

喷射成形的雾化气流速度^①

李 周 张智慧 张国庆 米国发 刘仲武 田世藩 颜鸣皋

(北京航空材料研究院, 北京 100095)

摘 要 熔融金属的气体雾化是喷射成形过程的重要组成部分。作者从理论与实验两方面, 对雾化气流速度变化和雾化熔滴与气体流场的交互作用进行了研究, 建立了雾化气流速度的关系式, 探讨了雾化熔滴对雾化气流场的影响。

关键词 喷射成形 气体雾化 气流流速 两相流

中图法分类号 TG14

喷射成形主要由熔融金属的气体雾化、雾化熔滴的沉积等连续过程组成^[1]。其基本原理是: 熔融金属经导流管流出, 被雾化喷嘴出口的高速气流破碎, 雾化为细小弥散的熔滴射流。雾化熔滴射流在高速气流动量作用下加速, 并与气流进行强烈的热交换。到达沉积表面以前, 小于某一临界尺寸的熔滴凝固成为固体颗粒, 较大尺寸的可能仍为液态, 而中间尺寸的熔滴则为含有一定比例液相的半凝固颗粒。这些大小凝固程度不同的熔滴, 以高速撞击沉积表面, 随之在沉积表面附着、铺展、堆积、熔合形成一个薄的半液态层后顺序凝固结晶, 逐步沉积生长成为一个大块致密的金属实体——沉积坯。沉积坯的组织及喷射成形工艺参数的选择与雾化熔滴散热速度密切相关, 而雾化熔滴与雾化气体之间的换热系数又受到雾化熔滴和雾化气体之间相对速度的决定性影响^[2]。正如前面所述, 雾化熔滴是在雾化气流作用下加速的, 因而研究雾化气流速度变化是非常必要的。雾化气流速度随着离开雾化喷嘴距离的增加而逐渐减小, 同时也随径向距离增加而减小, 但具体的衰减规律与雾化喷嘴等有关。Grant 和 Lavernia 等给出了几种计算气流速度的关系式^[3-5], 但这些关系式一般是自由射流流速的纯经验关系式, 参数随雾化喷

嘴结构变化而定, 同时这些关系式均未给出雾化气流速度随径向距离变化的规律, 也未考虑与雾化熔滴的交互影响。

本文针对超音速度雾化喷嘴系统, 从理论与实验两方面研究了雾化气流场的变化规律, 同时探讨了雾化熔滴与气体流场的交互作用。

1 实验过程

本实验目的是测量雾化气流场的速度。实验所用气体为氮气, 雾化压力分别为 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 MPa。具体的实验装置见图 1, 测量时风速管离雾化喷嘴的距离分别为 40, 80, 120, 150, 200, 300, 400, 500 和 600 mm, 各个风速管相互之间的径向距离均为 30 mm。

2 雾化气流速度的变化

喷射成形所用喷嘴形成的气流一般是轴对称的, 图 2 给出了轴对称自由射流流动简图。图中 O 为射流源极点, u_m 为射流某一截面的轴向速度, u 为该截面上任意一点的纵向速度, R_s 为该截面的射流半径。

