

# 基于 Laval 喷嘴的层流气雾化法工艺参数探索及粉末性能研究

沈鹭宇<sup>1</sup>, 陈超越<sup>1</sup>, 黎兴刚<sup>2</sup>, 帅三三<sup>1</sup>, 徐松哲<sup>1</sup>, 胡涛<sup>1</sup>, 金小礼<sup>3</sup>, 李山青<sup>3</sup>,  
王江<sup>1</sup>, 任忠鸣<sup>1</sup>

(1. 上海大学 材料科学与工程学院 省部共建高品质特殊钢冶金与制备国家重点实验室, 上海 200444)

(2. 南方科技大学 前沿与交叉学科研究院, 广东 深圳 518055)

(3. 宝山钢铁股份有限公司 中央研究院, 上海 201900)

**摘要:** 基于 Laval 喷嘴的层流气雾化技术可以高效制备高性能金属粉末, 但目前对这种技术的各项工艺参数及粉末性能尚未有系统性研究。本工作使用基于 Laval 喷嘴的层流气雾化制粉设备制备了 AlSi10Mg 合金粉末, 同时使用传统分析方法和 X 射线计算机断层扫描技术分别研究了雾化气体压力以及导流管内径对粉末整体形貌、三维形貌、球形度、粒度分布、物理性能及内部缺陷的影响, 并结合数值模拟进行机理性解释。结果表明, 基于 Laval 喷嘴的层流气雾化技术制备的 AlSi10Mg 粉末性能较好, 由于在较高的雾化气体压力和较窄的导流管内径条件下气液流量比更高, 金属熔体更易发生破碎, 故制备的粉末球形度更好, 粒度分布较窄, 细粉收得率可接近 50%, 不规则粉末及空心粉较少。

**关键词:** 层流气雾化; AlSi10Mg 合金粉末; 工艺参数; X 射线计算机断层扫描; 数值模拟

**中图分类号:** TF123

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-185X(2023)04-1369-11

高性能金属粉末是增材制造 (additive manufacturing, AM) 的主要原材料<sup>[1]</sup>, 金属粉末的各项性能如粉末粒径分布、流动性、球形度及空心粉、卫星粉等不规则粉末直接影响 AM 成型件的性能<sup>[2-4]</sup>。如何更高效地制备高性能增材制造用金属粉末是目前亟待解决的重要课题。气雾化法 (gas atomization, GA) 由于制备的粉末粒径较小、球形度高、流动性好, 且制备成本低廉, 生产效率高, 适合大批量工业生产, 是目前研究和应用最多的一种增材制造用金属粉末制备工艺<sup>[5]</sup>。

雾化喷嘴是气雾化设备中最重要的组成部分。传统的喷嘴主要有 2 类: 自由落体式 (free-fall) 喷嘴和紧耦合式 (close-coupled) 喷嘴<sup>[6]</sup>。这 2 种雾化喷嘴的气体流场往往呈现“湍流”形貌, 在导流管下方出现明显回流区<sup>[7]</sup>, 并造成金属熔体的相互碰撞, 产生大粒径粉末及不规则粉末, 甚至发生堵嘴现象<sup>[8]</sup>。为了进一步提高气雾化粉末质量, 一些学者开展了基于 Laval 喷嘴的层流气雾化方法的制粉工艺研究。“层流”形貌的气体流场具有自稳定的特性, 气体流向与主熔体流保持平行, 可以有效减少液滴之间的相互碰撞与融合, 避免大尺寸粉末及不规则粉末的产生。

