第10卷 第2期 2016年6月

文章编号:1673-9981(2016)02-0111-05

雾化气体压力及导流管伸长量对导流管 顶端压力的影响

宗 伟,罗 浩,周晚珠,朱 杰,马宇平,翁 廷,曾克里

广东省材料与加工研究所,广东 广州 510650

摘 要:对雾化气体压力及导流管伸长量对导流管顶端气体流场的影响进行了研究.结果表明:随着雾 化气体压力增加,导流管顶端压力先降低后升高;气体流场发生开涡-闭涡转变时雾化气体压力升高、导 流管顶端压力降低;闭涡状态下,导流管顶端压力与雾化气体压力成直线关系,且随着导流管伸长量增加,直线斜率减小.

关键词:气雾化;导流管伸长量;雾化气体压力;导流管顶端压力 中图分类号: TF 123.112 文章标识码:A

气雾化制备金属粉末技术具有环境污染小、粉 末球形度高及氧含量低等优点,该技术适应于生产 多种金属及合金粉末,尤其对含有易挥发、易氧化元 素粉末的制备具有明显的优势,目前此技术已经成 为生产高性能金属及特种合金粉末的主要方法^[1]. 多年来,国内外对此研究给予了高度重视^[2-10]. MI 等人[5-6] 对高压气体雾化(HPGA) 环缝喷嘴中雾化 气体压力及喷嘴结构参数对气体流场的影响进行了 计算模拟, Ting 等人[7] 对 HPGA 喷嘴中雾化气体 压力及气流场中出现的开涡、闭涡现象进行了研究. 然而,气雾化制粉工艺本身是一个多相流相互耦合 作用的复杂过程,人们对雾化过程中所涉及的一些 物理现象尚未形成一个全面、系统、清晰的认识,如 雾化气体流场中存在的一系列普朗特-迈耶波、紊 流、导流管顶端流场的变化和金属熔体的破碎机制, 以及对于气雾化生产过程中各技术参数如雾化气体 压力、喷嘴直径和角度、导流管直径和角度及伸长 量、熔体过热度等,对雾化粉末性能影响亦只有定性 的了解.

气雾化生产过程中导流管顶端压力及流场的变 化会导致金属熔体流速的变化^[11],对雾化过程及雾 化后粉末性能具有举足轻重的影响.当导流管顶端 为常压状态时,金属熔体自由下落,质流比较小,雾 化后粉末粒度细小、球形度高,粘连及卫星球较少, 但导流管易堵塞,雾化过程的稳定性及可持续性差; 导流管顶端为正压状态时,金属熔体的流速降低,雾 化气体甚至会通过导流管进入坩埚,出现熔体起泡 现象,严重时会造成金属熔体反喷,损坏设备,导致 雾化过程无法进行;导流管顶端为负压状态时,金属 熔体被抽吸进雾化区,质流比增大,雾化所得粉末粒 度较粗,但负压对防止导流管堵塞有着重要作用,利 于雾化过程的正常进行^[12-13].

由于仅有气流存在的雾化过程与实际雾化过程 之间存在着紧密联系^[5].本文通过调整导流管伸长 量及雾化气体压力,对紧耦合气雾化导流管顶端出 口处压力进行测量,探讨气雾化过程中的影响因素 及影响机制,为气雾化的正常进行提供依据和指导.

1 实验设定

本试验在开放系统下完成,图1为试验系统的 示意图,其中α表示喷嘴气流夹角,β表示导流管顶

收稿日期:2016-04-12

作者简介:宗伟(1987-),男,山东菏泽人,硕士.

端倒角,h 表示导流管伸长量, P_1 表示雾化气体压力 (0~5 MPa 可调), P_T 表示导流管顶端出口处 B 点



图1 试验系统的示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the experiment

压力(封闭状态下, B 点压力与 A 点压力相同,通过 压力表测定 A 点处压力等效于 B 点压力),试验用 雾化气体为氮气.