① 收稿日期: 1999-01-15 李 周, 男, 32 岁, 博士研究生

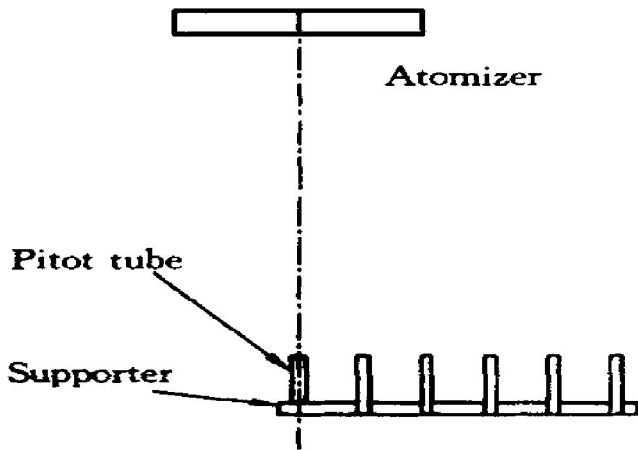


图1 雾化气体流场测量装置示意图

Fig. 1 Schematic of atomization gas velocity measurement

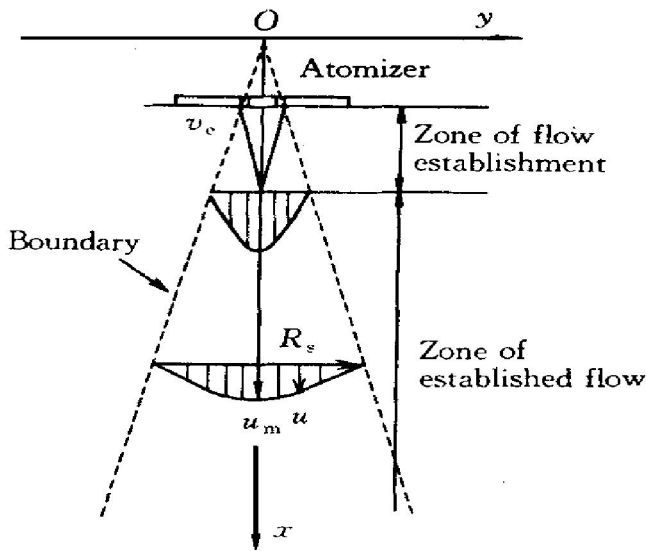


图2 雾化气体自由射流流动简图

Fig. 2 Schematic of flow of atomization gas

根据 Tollmien 理论, 轴对称射流主段内的无因次纵向速度可表达为^[6]

$$\frac{u}{u_m} = \frac{F'(\varphi)}{\varphi} \quad (1)$$

式中

$$F'(\varphi) = z' e^z$$

$$z' = 2/\varphi - 0.4\varphi^{0.5} - 0.004\varphi^2 + 0.00082\varphi^{3.5} + 0.00015\varphi^5 + 0.000014\varphi^{6.5}$$

$$z = \ln(\varphi^2/2) - 0.27\varphi^{1.5} - 0.00018\varphi^{4.5} + 0.000025\varphi^6 + 0.00000\varphi^{7.5}$$

$$\varphi = y/ax$$

a 为经验常数, 与具体的实验装置有关,

取值约为 0.066~0.076;

图3给出了雾化喷嘴(轴对称射流)雾化气体无因次纵向速度(u/u_m)与无因次半径(y/R_s)之间的关系。可以看出实验值与理论值在雾化锥轴线附近相符较好, 在边界层附近略微有点误差。为了进一步讨论与计算的方便, 根据实验数据, 并结合理论计算结果, 在一定精度范围内可写出下面的近似关系式:

$$\frac{u}{u_m} = \left(1 - \frac{y}{R_s}\right)^2 \quad (2)$$

图3中同时给出了式(2)的计算结果, 可以看出式(2)可以近似地反映轴对称射流截面的速度变化。

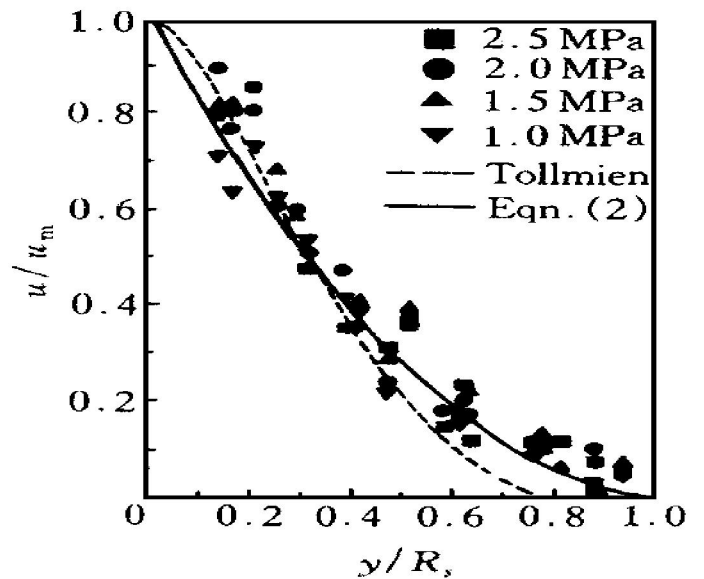


图3 雾化气体射流截面无因次速度剖面

Fig. 3 Gas velocity profile in cross section of atomization gas stream

3 雾化气流轴向速度的研究

虽然喷射雾化时, 雾化锥中包含有雾化熔滴和雾化气体, 但大多数文献介绍的雾化气流轴向速度的变化规律一般是无雾化熔滴时的纯经验关系式, 在一些雾化条件下不能真实反映实际雾化时的气体流场。

