

# 基于CFD的EIGA导流管伸出长度的优化研究

郭快快<sup>1,2</sup>, 李建中<sup>1</sup>, 刘常升<sup>3</sup>

(1. 东北大学 冶金学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 中国科学院 金属研究所, 辽宁 沈阳 110016;

3. 东北大学 材料科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110819)

**摘要:** 采用CFD(computational fluid dynamics)数值模拟的方法,对电极感应熔炼气雾化(electrode induction melting gas atomization, EIGA)导流管不同伸出长度进行模拟计算,分析了导流管伸出长度对流场结构和粉末粒径的影响规律.结果表明,导流管伸出长度为0 mm时,回流区内的速度最大值为335 m/s,气体出口处的膨胀波簇明显变大,会出现反喷现象.随着导流管伸出长度的增加(1~4 mm),回流区的长度逐渐增加,且所制备的合金粉末的平均粒径先减小后增大.导流管伸出长度为2和3 mm时,抽吸压力最大,利于液滴二次破碎.导流管伸出长度为2 mm时,粉末粒径分布均表现为单峰的正态分布形态,粉末的中位粒径 $d_{50}$ 为84  $\mu\text{m}$ ,粒径分布最均匀,粒径范围最窄.

**关键词:** 电极感应熔炼气雾化(EIGA);导流管;流场结构;回流区;粒径分布

中图分类号: TB 126 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2024)09-1252-06

## Optimization Study on Protrusion Length of Delivery Tube in EIGA Based on CFD

GUO Kuai-kuai<sup>1,2</sup>, LI Jian-zhong<sup>1</sup>, LIU Chang-sheng<sup>3</sup>

(1. School of Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China; 3. School of Material Science & Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: LIU Chang-sheng, E-mail: cslu@mail.neu.edu.cn)

**Abstract:** A computational fluid dynamics (CFD) approach was developed to simulate the EIGA (electrode induction melting gas atomization) with different protrusion lengths of delivery tube. The effect of the protrusion length of delivery tube on the flow field structure and powder particle size was analyzed. The results show that when the protrusion length is 0 mm, the maximum velocity in the recirculation zone is 335 m/s, and the expansion wave cluster at the gas outlet increased significantly, resulting in backflow phenomenon. With the increase of the protrusion length (1~4 mm), the length of the recirculation zone gradually increases, and the average particle size of the alloy powder prepared first decreases and then increases. The maximum suction pressure is achieved at 2 and 3 mm of protrusion length of delivery tube, which is beneficial to the secondary fragmentation of liquid droplets. When the protrusion length is 2 mm, the particle size distribution of the powders shows a normal distribution, and the median diameter ( $d_{50}$ ) of the powders is 84  $\mu\text{m}$ , which is the most uniform particle size distribution and the narrowest particle size range.

**Key words:** electrode induction melting gas atomization (EIGA); delivery tube; flow field structure; recirculation zone; particle size distribution

气雾化制备的金属粉末质量好坏的核心取决于喷嘴,其工作原理是通过收缩喷嘴内流道的

横截面,将高压气体的压力转化为动能,最后以高速气流的形式从喷嘴喷出<sup>[1-2]</sup>.导流管作为雾化

收稿日期: 2023-05-29

基金项目: 常州市科技支撑计划(工业)(CE20220044).

作者简介: 郭快快(1989-),男,河南平顶山人,中国科学院金属研究所博士后研究人员;刘常升(1963-),男,内蒙古奈曼旗人,东北大学教授,博士生导师.

喷嘴结构的重要组成部分,其几何形状、内径尺寸和相对位置直接决定了金属液流的最终破碎效果和制备的粉末性能<sup>[3-5]</sup>.

