

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.04.009

气道结构对条形雾化器的雾化能力影响研究

施欢纯, 马万太

(南京航空航天大学 机电学院, 江苏 南京 210016)

摘要:为解决喷射成形直径在 400 mm 以上的 7055 铝合金锭坯时要用到多个传统圆形雾化器所带来的参数过多、轨迹耦合、锭坯分层等问题,提出条形雾化器结构。利用 Fluent 仿真方法研究不同气道结构对条形雾化器气流场的影响。仿真实验结果表明:线性孔阵列气道结构能使核心雾化区域雾化速度均匀保持在 220~240 m/s,且气流场稳定可靠,短边最佳雾化气压维持在 0.8~1.0 MPa,比条缝结构雾化器高 0.1~0.2 MPa;条形雾化器系统制备的锭坯表面质量不存在沟壑现象。

关键词:喷射成形;增材制造;雾化器;Fluent 数值仿真

中图分类号:TP391.9 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2025)04-0052-05

Reserch on Influence of Airway Structure on Atomization Ability of Strip Atomizer

SHI Huanchun, MA Wantai

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: In order to solve the problems of excessive parameters, trajectory coupling and billet layering caused by the use of multiple traditional round atomizers when spraying 7055 aluminum alloy ingot with a diameter of more than 400 mm, a strip atomizer structure is proposed. The effect of different airway structures on the airflow field of the strip-shaped atomizer is studied by Fluent simulation method. The simulation results show that the linear hole array airway structure can keep the atomization velocity in the core atomization area uniformly at 220–240 m/s with stable and reliable airflow field, and optimal atomizing pressure on the short side maintains 0.8–1.0 MPa, 0.1–0.2 MPa, higher than that of the slit atomizer with no grooves on the surface quality of the ingots prepared by the strip atomizer system.

Keywords: spray forming; additive manufacturing; atomizer; Fluent numerical simulation

0 引言

喷射成形(spray forming)是一种金属材料近净成形方式,又名喷射沉积,其原理是利用高压惰性气体将熔融的金属液雾化破碎后飞行到沉积基底上凝固成形,其广泛应用于高强度金属材料的生产。雾化器是喷射成形设备中的核心部件,直接影响到金属熔体的雾化效果,最终影响锭坯成形的质量^[1-2]。

在喷射成形直径 400 mm 以上的大规格锭坯时,传统方式是使用 2~4 个圆形雾化器联动工作。在多喷嘴喷射成形过程中,由于要考虑到偏心距、雾化角、雾化器高度、雾化器轨迹设计等多种因素,工作参数的调节会变得无比复杂,细小的调节失误都能带来严重的后果。如雾化器轨迹耦合相撞、锭坯最终成形分层现象而报废等^[3-7]。设计条形雾化器结构就是为了解决多雾化器系统

存在的问题^[8-9]。

条形雾化器因其拥有极大的雾化范围,不依赖特殊机构的辅助摆动去扩大有效雾化范围,能够直接固连在漏液包上。这种新型雾化器结构大大减少了运动参数的引入并提高其生产效率。本文以计算流体力学 Fluent 数值仿真模拟方式对条形雾化器气道结构进行研究,提出条形雾化器气道最佳结构设计方式。

1 模型设计

1.1 条形雾化器出气口结构

条形雾化器出气口类比为圆形雾化器环缝、环孔出气口类型,其分为条缝式雾化器和线性孔阵列雾化器。多相流模型计算量大,传统圆形雾化器或喷嘴数值仿真时多采用 2D 模型^[10-11];条形雾化器非完全对称结构,故采用 3D 流场域模型。

