

引文格式: 鄢畅达, 王晓峰, 樊小蒲, 等. 基于 Laval 喷嘴的 VIGA 工艺参数优化及流场结构研究[J]. 中国有色冶金, 2025, 54(5): 156-164.

YAN Changda, WANG Xiaofeng, FAN Xiaopu, et al. Optimization of VIGA process parameters and flow field structure based on Laval nozzle[J]. China Nonferrous Metallurgy, 2025, 54(5): 156-164.

基于 Laval 喷嘴的 VIGA 工艺参数优化及流场结构研究

鄢畅达, 王晓峰, 樊小蒲, 褚一川, 马翔宇

(陕西科技大学 机电工程学院, 陕西 西安 710021)

[摘要] 真空感应熔炼气雾化技术(VIGA)是目前制备高性能球形金属粉末的主流技术,目前尚缺乏对雾化 Laval 喷嘴工艺参数的系统研究。本文设计了一种气雾化 Laval 喷嘴,并利用 CFD 仿真模拟了雾化压力、气流喷射角度、导流管伸出长度对雾化流场结构、速度分布以及导流管内静压的影响。结果表明雾化压力的增大使激波区域扩大,流场速度和导流管内静压均增大;气流喷射角度的增加可使滞点和马赫盘位置上移;而导流管伸出长度的增加则引起静压先降后升的现象。基于上述分析确定 Laval 喷嘴最优工艺参数为气流喷射角度 30° 、导流管伸出长度 -2 mm ,并在 3 MPa 的雾化压力下制备了 316L 不锈钢粉末,结果表明该粉末粒度分布均匀、球形度高、合金粉末收集率 $\geq 90\%$,显著提升了 VIGA 技术的雾化效率和粉末质量。

[关键词] 真空感应熔炼气雾化(VIGA);合金粉末;Laval 喷嘴;结构优化;气体流场;雾化压力;气流喷射角度;导流管伸出长度

[中图分类号] TF123.1⁺12 [文献标志码] A [文章编号] 1672-6103(2025)05-0156-09
DOI:10.19612/j.cnki.cn11-5066/tf.2025.05.017

0 引言

金属零件增材制造技术是先进制造技术的重要发展方向^[1]。球形金属粉末作为增材制造的主要原料,其粒度分布、球形度、流动性等理化特征直接影响成型件的性能^[2]。因此,如何有效避免生产过程中产生卫星粉、空心粉,以及如何高效制备球形金属粉末是当前科研与工业界亟待攻克的重要课题。气雾化法(gas atomization, GA)由于制备的粉末粒径较小、球形度高、生产效率高、生产成本低等特点,已成为目前主流的制备金属粉末方法。

气雾化技术的核心在于雾化器中的雾化喷嘴,喷嘴的结构决定气流的速度与方向,是影响雾化效率的关键因素。目前喷嘴设计方法中最主流的技术是紧耦合气雾化法(Close-coupled gas atomization, CCGA),其利用高压气体射流冲击熔融金属液流,将其破碎成小液滴,冷却凝固后得到金属粉末。该技术通过限制式喷嘴和缩减雾化器直径,以缩短液态金属的流动距离和减少气体能量损失,有利于熔体成膜和初始破碎,大幅度提高雾化效率^[3]。在真空感应气雾化工艺中,喷嘴的结构参数以及雾化工艺参数均对气体流场结构产生显著影响,从而影响粉末的组织形貌、粒度分布。尽管针对雾化流场的基础研究早已展开,且取得了一定成果,但对于紧耦合雾化过程中,结构工艺参数如何具体作用于雾化机制,以及如何实现对粉末质量的精细调控等细节,目前仍然缺乏深入而系统的研究。

真空感应气雾化法(VIGA)的制粉过程须在高温密闭环境下进行,难以直接观察流场特征和气液耦合过程,目前针对气雾化技术的研究主要采用计

[收稿日期] 2025-05-07

[第一作者] 鄢畅达(1999—),男,陕西汉中,硕士研究生,研究方向为3D打印用金属粉末的制备。

[通信作者] 樊小蒲,男,副教授。

[基金项目] 国家自然科学基金项目(52174320,52474360);陕西省重点研发计划项目(2020GY-109);西安市重点产业链增材制造核心技术攻关项目(23ZDCYJSG0043-2022)。

算流体力学(CFD)实现雾化气体流动、气液两相耦合、金属熔滴破碎的仿真模拟^[4-5]。Aydin 等^[6]利用 CFD 研究了雾化压力对导流管出口处压力和流动性的研究,验证了 CFD 可用于模拟喷嘴压力。欧阳鸿武等^[7]采用 CFD 法对环缝雾化喷嘴的气体流场进行分析,研究发现气体在射流状态时流场存在“开涡”和“闭涡”两种流场,且两种流场结构之间的转化与喷嘴结构参数和雾化气体压力有关。王怡^[8]设计了一种环孔雾化器,通过 CFD 模拟了雾化压力、雾化气体温度、气体喷嘴孔心距等因素对流场结构的影响。钟韬^[9]采用 Fluent 设计 Laval 雾化器,得到了喷管的最佳喉部直径、收缩角和扩张角度数。赵航^[10]模拟了 VIGA 技术在不同的雾化气压下制备 Cu-Al-Ni 合金粉末一次破碎和二次破碎过程,发现 VIGA 喷嘴的设计会存在一个临界值,到达临界值后流场内各个数值变化不大。施立新^[11]选用多种不同类型雾化喷嘴进行流场模拟,经过数据比对显示 Laval 喷嘴具有更好的雾化效果,总结了影响雾化效果的结构参数:导流管伸出长度、气流喷射角度、喷嘴中心、喷嘴孔径。目前关于 Laval 喷嘴结构参数对雾化流场和制备粉末性能影响规律的研究较少,为此作者利用计算流体力学软件 ANSYS Fluent 设计 Laval 喷嘴结构并对雾化流场进行数值模拟,分析雾化压力、喷射角度、导流管伸出长度对雾化流场结构的影响,得到最优设计参数,应用 Laval 喷嘴通过 VIGA 法制备合金粉末并测试制备粉末性能,验证模拟结果可靠性,为优化金属粉末制备方法提供理论依据。

