

文章编号: 1004-0609(2005)07-1000-06

开涡状况下紧耦合气雾化的成膜机理^①

欧阳鸿武, 黄伯云, 陈 欣, 余文焘, 张 新

(中南大学 粉末冶金国家重点实验室, 长沙 410083)

摘 要: 为了探明紧耦合气雾化制粉过程中金属熔液在气流作用下的雾化机理, 采用降低金属过热度, 使部分金属液流在雾化过程中提前凝固的方法, 研究了开涡状况下(气体压力为 2.1 MPa)金属液流的成膜机制。结果表明: 雾化过程中液膜不是连续生成的, 而是以离散方式形成的; 开涡状况下的“实心锥”雾化存在将液滴挤压成液膜的成膜过程。这个成膜过程可表述为: 金属液流进入回流区, 经“初次雾化”破碎成离散的液滴, 并在湍流层中进一步破碎细化, 从滞留点前端穿过马赫盘, 被挤压成厚度约为 10~30 μm 、面积大约为 10~50 mm^2 的液膜。

关键词: 雾化机理; 粉末; 流场

中图分类号: TF 123.1

文献标识码: A

Filming mechanism of high-pressure gas atomization in state of ‘opened’ wake

OUYANG Hong-wu, HUANG Bai-yun, CHEN Xin, YU Wen-tao, ZHANG Xin

(State Key Laboratory of Powder Metallurgy, Central South University,
Changsha 410083, China)

Abstract: By decreasing the over-heating, a amount of metal sheets were solidified in the process of high-pressure gas atomization. The results indicate that the process of filming is not continuous, but in a discrete way. There is a filming process in the condition of ‘opened’ wake, as referred to solid-cone atomization. The filming process is described as: the melt is disrupted into droplets firstly by recirculation gas, and further smashed into smaller droplets in the turbulent layer by violent turbulent eddies; while crossing the Mach-disc, the droplets are squeezed into sheets with the thickness of 10~20 μm , and the area around 30~40 mm^2 .

Key words: atomization mechanism; powder; flow structure

近年来, 紧耦合气雾化机制的研究引起了广泛而深入的探索, 其热点集中在喷嘴下方回流区的流场结构特征和金属液流的破碎(雾化)机制^[1~5]。与其它气雾化技术不同, 紧耦合雾化技术的特点是雾化气体在喷嘴下方形成了一个流场结构十分复杂、形如倒锥的回流区。

金属液流与复杂流场的相互作用, 即金属液流的破碎机制, 至今尚未彻底弄清^[4~10]。有研究表明, 回流区内雾化气体的运动呈现 2 种典型的流场结

构, 即开涡和闭涡状况^[4, 5]。区分开涡与闭涡的准则为回流区前端是否存在封闭的马赫盘(碟)。如果存在封闭的马赫盘, 称之为闭涡状况; 反之, 称为开涡状况。闭涡结构的形成需要较高的雾化气体压力才能维持, 而开涡状况所需的气压相对较低。对应于开涡与闭涡状况存在 2 种不同的液流雾化机制: 实心锥雾化机制对应于开涡状况; 空心锥机制对应于闭涡状况^[5]。目前, 有研究认为, “空心锥”雾化机制存在液流转化为液膜的过程, 这些液膜在

① 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10476034)

收稿日期: 2004-11-29; 修订日期: 2005-05-09

作者简介: 欧阳鸿武(1964-), 男, 教授, 博士。

通讯作者: 欧阳鸿武, 教授; 电话: 0731-8877192; E-mail: oyxy163@163.com

高速气流作用下进一步破碎成液滴; 紧耦合喷嘴的“实心锥”雾化与自由落体式的雾化机制相似, 金属液流在雾化过程中没有成膜过程。

由于紧耦合雾化技术本身的复杂性, 金属液流、雾化气体流动特征以及雾化工艺参数等因素之间的相互影响仍难以确定^[11-15]。在研究过程中, 作者注意到在开涡雾化条件下, 粉末收集罐中会存在少量的膜片(质量分数大约为 5%)。这些膜片的存在, 显然与上述开涡状况下的“实心锥”雾化机制有较大的差别, 为此, 作者就开涡状况下可能存在的金属液流成膜机制进行实验研究, 以求对紧耦合气雾化机理获得真切的认识。

