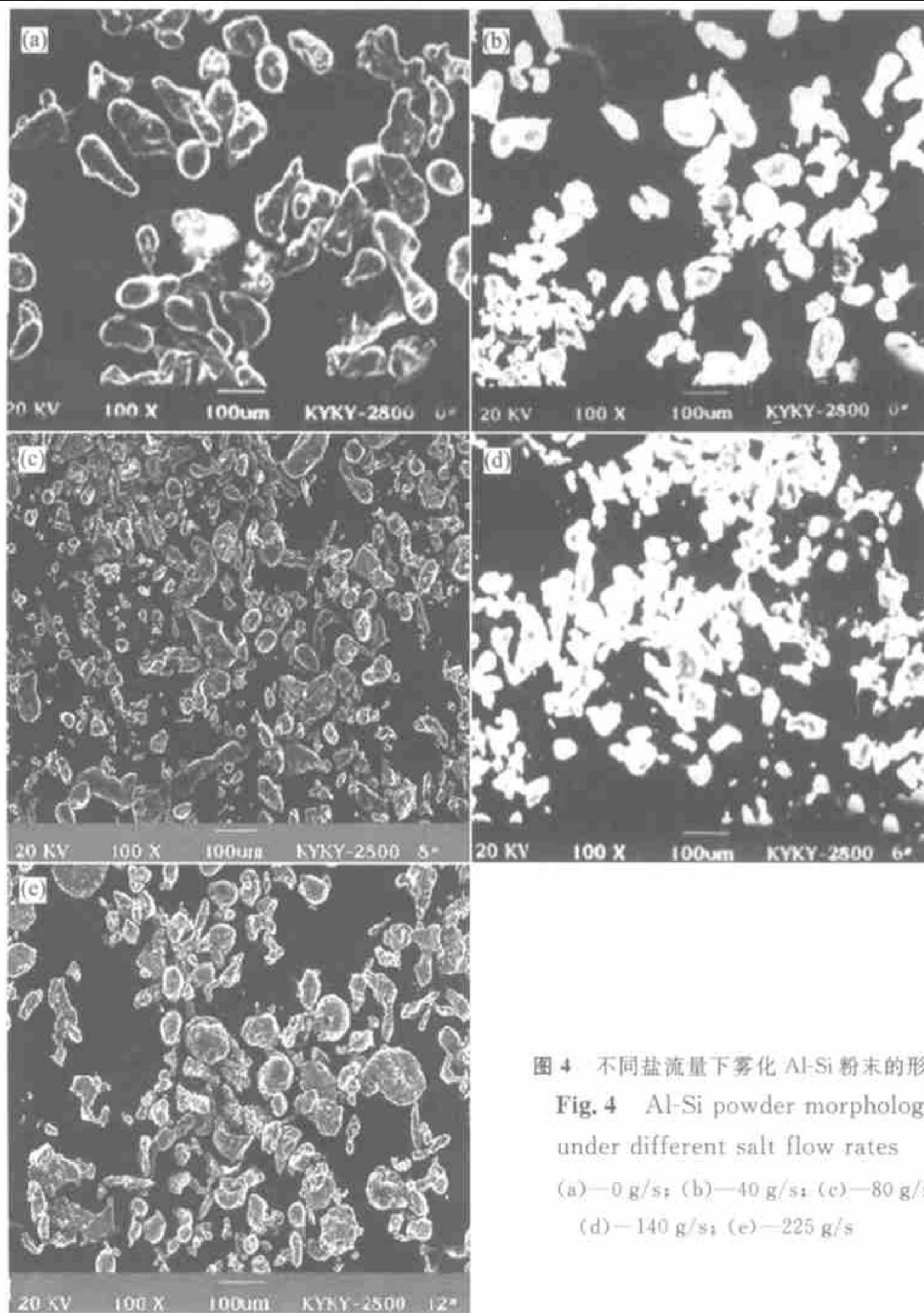


图 4 不同盐流量下雾化 Al-Si 粉末的形貌

Fig. 4 Al-Si powder morphologies under different salt flow rates

(a)—0 g/s; (b)—40 g/s; (c)—80 g/s;
(d)—140 g/s; (e)—225 g/s

可以得到不同粒度的粉末, 盐流量过大和过小, 都不能得到细小粉末。本实验中, 在 0.8 MPa 气压下, 盐流量控制在 100~140 g/s 范围内有利于制取微细粉末。