真空感应熔炼气雾化(vacuum induction melting gas atomization, VIGA)技术一般采用氮化硼陶瓷作为导流管,高温金属液流随导流管进入雾化室被雾化破碎<sup>[6-7]</sup>.由于雾化过程中,金属熔体直接接触导流管,因此导流管需要每次进行更换.区别于VIGA制粉的导流管,电极感应熔炼气雾化(EIGA)技术的高温熔体不直接接触导流管<sup>[8-9]</sup>,因此EIGA的导流管更像是介质连接通道,不用频繁更换.然而气雾化制粉技术是一个多相流复杂的相互作用过程,通常用计算流体力学(CFD)来模拟导流管对雾化的影响<sup>[10-11]</sup>. Ünal<sup>[12]</sup>使用一种新设计的紧密耦合喷嘴系统来研究导流管突出长度对压力形成的影响,导流管底部始终存在1.0~3.5 MPa雾化气体压力范围内的负压.宗伟等<sup>[13]</sup>发现闭涡状态下,导流管顶端压力与雾化气体压力成直线关系.Wang等<sup>[14]</sup>研究了导流管顶端形状对喷嘴堵塞的影响,结果表明,导流管末端的小平台是导致喷嘴堵塞的关键因素,当扩张角为40°~45°时,粉末具有较好的微观形貌,粒径为21~25  $\mu\text{m}$ .但对于导流管伸出长度,尤其是EIGA情况下,对粉末特性的影响及雾化作用机理却鲜有报道.因此本文采用CFD数值模拟方法,对EIGA不同导流管伸出长度进行模拟计算,分析导流管伸出长度对粉末粒径大小和分布的影响,同时对其流场结构特性进行了研究,以期对喷嘴结构的设计优化提供一定的指导作用.

## 1 实验方法

EIGA喷嘴的导流管为铜制结构,黄铜底部与出气口的差值即为导流管伸出长度( $h$ ),如图1所示.采用Ansys-fluent模拟软件,根据雾化实际数据,将导流管伸出长度分别设定为0,1,2,3,4,5 mm,雾化气流压力为5 MPa,金属熔体温度为2 193 K、熔体质量流率设为0.035 kg/s. VOF (volume of fluid)两相流模型用于模拟喷嘴内部的导流管和喷嘴出口附近.由于雾化喷嘴出口处的气体是超音速的,使用 $k-\varepsilon$ 和LES (large eddy simulation)相结合模拟高速气流内部流动,可以准确预测雾化相关的冲击波.对于液滴的二次雾化过程,选用离散相模型(discrete phase model,

DPM),破碎过程则采用TAB (Taylor analogy breakup)破碎模型, TAB模型是基于液滴变形动力学,以临界变形作为破碎准则,可以更好地预测液滴球形凝固过程.采用Gambit前处理软件对设备简化几何模型进行网格划分,如图2所示.采用了动态网格自适应方法应用于加密网格,内部边界网格在相邻部分之间是兼容的,从而启动收敛计算.气雾化实验所使用气体为氩气,选择压力入口 (pressure inlet)边界作为雾化气体入口;导流管压力入口作为金属液流入口;雾化室的下边界和左右边界设为压力出口 (pressure outlet).

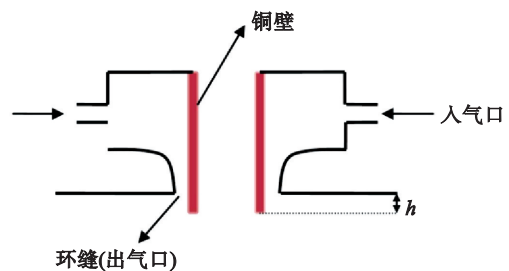


图1 雾化器结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of atomizer

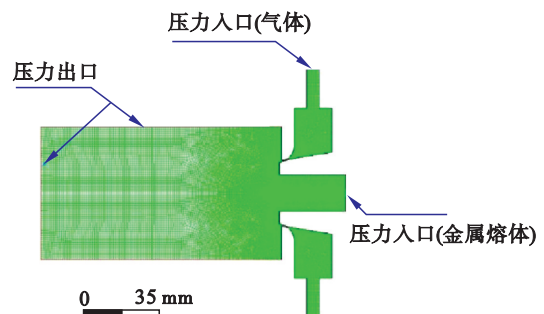


图2 数值模拟计算域和边界条件

Fig. 2 Numerical simulation computational domain and boundary conditions

EIGA雾化过程中所采用的雾化气体为氩气,设置为不可压缩气流;所采用的合金为Ti-6Al-4V (TC4),模拟所用的熔体和雾化气体的物理参数如表1所示.