1 雾化模型建立

1.1 喷嘴结构及雾化工艺参数设置

Laval 雾化喷嘴结果如图 1 所示,结构主要由气体通道和导液管组成。收缩的气腔与气体通道构成 Laval 喷嘴的收缩-扩张结构,雾化气体通过离散分布的环形孔,形成一系列具有相同周向分布的气体射流,其中环孔与竖直方向形成的喷射夹角的一半为气流喷射角 α ,喷射孔的中心距 20 mm,导流管伸出长度 h 为 -2 mm。参考雾化制粉行业常用结构与工艺参数范围并结合实验室条件,等距设置实验参数,本实验气流压力设置为 2、3、4、5 MPa;气流喷射角度 20°、30°、40°、50°;雾化气体温度 300 K。

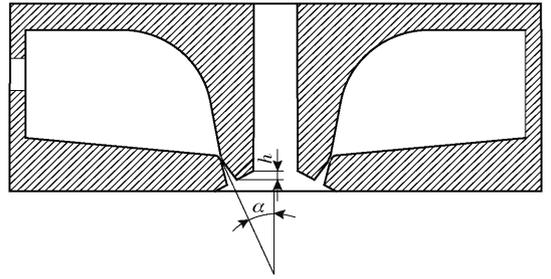


图 1 紧耦合气雾化 Laval 喷嘴结构示意图

Fig. 1 Structural of Laval nozzle for tightly coupled gas atomization

1.2 数值模型

雾化过程中雾化气体流动为湍流流动,流体流动连续性方程、动量方程和能量方程见式(1)~(3)^[12]。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho v_i) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}(\rho v_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho v_i v_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \rho g \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} \left(\rho \left(e + \frac{v_i^2}{2} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\rho v_i \left(h + \frac{v_i^2}{2} \right) \right) = \\ \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\left(\mu_l + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial T}{\partial x_i} - \sum_j h_j J_j + \left(\mu_l + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) v_i \right) \end{aligned} \quad (3)$$

式中: ρ 为密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; v_i, v_j 为速度分量, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; t 为时间, s ; x_i, x_j 为横、纵坐标, m ; T 为温度, K ; μ_l 为层流黏性系数, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; μ_t 为湍流黏性系数, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; e 为分子随机运动产生单位质量的内能, J ; σ_k 和 σ_ε 分别为湍流动能和湍流动能耗散率的湍流普朗特数, 分别取 1.0、1.3; h 为普朗克常数, $\text{J} \cdot \text{s}$; h_i 为约化普朗克常数, $\text{J} \cdot \text{s}$; J_j 为纵向角动量, $\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ 。

本次模拟湍流模型选用 Standard $k-\varepsilon$ 模型,该模型通过求解两个主要变量——湍流动能(k)和湍流动能耗散率(ε)的输运方程,来描述湍流流动的特性,是目前 CFD 中应用最广泛的湍流模型,其 k 方程和 ε 方程见式(4)(5)^[13]。

k 方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k v_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu_l + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon \quad (4)$$

ε 方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon v_i) =$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu_i + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (5)$$

其中 G_k 表达式见式(6)。

$$G_k = \left[\mu_t \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left(\rho k + \mu_t \frac{\partial v_1}{\partial x_1} \right) \delta_{ij} \right] \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \quad (6)$$

μ_t 表示由层流速度梯度而产生的湍流动能, 表达式见式(7)。

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (7)$$

式中: $C_{1\varepsilon} = 1.44$, $C_{2\varepsilon} = 1.92$, $C_\mu = 0.09$; $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\varepsilon = 1.3$; v_1 为层流代表速度; x_1 为层流代表长度; δ_{ij} 为克罗内克 δ 函数, 若 i 和 j 两个自变量相同, 则为 1, 否则为 0。

1.3 网格划分及边界条件设置

本实验采用 ANSYS Fluent 软件模拟雾化气体流场, 利用 meshing 划分网格建立计算域。根据紧耦合气雾化喷嘴结构和雾化腔的旋转对称设计, 为简化计算, 使用二维对称平面建模, 图 2 为几何模型及边界条件示意图, 模型只考虑气雾化喷嘴附近部分(轴向 140 mm, 半径 50 mm), 模型结构包括 Laval 喷嘴、导流管、雾化腔体三个部分。仿真中流场垂直放置, 对称边界轴与 x 轴重合, 雾化气体压力入口位于计算域左侧, 压力出口位于计算域右侧。采用四边形结构性网格进行划分, 全局网格总数约为 16 万, 并对雾化喷嘴和对称边界轴线附近等压力温度梯度较大区域进行局部加密。