1 实验

实验所采用的气雾化设备是由英国 PSI 公司制造的紧耦合真空气雾化炉。紧耦合喷嘴的雾化过程如图 1 所示。雾化气体为高纯氮气, 气源由 12 个高压气瓶串联的供气系统供气, 最高气压为 5 MPa, 实验时气压为 2.1 MPa。选取 6 000 g 金属铜为雾化对象。为了获取足够多的金属膜片, 将熔化温度设为 1 409 K(铜的熔点为 1 359 K), 即过热度为 50 K。温度测量误差为 ± 2 K。实验过程持续约 2.5 min。在正常的气雾化过程中, 金属的过热度通常控制在 150~250 °C 之间, 一方面降低金属液流的运动粘性, 确保金属液流顺畅地通过导液管; 另一方面使金属液流具有适当高的温度, 在雾化过程中不致过早凝固, 保障其充分雾化。当过热度降低后, 金属液流在流出回流区时, 温度迅速下降 50 °C 以上^[16], 即金属液流还未充分雾化就已经凝固, 由此可以将雾化制粉的过程“凝固”下来。实验中, 粉末收集罐内近 60% 的金属是以膜片的方式存在的。

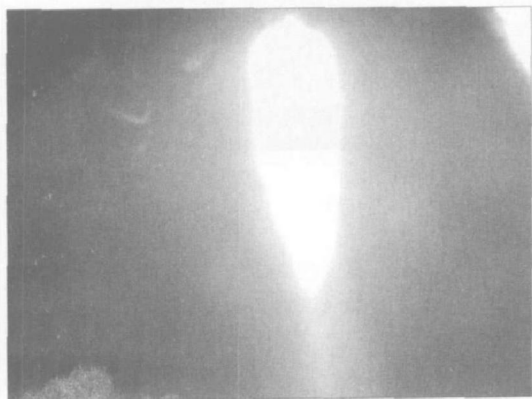


图 1 紧耦合喷嘴雾化过程

Fig. 1 Close coupled atomization process

将雾化粉末过筛, 以筛上留下的膜片(含少量颗粒)作为研究对象。

表面形貌分析中所采用的扫描电镜型号为 KYKY2800。

2 结果和讨论

2.1 实验结果

2.1.1 膜片的整体特征

在所收集的金属膜片中, 膜片的厚度通常为 10~30 μm , 最厚的膜片超过 40 μm , 最薄的膜片大约为 3~5 μm 。较厚的膜片表面呈现流痕, 而较薄的膜片表面出现了大量的孔洞。膜片的大小不一, 平均面积大约为 40 mm^2 , 最大的膜片面积约为 200 mm^2 , 较小的膜片面积大约为 5~10 mm^2 。其形状也丰富多样, 有枫叶状、鱼鳞状、羽毛状、带状和针状, 等等, 如图 2 所示。其中, 枫叶状和鱼鳞状的膜片比例较高, 大约占总数的 70%~85%; 羽毛状膜片的比例比带状的高, 大约为 10%~20%; 带状和针状的膜片很少。膜片的边沿通常呈不规则的锯齿状。

2.1.2 膜片的表面特征

膜片的表面呈现出多样化, 形貌也很复杂。通常较厚的膜片表面呈现出流痕, 表面相对光滑; 较薄的膜片表面往往出现明显的横向条纹、皱褶和细小的孔洞, 不仅表面较为粗糙, 而且还可以看到表面粘附有大量的更薄的膜片和微细颗粒。其中, 那些更薄更小的膜片与较厚较大的膜片熔合在一起, 细小的颗粒通常只是粘附在膜片的表面, 只有少量的颗粒熔合在膜片表面。

2.2 紧耦合气雾化的流场结构特征

2.2.1 开涡状况下回流区的流场结构

在无金属液流时, 回流区的流场结构如图 3 所示。在回流区内, 由下向上的回流气体在金属液流导管的出口处改变方向, 由内向外变为径向流动, 当到达喷嘴的边沿时, 与湍流边界层相遇, 被迫向下流动, 并被限制在回流区内与超声速流场分隔开。由此形成了回流区以及回流区之外的流场。外流场与回流区之间由一湍流层分离开。在湍流层中产生了一系列相邻的涡。