图 3 所示为气体雾化与固气两相流雾化 Al-Si 粉末的粒度分布情况。可以看出, 两相流雾化所得粉末的粒度分布较窄, 这是因为固气两相流雾化过程中尺寸较大的金属熔滴被固相颗粒撞击破碎的几率较大, 而小熔滴难以被固相颗粒破碎, 使得雾化粉末粒度保持在较窄的范围内。

气体雾化粉末通常为球形或类球形(如图 4(a)

所示), 而固气两相流雾化粉末大部分为不规则形, 粉末表面很粗糙。由于固体颗粒的撞击作用破坏了表面结构, 同时固气两相流雾化冷却速度较大, 约为 $10^4 \sim 10^5 \text{ K/s}^{[1]}$, 因此凝固时间少于球化时间, 使液滴没有足够的时间球化, 造成粉末的不规则及表面粗糙。

2.2 金属液质量流率与粉末粒度的关系

由于熔体的质量流率将直接影响到粉末的产率, 所以控制它的大小对于考察整个固气两相流雾化工艺的经济性是相当重要的。在 0.8 MPa 的气体

压力下, 金属质量流率对雾化粉末粒度分布及平均粒度的影响分别如图 5 和表 1 所示。可以明显看出, 随着金属质量流率的减小, 粉末的平均粒度减小, 且粉末粒度分布度窄。

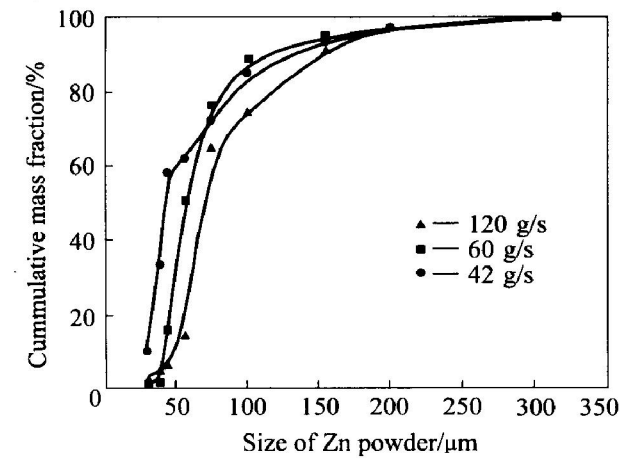


图 5 不同金属质量流率下 Zn 粉末粒度分布

Fig. 5 Effect of melt mass flow rate on size distribution of as-atomized Zn powder

表 1 不同金属质量流率下所得 Zn 粉末平均粒度

Table 1 Mean particle size of Zn powder under different melt mass flow rates

Metal	Salt flow rate/ (g·s ⁻¹)	Diameter of molten metal/ mm	Melt flow rate/(g·s ⁻¹)	Mean particle size/ μm
Zn	140	4.2	120	72
		3.0	60	57
		2.5	42	44

由于粉末平均粒度随金属液流直径和质量的减小而减小^[10], 且根据气体雾化的破碎机制, 金属熔体在破碎前首先形成金属液膜, 而液膜的厚度随金属液流的增加而增厚^[11], 因此随着金属质量流率减小, 液膜厚度相应减小, 液流在液膜中的动量损失减小^[12], 有利于固体颗粒击穿液膜, 破碎效果更好, 这样破碎初始形成较小的液滴, 从而降低了粉末中粗颗粒的比例, 粉末的平均粒度降低, 表现为其质量积累曲线向左下方偏移。

2.3 固体介质与粉末粒度的关系

气体雾化过程中, 不同的雾化介质对雾化粉末的形状和显微组织有很大的影响^[13, 14]。固气两相流雾化过程中, 拥有很高动能的固体介质对液滴的破碎作用是雾化破碎的主要因素, 因此固体雾化介质不同, 雾化后所得粉末的粒度、粒度分布和粉末形貌有很大变化。实验分别采用 Fe 粉和食盐作为

固体介质进行比较, 结果如图 6 和表 2 所示。采用铁粉作为固体介质时雾化所得粉末的平均粒度为 50 μm; 当采用食盐作固体介质所得粉末平均粒度为 70 μm。可见铁粉作为固体介质所得雾化粉末较细, 且粒度分布较窄, 表现为粉末质量积累曲线往左下方偏移。

表 2 采用不同固体介质时 Al-Si 粉末的平均粒度

Table 2 Mean particle size of Al-Si alloy powder atomized with different solid media