## 2 模拟结果与讨论

### 2.1 导流管伸出长度对气流场结构的影响

当导流管伸出长度不同时回流区的速度变化如图3所示.可以看出,与其他5组参数条件下的速度云图相比,当导流管伸出长度为0 mm时,回流区的长度明显缩小1/2,且回流区的位置明显上移,回流区上端开始进入导流管内部,这对于金属熔体的流出不利的,气体出口处的膨胀

波簇(expansion wave cluster)明显变大,雾化气体流动状态相当紊乱,回流区内速度为200~300 m/s,如图3a所示.其他5组不同伸出长度条件下的云图特征大致相同,因此可以推断出,速度云图的基本结构特征主要取决于喷嘴的结构.随着导流

管伸出长度的增加(1~4 mm),回流区的长度有逐渐增加的趋势.回流区的存在是雾化可以进行的前提条件,回流区面积的大小,决定了有效雾化区域的大小,因此结合速度云图的分析可以得出,导流管伸出长度为2~4 mm时,雾化效率较高.

表 1 钛合金(TC4)和氩气物理参数  
Table 1 Physical properties of titanium alloy (TC4) and argon

物质	密度 kg·m <sup>-3</sup>	黏度 kg·s·m <sup>-2</sup>	表面张力 N·m <sup>-1</sup>	比热容 J·(kg·K) <sup>-1</sup>	热导率 W·(m·K) <sup>-1</sup>
钛合金	4 500	2.0×10 <sup>-5</sup>	1.588	812	25.8
氩气	ideal-gas	2.125×10 <sup>-5</sup>	—	520.64	0.0158

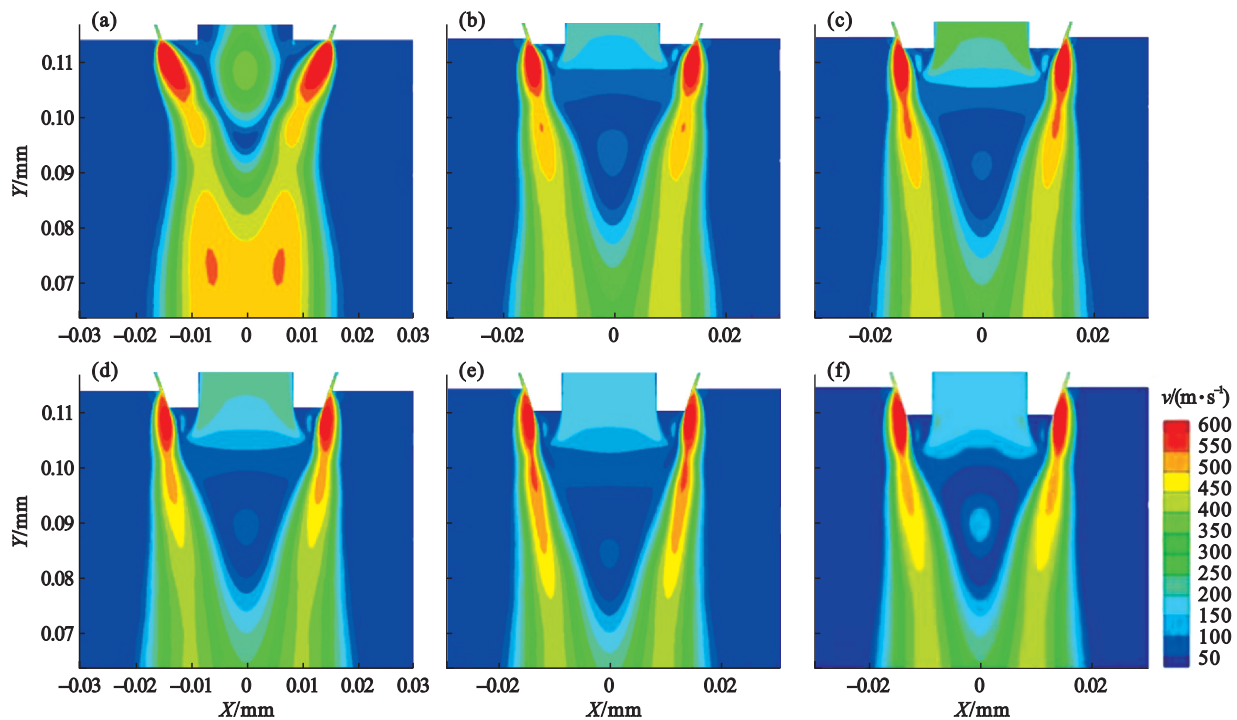


图 3 导流管不同伸出长度时回流区速度云图

Fig. 3 Velocity contours of recirculation zone with different protrusion lengths of delivery tube  
(a)—0 mm; (b)—1 mm; (c)—2 mm; (d)—3 mm; (e)—4 mm; (f)—5 mm.