从喷嘴喷出的气体从滞留点的前端进入回流区, 并通过湍流层流出回流区。在回流区内部气体由下向上流动, 而在回流区的外围, 气体由上向下

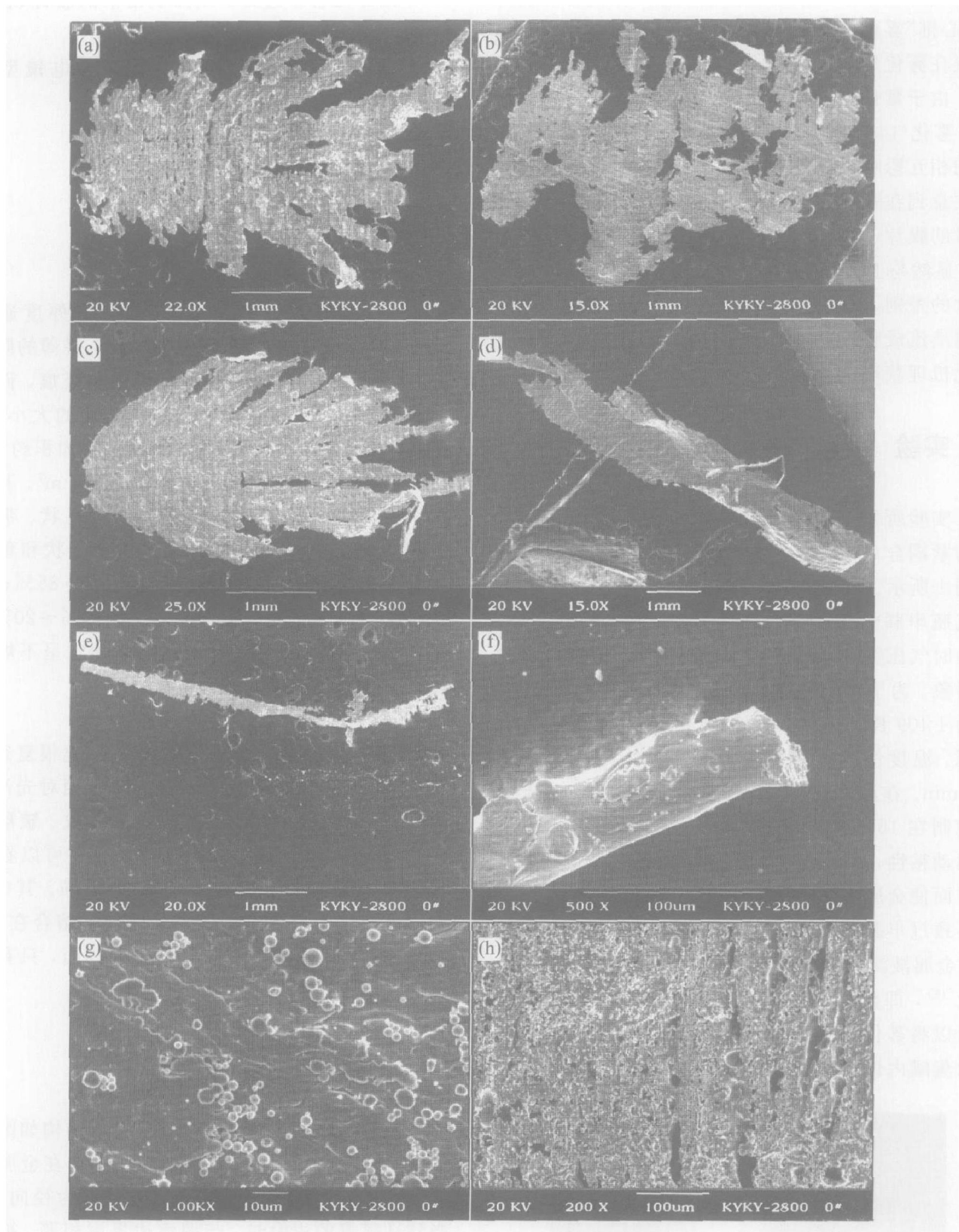


图 2 膜片的 SEM 形貌

Fig. 2 SEM images of sheet

流动。湍流层中气体的速度很低,但气体质量流量却很大。在大多数情况下,流经湍流层的气体质量相同,即进入和流出湍流层的气体质量相当。并且,气体流入和流出湍流层对滞留点的压力影响不大。