3.1 无雾化熔滴时气流的轴向速度变化

在不考虑雾化熔滴影响时, 根据动量平衡原理, 即所有截面上气体动量应保持不变, 且等于出口处的原始总动量^[7]。即

$$\int_A \rho u^2 dA = \int_{A_e} \rho_e v_e^2 dA_e + (P_e - P_b) A_e = I_m \quad (3)$$

式中 ρ , A 分别为所求射流截面的气体密度和射流截面面积; ρ_e , A_e 和 v_e 分别为雾化喷嘴气体的出口处气体密度, 截面面积, 气流速度。其中 v_e 可由下式计算:

$$v_e = \sqrt{\frac{2k}{k-1} \cdot \frac{P_0}{\rho_0} \cdot [1 - (\frac{P_e}{P_0})^{(k-1)/k}]} \quad (4)$$

式中 k 为气体的绝热指数(对于氮气 $k = 1.4$), P_0 和 ρ_0 分别为雾化气体的压力和密度。

结合式(2)和(3)及参考文献[7]中的推导过程, 可计算出 u_m :

$$u_m = \frac{\sqrt{\frac{15I_m}{\rho\pi}}}{3.4as + R} \quad (5)$$

式中 s 为射流截面与雾化喷嘴的距离, R 为雾化喷嘴外环半径。图4给出了雾化喷嘴的轴向速度的变化关系。可以看出, 利用式(5)计算的理论与实验值相符较好, 说明该关系能较好地反映自由射流的轴向速度变化规律。

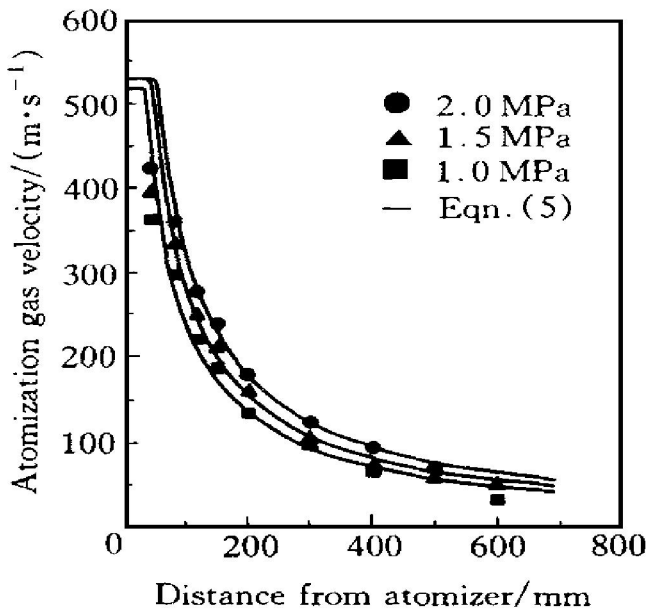


图4 雾化气流轴线速度的变化

Fig. 4 Axial velocity of atomization gas

3.2 液体金属雾化时气流的轴向速度

喷射成形时, 雾化气体与金属的质量流率比一般在 0.2~2.0 范围, 因而在低质量流率

比时雾化金属熔滴对气流速度是有影响的, 而仅按式(5)的气流来讨论雾化熔滴的速度是会有误差的。所以有必要研究雾化气流与雾化熔滴的交互作用。

在考虑雾化熔滴的影响时, 同样根据动量平衡原理有

$$\int_A (\rho u^2 + M(y, S) v_d) dA = \int_{A_e} \rho_e v_e^2 dA + J_m v_0 \quad (6)$$

式中 J_m 和 v_0 分别为雾化熔滴的流量, 初始速度。雾化熔滴的质量流率空间分布函数 $M(y, s)$ 可由下式决定^[8]:

$$M(y, s) = a(s) e^{-\left(\frac{y}{b(s)}\right)^{1.5}} \quad (7)$$

式中

$$\frac{a(s)}{a} = \left(\frac{1130}{s}\right)^2;$$

$$\frac{b(s)}{b} = \frac{s}{1130}$$

雾化熔滴的速度 v_d 可根据牛顿第二定律确定:

$$\rho_d V_d \frac{dv_d}{dt} = V_d (\rho_d - \rho) g + \frac{A_d}{8} C_D \rho \cdot (u - v_d) |u - v_d| \quad (8)$$