图4为导流管不同伸出长度条件下沿计算中心的轴向速度变化曲线.从此图可以更直观地看出雾化室的速度变化,当导流管伸出长度为0 mm时,轴向速度的变化明显区别于另外5组,结合图3a可以得出,回流区的上游已经进入导流管内部,回流区内的速度最大值为335 m/s,明显高于另外5组.回流区下游末端的速度最大为-430 m/s,也明显高于其他5组,这种雾化室内剧烈的速度波动,虽增加了回流区的紊乱度,利于液滴的破碎,但同时也加大了液滴的形变,不利于形成球形粉末.随着导流管伸出长度的增加(1~4 mm),回流区位置略微有下移的趋势.导流管伸出长度为5 mm时,回流区内的速度波动较另外4组(1~4 mm)略微增加,最大速度可

达130 m/s.

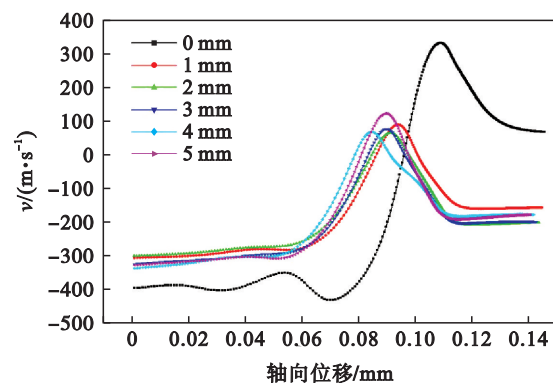


图 4 导流管不同伸出长度条件下沿计算中心的轴向速度  
Fig. 4 Axial velocities along the center of the computational domain with different protrusion lengths of delivery tube

图5a是导流管伸出长度为0 mm时压力沿对称轴方向的变化情况.可以看出此时导流管底部的静压为0 Pa,说明导流管内的气流速度为零或速度方向向上,此时喷射气流对导流管内的金属不能产生抽吸作用,甚至会产生向上的阻力,金属只能依靠自身的重力作用流下,金属液滴雾化的可靠性降低.导流管伸出长度为1~5 mm时的轴向压力变化情况如图5b所示,可以看出,当导流管伸出长度为1,2,3,4,5 mm时,导流管底部的压力依次为-19.03,-29.88,29.31,-23.88,-23.96 kPa,

计算可得其抽吸压力分别为-119.03,-129.88,-129.31,-123.88,-123.96 kPa,均为负压,呈现出随着导流管伸出长度的增加先增加再减小的趋势.这一结论与文献[15]的结论不太相同,赵新明等研究得出,随着导流管伸出长度的增加,抽吸压力逐渐减小.这种不同是因为赵新明等研究的是VIGA的喷嘴结构,EIGA的回流区压力状况目前还鲜有报道.导流管伸出长度为2和3 mm时,此时抽吸压力最大且大小基本一样.

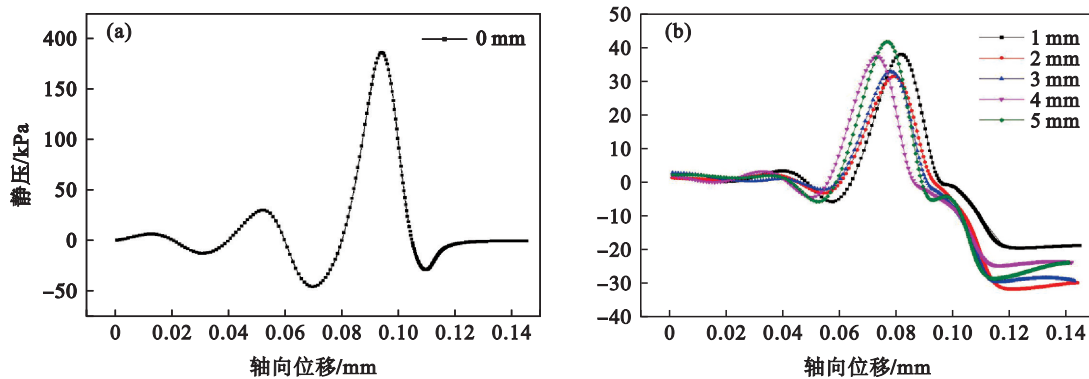


图5 导流管不同伸出长度下沿计算中心轴线上压力变化曲线

Fig. 5 Axial pressures along the center of the computational domain with different protrusion lengths of delivery tube

(a)—导流管伸出长度0 mm的静压;(b)—导流管伸出长度1~5 mm的静压.