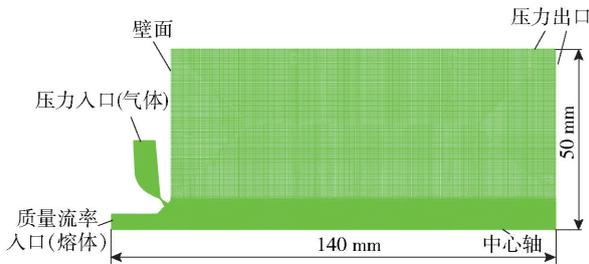


图 2 计算模型及网格划分

Fig.2 Computational model and meshing

常用的雾化介质有空气、氦气、氮气及氩气等; 相比其他气体, 氩气作为雾化气体制备的粉末粒度分布更均匀, 粉末球形度更高^[14]。本次实验雾化气体为氩气, 其物性参数见表 1 所示。

基于所设计的紧耦合式 Laval 喷嘴, 本实验分析雾化气体压力、雾化气体温度、喷射交角、导流管

表 1 氩气物理参数

Table 1 Physical parameters of argon

物理属性	数值
密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	理想气体
比热容/($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	520.64
热导率/($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	0.0158
黏度/($\text{Pa}\cdot\text{s}$)	2.125×10^{-5} (萨特兰公式)
分子量	39.948

伸出长度等参数对雾化流场的影响, 以课题组前期研究中的实验雾化参数(雾化压力 4 MPa、雾化气体温度 300 K、喷射交角 30° 、伸出长度 - 2 mm) 为基准, 具体雾化参数变量设置如表 2 所示。

表 2 影响因素及参数设置

Table 2 Influencing factors and parameter settings

实验影响因素	参数值设置
雾化气体压力/MPa	2.0, 3.0, 4.0, 5.0
喷射交角/ $(^\circ)$	20, 30, 40, 50
导流管伸出长度/mm	-2, 0, 2, 4
雾化气体温度/K	300
喷孔中心距/mm	20

Fluent 软件仿真采用密度基求解器求解, 使用隐式算法求解耦合方程组(连续性、动量和能量方程)。瞬态方程迭代过程采用二阶迎风方程, 库朗数设置为 2, 变量计算残差收敛规则小于 0.001, 时间步长设为 0.0001 s, 时间步数 2000 步, 当流场中压力、速度等变量分布稳定后结束仿真模拟计算。

2 数值模拟结果与分析

2.1 雾化气体压力对流场的影响

不同雾化压力下气体速度流场的云图分布情况如图 3 所示, 在喷嘴出口处气体迅速膨胀并加速至超音速状态。随着气体持续膨胀至过膨胀区域, 由于环境压力逐渐超过气体内部压力, 气体开始受到压缩, 从而在喷嘴出口处形成了周期性的膨胀与压缩波。各喷嘴处的膨胀波汇聚后形成显著的桶形激波, 导流管下方存在一个倒锥状气体回流区。回流区底端与桶状激波顶端之间一处为流场的滞点, 气体速度为 0 m/s, 标志着流场动能的转换点。激波尾部出现了明显的马赫盘, 这是超音速气体流动中

特有的现象,反映了气体速度从超音速到亚音速的急剧变化。随着雾化气体压力的增大,雾化腔内超音速气流量增加,这直接致使膨胀波范围扩大,进而使得汇聚后的激波尺寸也随之增大。从 2 MPa 到 5 MPa,汇聚后第一条激波的长度增长 39.9%,宽度增长 47.1%,而随着气体在流动过程中能量逐渐耗散,激波的尺寸会逐渐减小,直至气流趋于稳定的直

流状态,通过观测速度云图和轴向压力分布(静压相邻峰值间呈现出的凹状变化趋势即代表 1 数目激波存在)估算计算域内激波数目,当雾化气体压力分别为 2、3、4、5 MPa 时,汇聚后的激波数目分别为 4.0、3.8、2.9、2.4,随雾化压力增大,在计算区域内汇聚后的激波数目明显逐渐减小。