大部分气体并不从回流区中穿过声速边界进入超声速雾化气流中。这是因为径向流动的亚声速气流很难自由加速至超声速。然而,超声速雾化气流却很容易丧失能量变为亚声速并穿过声速边界进入亚声速回流区。其中一部分减速后,从滞留点前端

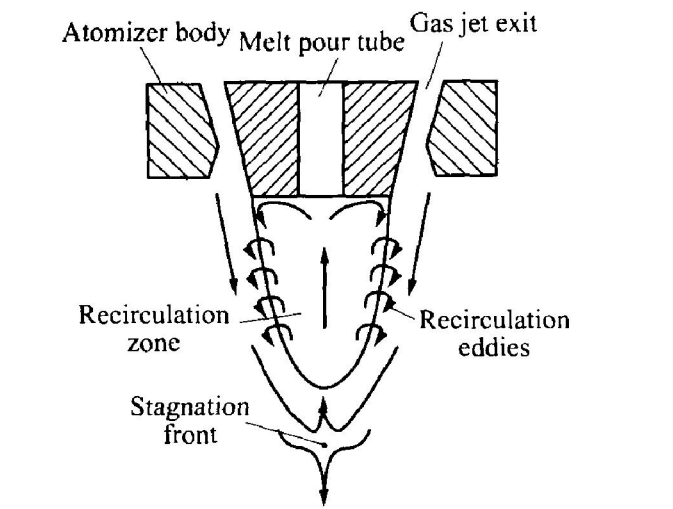


图 3 回流区气体的流动结构示意图

Fig. 3 Schematic depiction of gas recirculation zone

被夹带进入回流区。由于气体质量的增加, 影响了导液管出口处的压力, 即影响了金属液流的抽吸压力, 从而引起金属液流量的脉动。

在滞留点前端, 气体被拖拽出涡流, 加速至超声速并穿过声速边界进入超声速自由流区, 保持回流区内的动态平衡。在仅有气体流动的条件下, 喷嘴下方的气体流场通过膨胀或压缩, 调节高速气流与环境的压力平衡, 将不可压缩的金属液流导入回流区后, 打破了可压缩气体原有的流场平衡结构, 使气体流动处于新的动态平衡状况。

2.2.2 开涡状况下的雾化过程

在紧耦合雾化过程中, 振荡雾化机制是其内在

特征, 所有的气雾化过程不可避免地存在脉动现象, 这是气雾化过程的本质特征之一。有研究表明, 其振荡频率低于 60 Hz ^[17]。文献[5]对开涡状况下脉动雾化模型的表述如图 4 所示。图 4(a) 为开始将金属液流导入回流区; 图 4(b) 为金属液流被吸入回流区后, 在雾化气体的作用下, 产生径向流动, 向回流区的边界运动; 图 4(c) 为在金属液流加入后, 回流区被扩大, 处于“开涡”状况, 金属液流从锥前端离开回流区。当这股金属液流离开回流区后, 回流区前端的压力得到恢复, 使回流区的流场结构回复到图 4(a) 所示的状况。雾化过程在 (a) 和 (b) 这两个状况间反复转换, 形成雾化的脉动机制。并认为开涡状况下的雾化类似于自由落体式的雾化机制, 所不同的是雾化气体与金属液流在几何位置上相距很近, 并且气体对金属液流的作用更为强烈。所谓的实心雾化模式: 金属液流不经过“片”或“膜”的过程, 直接被高速气流冲击成为细小的颗粒。当液滴进入超声速流场后, 由于气动阻力的作用, 液滴被加速。在加速过程中, 作用在液滴上的气动力与表面张力的平衡受到破坏, 液滴将被破碎成带状或丝状后, 进一步破碎成细小液滴, 即经历二次雾化^[18]。

如果上述开涡雾化机制完全正确的话, 那么, 在开涡状况下雾化时, 在粉末收集罐中得到的不应是金属膜片, 而应是带状或其它形状的金属屑。由于实际开涡状况的雾化过程中, 在粉末收集罐内存在大量的金属膜片, 与上述的开涡雾化机理存在较大的差异, 作者认为开涡状况下可能同样存在成膜