在模拟雾化的实验过程中也证实了导流管伸出长度为0 mm时,会出现反喷现象,如图6a所示.回流区内的液滴并没有进行充分破碎,粒径大小为300~500  $\mu\text{m}$ ,沿着导流管向上流动.这种半凝固的液滴与高温熔体结合黏附在铜壁周围,堵塞喷嘴,影响雾化的进行.实际雾化制备粉末的过程中也证实了导流管伸出长度为0 mm时,喷嘴会被反喷而上的液滴堵塞,如图6b所示,反喷而上的液滴夹杂着粉末颗粒与正在流入导管的高温熔体相碰撞,凝固成块体、片状黏附在铜喷嘴周围,阻碍雾化过程的进行.

## 2.2 熔体二次雾化的粒径分析

为了更准确模拟EIGA金属液滴的二次破碎过程及粉末粒径分布情况,在一次雾化模拟结果的基础上,结合速度云图选取粒子束的空间位置(位置和喷射方向),雾化开始时,使粒子流连续喷射.二次雾化后粉末的粒径分布如图7所示.虽然导流管伸出长度为0 mm时会出现反喷现象,但是仍有部分液滴发生破碎.雾化所得粉末粒径粗大,粒径分布范围较宽,出现双峰形态,说明此

压力条件下二次雾化进行得不充分、不均匀.随着导流管伸出长度的增加(1~3 mm),此时双峰的现象明显消失,粉末粒径减小.表明导流管伸出长度直接影响粉末最终粒径的大小,导流管伸出长度通过影响回流区位置和流场结构来影响二次雾化的过程.在导流管伸出长度为2 mm时,双峰形态消失,粉末粒径分布均表现为单峰的正态分布形态.

图8为导流管不同伸出长度条件下粉末的累积粒径分布对比.从图8可以更明显地看出,随着导流管伸出长度的增加,累积粒径分布曲线先左移再右移,即粉末的平均粒径先降低后升高,降低的幅度大于升高的幅度,说明导流管的伸出长度不宜过低,即2~3 mm范围内对二次破碎最为有利.当导流管伸出长度为0,1,2,3,4,5 mm时,粉末的中位粒径 $d_{50}$ 分别为136,125,84,92,96,108  $\mu\text{m}$ .导流管伸出长度为2 mm时,粒径分布最均匀,粒径范围最窄.

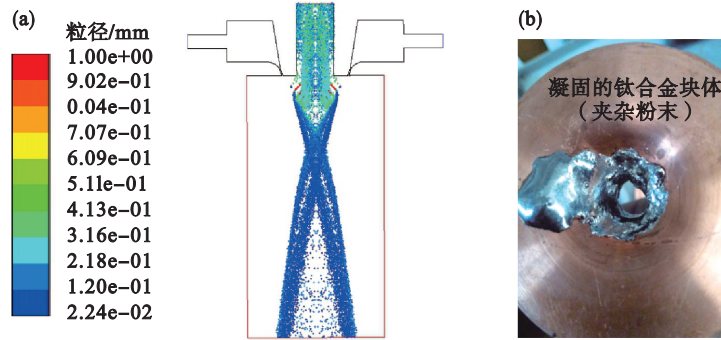


图 6 EIGA 过程中出现的反喷现象

Fig. 6 Back flow phenomenon in the process of EIGA

(a)二次雾化模拟实验中出现的液滴反向流入导流管; (b)一实际EIGA生产中出现的反喷现象.