Schulz<sup>[9]</sup>报道了德国 Nanoval 公司使用 Laval 喷嘴层流气雾化技术 (laminar gas atomization, LGA) 在 2.0 MPa 气体压力下成功制备出粒度较小的金属粉末, 且耗气量较低。Khatim 等人<sup>[10]</sup>对 Laval 喷嘴气雾化的加压过程进行了研究, 结果显示即使达到超音速, 气流在雾化区域也是层流的, 且液滴尺寸会随压力的逐渐增大而减小。Allimant 等人<sup>[11]</sup>通过流体力学建模研究了 Laval 喷嘴气雾化过程, 建立了气相压力随质量流量变化的数学模型, 并通过实验成功获得较窄的粉末粒度分布。Planche 等人<sup>[12]</sup>采用粒子图像测速法测定了 Laval 喷嘴气雾化生产 Cu 粉的气流速度场, 结果表明增大气体压力可增大气液流量比, 提高熔体的破碎效率。徐金鑫等人<sup>[13]</sup>通过气液两相流数值模拟, 系统研究了层流雾化过程中的一次雾化和二次雾化机理, 为基于 Laval 喷嘴的层流气雾化技术的实际应用提供了重要参考。综上所述, 针对基于 Laval 喷嘴的层流气雾化制粉技术的文献报道尚局限于采用数值模拟或粒子图像测速等方法的雾化机理研究, 而对于具体工艺参数及其对最终粉末形貌的影响规律目前还尚未有系统性研究报导。

收稿日期: 2022-04-13

基金项目: 科技部国家重点研发计划 (2019YFA0705302); 国家航空发动机和燃气轮机重大专项 (2017VII00080102); 上海市科委基础研究项目 (20511107700); 中国重燃项目 (F035); 国家自然科学基金青年科学基金 (52001191); 上海青年科技启明星计划 (20QA1403800); 宝钢金苹果项目 (A19EC13500); 广东省现代表面工程技术重点实验室开放课题 (2020B1212060049)

作者简介: 沈鹭宇, 男, 1992 年生, 硕士, 上海大学材料科学与工程学院, 省部共建高品质特殊钢冶金与制备国家重点实验室, 上海 200444, E-mail: shenluyu@163.com

本工作对基于 Laval 喷嘴的层流雾化技术的工艺参数及粉末性能进行了系统研究，分别考察了雾化气体压力和导流管内径对粉末各项性能的影响规律，并结合单相气体流场及气液两相流的数值模拟结果进行机理性讨论。通过对基于 Laval 喷嘴的层流雾化法工艺参数及粉末性能的研究，本工作有望为进一步优化金属粉末质量提供理论依据。

## 1 实验

本实验采用自主设计的层流雾化制粉设备制备 AlSi10Mg 合金粉末，如图 1 所示，层流雾化制粉设备采用基于 Laval 结构的喷嘴作为核心雾化系统，导流管内径位置如图所示，实验过程中雾化气体压力直接作用于熔炼室腔体内。实验所用原料为 AlSi10Mg 铸锭，其化学成分如表 1 所示，使用的高压惰性气体为高纯氩气。本实验分别研究雾化气体压力（1.5、2.0 及 2.5 MPa）以及导流管内直径（2、4 及 6 mm）对粉末各项性能的影响，具体实验参数设置如表 2 所示。

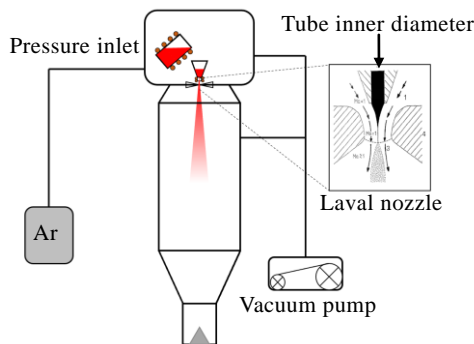


图 1 基于 Laval 喷嘴的层流雾化制粉设备

Fig.1 Laminar gas atomization equipment based on Laval nozzle

表 1 实验所用 AlSi10Mg 铸锭的化学成分

Table 1 Chemical composition of AlSi10Mg ingots ( $\omega/\%$ )

Si	Fe	Mn	Mg	Al
8.43	0.49	0.25	0.40	Bal.