第一作者简介:施欢纯(1999—),女,江苏镇江人,硕士研究生,研究方向为喷射成形雾化器结构设计与参数优化, shihuanchun@nuaa.edu.cn。

条缝式雾化器出气口截面 2 条长 400 mm、宽 1.8 mm 的矩形狭缝,对称分布于漏液缝隙两侧;线性孔阵列雾化器出气口结构为间距 10 mm、直径 1.8 mm 的线性分布的 39 个小孔,对称分布于漏液缝隙的两侧。如图 1 所示。其中惰性气体 Ar 喷射角度为 30°,进气口为 $\phi 20$ mm、长 20 mm 的圆柱状,金属溶液入口截面为长 400 mm、宽 20 mm 的矩形截面,漏液高度不超过惰性气体的相遇处,采用非限制式结构。

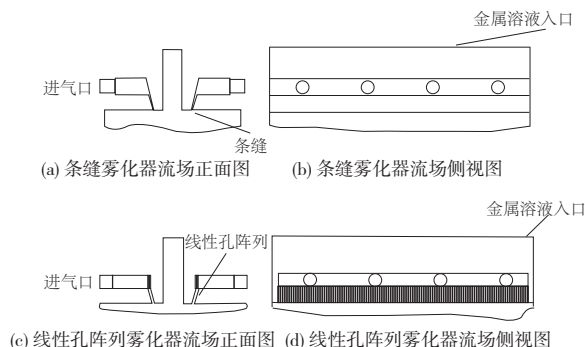


图 1 条形雾化器出气口结构分类示意图

1.2 流场域网格划分

在 SolidWorks 中对两种条形雾化器的气流域进行建模并在 Fluent 自带的 Meshing 网格划分工具中进行网格划分。

设置表面网格最小尺寸为 1.85×10^{-4} mm,最大尺寸为 9.5×10^{-3} mm,增长率为 1.2,尺寸函数为 Curvature and Proximity,曲率法相角为 18°;添加边界层为 3 层;生成体网格 poly-hexcore,缓冲层为 2 层,剥离层为 1 层,最小单元长度为 4.7×10^{-4} mm,最大单元长度为 7.5×10^{-3} mm。

2 数值仿真模拟

2.1 模型选择

VOF 模型能够模拟计算 2~3 个互不渗透的流体流动情况,适用于喷射成形雾化过程的数值模拟^[12-14]。该模型中,每个控制体中每一相体积分分数相加为 1。利用显式或隐式体积公式计算出每一相在每一控制体中的体积分分数,以此来描述流动情况,初相的体积分分数求解,根据式(1)约束条件计算。

$$\sum_{q=1}^n \alpha_q = 1 \quad (1)$$

体积分分数方程可通过隐式或显式时间公式计算,其中显式时间公式与时间有关,使用时必须计算与时间相关的解;隐式公式既可以用于时变计算也可用于稳态计算,其体积分分数控制方程离散方式为

$$\frac{\alpha_q^{n+1} \rho_q^{n+1} - \alpha_q^n \rho_q^n}{\Delta t} V + \sum_f (\rho_q^{n+1} U_f^{n+1} \alpha_{q,f}^{n+1}) = [S_{\alpha_q} + \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp})] V \quad (2)$$

式中: $n+1$ 为当前时间步的索引; n 为上一个时间步的索引; α_q^{n+1} 为在 $n+1$ 时间步时体积分数的单元值; α_q^n 为在第 n 时间步时体积分数的单元值; $\alpha_{q,f}^{n+1}$ 为第 $n+1$ 步时体积分数的面值; U_f^{n+1} 为第 $n+1$ 步时通过表面的体积通量; V 为单元体积。

使用 VOF 多相流模型,设置相数为 2,主项为惰性气体 Ar,副相为 7055 铝合金材料的金属熔体,其化学成分参考国标 GB/T3190—2020 变形铝和铝合金化学成分,如表 1 所示^[15-16]。

表 1 7055 铝合金质量分数表

单位: %

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Zr	Cr	Al
0.1	0.15	2~2.6	0.05	1.8~2.3	7.6~8.4	0.06	0.08~0.25	0.04	余量

其物理模型的密度为 2.69 g/cm^3 ,比热容为 $860 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$,热导率为 $154 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$,固相线温度为 525°C ,液相线温度为 635°C 。