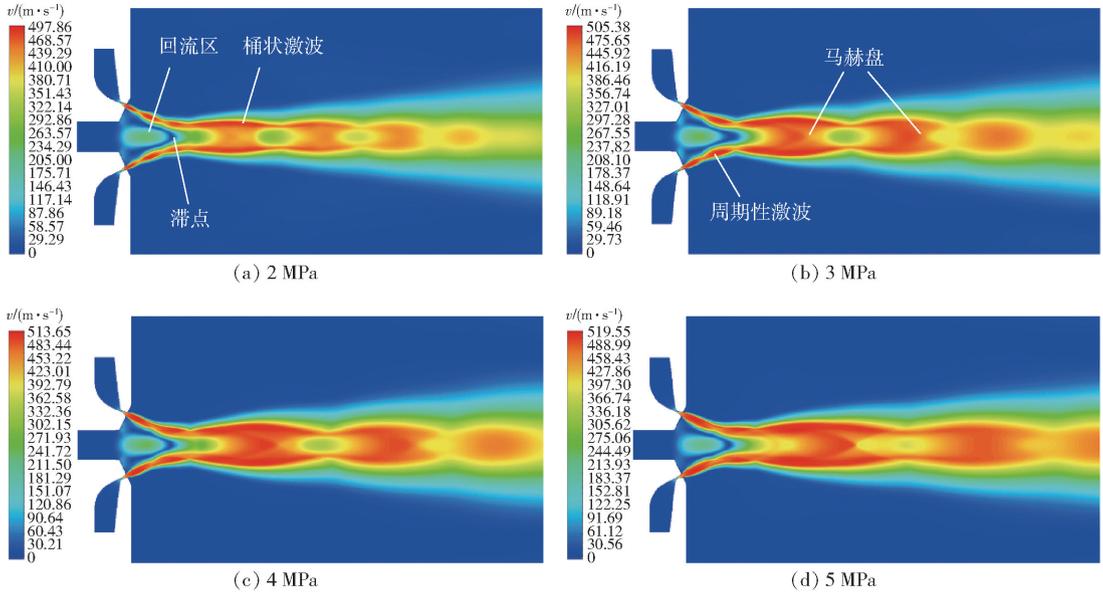


图 3 不同雾化压力下的速度云图

Fig. 3 Velocity nephogram under different atomization pressures

二维计算模型的对称轴线为计算区域中心线,图 4 为不同雾化压力下计算区域中心线的速度和静压分布图,从图 4 中可看雾化压力对滞点位置影响并不显著。随着雾化压力的增大,回流区内的气体

最大速度(沿 x 轴负向)逐渐增加,随后气流速度逐渐减缓直至在滞点处降为零,之后气流迅速加速,并在接近马赫盘时达到速度峰值。随着雾化压力的增大,中心线上的最大速度随之增大。当雾化压力分

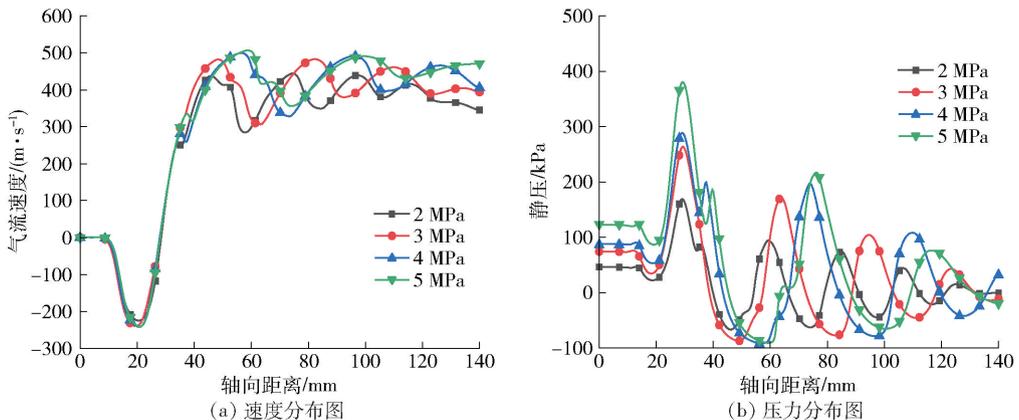


图 4 不同雾化压力下中心轴线处的数据分布图

Fig. 4 Data distribution at the central axis under different atomization pressures

布为 2、3、4、5 MPa 时,中心线上的最大速度分别为 444.3、483.7、500.1、507.4 m/s。雾化压力从 2 MPa 到 3 MPa,最大速度增幅将近 40 m/s,而后每增加 1 MPa 速度仅增长 10 m/s 左右,可见雾化压力升到临界点后,其对气流速度的增幅效果减弱,印证了赵航^[10]的结论:VIGA 喷嘴设计在达到其性能临界值后,流场内的各项参数变化趋于平缓。马赫盘对气流存在阻挡作用,导致气流通过马赫盘后速度迅速下降。在后续穿过激波的过程中,气流速度呈现出加速与减速的周期性变化。随着雾化压力的升高,计算域内的马赫盘数量减少,相应的速度峰值数目也随之减少,与流场速度云图的观察结果相一致。同时导流管出口处的静压随着雾化压力的增大而显著增加。从 2 MPa 到 5 MPa,导流管出口处的静压由 46.6 kPa 增至 121.6 kPa,增长了 160.9%。雾化过程中较高的气流速度和静压有助于降低金属熔体的流速和流量,从而提高气液质量比,促进更充分的气液相互作用,有利于金属液滴的破碎和细粉的收集,但导流管出口处过大的静压(超过 100 kPa)会

阻碍金属熔体流出,甚至出现“反喷”现象堵塞导流管并致使实验失败,因此选择雾化压力时需综合考虑静压和气流速度,在导流管出口处的静压不超过大气压的前提下使气流速度达到最优值,综合考虑合适的雾化压力为 3 MPa。

2.2 雾化气体喷射角度对流场的影响

不同气流喷射角度下的速度云图变化如图 5 所示。随着喷射角度的增大,喷嘴产生的膨胀波交汇点明显向 x 轴负向移动,同时滞点和马赫盘的位置也相应地负向移动。 20° 时两条气流之间的汇聚程度较浅,马赫盘并不明显,而随着喷射角度的增加,喷嘴产生的膨胀压缩波汇聚距离缩短,气流在交汇过程中的能量损失减少,因此气流间的相互作用更为剧烈,使得马赫盘的形状变得更加清晰和显著。产生的回流区范围更短,形成激波的平均速度更快,值得注意的是,尽管喷射角度变化,但计算域内汇聚后形成的桶状激波数目基本保持不变,这表明气流喷射角度主要影响的是回流区和滞点的位置,而对桶状激波的整体特性影响较小。