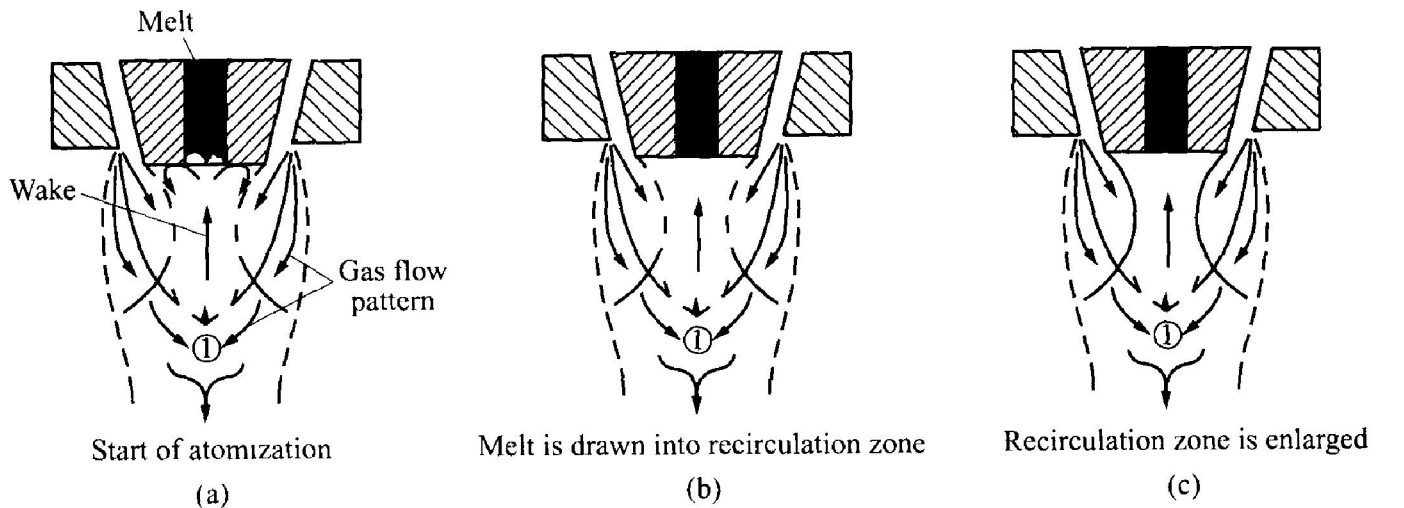


图 4 开涡状况下的雾化机制

Fig. 4 Schematics of atomization mechanism in state of ‘opened’ wake

(a) —Gas flow features prior to introduction of melt into wake;

(b) —Melt drawn into wake; (c) —State of ‘opened’ wake

机制,下面从流场结构的特点对这一构思做深入分析。

2.3 开涡状况下可能的成膜机理

2.3.1 开涡状况下成膜机制分析

作者认为开涡状态下的脉动雾化方式并非滞留点消失或重建之间的脉动,而是回流区内压力的初始平衡被打破后,雾化气流对流场结构的恢复与保持,并且是局部的打破与恢复,并非全面的打破。其理由是:超声速气体流场的压力是由前向后传播的,并且,下(后)游的压力波动不会影响到上(前)游。上游流场决定性地影响下游流场的结构和特征^[19]。在紧耦合雾化过程中,回流区内的亚声速流场结构(在喷嘴结构不变的条件下)主要依赖于外流场中的超声速气流,可见,滞留点的形成和演化主要决定于整体流场的特征。因此,滞留点压力的建立主要取决于外流场的作用。如果雾化气体压力适当高,足以平衡金属液流对回流区内流场的影响,那么,回流区内气体的流场结构将是基本稳定的,波动或脉动都只是在在一个比较小的范围内发生,而不是滞留点的完全消失或重建。这是与文献[5]所阐述的雾化机制的主要差别。另外,金属液流对回流区流场结构的影响也值得引起注意。虽然金属液流是以液柱的形式进入回流区,但在回流的作用下,不仅运动方向发生了两次改变(即由上向下变为由下向上;再变为由内向外),而且,更为重要的是液柱变为了离散的液滴。这些液滴在进入湍流层后进一步破碎,成为更为细小的液滴。当这些液滴穿过声速边界进入超声速流场时,在巨大(大约为100~250 kPa)的压差作用下,液滴被挤压(或拉扯)成形状各异的液膜^[5, 18]。