2.2 计算条件设置

VOF 模型基于压力基求解。设置进气口、金属溶液入口为 pressure-inlet,混合出口为 pressure-outlet。

设置雾化压力为 2 MPa,其余参数为默认值。设置湍流能为 $65 \text{ m}^2/\text{s}^2$,湍流耗散率

为 $8.4 \times 10^5 \text{ s}^{-1}$ 。

2.3 计算结果

CFD 数值仿真时迭代 300 次,保证残差波动小于 0.001,分别以条缝雾化器和线性孔阵列雾化器的主雾化截面气流场、条形雾化器条形气流场截面、核心长边雾化区、中心静压曲线以及条形雾化器区短边静压分布曲线为研究对象,仿真结果如图 2—图 4 所示(本刊为黑白印刷,相关问题请咨询作者)。

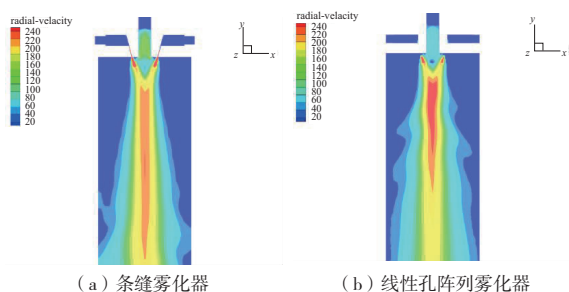


图2 条缝雾化器和线性孔阵列雾化器的主雾化截面气流场数值仿真结果

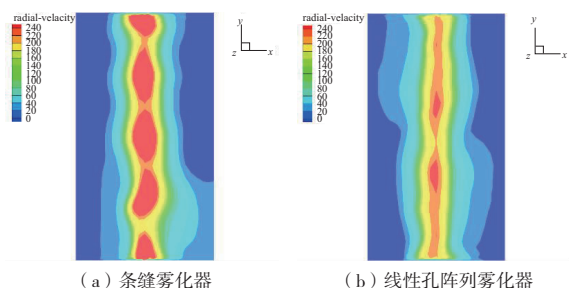


图3 条缝雾化器和线性孔阵列雾化器的条形气流场截面数值仿真结果

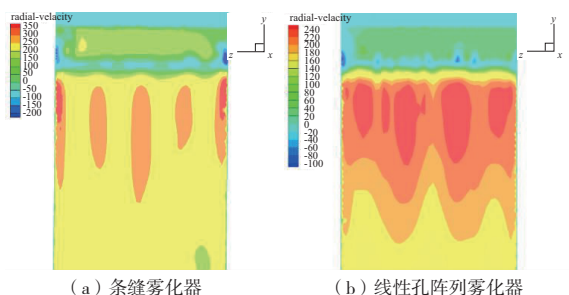


图4 条缝雾化器和线性孔阵列雾化器的核心长边雾化区数值仿真结果

由图2—图4可以看出,无论是条缝雾化器还是线性孔阵列雾化器,核心雾化区域雾化速度均保持在 $220 \sim 240 \text{ m/s}$ 。相对于条缝雾化器,线性孔阵列雾化器的核心雾化速度较大,且雾化范围较为集中在对称的雾化气体交汇的不远处,这种较为集中的速度分布有利于7055铝合金熔体在核心雾化区域被充分地雾化。

条缝雾化器中,高压气体尚未从条缝中离开,速度就已经达到了 240 m/s ,到达雾化区域后进入减速过程;线性孔阵列雾化器的高压气体在流出线性孔阵列气体出口通道后,速度才达到峰值,交汇后速度再次提升到与刚离开气体通道的速度相当,最大程度上保持了高压气体的雾化能力。