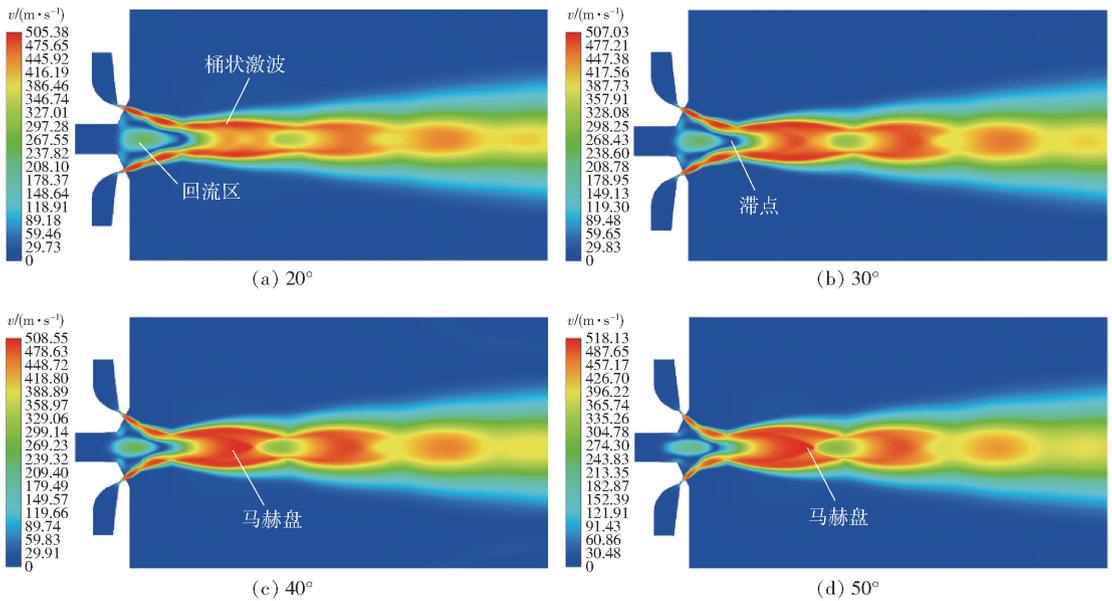


图 5 不同气流喷射角度下的速度云图

Fig. 5 Velocity nephogram under different jet angles

图 6 则揭示了不同气流喷射角度下,计算区域中心线上速度和静压的变化规律。当气流喷射角分别为 20° 、 30° 、 40° 、 50° 时,流场轴线最大速度分别为 464.2、478.9、508.85、518.1 m/s,速度增幅仅为 10 m/s 左右。导流管出口处的静压随喷射角度的

增大而增加, 40° 和 50° 时静压已超过标准大气压 (100 kPa),会导致“反喷”现象堵塞导流管。若喷嘴交角过小,金属熔体的流动距离延长,气液两相作用效果减弱,不利于金属熔体的充分雾化破碎。而导液管末端过低的静压使金属熔体流速过快,导致

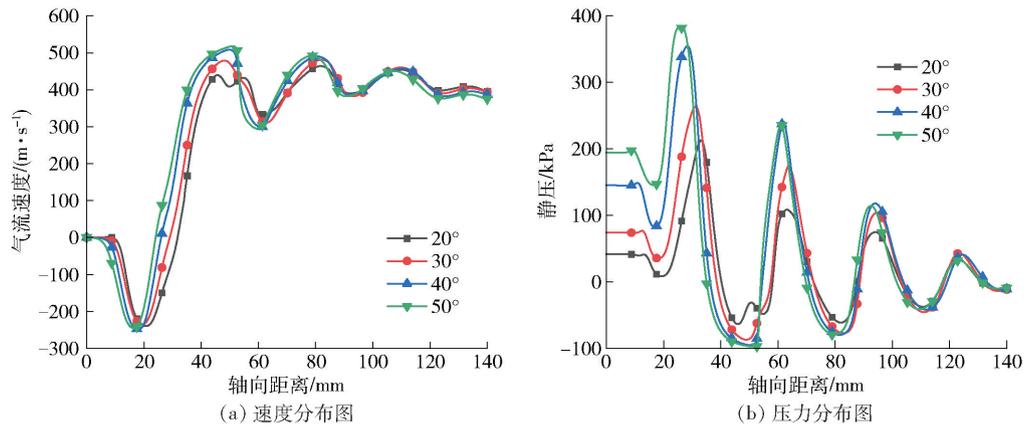


图 6 不同喷射角度下中心轴线处的数据分布图

Fig. 6 Data distribution at the central axis under different jet angles

粉末粒度增大,紧耦合式喷嘴制粉中导流管末端理想静压应在 70 kPa 左右^[11],当气流喷射角为 20° 时,静压为 42.1 kPa,而 30° 时静压达到 74.3 kPa,这一数值更接近理想静压范围。综合考虑模拟结果,合适的气流喷射角度为 30°。

2.3 导流管伸出长度对流场的影响

不同导流管伸出长度下的速度云图如图 7 所示,在雾化压力 3 MPa,喷射角度 30° 条件下,不同导流管伸出长度条件下桶状激波的结构无明显变化。而随着伸出长度的增加,回流区明显受到压缩,其面积逐渐减小。当导流管伸出长度为正值时,喷嘴出口处的气流受到壁面的抑制作用,导致膨胀效应加