Alloy	Diameter of molten metal/ mm	Solid medium	Flow rate of solid medium/ (g·s)	Mean particle size/ μm
Al 30% Si	6.0	NaCl	140	70
		Fe	130	50

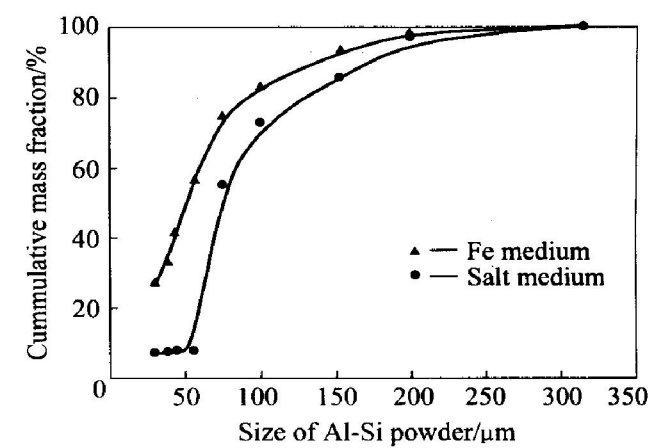


图 6 不同固体介质雾化 Al-Si 粉末粒度分布

Fig. 6 Effect of solid medium on size distribution of as-atomized Al-Si powder

固气两相流雾化过程中, 固体粒子撞击液滴, 才能破碎液滴。铁的密度为 7.8 g/cm³, NaCl 的密度为 2.17 g/cm³, 在相同质量流率情况下, 单个铁粉的动量要大于单个食盐颗粒, 铁粉冲击液滴的作用力更大, 对液滴的破碎效果要比食盐的好, 因此得到的粉末更细小。同时, 铁在 273 K 时的导热系数为 53.6 W/(m·K), NaCl 的导热系数约为 1.15 W/(m·K), 显然采用铁粉作为固气两相流雾化介质, 冷却速率要大的多, 在雾化过程中, 粉末没有球化就凝固, 所得粉末除了微细粉末有少许是球形或类球形外, 大部分为不规则形状; 而采用食盐作为固气两相流雾化介质所得球形粉末相对要多一些 (如图 7 所示)。

采用固气两相流雾化制粉时, 选择固气两相流雾化介质, 在满足可除去、不污染粉末且输送方便的基础上, 尽可能的选用密度大的固体颗粒。

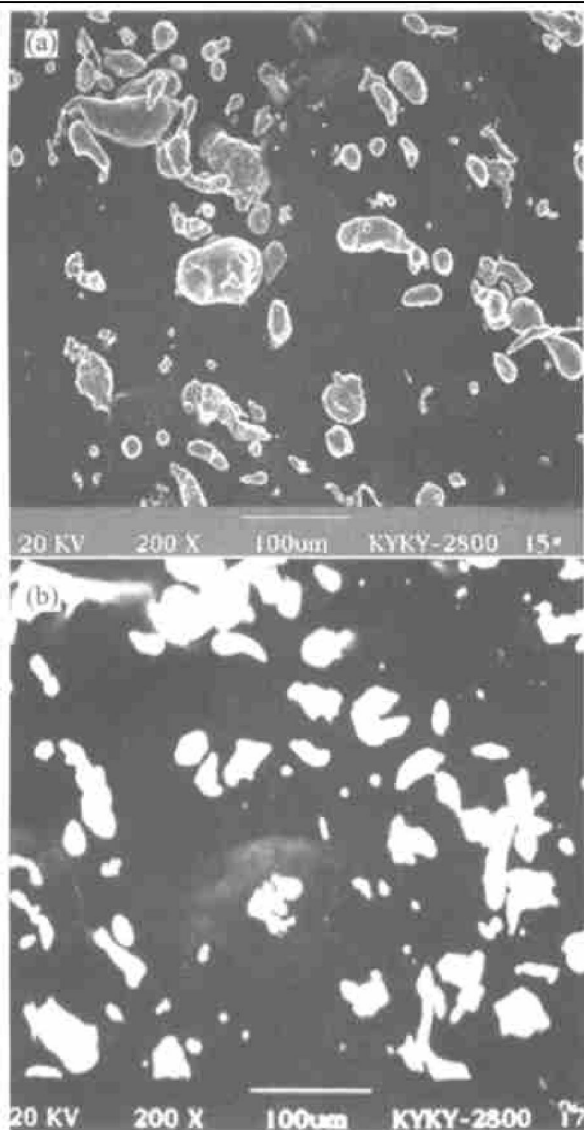


图 7 采用不同固体介质时 Al-Si 粉末粒度分布

Fig. 7 Mass cumulative distribution curve of Al-Si alloy powder atomized with different solid media