表 2 层流雾化实验参数设置

Table 2 Process parameters of laminar gas atomization

Pressure/MPa	Diameter/mm	Superheat/ $^{\circ}\text{C}$
1.5	4	350
2.0	4	350
2.5	4	350
2.0	2	350
2.0	4	350
2.0	6	350

在层流雾化实验后，将收得的 AlSi10Mg 合金粉末进行初筛，并对粒径 300  $\mu\text{m}$  以下的粉末进行表征。采用美国 Beckman Coulter 公司的 LS 13320 激光粒度分布仪对粉末的粒度分布进行分析；采用 Nova Nano 450 场发射扫描电镜分别观察粉末的表面形貌及截面形貌；依据国家标准 GB 1482-84，使用 JHY-1002 霍尔流速计测试粉末的流动性，使用 HYL-100D 型振实密度测试仪测试粉末的振实密度。

除以上传统的粉末表征方法外，近年来不断有学者尝试使用 X 射线计算机断层扫描技术 (X-ray computed tomography, XCT) 对粉末三维形貌及内部缺陷进行表征<sup>[14-15]</sup>，并发现这种技术可以更好地表征粉末颗粒的三维形貌<sup>[16]</sup>。本实验使用美国 NSI 公司的 CT-X5000 型 X 射线断层扫描设备对粉末进行三维扫描，将金属粉末均匀分散至蜡液中，在冷却凝固的同时将其固定在金属铜棒上，得到直径 6 mm、高 30 mm 的圆柱形蜡液/粉末复合试样，每个试样固定在样品台上旋转 360 $^{\circ}$  共采集 1440 张投影图像，随后使用 Avizo 后处理软件对图像进行三维重构，从每个样品中分割出尺寸为 3 mm $\times$ 3 mm $\times$ 3 mm 的立方体区域进行表征，并统计粉末粒径分布、球形度、长宽比以及空心粉率等数据。

此外，本研究基于 Ansys Fluent 软件对不同参数条件下的单相气体流场和气液两相流进行了数值模拟。其中，对气液两相流的模拟采用耦合水平集-体积分法 (coupled level set-volume of fraction, CLSVOF)<sup>[13,17]</sup>，其计算域、网格划分和边界条件如图 2 所示。

## 2 结果与分析

### 2.1 雾化气体压力对粉末性能的影响

气雾化制粉过程中的雾化气体压力是影响粉末最终形貌及性能的重要参数。本实验中，雾化气体压力对粉末的各项性能影响结果如下。

#### 2.1.1 粉末的整体形貌及三维形貌分析

图 3 为不同雾化压力下的 AlSi10Mg 粉末形貌，

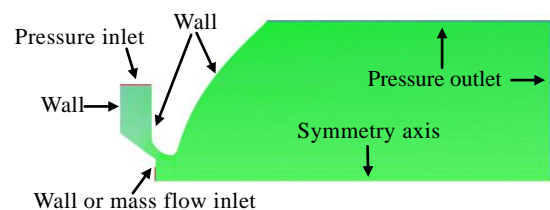


图 2 数值模拟的计算域，网格划分及边界条件

Fig.2 Computational domain, mesh grid and boundary conditions of numerical simulation

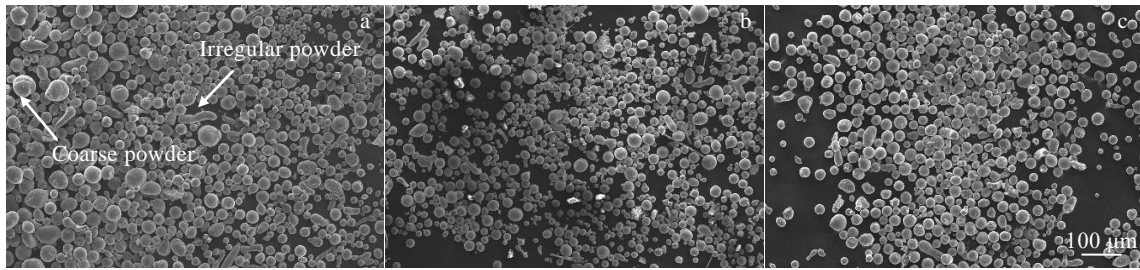


图3 不同雾化压力下粉末的整体形貌

Fig.3 Overall morphologies of powders under different atomization pressures: (a) 1.5 MPa, (b) 2.0 MPa, and (c) 2.5 MPa