剧,膨胀压缩波的尺寸增大,气体间的交汇反应也更为剧烈,增强的气体相互作用在回流区后端与桶状激波前端形成了一个较小的马赫盘,进而使得滞点的位置向上游移动。

如图 8 所示,导流管伸出长度从 -2 mm 增至 4 mm 时,回流区的最大速度由 240 m/s 降低至 184 m/s,轴向作用范围从 22.8 mm 缩减至 18.3 mm,轴向上的最大速度由 478 m/s 提升至 502 m/s,而马赫盘位置和激波数目均未有明显变化。从图 8(b) 可以看出导流管伸出长度主要影响流场的压力分布。当伸长量从 -2 mm 增至 0 mm,导流管末端的静压呈现下降趋势,由 76.8 kPa 降至 64.3 kPa。过低的

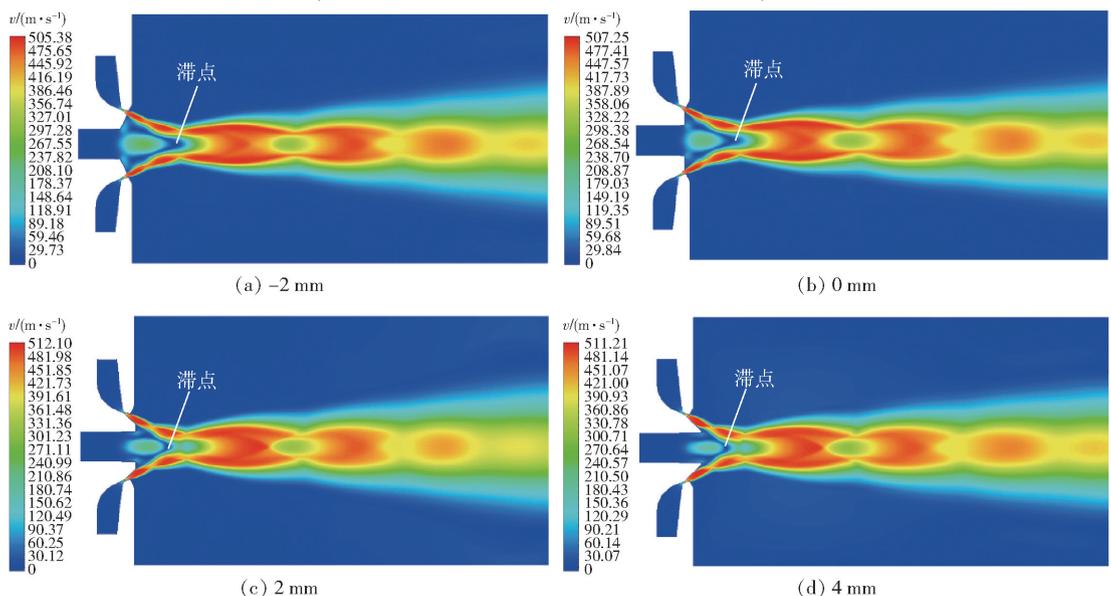


图 7 不同导流管伸出长度下的速度云图

Fig. 7 Velocity nephogram under different extension lengths of draft tube

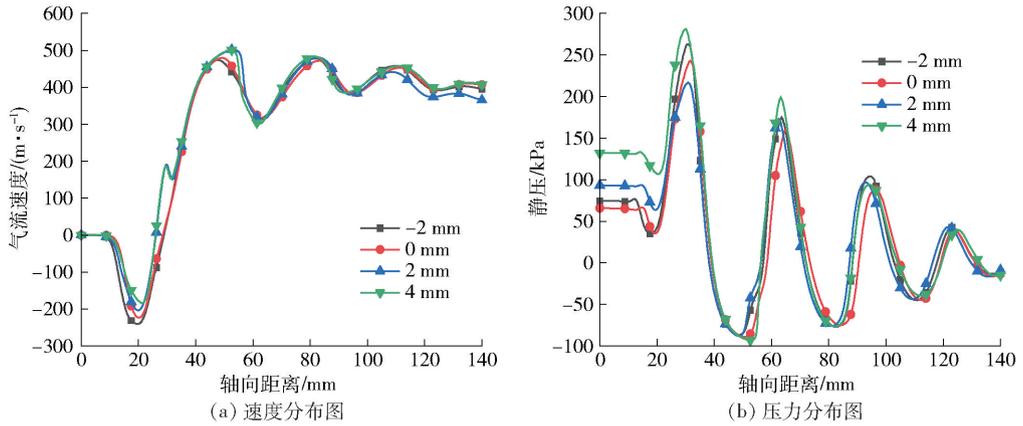


图8 不同导流管伸出长度下中心轴线处的数据分布图

Fig. 8 Data distribution at the central axis under different extension lengths of draft tube

静压会导致熔体流速过快,影响气液两相作用效率,从而制备出的粉末粒径较大且流动性差。而当导流管伸出长度为正值时,末端静压迅速上升,在伸出量为 2 mm 和 4 mm 时,静压分别达到 92.6 kPa 和 132.4 kPa。理论上气体速度越高越有利于制备粒径较细粉末,而为保证适当的抽吸压力,导流管出口的静压不超过标准大气压并尽量接近理想静压 70 kPa,综合考虑导流管伸出长度 -2 mm 最合适。

