

气体雾化过程几个重要参量的计算

沈军** 崔成松 蒋祖龄 李庆春

(哈尔滨工业大学, 黑龙江 150001)

摘要 利用流体力学理论, 对气体雾化过程的气体出口速度、气体质量流率及金属质量流率等几个重要参量进行了分析, 并给出了相关的数学表达式。

主题词 快速凝固 粉末冶金 气体雾化

快速凝固技术的发展为研制和开发高性能材料开辟了新途径。雾化快凝是制备高性能快速凝固材料的主要方法。其金属雾化过程的某些参量难以完整地通过实验确定。本文对几个重要参量进行了理论分析, 给出了计算公式。

1 气体出口速度及气体质量流率

气体在雾化器出口处的速度、气体质量流率及金属质量流率是控制合金粉末尺寸分布的主要因素^(1~3)。为了讨论气体经过雾化器出口处的流动速度 V_{go} , 将雾化器等效地示于图 1。分别在气体出口处和雾化器空腔内

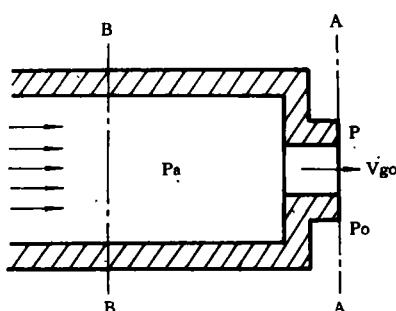


图 1 雾化器等效示意图

Fig. 1 Equivalent drawing of the atomizer

选取截面 A—A, B—B, 两截面处的气体压力分别为 P 和 P_a , 这里, P_a 为雾化压力, A_t 为截面 A—A 处的面积(即雾化器环孔或环缝的面积)。

压力为 P_a 的气体经截面 A—A 流入压力为 P_0 (雾化器的背压)的环境, 当把这种流动近似地看作定常流动, 并忽略位能及摩擦力所做的功时, 对于截面 A—A, B—B 之间的体系, 其 Bernoulli 能量关系可表示为:

$$\frac{1}{2}V_{go}^2 + \int_{P_a}^P \frac{dP}{\rho} = 0 \quad (1)$$

式中 ρ —— 压力为 P 时的气体密度。

对于可压缩气体的等熵流动, 状态方程⁽⁴⁾为

$$P\rho^{-\gamma} = C \quad (2)$$

式中 γ —— 气体的绝热指数

C —— 常数。

将(2)式代入(1)式, 并积分得出气体出口速度 V_{go} 与雾化压力 P_a 之间的关系为:

$$V_{go} = \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1} \frac{P_a}{\rho_a} \left[1 - \left(\frac{P}{P_a} \right)^{(\gamma-1)/\gamma} \right]} \quad (3)$$

式中 ρ_a —— 压力为 P_a 时的气体密度。

根据 $J_g = \rho V_{go} A_t$, 可得气体质量流率 J_g 与雾化压力 P_a 之间的关系为:

* 国家自然科学基金和国家教委博士点专项基金资助课题。

** 沈军, 工学博士, 讲师, 主要从事快速凝固理论、技术及新材料开发方面的研究工作。

$$J_s = A_i \left(\frac{P}{P_a} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1} P_a \rho_a \left[1 - \left(\frac{P}{P_a} \right)^{(\gamma-1)/\gamma} \right]} \quad (4)$$

由(3)式可明显看出, 气体在截面 A-A 处的压力 P 必须满足 $0 < P < P_a$, 而且当 $P=0$ 和 $P=P_a$ 时, 均有 $J_s=0$, 显然 $J_s \leq 0$ 的过程在物理上都是不能实现的。因此在 $0 < P < P_a$ 的范围内, 气体质量流率必将经历极大值。令 $dJ_s/dP=0$, 即可求得 J_s 取极大值时的气体压力 $P^* = (2/(\gamma+1))^{\gamma/(\gamma-1)} P_a$, 将此关系代入式(3)和(4), 可求得气体出口速度和气体质量流率的极大值, 并分别仍以 V_{so} 和 J_s 表示:

$$V_{so} = \sqrt{\frac{2\gamma P_a}{(\gamma-1)\rho_a}} \quad (5)$$

$$J_s = \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{1/(\gamma-1)} \cdot A_i \cdot \sqrt{\frac{2\gamma P_a \rho_a}{\gamma+1}} \quad (6)$$

实际雾化过程中, 气体出口后的压力 P_o 小于临界压力 P^* , 根据气体动力学理论, $P_o < P^*$ 时气体在出口处的压力 P 将保持与临界压力 P^* 相等, 此时气体出口速度和质量流率将恒定为其极大值, 并分别由式(5)和(6)给出。

2 金属质量流率

稳态流体流动的能量平衡微分方程可一般地写成

$$dU + d\left(\frac{P}{\rho_m} \right) + d\left(\frac{V^2}{2\beta} \right) - gdh - \delta Q^* = 0 \quad (7)$$

式中 U —内能

P —压力

V —流速

β —动能项因子

h —流体压力高度

Q^* —热量

ρ_m —金属熔体密度

g —重力加速度。

根据热力学第一定律, 当流体通过体系的某一微元段流动时, 其单位质量的内能变化为:

$$dU = \delta Q^* - Pd(1/\rho_m) + \delta E_t \quad (8)$$

式中 δE_t —因摩擦转变成热而损失掉的单位质量的机械能。

将式(7)中的 $d\frac{P}{\rho_m}$ 项展开成 $(1/\rho_m)dP + Pd(1/\rho_m)$, 并将式(8)代入式(7), 可得

$$\frac{1}{\rho_m}dP + d\left(\frac{V^2}{2\beta} \right) - gdh + \delta E_t = 0 \quad (9)$$