可以看出，整体粒径分布较均匀，卫星粉等不规则粉末较少，球形度较好，基于 Laval 喷嘴的层流雾化技术制备的金属粉末整体形貌较好。此外，细粉球形度较高，而大尺寸粉末中不规则粉末比例更高。同时可以发现，在 1.5 MPa 的雾化压力下，存在较多的不规则粉末及大尺寸粉末，如图 3a 所示。随着雾化压力的不断增大，粉末的球形度逐渐提高，粉末粒径逐渐减小。

通过 XCT 对 AlSi10Mg 粉末的三维形貌进行表征，不同雾化压力下粉末的三维形貌重构图如图 4 所示，其中图例所示颜色代表粉末等效粒径。如图 4 所示，随雾化压力的不断增大，大尺寸粉末比例明显减

少，颗粒大小也更加均匀。进一步分析不同雾化压力下粉末的平均球形度及平均长宽比可知，随着雾化压力的不断增大，粉末的平均长宽比逐渐减小，平均球形度也得到明显改善，如表 3 所示。

2.1.2 粉末的粒度及粒度分布

为了进一步量化雾化压力对于粉末尺寸的影响，分别使用激光粒度分布仪及 XCT 对不同雾化压力下 AlSi10Mg 粉末的粒度进行统计，得到粒度分布如图 5 所示。结果表明，使用 2 种方法得到的粉末粒度分布基本吻合，可以看出随着雾化压力的不断增大，粉末中大尺寸粉末比例不断降低。由于粉末的粒度分布近似对数正态分布<sup>[18]</sup>，故进一步计算 2 种方法得到的分布

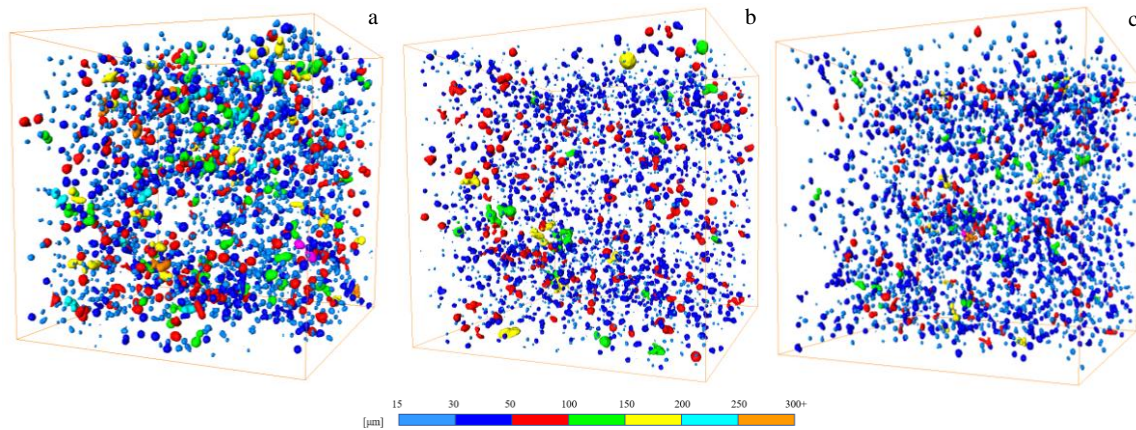


图4 不同雾化压力下粉末的三维形貌

Fig.4 3D surface morphologies of powders under different atomization pressures: (a) 1.5 MPa, (b) 2.0 MPa, and (c) 2.5 MPa

表3 不同雾化压力下粉末的平均球形度及平均长宽比

Table 3 Average sphericity and average length-width ratio of powders under different atomization pressures

Pressure/MPa	Average sphericity	Average length-width ratio
1.5	0.72	1.80
2.0	0.76	1.66
2.5	0.78	1.45

曲线的标准差 (standard deviation, 用  $\delta$  表示)、偏度 (skewness, 用  $S$  表示) 以及峰度 (kurtosis, 用  $K$  表示)，结果如图 6 所示。计算结果均显示，随着雾化压力的增大，分布曲线的标准差逐渐减小，表明粒度分布收窄；同时随雾化压力的增大，分布曲线的偏度以及峰度值均增大，这表明分布曲线更加左偏，细粉比例较高。