3 固体颗粒与金属液滴的相互作用

3.1 临界穿透速度

固气两相流雾化工艺中采用高压气体将流态化的固体颗粒从喷嘴送出, 颗粒与液滴发生碰撞的几率较高, 碰撞都被认为是完全非弹性的, 碰撞动能全部转化为表面能的增加和克服沿穿透方向阻力所做的功, 颗粒的穿透运动作一维减速运动考虑。Zhang 等^[15]在研究喷射沉积共雾化颗粒与液态金属的动力学作用机制时, 对固体颗粒穿透过程进行了实验和理论研究, 提出了颗粒穿透的判据, 得到穿透深度与初始速度的关系:

$$v_0 = \frac{3(1 - \cos \varphi_0)^2}{8R\rho} \left[\eta + \sqrt{\eta^2 - \frac{32R\rho v_{lg}(1 + \cos \varphi_0 + 2\cos \theta)}{3(1 - \cos \varphi_0)^3}} \right] \quad (1)$$

式中 v_0 是初始速度, φ_0 是接触深度, η 是熔体粘性系数, θ 是颗粒与液滴间的接触角, v_{lg} 液滴与气体的表面能, R 为颗粒的直径, ρ 为颗粒的密度。

$\varphi_0 = \pi$ 时的速度是临界穿透速度, 即

$$v'_0 = \frac{3}{2R\rho} \left[\eta + \sqrt{\eta^2 - \frac{8R\rho v_{lg} \cos \theta}{3}} \right] \quad (2)$$

因此固体颗粒能否穿透液滴, 取决于该固体颗粒是否达到了临界穿透速度。当固体介质速度 $v_s \geq v'_0$ 时, 可以穿透液滴, 起到破碎液滴的作用, 使粉末更加细小; 当 $v_s < v'_0$ 时, 固体介质不能穿透液滴, 对雾化没有贡献。

从式(2)可以看出, 临界穿透速度与固体颗粒的密度有关, 在其它条件相同的情况下, ρ 越大, v'_0 越小, 也就是说对于密度大的固体颗粒, 其穿透液滴能力比密度小的固体颗粒要强, 所以采用铁粉作为固气两相流雾化介质能取得更好的雾化效果, 所得粉末粒度更细小。

3.2 固/气输送比 μ 与颗粒速度 v_s 的关系

设 v_g 、 v_s 分别为气体和固体颗粒的速度, 令 $\phi = v_g/v_s$, m_g 、 m_s 分别为气体和固体颗粒的质量, μ 为固/气输送比, $\mu = m_s/m_g$, E_k 为气力输送总能量, ΔE 为气力输送的各种损耗, 包括管道损耗和弯管损耗, 且在气力输送过程中保持不变, 根据能量守恒条件, 得到下列方程:

$$\begin{aligned} E_k &= \frac{1}{2} m_g v_g^2 + \frac{1}{2} m_s v_s^2 + \Delta E \\ &= \frac{1}{2} m_g (\phi v_s)^2 + \frac{1}{2} \mu m_g v_s^2 + \Delta E \end{aligned} \quad (3)$$

由式(3)可得:

$$v_s = \sqrt{\frac{2(E_k - \Delta E)}{m_g(\phi^2 + \mu)}} \quad (4)$$

在本实验条件下, $\phi \ll \mu$, 可忽略不计, 因此式(4)可近似为

$$v_s = \sqrt{\frac{K}{\mu}} \quad (5)$$

可以看出, 随着固/气输送比的增加, 管道输送的固体介质质量增多, 则固体颗粒的速度相应减小。当 μ 达到一定值时, $v_s < v'_0$, 固体颗粒就不能破碎液滴, 雾化不充分, 这就是当盐流量为 225 g/s 时, 雾化所得粉末和普通气体雾化的粉末粒度相当甚至还要粗大的原因。

3.3 固体颗粒与金属液滴碰撞的撞击力

假设 $v_s \geq v'_0$, 固体颗粒可以穿透金属液滴, 而且固体颗粒与金属液滴的碰撞为完全非弹性, M 是金属液滴的质量, v_m 是液滴初始速度, v 是碰撞后的速度, 当固体颗粒与液滴碰撞时, 根据动量守恒定律可以得到下列方程:

$$m_s v_s + M v_m = (m_s + M) v$$

$$v = \frac{m_s v_s + M v_m}{m_s + M} = \frac{\mu m_g v_s + M v_m}{\mu m_g + M} \quad (6)$$