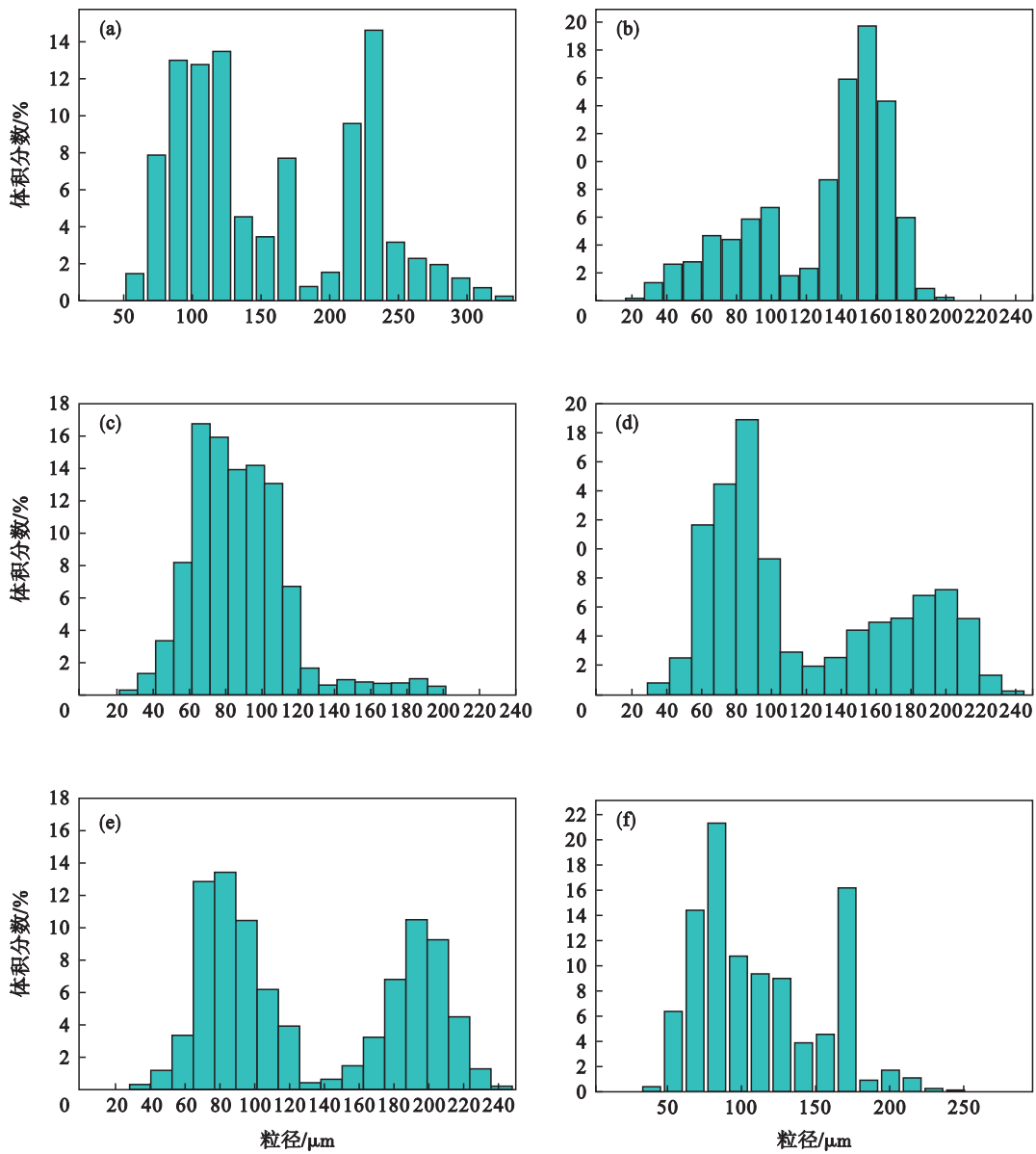


图 7 导流管不同伸出长度条件下制备粉末的粒径分布

Fig. 7 Particle size distributions of powders prepared under different protrusion lengths of delivery tube

(a)—0 mm; (b)—1 mm; (c)—2 mm; (d)—3 mm; (e)—4 mm; (f)—5 mm.

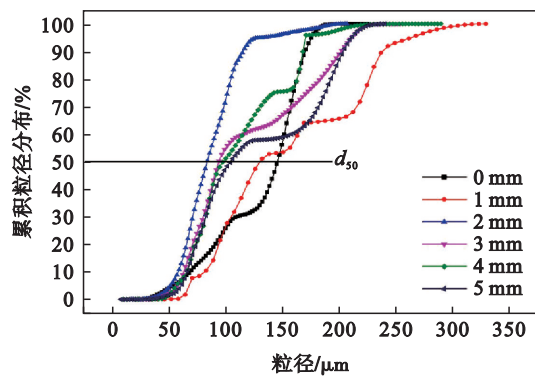


图8 导流管不同伸出长度条件下制备粉末的累积粒径分布  
Fig. 8 Cumulative particle size distribution of powders prepared under different protrusion lengths of delivery tube

### 3 结 论

1) 导流管伸出长度为0 mm时,回流区内的速度最大值为335 m/s,抽吸压力为0 Pa,会出现反喷现象,与实际验证结果一致.随着导流管伸出长度的增加(1~4 mm),回流区的长度有逐渐增加的趋势.