分别对激光粒度分布仪与 XCT 得到的粉末粒度分布数据进行进一步统计, 得到不同雾化压力下粉末的  $D_{10}$ 、 $D_{50}$  以及  $D_{90}$  的变化曲线, 如图 7 所示。由图 7 可以看出, 2 种方法得到的曲线变化趋势一致, 随着雾化气体压力的不断增大, 粉末的  $D_{10}$ 、 $D_{50}$  以及  $D_{90}$

均有明显下降。如表 4 所示, 不同雾化压力下的细粉收得率(粒径 $<53 \mu\text{m}$  的粉末比例)随雾化压力的增大而增大, 雾化压力为 2.5 MPa 时细粉收得率接近 50%, 表明基于 Laval 喷嘴的层流雾化技术可以在较低雾化压力水平下获得较高的细粉收得率。

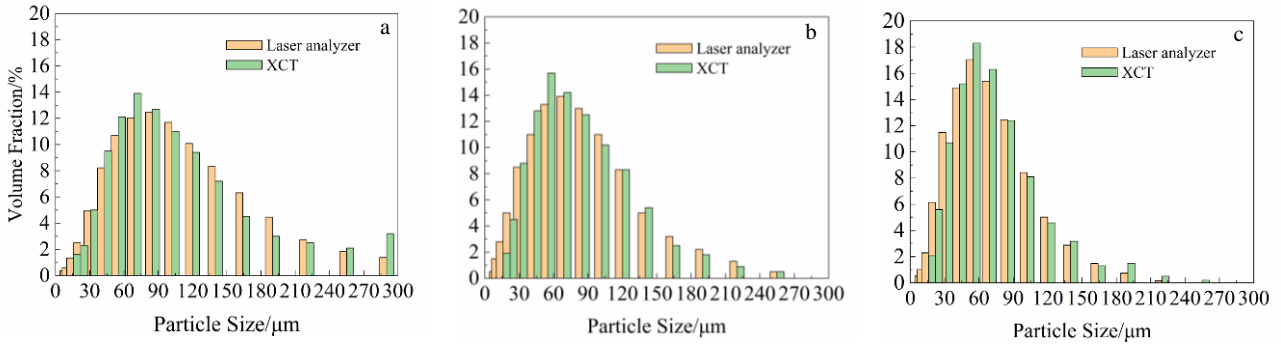


图 5 不同雾化压力下粉末的粒度分布

Fig.5 Particle size distribution of powders under different atomization pressures: (a) 1.5 MPa, (b) 2.0 MPa, and (c) 2.5 MPa

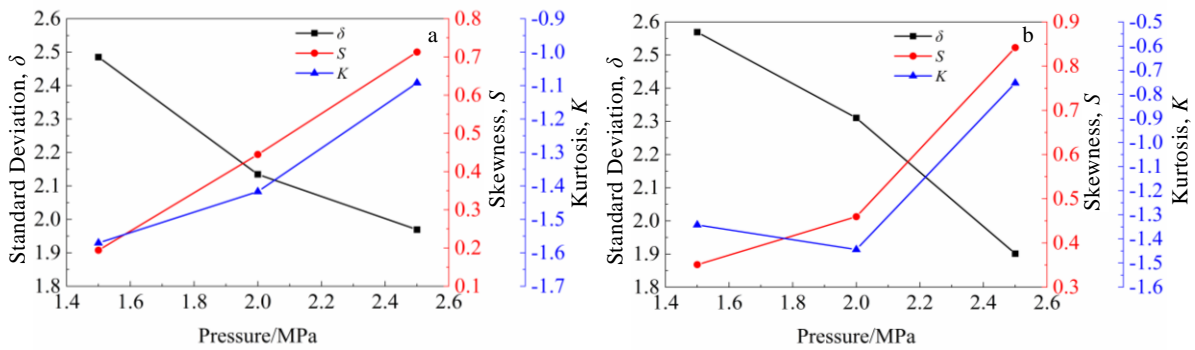


图 6 粒度分布曲线的标准差 ( $\delta$ ), 偏度 ( $S$ ) 以及峰度 ( $K$ )