3 试验方法与试验结果

3.1 试验方法

根据仿真结果选择雾化效果较好的结构参数加工 Laval 喷嘴并进行气雾化制粉实验验证,既雾化压力 3 MPa,喷射角度 30°,导流管伸出长度 -2 mm,选用真空熔炼气雾化法(VIGA)制备 316L 不锈钢金属粉末,金属熔体经坩埚熔炼后通过导流管进入雾化室内进行破碎,随后液滴经二次破碎后迅速球化随高速气流流动进旋风收粉装置内。

将制备的粉末样品采用 Philips Quanta 400 扫描电子显微镜进行表征,观察粉末微观组织形态。采用 GB/T 6003.1—2012 标准筛网对金属粉末进行筛分,统计粒度分布,使用霍尔流速计对不同粒径分布的金属粉末进行霍尔流速(流动性)、松装密度、振实密度的测定。

3.2 试验结果

在制备的金属粉末中,粒径 15 ~ 53 μm 细粉收集率为 47%,粒径 75 ~ 135 μm 所占比例大概 40%,粉末霍尔流速 17.53 s/50 g,松装密度 4.57 g/cm³,振实密度 5.48 g/cm³,满足当前增材制造对金属粉末指标的需求。

粉末 SEM 形貌见图 9(a) 和(b)所示,粉末颗粒形态为均匀的球形或近球形,粒度分布均匀,表面较为光滑,未观察到明显的孔洞、裂纹。这表明相较传统的氮气雾化,氩气对金属粉末有更好的保护性,有助于制备形态规范、粒度均匀的金属粉末。粉末粒径基本都在 100 μm 以下,卫星粉的数量极少,只有

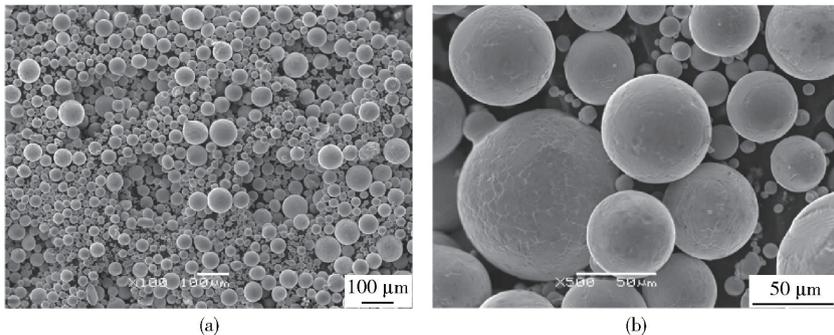


图9 316L 不锈钢粉末的 SEM 形貌

Fig. 9 SEM morphology of 316L stainless steel powder

少部分大尺寸粉末颗粒表面存在局部变形和卫星粉现象。

4 结论

本研究利用计算流体力学软件 ANSYS Fluent 设计 Laval 喷嘴结构,并对雾化流场进行数值模拟,分析雾化压力、喷射角度、导流管伸出长度对雾化流场结构的影响,得到以下主要结论。

1) 气雾化 Laval 喷嘴的数值模拟研究表明,雾化压力变化对流场行为具有显著影响。从 2 MPa 至 5 MPa,随着雾化压力的增加,雾化室内气流量显著提升,流场最大速度随之增大,尽管其增速逐渐放缓,轴线速度最高可达 507 m/s,导流管内静压由 46.6 kPa 升至 126.6 kPa。基于仿真模拟结果,确定 3 MPa 为较优的雾化压力。

2) 气流喷射角度的增大缩短了气流交汇距离,促使滞点和马赫盘位置上移,同时流场速度得到提升,有利于细化粉末粒径。而过大的喷射角度会导致导流管内静压急剧上升,增加熔体流动阻力。综合分析流场速度、抽吸压力等因素,优化得出气流喷射角度为 30° 时效果最佳。

3) 导流管伸出长度增加会使回流区面积减少,流场速度略有提升,伸出长度为正值时膨胀压缩波面积扩大,加剧气流间交汇,形成小马赫盘并使滞点位置上移;导流管末端静压在 -2 ~ 0 mm 范围内呈现下降趋势,在 0 ~ 4 mm 范围内迅速回升。综合考虑仿真结果,导流管伸出长度为 -2 mm 较合适。

4) 采用上述优化参数(30° 气流喷射角度、-2 mm 导流管伸出长度),在 3 MPa 雾化压力条件下,通过所设计气雾化 Laval 喷嘴制备的 316L 不锈钢粉末性能卓越,球形度高,表面光滑,粒径细小且分布均匀。粒径 15 ~ 53 μm 细粉收集率达到 47%,并具备良好的流动性。综合性能优良,满足当前增材制造高品质金属粉末的性能需求。

[参考文献]

[1] 康雅平,郭静,王振国. 3D 打印技术在关节置换中的应用[J]. 金属功能材料, 2021, 28(5): 111 - 117.
KANG Yaping, GUO Jing, WANG Zhenguo. Application of 3D printing technology in joint replacement[J]. Metallic Functional Materials, 2021, 28(5): 111 - 117.

[2] BAESSO I, KARL D, SPITZER A, et al. Characterization of powder flow behavior for additive manufacturing[J]. Additive manufacturing, 2021, 47: 102250.