假设气体/金属流量比为

$$R_{gm} = \frac{m_g}{M} \quad (7)$$

综合式(5), (6)和(7)可得:

$$v = \frac{v_m + R_{gm} K / \sqrt{\mu}}{\mu R_{gm} + 1} \quad (8)$$

设固体颗粒与液滴碰撞时的冲量为 I , 根据冲量定律得:

$$I = m_s (v_s - v) \quad (9)$$

综合式(8)和(9)可以得出:

$$I = \sqrt{\mu m_g} \cdot \left[K - \frac{\sqrt{\mu} v_m + R_{gm} K}{\mu R_{gm} + 1} \right] \quad (10)$$

由式(10)可以看出, 当 $v_s \geq v'_0$, 随着固/气输送比的增加, 即固体颗粒质量流量的增加, 固体颗粒与液滴之间的冲量增大, 固体颗粒与液滴之间的撞击力也增大, 因而粉碎效果越好, 这和实验结果相符。

REFERENCES

- [1] 陈振华, 陈刚, 严红革, 等. 液体金属和合金的盐雾化[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2001(4): 30-34.
CHEN Zhen-hua, CHEN Gang, YAN Hong-ge, et al. A novel atomization technology of melts and alloy by solid salt particles [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2001(4): 30-34.
- [2] 陈振华, 陈刚, 严红革, 等. 液体金属与合金的固体雾化方法[P]. 中国发明专利: ZL01106868. X, 2001.
CHEN Zhen-hua, CHEN Gang, YAN Hong-ge, et al. A novel atomization technology of melts and alloy by solid atomization [P]. China Invention Patent: ZL01106868. X, 2001.
- [3] 陈刚, 陈振华, 严红革, 等. 一种新型的气体雾化制粉方法[J]. 中国有色金属学报, 2001, 11: 33-35.
CHEN Gang, CHEN Zhen-hua, YAN Hong-ge, et al. Novel gas atomization method for powder preparation[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2001, 11: 33-35.
- [4] 傅定发, 陈刚, 吕洪, 等. 固体雾化铝硅合金的粉末特征[J]. 材料开发及应用, 2002(5): 1-4.
FU Ding-hua, CHEN Gang, LI Hong, et al. Powder characteristic of solid atomized eutectic Al-Si alloy [J]. Development and Application of Materials, 2002(5): 1-4.
- [5] 吕洪, 陈鼎, 傅定发, 等. 一种新型的雾化方法[J]. 中国粉体技术, 2002(8): 6-8.
LV Hong, CHEN Ding, FU Ding-fa, et al. A new method of atomization [J]. China Powder Science and Technology, 2002(8): 6-8.
- [6] Lawley A. Atomization metal powder industries federation [J]. PA, 1992. 105.
- [7] Shinde S L, Tendolkar G S. Analyses of atomization EM Dash, a review [J]. Powder Metall Int, 1977, 9(4): 180.
- [8] Anderson I E, Figliold R S, Morton H. Flow mechanisms in high pressure gas atomization [J]. Mater Sci Eng, 1991, A148: 101-107.
- [9] 黄标. 气力输送[M]. 上海: 上海科技出版社, 1984. 14.
HUANG Biao. Gas Force Transmission [M]. Shanghai: Shanghai Science & Technology Press, 1984. 14.
- [10] Lubanska H. Correlation of spray ring data for fast atomization of liquid metals [J]. J Met, 1970, 22(2): 45-54.
- [11] Gretziner J, Marshall W R. Characteristics of atomization [J]. AIChE Journal, 1961. 7: 312.
- [12] Unal A. Liquid break-up in gas atomization of fine aluminum [J]. Metal Trans B, 1989, 20B(2): 61-65.
- [13] 黄培云, 主编. 粉末冶金原理(第二版) [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1997. 101-103.
HUANG Pei-yun. Principle on Powder Metallurgy, 2nd Edition [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1997. 101-103.
- [14] Mehrotra S P. Mathematical modeling of gas atomization process for metal powder production (Part I) [J]. Powder Metall Int, 1981, 13(2): 80-93.
- [15] Zhang J, Wu Y, Lavernin E J. Kinetics of ceramic particulate penetration into spray atomized metallic droplet at variable penetration depth [J]. Acta Metall Mater, 1994, 42(9): 2955-2973.

(编辑 杨兵)