Fig.6 Standard deviation ( $\delta$ ), skewness ( $S$ ) and kurtosis ( $K$ ) of particle size distribution curve: (a) laser analyzer and (b) XCT

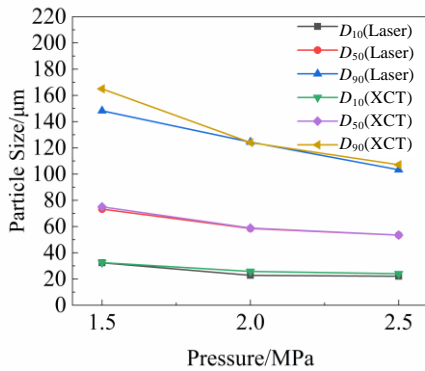


图 7 不同雾化压力下 AlSi10Mg 粉末的  $D_{10}$ 、 $D_{50}$  以及  $D_{90}$

Fig.7  $D_{10}$ ,  $D_{50}$  and  $D_{90}$  of AlSi10Mg powders under different atomization pressures

表 4 不同雾化压力下粉末的细粉收得率

Table 4 Yield of fine powder under different atomization pressures

Pressure/MPa	Yield of fine powder/%
1.5	35.2
2.0	43.3
2.5	49.3

### 2.1.3 粉末的物理性能

表 5 为不同雾化压力条件下 AlSi10Mg 粉末的霍尔流速、松装密度及振实密度测试结果。可以看出, 雾化压力为 1.5 MPa 时, 粉末流动性较差, 而雾化压力为 2.0 和 2.5 MPa 时, 粉末流动性较好。不同雾化压力下粉末的松装密度和振实密度差异较小, 整体物理性能较

好<sup>[19]</sup>。在 1.5 MPa 的条件下，由于大尺寸粉末和不规则粉末较多，粉末的松装密度和振实密度均相对较低。

2.1.4 粉末截面形貌及内部缺陷分析

图 8 为不同雾化压力下的粉末截面形貌，其中图 8a~8c 为 SEM 结果，图 8d~8f 为 XCT 扫描切片结果。可以看到，粉末整体质量较好，空心粉较少。在雾化压力较低时，由于大尺寸粉末较多，会出现少量空心粉，且空心粉中孔隙以直径小于 10 μm 的微孔为主，且随雾化压力的变化，粉末中微孔的尺寸并无明显变化。

表 5 不同雾化压力下粉末的流动性，松装密度和振实密度

Table 5 Flowability, apparent density and tap density of powders under different atomization pressures

Pressure/MPa	Flowability/s (50 g) <sup>-1</sup>	Apparent density/g cm <sup>-3</sup>	Tap density/g cm <sup>-3</sup>
1.5	66.3	1.40	1.49
2.0	59.3	1.42	1.52
2.5	61.5	1.42	1.51