条形雾化器的最大创新之处在于区别于传统

圆形雾化器的雾化气流场截面,条形气流场截面的数值模拟计算是设计条形雾化器的重要步骤。不同的气道结构对于条形气流场截面的速度分布影响很大,图3(a)所示是条缝雾化器条形气流场截面,由于高压气体入口仅为对称的阵列分布,仅依靠条缝的调节,无法做到气流场的分布均匀,具体体现在气流入口处的速度分布明显高于其他处,呈现“串”型分布;线性孔阵列雾化器得益于均匀分布的线性孔阵列气道结构,将从同样的高压气体入口处流入的高压气体均匀输送至雾化区域,使得条形气流场截面上速度分布更加均匀,有利于7055铝合金熔体的雾化。

核心长边雾化区数值仿真结果更好地体现了线性孔阵列雾化器的雾化均匀性,核心雾化区域 z 轴分布基本均匀地维持在 240 m/s ,相比于条缝雾化器核心雾化区域 z 轴分布上有 50 m/s 的速度突变,线性孔阵列雾化器的气流场更加平稳可靠。

中心静压曲线体现了雾化器核心雾化区的高度,在同样的雾化压力、雾化角度下,条缝雾化器和线性孔阵列雾化器分别在距离气道出口 350 mm 、 450 mm 处达到雾化压力峰值最后趋于稳定,如图5所示。

短边静压分布曲线体现了条形雾化器的雾化范围宽度,区别于传统圆形雾化器,条形雾化器的雾化区域呈现一个“楔形”,如图6所示,短边静压分布曲线体现了这个“楔形”的短边 L 方向上的静压分布。条缝雾化器短边最佳雾化气压为 $0.6 \sim 0.7 \text{ MPa}$,线性孔阵列雾化器短边最佳雾化气压为 $0.8 \sim 1.0 \text{ MPa}$ 。

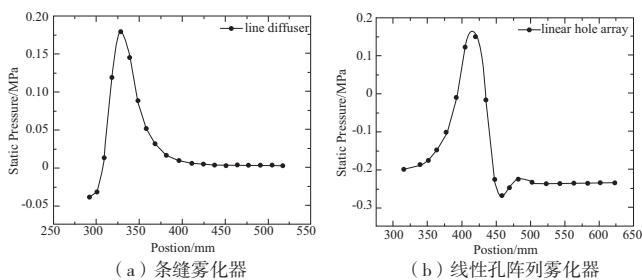


图5 中心静压曲线

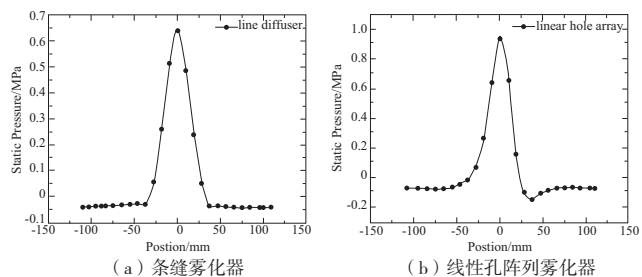


图6 条形雾化器短边静压分布曲线

3 实验结果

为验证条形雾化器的雾化效果,搭建如图7所示的实验设备,雾化气体为 Ar,气压为 2 MPa,工作温度为 685 ℃。分别使用两个传统雾化器联合工作系统和单个条形雾化器系统进行 7055 铝合金大规格锭坯喷射成形实验。