上式对整个体系积分, 可得

$$\int_{P_1}^{P_2} \frac{dP}{\rho} + \left(\frac{V_2^2}{2\beta_2} - \frac{V_1^2}{2\beta_1} \right) + gdh + \delta E_t = 0 \quad (10)$$

式中, P_1, V_1, β_1 ($i=1, 2$) 分别为截面 i 处的压力、流速和动能项系数。 β_i 由式(11)确定

$$\frac{1}{\beta_i} = \frac{1}{A_i} \int_0^{A_i} \left(\frac{v_i}{V_i} \right)^3 dA_i \quad (i=1, 2) \quad (11)$$

式中, v_i, V_i, A_i 分别为截面 i 处的当地流速、平均流速和截面积。

假定金属熔体的密度与压力无关, 将式(10)用于图 2 所示的坩埚及导液管中的金属熔体的流动, 此时 $V_1=0, P_1=P_a, P_2=P_o, V_2=V_o$ 。并定义 $\Delta P=P_o-P_a, V_o, P_o$ 分别为导液管出口处的速度和压力, 则有

$$\frac{\Delta P}{\rho_m} + \frac{V_o^2}{2\beta_2} - gdh + \delta E_t = 0 \quad (12)$$

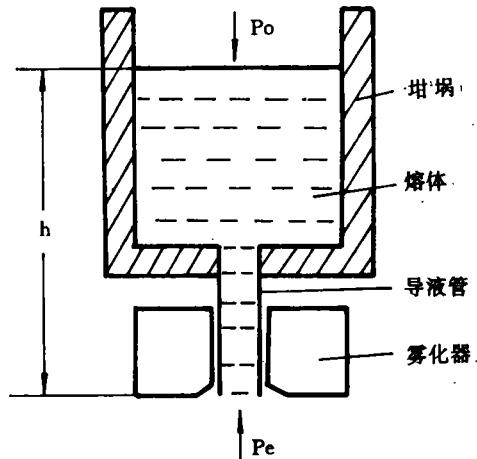


图 2 金属熔体释放系统示意图

Fig. 2 Schematic drawing of discharging system of metal melt

对于图 2 所示的金属熔体的释放系统, 因摩擦引起的机械能损失 E_t 可近似地表达

成

$$E_f = \frac{1}{2} e_f V_e^2 \quad (13)$$

式中, e_f 为摩擦损失系数, e_f 和 β_2 均取决于金属释放系统(主要包括坩埚和导液管)的几何结构及金属熔体在导液管出口处的雷诺数。

将式(13)代入(12), 并定义金属释放系数 $C_D = \left(\frac{1}{\beta_2} + e_f\right)^{-1/2}$, 则可解出金属熔体的出口速度 V_e 。

$$V_e = C_D \sqrt{2 \left(gh - \frac{\Delta P}{\rho_m} \right)} \quad (14)$$

根据 $J_m = A_e \rho_m V_e$, 由式(14)可得金属质量流率 J_m 的表达式

$$J_m = A_e \rho_m C_D \sqrt{2 \left(gh - \frac{\Delta P}{\rho_m} \right)} \quad (15)$$

由式(15)可以看出, 金属的质量流率不仅取决于坩埚中熔体的静压头(h), 而且还与导液管末端的压力特性(ΔP)密切相关。

由金属质量流率的表达式可以看出, 金属的质量流率随雾化时间的变化而变化。雾

化初期, 金属的质量流率较大, 随着雾化过程的进行, 金属静压头越来越小, 在导液管末端压力一定(即 ΔP 为常数)的情况下, 金属的质量流率也不断下降, 由 $\bar{J}_m = \frac{1}{h} \int_0^{h_0} J_m dh$, 并利用式(15)可得金属平均质量流率的表达式

$$\bar{J}_m = \frac{A_e \rho_m C_D}{3gh_0} \left[2 \left(gh_0 - \frac{\Delta P}{\rho_m} \right) \right]^{3/2} \quad (16)$$

式中 h_0 —— 坩埚中金属熔体的初始高度。

3 结论

推导出气体雾化过程中气体出口速度 V_{go} 、气体质量流率 J_g 和金属质量流率 J_m 的表达式分别为

$$V_{go} = \sqrt{\frac{2\gamma P_a}{(\gamma-1)\rho_a}}$$

$$J_g = \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{1/(\gamma-1)} \cdot A_t \cdot \sqrt{\frac{2\gamma P_a \rho_a}{\gamma+1}}$$

$$J_m = A_e \rho_m C_D \sqrt{2 \left(gh - \frac{\Delta P}{\rho_m} \right)}$$

4 参考文献

- 1 Lubanska H. J Metals, 1970, 22: 45.
- 2 Gutierrez E, Lavernia E J. Metall Trans, 1989, 20A: 71.
- 3 Rai G, Lavernia E J, Grant N J. J Metals, 1985, 8: 22.
- 4 [美] Emanuel G, 周其兴等译. 气体动力学的理论与应用, 北京: 宇航工业出版社, 1992. 44.

CALCULATION OF SEVERAL KEY PARAMETERS OF GAS ATOMIZATION PROCESS

Shen Jun Cui Chengsong Jiang Zuling Li Qingchun
(Harbin Institute of Technology, Heilongjiang 150001)

Abstract By the theory of fluid mechanism, several important parameters, such as gas exit velocity, gas mass flow rate, metal mass flow rate, etc. have been analysed, and their mathematical expressions have been given out.

Key Words rapid solidification powder metallurgy gas atomization