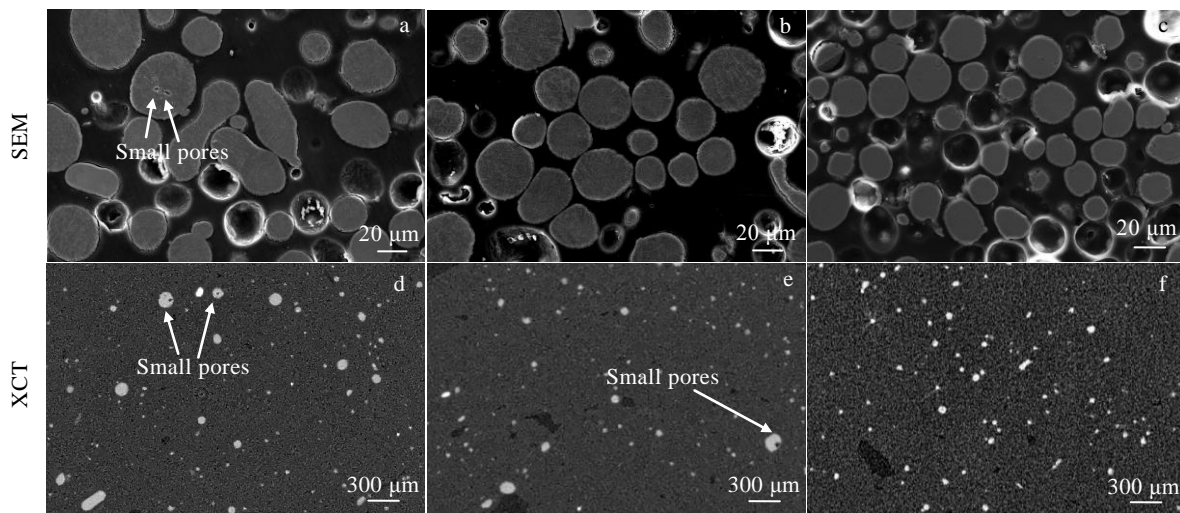


图 8 不同雾化压力下粉末的截面形貌

Fig.8 Cross section morphologies of powders under different atomization pressures: (a, d) 1.5 MPa, (b, e) 2.0 MPa, and (c, f) 2.5 MPa

使用 XCT 对粉末中的空心粉数量进行统计，并计算出空心粉率。分析结果表明，雾化压力为 1.5、2.0 和 2.5 MPa 时的空心粉率分别为 1.79%、0.43%、0.31%，整体空心粉率较低，且空心粉率随雾化压力的增大而降低，与 SEM 的观察结果吻合。

2.2 导流管内径对粉末性能的影响

众所周知，导流管内径直接决定初始金属熔体流的尺寸，对后续初次雾化和二次雾化的熔体破碎形貌及尺寸也有重要影响。本实验中导流管内径对粉末的各项性能影响结果如下。

2.2.1 粉末的整体形貌及三维形貌分析

图 9 为不同导流管内径条件下粉末的整体形貌。从图中可以看出，在导流管内径较小的条件下，粉末中细粉比例较高，粉末的球形度较好，卫星粉较少，但是在导流管内径达到 6 mm 时，AlSi10Mg 粉末中大尺寸粉末的比例明显增多，球形度变差，出现了三角形等不规则粉末，如图 9c 所示。

通过 XCT 对 AlSi10Mg 粉末的三维形貌进行表征，不同导流管内径条件下粉末的三维形貌重构图如图 10 所示，其中图例所示颜色代表粉末等效粒径，如图 10 下所示，可以看出随导流管内径的不断增大，粒径为 150 μm 以上的大尺寸粉末数量明显增多，当内径为 6 mm 时，粉末中粗大颗粒较多，且这些大尺寸粉末大多球形度较差。三维形貌结果与 SEM 结果相吻合。进一步统计不同导流管内径条件下粉末的平均球形度及平均长宽比，如表 6 所示，结果表明随着导流管内径的不断增大，粉末的平均长宽比逐渐增大，平均球形度也明显变差。

2.2.2 粉末的粒度及粒度分布

分别使用激光粒度分布仪和 XCT 对不同导流管内径条件下 AlSi10Mg 粉末的粒度分布进行统计，得到粒度分布如图 11 所示，结果显示随着导流管内径的不断增大，粉末中大尺寸粉末比例不断增大。XCT 统计结果显示，当直径达到 6 mm 时，200 μm 以上粉末比

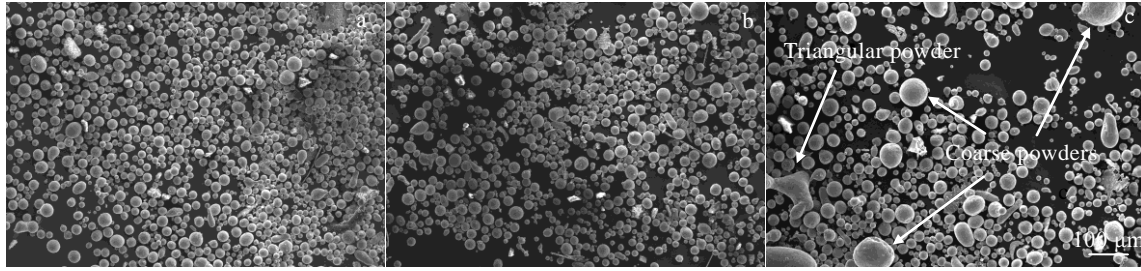


图 9 不同导流管内径下粉末整体形貌

Fig.9 Overall morphologies of powders under different tube inner diameters: (a) 2 mm, (b) 4 mm, and (c) 6 mm