在金属液柱的破碎过程中,回流区处于动态平衡状况,气体与金属液流发生十分复杂的物理、化学变化。因此,金属的质量分布、流场分布都可能处于不对称或不平衡状况,即液柱破碎后形成的液滴并不是均匀地分布在回流区中,并且,液滴的大小也不均匀。在回流区边界面上,气体的压力和速度分布并非完全均匀一致,事实上,往往是处于不均匀的分布状况。质量分布不均匀、大小不同的液滴在流出回流区时,势必影响回流区的流场结构。回流区内金属液滴可能沿压差较低(低压通道)的方向运动。这样,一方面瞬间打破了回流区内原有的动态平衡,另一方面导致气体将尽快地恢复回流区的平衡状况。而气体在恢复过程中,又出现新的压力分布不均匀状况,为金属液流流出回流区提供了

条件。由此可见,在滞留点前金属液流运动状况的动态变化,以及雾化气体维持流场结构平衡的调节过程,是开涡状况下脉动雾化的主要特征。

根据上述分析,对开涡状况下金属液流的雾化过程可以表述为:金属液流以液柱的形式进入回流区,但在回流气体的作用下,液柱破碎成离散的液滴(并非直接成膜),这些液滴在湍流层中进一步破碎细化,最后从滞留点前端穿过马赫盘进入外流场,在超声速气流作用下,进一步破碎雾化。基于这样的假设,金属液滴在滞留点前端穿过马赫盘时,将在高压下被挤压成液膜。这些液膜再与超声速气流相互冲击,进一步破碎成更为细小的液滴,最后凝固出粉末颗粒。

2.3.2 开涡状况下成膜机制的验证

降低金属过热度,使大部分金属液流在开涡状况雾化过程中提前凝固,由此获得大量的金属膜片,这说明在开涡状况下存在成膜机制。膜片的厚薄、大小、形状以及表面形貌的差异,一方面反映出紧耦合雾化过程的复杂性,另一方面清楚地表明,液膜不是连续生成的,而是以离散的方式形成的。空心锥雾化模式其实并不是一个完整的表面连续的空心锥,而是由于大量的金属液膜集中地从回流区前端喷出时,形成了一个由离散细小液膜组成的锥形流。因此,紧耦合雾化过程的“实心锥”模式也存在一个由液滴挤压成液膜的成膜过程。

从某种意义上看,“空心锥”和“实心锥”本质其实是相同的,都存在液滴的成膜过程,只是表现形式上略有差别:“实心锥”模式下的雾化过程不如“空心锥”模式那么“平稳”,成膜的质量以及随后的液膜破碎效果存在差异。由于雾化过程中,回流区流场结构处于动态变化过程,特别是滞留点压力的波动,直接影响了金属液流的流率。当滞留点压力提高时,金属导流口处的压力提高,使金属液流量降低,甚至阻止金属液流进入回流区;当滞留点压力下降时,金属液流量提高,甚至瞬时打破滞留点的压力分布结构。通常情况是:“实心锥”模式下,金属流率高,雾化效果较差,微细粉末的比例低;“空心锥”模式下,金属流率低,雾化效果好,微细粉末比例高。

事实上,由于紧耦合雾化过程中各影响因素的耦合作用,金属液流的雾化过程的具体形式仍不能确定或保持不变,雾化过程是一个时均的(脉动的)过程。在雾化工艺参数不变的情况下,回流区内金属液柱的破碎,以及液柱破碎后对回流区流场的反作用,都将影响随后的液滴成膜。这是一个相互耦

合的复杂作用过程。

3 结论

1) 通过降低金属过热度, 使部分金属液流在雾化过程中提前凝固的方法, 研究了开涡状况下 (气体压力为 2.1 MPa) 紧耦合雾化技术的金属液流成膜机制。所收集的膜片尽管厚薄、大小、形状以及表面形貌各异, 但足以说明在开涡状况下存在成膜机制。对膜片形貌的分析表明, 雾化过程中液膜不是连续生成的, 而是以离散的方式形成的。紧耦合气雾化的“实心锥”模式存在一个将大量液滴挤压成液膜的成膜过程。