[3] KASSYM K, PERVEEN A. Atomization processes of metal powders for 3D printing[J]. Materials today: proceedings, 2020, 26: 1727 - 1733.

[4] 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, 326(1): 110 - 121.

[5] 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 - 3): 291 - 295.

[6] AYDIN O, ÜNAL R. Experimental and numerical modeling of the gas atomization nozzle for gas flow behavior[J]. Computers & Fluids, 2011, 42(1): 37 - 43.

[7] 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.
OUYANG Hongwu, WANG Qing, LIU Zhuomin. Numerical study on abrupt change of flow field in close-coupled gas atomization [J]. Mater Sci Eng Powder Metall, 2010, 15(2): 96 - 101.

[8] 王怡. 基于新型环孔雾化器的 3D 打印用铝粉气雾化工艺研究[D]. 武汉科技大学, 2023.
WANG Yi. Research on aluminum powder atomization process for 3D printing based on novel discrete nozzle atomizer[D]. Wuhan University of Science and Technology, 2023.

[9] 钟韬,曾归余,肖明清,等. 气雾化制粉用 Laval 喷管结构优化研究[J]. 金属材料与冶金工程, 2019, 47(5): 59 - 63.
ZHONG Tao, ZENG Guiyu, XIAO Mingqing, et al. Design optimization of Laval nozzles for gas atomization pulverizing [J]. Metal Materials and Metallurgy Engineering, 2019, 47(5): 59 - 63.

[10] 赵航,王晓峰. 雾化压力对 VIGA 技术制备 Cu-Al-Ni 合金粉末粒度分布影响机理分析[J]. 中国有色冶金, 2023, 52(4): 65 - 72.
ZHAO Hang, WANG Xiaofeng. Influence mechanism of atomization pressure on particle size distribution of Cu - Al - Ni alloy powder prepared by VIGA technology [J]. China Nonferrous Metallurgy, 2023, 52(4): 65 - 72.

[11] 施立新. 金属熔体雾化喷嘴流场数值研究[D]. 福州大学, 2014.
SHI Lixin. The numerical simulation about flow fields of atomization nozzle of metal melt[D]. Fuzhou University, 2014.

[12] QING Y, GUO K, LIU C, et al. Impact of atomization pressure on the particle size of nickel-based superalloy powders by numerical simulation[J]. Materials, 2022, 15(9): 3020.

[13] WEI M, CHEN S, 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.

[14] FANG P J, XU Y, LI X G, et al. Influence of atomizing gas and cooling rate on solidification characterization of nickel based

Optimization of VIGA process parameters and flow field structure based on Laval nozzle

YAN Changda, WANG Xiaofeng, FAN Xiaopu, ZHU Yichuan, MA Xiangyu

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Shaanxi University of Science and Technology, Xi'an 710021, China)

Abstract: Vacuum induction melting and atomization technology (VIGA) is currently the mainstream technology for preparing high-performance spherical metal powders, but there is still a lack of systematic research on the process parameters of atomization Laval nozzles. This article designs an atomized Laval nozzle and uses CFD simulation to simulate the effects of atomization pressure, airflow injection angle, and guide pipe extension length on the atomization flow field structure, velocity distribution, and static pressure inside the guide pipe. The results indicate that an increase in atomization pressure can expand the shock wave region, and both the flow field velocity and the static pressure inside the guide tube increase; An increase in the angle of airflow injection can cause the stagnation point and Mach disk position to shift upward; The elongation of the extended length of the guide pipe causes a phenomenon of static pressure first decreasing and then increasing. Based on the above analysis, the optimal process parameters are determined as follows: air jet angle of 30° and guide pipe extension length of -2 mm. And 316L stainless steel powder was prepared under an atomization pressure of 3 MPa. The powder has a uniform particle size distribution, high sphericity, and an alloy powder collection rate of ≥90%, significantly improving the atomization efficiency and powder quality of VIGA technology.

Key words: vacuum induction melting gas atomization (VIGA); alloy powder; Laval nozzle; structural optimization; gas flow field; atomization pressure; gas jet angle; extension length of draft tube

索通发展聚焦提锂技术 助力铝工业固废产业化

9月7日,由中国有色金属工业协会组织的科技成果评价会议认为,索通发展股份有限公司(以下简称“索通发展”)山东临邑基地的“从复杂铝电解质中提取锂盐新技术”成果达到国际领先水平。

以国产铝土矿为原料产出的氧化铝,锂盐含量超过60%。锂元素进入电解槽电解质体系并富集,当LiF含量>7%(质量分数)时,会干扰电化学反应平衡,导致吨铝电耗增加150~200 kWh,还会增强电解质腐蚀性,缩短槽寿命。

索通发展与东北大学开展铝电解技术复杂电解质工艺优化与应用研究,创新提出“选择性浸出”工艺,通过特定流程从氧化铝精矿中提取锂盐并制备碳酸锂。此技术工艺成熟,锂元素总回收率>85%,碳酸锂指标达Li₂CO₃—0级要求,全流程绿色环保,无“三废”产生,能耗低,经济效益和社会效益显著。使用提锂后的电解质进行铝电解生产,可提高电流效率约1%,吨铝电耗降低150~200 kWh,延长槽寿命1~2年。该技术生产的碳酸锂成本及碳排放远低于传统工艺,能有效支撑低碳电池生产,实现“铝工业减碳”与“新能源补链”双向共赢。

(资料来源:中国有色金属报)