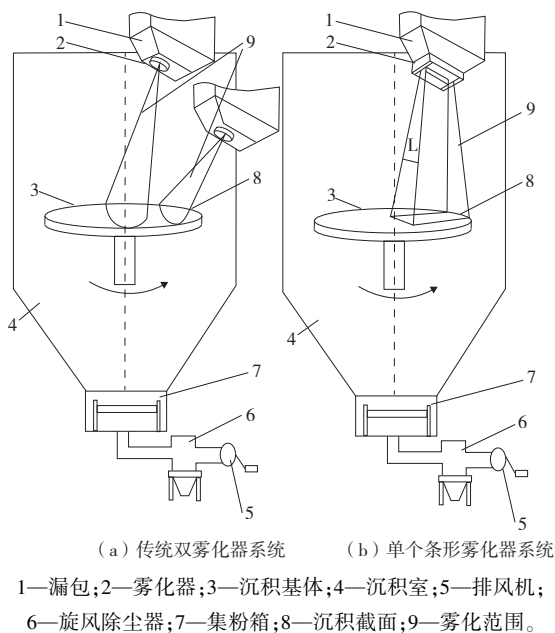


图7 实验设备原理图

最终喷射成形锭坯如图8所示。显然,由传统双雾化器系统制备的锭坯表面有明显的沟壑现象,非常不平整,由单个条形雾化器系统制备的锭坯表面较平整。

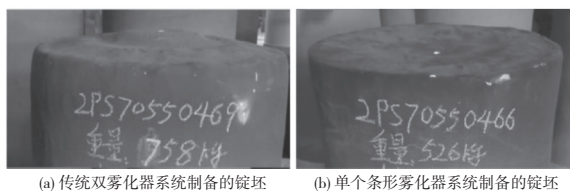


图8 锭坯质量实物图

4 结果分析

新型条形雾化器对比传统的圆形雾化器,存在着雾化范围大的优势,但也丧失了结构中心对称带来的雾化气流场分布均匀的特点,气道结构设计对条形雾化器的结构设计就尤为关键。

通过 SolidWorks 对两种条形雾化器气道结构的气流场区域建模,使用 Fluent 软件对条缝雾化器和线性孔阵列雾化器的主雾化截面气流场、条形雾化器条形气流场截面、核心长边雾化区、中心

静压曲线以及条形雾化器区短边静压分布曲线进行数值模拟计算。

在雾化压力为 2 MPa、雾化角度为 30°的条件下,线性孔阵列气道结构使得主雾化截面气流场核心雾化区域速度集中、条形气流场截面、核心长边雾化区速度分布均匀,减少了条缝雾化器存在的速度突变的现象,在雾化速度为 240 m/s 的最佳气体速度下,能够保持长为 400 mm 的有效雾化区域。

条形雾化器短边静压分布曲线对比如图9所示,条缝雾化器短边最佳雾化气压在 0.6~0.7 MPa,线性孔阵列雾化器短边最佳雾化气压在 0.8~1.0 MPa。在有效雾化压力 0.5 MPa 下,条缝雾化器的有效雾化宽度和雾化压力远远小于线性孔阵列雾化器的有效雾化宽度。线性孔阵列雾化器能够在有效雾化压力 0.6~1.0 MPa 下保持有效短边雾化范围 0~25 mm,宽于条缝雾化器 40%。

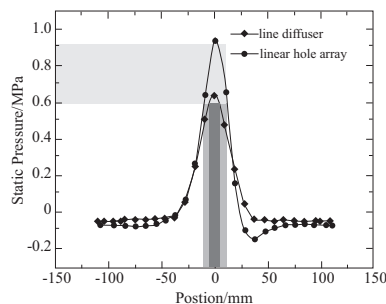


图9 条形雾化器区短边静压分布曲线

在雾化速度、雾化压力、雾化气流场稳定程度、雾化范围 4 个维度上,线性孔阵列的气道结构均优于条缝气道结构。

经过实验可知:传统双雾化器系统制备大规格锭坯,表面非常不平整,存在严重的沟壑,这是由于双雾化器系统的参数难以调节,轨迹容易耦合,并且双雾化器雾化不均匀;制备相同规格的锭坯,条形雾化器系统由于其单一的结构、简单的扫描轨迹、均匀的雾化效果,最后的锭坯成形表面非常平整。

5 结语

本文为解决传统雾化器喷射成形大规格锭坯(直径在 400~800 mm 之间)时使用多个传统圆形雾化器带来的参数过多、调节困难、锭坯易分层等问题提出一种新型的条形雾化器结构。使用 SolidWorks 对条形雾化器的两种不同气道结构:条缝、线性孔阵列雾化器产生的雾化流体区域建