2) 开涡状况下紧耦合雾化的成膜过程为: 金属液流以液柱的形式进入回流区, 在回流气体的作用下, 液柱破碎成离散的液滴, 并在湍流层中进一步破碎细化, 最后从滞留点前端穿过马赫盘进入外流场。金属液滴在滞留点前端穿过马赫盘时, 在高压下被挤压成液膜, 其厚度大约为 10~30 μm , 面积大约为 10~50 mm^2 。这些液膜与超声速气流相互作用, 进一步破碎成更为细小的液滴, 最后凝固成粉末颗粒。

REFERENCES

- [1] Dowson A G. Atomization dominates powder production[J]. MPR, 1999, 54(1): 15-17.
- [2] Schulz G. Some applications of ultrafine, gas atomized metal powder beyond classical powder metallurgy[A]. Kosuge K, Nagai H. Proc of 2000 Powder Metallurgy World Congress[C]. Japan: The Japan Party of Powder and Powder Metallurgy, 2000. 475-478.
- [3] Sheikhaliev S M, Beryukhov A V, Dunkley J J. Metal droplet's deformation and break-up by a gas stream [A]. Euro PM2004[C]. 2004. 1-6.
- [4] Ting J, Anderson I E. A computational fluid dynamics (CFD) investigation of the wake closure phenomenon [J]. Materials Science and Engineering A, 2004, A379: 264-276.
- [5] Ting J, Peretti M W, Eisen W B. The effect of wake-closure phenomenon on gas atomization performance [J]. Materials Science and Engineering A, 2002, A326: 110-121.
- [6] Laulgy A. Atomization: The Production of Metal Powder[M]. Princeton, NJ: Metal Powder Industries Federation, 1992. 76.
- [7] Mates S P, Settles G S. High-speed imaging of liquid atomization by two different close-coupled nozzles[A]. Cadle T M, Narasimhan K S. Advances in Powder Metallurgy & Particulate Materials - 1996[C]. Princeton NJ: MPIF, 1996. 67-80.
- [8] Liu H, Robert F. Effect of atomizer geometry and configuration on gas flow field in gas atomization[A]. Cadle T M, Narasimhan K S. Advances in Powder Metallurgy & Particulate Materials - 1997 (part 1) [C]. Princeton, NJ: MPIF, 1997. 5-10.
- [9] Espina P I, Piomelli U. Numerical simulation of the gas flow in gas-metal atomizers [A]. Cadle T M, Narasimhan K S. Proceedings of FEDSM 98 [C]. Princeton, NJ: MPIF, 1998. 1-11.
- [10] Dunkley J. Water bench testing boots gas atomizing [J]. MPR, 1999, 54(3): 26-29.
- [11] Lee C H, Reitz R D. An experimental study of the effect of gas density on the distortion and breakup mechanism of drops in high speed gas stream[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2000, 26: 229-244.
- [12] Strauss J T. Hotter gas increases atomization efficiency[J]. MPR, 1999, 54(11): 24.
- [13] Strauss J T, Miller S A. Effect of gas properties in powder yield produced by close-coupled gas atomization[A]. Advances in Powder Metallurgy & Particulate Technology - 1997 (part1) [C]. Princeton NJ: MPIF, 1997. 45-52.
- [14] Strauss T J. Close-coupled gas atomization using elevated temperature gas[J]. Advances in PM Tech, 1999, 1: 23-34.
- [15] Murray I F, Heister S D. On a droplet's response to acoustic excitation. International [J]. Journal of Multiphase Flow, 1999, 25: 531-550.
- [16] LIU Yun-zhong, CHEN Zhe-hua, WANG J N. Numerical simulation of the thermal history of droplets during multi-stage atomization[J]. Science and Technology of Advanced Material, 2001, 2: 177-180.
- [17] Jr Giel T V, Mueller T J. The Mach Disk in Truncated Plug Nozzle Flow[M]. AIAA, 1975. 75-886.
- [18] LI Qing-quan. The principle of powder production by the closed-coupled gas atomization[J]. Powder Metallurgy Industry, 1999, 9(5): 3-17.
- [19] Zucker R D. Fundamentals of Gas Dynamics[M]. Chesterland, OH: Matrix Publishers Inc, 1977.

(编辑 杨 兵)