式中 ρ_d , V_d 和 A_d 分别为雾化熔滴的密度、体积和表面积; C_D 为系数。

结合式(2), (6), (7)和(8)可计算出雾化气体的流场, 但由于关系的复杂性, 无简单的解析解, 需利用计算机进行数值计算。图5给出了雾化气体压力为 2.0MPa 时, 不同气液比 (GMR= 雾化气体流量/液体金属流量) 对雾化气流速度变化的影响。从图中可以看出, 当存在雾化熔滴时, 相应的雾化气流速度会降低。当 GMR 较低时(如 < 0.35), 雾化熔滴的交互作用对气流流场的影响是明显的; 但当 GMR 较高时(如 > 1) 雾化熔滴对气流流场的影响较小, 在理论计算时可忽略不计。

4 结论

(1) 雾化气体射流的截面速度可表达为

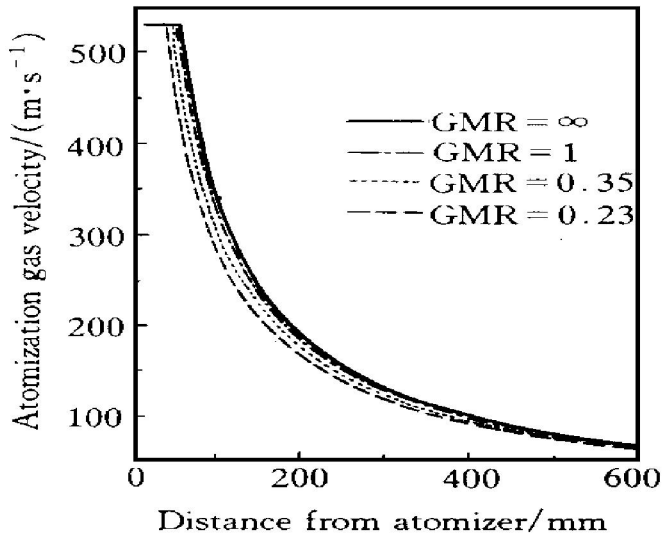


图5 气液比(GMR)对雾化气流速度的影响

Fig. 5 Effect of gas-melt ratio(GMR) on atomization gas velocity

$$\frac{u}{u_m} = \left(1 - \frac{y}{R_s}\right)^2$$

(2) 不考虑雾化熔滴影响时自由射流轴向速度变化规律为

$$u_m = \frac{\sqrt{\frac{15I_m}{\rho\pi}}}{3.4as + R}$$

(3) 喷射雾化过程, 低气液比时雾化熔滴

对雾化气体速度有明显的影晌, 但高气液比时雾化熔滴对雾化气流速度无明显影晌。

REFERENCES

- 1 Leatham A G and Lawley A. Inter J P/M, 1993, 29 (4): 321.
- 2 Lavernia E J and Wu Y. Spray Atomization and Deposition. Chichester: John Wiley & Sons, Inc, 1996.
- 3 Grant P S, Cantor B and Katgerman L. Acta Metall Mater, 1993, 41(11): 3097.
- 4 Lavernia E J *et al.* Inter J Rapid Solidification, 1988, 4: 89.
- 5 Liang X and Lavernia E. Mat Sci Eng, 1993, A161: 221.
- 6 Xie XiangChun(谢象春), Theory and Calculation of Torrent Efflux(湍流射流理论与计算). Beijing: Science Press, 1975.
- 7 Mei Zhi(梅 焱). Principle of Metallurgical Transmission Process(冶金传递过程原理). Changsha: CUST Press, 1987.
- 8 Li Zhou(李 周) *et al.* Journal of Aeronautical Materials (航空材料学报), 1998, (2): 31.

VELOCITY OF ATOMIZATION GAS DURING SPRAY FORMING

Li Zhou, Zhang Zhihui, Zhang Guoqing, Mi Guofa,
Liu Zhongwu, Tian Shifan and Yan Minggao

Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, P. R. China

ABSTRACT Gas atomization of melt metal is an important stage of spray forming process. Through the study of atomization gas velocity, expressions for dimensionless velocity in cross section of atomization gas stream and axial velocity of atomization gas have been established. The influence of droplets on gas velocity was also studied in this paper.

Key words spray forming spray atomization and deposition gas velocity two phase flow

(编辑 何学锋)