2 实验结果

图 2 所示为导流管伸长量 h 为定值时,导流管 顶端压力 P_{T} 随雾化气体压力 P_{I} 变化的曲线.从图 2 可见:当 $h \leq 3 \text{ mm}$ 时, P_{T} 大于大气压(100 kPa),即 出现反气现象,且随着 P_{I} 的增大 P_{T} 也升高,此种情 况对于实际生产已经失去意义,本实验暂不涉及;当 $h \geq 3.5 \text{ mm}$ 时,随着 P_{I} 的增大 P_{T} 先降低后升高.降 低过程分为两个阶段,当雾化气体压力小于临界压 力 P_{C} 时, P_{T} 随 P_{I} 升高而缓慢降低;当 $P_{I} = P_{C}$ 时, P_{T} 发生急剧降低,且降低前后的压差约为 30 kPa,这 一现象与气雾化流场中的开涡-闭涡理论^[2-3,14-17]相 吻合.





对比图 2 中曲线可知,随着 h 增大,发生开涡-闭涡转变所对应的雾化气体压力 P_c 增大.当 h=3.5~4 mm 时,m P_c 均小于 1 MPa;当 $h=4.5\sim5$ mm 时, P_c 均为 1.5 MPa;当 $h=5.5\sim6$ mm 时, P_c 均为 2 MPa;当 $h=6.5\sim6.8$ mm 时, P_c 均为 2.5 MPa.随着 h 增大,发生开涡-闭涡转变时的 P_T 降低.当 $h=4.5\sim5$ mm 时,曲线发生转变时的 P_T % 为 75 kPa; $h=5.5\sim6$ mm 时,曲线发生转变时的 P_T 约为 65 kPa;当 $h=6.5\sim6.8$ mm 时曲线发生转 变时的 P_T 为 60 kPa.发生开涡-闭涡转变时,具有相同 P_c 的不同曲线,h较大的曲线总是处于下方,即 P_T 相同时, P_T 随 h 增大而增大. 对比图 2 中 h 分别为 6.5 mm 和 6.8 mm 曲线 时发现,两条曲线基本重合,此时 h 的变化对于 P_T 已无影响,即对于确定的喷嘴及导流管,当 P_1 一定 时,引起 P_T 变化的 h 存在一个极限值 h_c .当 $h < h_c$ 时, P_T 随 h 增加而降低;当 h 在 h_c 附近波动时, P_T 不变.发生开涡-闭涡转变后的曲线近似为直线,不 同导流管伸长量所对应的导流管顶端压力与雾化气 体压力的直线方程: $P_T = 3$. $1P_1 + 1$ (h = 4 mm); $P_T = 2$.5 $P_1 - 5$ (h = 4.5 mm); $P_T = 1$.8 $P_1 + 1$ (h = 5 mm); $P_T = 1$.35 $P_1 + 1$.75 (h = 5.5 mm); $P_T = 1$.25 $P_1 - 6$.25 (h = 6 mm); $P_T = 0$.87 $P_1 - 1$ (h = 6. 5~6.8 mm).对比直线方程,随着 h 的增加,直线斜 率减小,从 3.1 逐渐降低至 0.87,即随着 h 的增加, 导流管顶端压力对雾化气体压力变化的敏感度降低.对于图 2 中 h 分别为 3.5,4,4.5 mm 的三条曲 线,当 P₁足够大时,P_T逐渐增加并大于大气压(100 kPa),致使雾化过程不能进行.因此,为了获得特定 性能的粉末,提高粉末收得率,在调整雾化气体压力 的同时,亦需要同时调整导流管的伸长量.在实际生 产过程中,在保证粉末性能的情况下,为了降低熔体 过热度、减少能耗、降低原材料损耗及对设备的损 害,应尽可能减小 h 值. 图 3 为同一雾化气体压力 P_1 下,导流管顶端压 力 P_T 随导流管伸长量 h 变化的曲线. 从图 3 可以看 出,当 $P_1 \leq 2.5$ MPa 时,导流管顶端的气体流场处 于开涡状态,随着 h 的增加, P_T 先降低再升高, 然后 稳定于一定值 P_E . 这是由于当 P_1 分别为 2 MPa 和 2.5 MPa 时,发生了开涡-闭涡转变而导致曲线发生 突变. 当 $P_1 \geq 3$ MPa 时,导流管顶端气体流场处于 闭涡状态,随着 h 增加, P_T 逐渐降低并稳定于某一 定值 P_E , 而且 P_E 随着 P_1 的增大而增大.