2) 随着导流管伸出长度的增加,雾化粉末的平均粒径先减小后增大.导流管伸出长度为2 mm和3 mm时,此时抽吸压力最大,有利于液滴二次破碎.导流管伸出长度为2 mm时,粉末粒径分布均表现为单峰的正态分布形态,粒径分布最均匀,粒径范围最窄.

#### 参考文献:

- [1] Hohmann M, Pleier S. Production methods and applications for high-quality metal powders and sprayformed products [J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2005, 18(1): 15-23.
- [2] Zhao B, Xia M, Wang J F, et al. Numerical simulation and experimental study on production of high-speed steel powder by high-frequency induction melting gas atomization [J]. *Metallurgical Research & Technology*, 2022, 119(5): 509.
- [3] 苏才津,孙耀宁,董开基,等.导流管参数对真空紧耦合气雾化法制备Fe-Cr合金粉末的影响[J]. *粉末冶金技术*, 2024, 42(1): 68-74.  
(Su Cai-jin, Sun Yao-ning, Dong Kai-ji, et al. Effect of melt delivery nozzle parameters on Fe-Cr alloy powders prepared by vacuum close-coupled gas atomization [J]. *Powder Metallurgy Technology*, 2024, 42(1): 68-74.)
- [4] Ma Y, Bao J F, Hu Y, et al. The impact of vacuum atomization parameters on the particle size distribution and morphology [J]. *Thermal Spray Technology*, 2014, 6(1): 45.
- [5] Dawes J, Bowerman R, Trepleton R. Introduction to the additive manufacturing powder metallurgy supply chain [J]. *Johnson Matthey Technology Review*, 2015, 59(3): 243-256.
- [6] Wei M W, Chen S Y, Sun M, et al. Atomization simulation and preparation of 24CrNiMoY alloy steel powder using VIGA technology at high gas pressure [J]. *Powder Technology*, 2020, 367: 724-739.
- [7] Beckers D, Ellendt N, Fritsching U, et al. Impact of process flow conditions on particle morphology in metal powder production via gas atomization [J]. *Advanced Powder Technology*, 2020, 31(1): 300-311.
- [8] Xia M, Wang P, Zhang X H, et al. Computational fluid dynamic investigation of the primary and secondary atomization of the free-fall atomizer in electrode induction melting gas atomization process [J]. *Acta Physica Sinica*, 2018, 67(17): 170201.
- [9] Park J M, Na T W, Park H K, et al. Preparation and characterization of spherical niobium silicide-based powder particles by electrode induction gas atomization [J]. *Materials Letters*, 2019, 243: 5-8.
- [10] Zeoli N, Gu S. Computational simulation of metal droplet break-up, cooling and solidification during gas atomization [J]. *Computational Materials Science*, 2008, 43(2): 268-278.
- [11] 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]. *Materials Science and Engineering: A*, 1996, 208(1): 20-29.
- [12] Ünal R. The influence of the pressure formation at the tip of the melt delivery tube on tin powder size and gas/melt ratio in gas atomization method [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2006, 180(1/2/3): 291-295.
- [13] 宗伟,罗浩,周晚珠,等.雾化气体压力及导流管伸长度对导流管顶端压力的影响[J]. *材料研究与应用*, 2016, 10(2): 111-115.  
(Zong Wei, Luo Hao, Zhou Wan-zhu, et al. Effect of atomization pressure and protrusion length on delivery tube tap pressure [J]. *Materials Research and Application*, 2016, 10(2): 111-115.)
- [14] Wang J F, Xia M, Wu J L, et al. Ladle nozzle clogging in vacuum induction melting gas atomization: influence of the melt viscosity [J]. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2022, 53(4): 2386-2397.
- [15] 赵新明,徐骏,朱学新,等.超音速气雾化中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.  
(Zhao Xin-ming, Xu Jun, Zhu Xue-xin, et al. Effect of protrusion length of melt delivery tube on gas flow field for supersonic gas atomization [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2009, 19(5): 967-973.)