模;使用 Fluent 软件对两种结构在雾化压力 2 MPa、雾化角度 30°条件下的主雾化截面气流场、条形雾化器条形气流场截面、核心长边雾化区、中心静压曲线以及条形雾化器区短边静压分布曲线进行数值模拟计算。通过喷射成形实验对比了传统双雾化器系统和单个条形雾化器系统制备的大规格锭坯的表面质量,结论如下。

1) 条缝雾化器高压气体到达雾化区域后进入减速过程,低于线性孔阵列雾化器的高压气体在流出线性孔阵列气体出口通道后能达到的峰值 240 m/s。

2) 条缝雾化器条形气流场截面上速度呈现“串”型分布,没有线性孔阵列雾化器的速度分布均匀。

3) 相比于条缝雾化器核心长边雾化区 z 轴分布上有 50 m/s 的速度突变,线性孔阵列雾化器的气流场更加平稳可靠。

4) 条缝雾化器和线性孔阵列雾化器分别在距离气道出口 350 mm、450 mm 处达到雾化压力峰值最后趋于稳定。

5) 线性孔阵列雾化器短边最佳雾化气压为 0.8~1.0 MPa,比条缝雾化器高 0.2~0.3 MPa。

6) 条形雾化器系统能够解决传统多个雾化器系统带来的轨迹耦合、参数难调等问题,最终成形的锭坯表面平整无沟壑。

参考文献:

- [1] 姜周华,董艳伍,刘福斌,等. 我国特种冶金产品、技术和装备的最新进展与展望[J]. 特殊钢, 2024, 45(4):1-12.
- [2] 黄晖,张迎元,王月. 快速凝固耐热铝合金及其进展[J]. 材料开发与应用,1996,11(4):38-42.
- [3] 吴凯琦,卢林,吴文恒,等. 喷嘴进气方式对 3D 打

印用 GTD222 高温合金粉末性能的影响[J]. 粉末冶金技术, 2021, 39(2): 107-112.

- [4] 刘腾. 双喷嘴喷射成形锭坯沉积生长机理研究及参数优化[D]. 南京:南京航空航天大学,2013.
- [5] 石永正. 双喷嘴多层喷射成形锭坯形状模拟的研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2008.
- [6] 徐玉冰. 锭坯双喷嘴扫描喷射成形均匀沉积技术研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2010.
- [7] 张豪,张捷. 双喷嘴扫描斜喷式圆柱坯喷射成形装置:CN102145387A[P].2011-08-10.
- [8] 古元军. 喷射成形新型雾化器设计的研究[D]. 沈阳:沈阳工业大学,2009.
- [9] 王世橦,朱家威,张鹏,等. 基于 FDM 成型技术的打印强度和成型速率研究进展[J]. 中国塑料, 2025, 39(1): 112-117.
- [10] 胡浩威,时文博. 某直流喷嘴喷射雾化过程的数值模拟[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2022, 36(3): 215-222.
- [11] 徐金鑫,陈超越,沈鹭宇,等. 层流气体雾化制粉工艺粉末形貌及雾化机理[J]. 物理学报, 2021, 70(14): 134-148.
- [12] 孙汝苇. 基于双层雾化器设计的气体流场和雾化过程的模拟研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学,2015.
- [13] 黄飞,陈兰. Fluent 软件在 VOF 模型中的应用[J]. 现代营销(学苑版),2012(8):255.
- [14] 李子丰. 基于 VOF 的气液两相流多尺度耦合算法[D]. 沈阳:沈阳化工大学,2022.
- [15] 谢志强. 大规格喷射成形 7055 铝合金组织演化及其对力学性能和淬透性影响研究[D]. 重庆:重庆大学,2020.
- [16] 严林. 喷射成形 7055 铝合金高温塑性变形行为及微观组织模拟[D]. 镇江:江苏科技大学,2022.

收稿日期:2023-10-11