3 分析与讨论

Ting 等人为了研究导流管顶端回流区抽吸压 力的形成机制,建立了控制体模型^[7,18],如图 4 所 示.从图 4 可见,控制体位于导流管顶端,是由导流 管顶端与轴对称分布的雾化气流所围成的气雾化特 有的气体回流区^[3,15].



图 4 回流区控制体模型



在控制体内存在两个压力梯度,从滞点到导流 管顶端的轴向压力梯度及以导流管中轴线为中心向 四周辐射的径向压力梯度^[7,9,20],如图 5 所示.



图 5 导流管顶端回流区速度矢量图



雾化气体在滞点汇合(此处气流速度为0,压强 较高)后,由于轴向压力梯度的存在,部分气体从雾 化气流中分离并向上流入回流区,其它则沿流场中 心线继续向下运动.进入回流区内的气体沿中心线 轴压力梯度向导流管顶端方向流动,当回流气体接 近导流管顶端时,沿径向压力梯度转向沿导流管顶 端径向流动^[5-6,20].在导流管顶端边缘,回流气体与 雾化气流相接触,并受雾化气流影响向下运动,因此 在回流区内,中心向上气流与外侧向下气流中间存 在高强度紊流层^[7,19].

通过控制体模型可认为,导流管顶端的抽吸压 力是由进入和离开回流区的气流量引起的^[18].在开 涡状态下,随着雾化气体压力升高,气体动能增加, 紊流层内被加速至高速气流量增加,致使控制体内 随雾化气流离开的气流量大于滞点处补充的气流 量,导致导流管顶端压力逐渐降低.随着雾化气体压 力进一步升高,控制体的气体流场由开涡状态转变 为闭涡状态时,回流区被马赫碟截断形成主次两个 回流区(图 6),由于次回流区的气流不能进入主回 流区,造成主回流区气流急剧减少,表现为导流管顶 端压力突然降低^[7,14].

在闭涡状态下,当导流管伸长量为定值时,随着 雾化气体压力升高,雾化气流量增加,控制体边缘处 紊流层强度增加,进入回流区内的气流量增加,因此 导流管顶端压力随雾化气体压力升高呈线性变化. 当开涡-闭涡转变所对应的雾化气体压力 Pc相同 时,h较大的曲线总是处于下方,是因为在开涡状态 下,随着h增加,滞点与导流管顶端之间的距离增 大,回流区增大,使导流管顶端压力更低;在闭涡状 态下,随着h增加回流区增大,同时马赫碟强度增加 且马赫碟与导流管顶端距离减小,进入主回流区的 气流减少,使导流管顶端压力更低.

随着 h 增大,雾化气流与导流管之间碰撞增加, 被反射的气流量增加,导流管顶端的普朗特-迈耶波 变得更加复杂,导致 $P_{\rm T}$ 对 $P_{\rm I}$ 敏感度降低.

4 结 论

(1)雾化气体压力及导流管伸长量,对导流管顶 端气体流场具有决定性影响.

(2)随着导流管伸长量增加,导流管顶端压力先 降低后增加,气体流场发生开涡-闭涡转变时雾化气 体压力升高、导流管顶端压力降低.

(3)在闭涡状态下,导流管顶端压力与雾化气体 压力成直线关系,且随着导流管伸长量增加,直线斜 率减小.



图 6 开涡(轴线上端)-闭涡(轴线下端)转变

Fig. 6 Abruput change between open-wake (above axis) and close-wake (below axis)

参考文献:

- [1] DOWSON A G. Atomization dominates powder production [J]. Metal Powder Report, 1999, 54(1):15-17.
- [2] OUYANG Hongwu, HUANG Baiyun, CHEN Xin, et al. Melt metal sheet breaking mechanism of closecoupled gas atomization [J]. Trans Nonferrous Met Soc China, 2005, 15(5):985-992.
- [3] MATES S P, SETTLES G S. A study of liquid metal atomization using close-coupled nozzles, part 1: Gas dynamic behavior [J]. Atomization and Sprays, 2005, 15:19-40.
- [4] MATES S P, SETTLES G S. A study of liquid metal atomization using close-coupled nozzles, part 2: Atomization behavior [J]. Atomization and Sprays, 2005, 15:41-60.
- [5] MI J, FIGLIOLA R S, ANDERSON I E. A numerical simulation of gas flow field effects on high pressure gas atomization due to operating pressure variation [J]. Mater Sci Eng A, 1996, 208:20-29.
- [6] MI J, FIGLIOLA R S, ANDERSON I E. A numerical investigation of gas flow effects on high-pressure gas atomization due to melt tip geometry variation [J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 1997, 28: 935-941.
- [7] JASON T, IVER E A. A computational fluid dynamics (CFD) investigation of the wake closure phenomenon
 [J]. Mater Sci Eng A, 2004, 379:264-276.

2016

- [8] JEYAKUMAR M, GUPTA G S, SUBODH K. Modeling of gas flow inside and outside the nozzle used in spray deposition [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 203:471-479.
- [9] TONG M, BROWNE D J. Direct numerical simulation of melt-gas hydrodynamic interactions during the early stage of atomization of liquid intermetallic[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 202:419-427.
- [10] ZEOLI N, GU S. Computational simulation of metal droplet break-up, cooling and solidification during gas atomization [J]. Computational Materials Science, 2008,43:268-278.
- [11] ALLIMANT A, PLANCHE M P, BAILLY Y, et al. Progress in gas atomization of liquid metals by means of a de laval nozzle [J]. Powder Technology, 2009, 190:79-84.
- [12] 孙剑飞,曹福洋,崔成松,等.金属雾化过程中气体流场 动力学行为[J].粉末冶金技术,2002,20(2):79-81.
- [13] 陈再新,刘福长,鲍国华.空气动力学[M].北京:航空 工业出版社,1993:67.
- [14] 欧阳鸿武,王琼,刘卓民.紧耦合气雾化流场结构突变 过程的数值模拟[J].粉末冶金材料科学与工程,2010,

15(2):96-101.

- [15] TING J, PERETTL M W, EISEN W B. The effect of wake-closure phenomenon on gas atomization performance [J]. Materials Science and Engineering A, 2002, 326(1): 110-121.
- [16] 欧阳鸿武,陈欣,余文焘,等. 气雾化制粉技术发展历程 及展望[J]. 粉末冶金技术,2007,25(1):53-58
- [17] 欧阳鸿武,黄伯云,陈欣,等. 开涡状况下紧耦合气雾化 的成膜机理[J]. 中国有色金属学报,2005,15(5): 985-992.
- [18] TING J, ANDERSON I E, TERPSTRA R, et al. Design and testing of an improved convergent-divergent discrete-jet high pressure gas atomization nozzle[J]. Advances in Powder Metallurgy & Particulate Materials, 1998,10(3):25-39.
- [19] ZEOLI N, GU S. Computational validation of an isentropic plug nozzle design for gas atomization [J]. Computational Materials Science, 2008, 42:245-258.
- [20] 赵新明,徐俊,朱学新,等. 超音速气雾化导液管突出长 度对气体流场的影响[J]. 中国有色金属学报,2009,19 (5):967-973.

Effect of atomization pressure and protrusion length on delivery tube tap pressure

ZONG Wei, LUO hao, ZHOU Wanzhu, ZHU Jie, MA Yuping, WENG Ting, ZENG Keli Guangdong Institute of Materials and Processing, Guangzhou 510650, China

Abstract: This article studies the effect of atomization gas pressure and delivery tube protrusion length on delivery tube tap filed. The results shows that: with atomization gas pressure increase, the delivery tube tap pressure first decrease then increase; as gas filed changes from open-wake to closed-wake, the atomization gas pressure increase and delivery tap pressure decrease; in closed-wake state, the delivery tap pressure has a line relationship with the atomization gas pressure, and with the protrusion length increase, the straight slope decrease.

Key words: gas atomization; delivery tube protrusion length; atomization gas pressure; delivery tube tap pressure