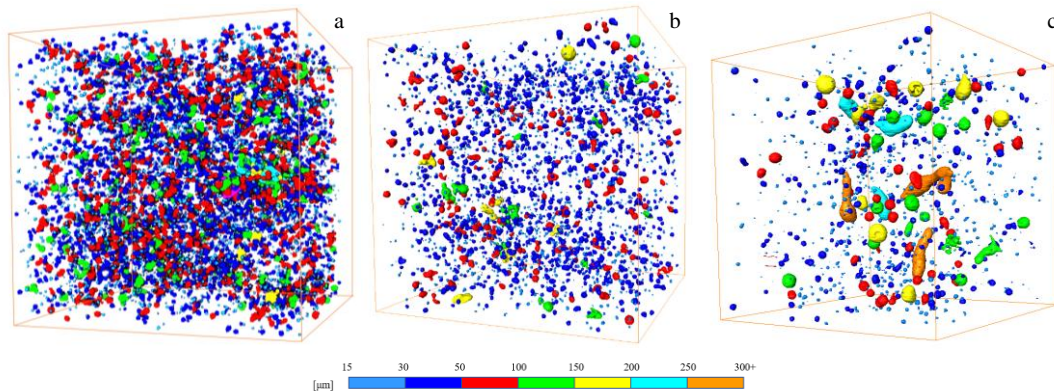


图 10 不同导流管内径下粉末的三维形貌

Fig.10 3D surface morphologies of powders under different tube inner diameters: (a) 2 mm, (b) 4 mm, and (c) 6 mm

表 6 不同导流管内径下粉末的平均球形度及平均长宽比

Table 6 Average sphericity and average length-width ratio of powders under different tube inner diameters

Diameter/mm	Average sphericity	Average length-width ratio
2	0.77	1.52
4	0.76	1.66
6	0.68	1.82

例明显增大。进一步计算分布曲线的标准差、偏度以及峰度，结果如图 12 所示。计算结果均显示，随着内径的增大，分布曲线的标准差逐渐增大，表明粒度分布区间变宽；同时随内径的增大，分布曲线的偏度以及峰度值都减小，这表明分布曲线更加右偏，大尺寸粉末比例较高。

对粉末粒度分布数据进行进一步统计，得到不同导流管内径条件下粉末的  $D_{10}$ 、 $D_{50}$  以及  $D_{90}$  的变化曲线，如图 13 所示。可以看出，随着导流管内径的不断增大，粉末的  $D_{10}$ 、 $D_{50}$  以及  $D_{90}$  均有明显上升。计算不同内径条件下的细粉收得率如表 7 所示。细粉收得

率随导流管内径的增大而降低，当内径为 2 和 4 mm 时，细粉收得率均高于 40%，表明 Laval 喷嘴层流雾化工艺可以有效提高粉末细粉收得率。

2.2.3 粉末的物理性能

表 8 为不同导流管内径条件下 AlSi10Mg 粉末的霍尔流速、松装密度及振实密度数据。结果显示，粉末流动性随导流管内径的增大而逐渐变差，当导流管内径为 2 和 4 mm 时粉末流动性较好，松装密度和振实密度差异很小，粉末整体物理性能较好。导流管内径为 6 mm 时，由于大尺寸粉末和不规则粉末较多，流动性较差，粉末的松装密度和振实密度均相对较低。

2.2.4 粉末截面形貌及内部缺陷分析

图 14 为不同导流管内径下的粉末截面形貌，其中图 14a~14c 为 SEM 结果，图 14d~14f 为 XCT 扫描切片结果。可以看出，粉末整体质量较好，空心粉较少。在导流管内径较大时，由于大尺寸粉末较多，会出现少量空心粉，但空心粉中孔隙以直径小于 10 μm 的微孔为主，且通过 XCT 切片结果可以看出，粉末内部微孔的尺寸变化并不明显，如图 14e~14f 所示。

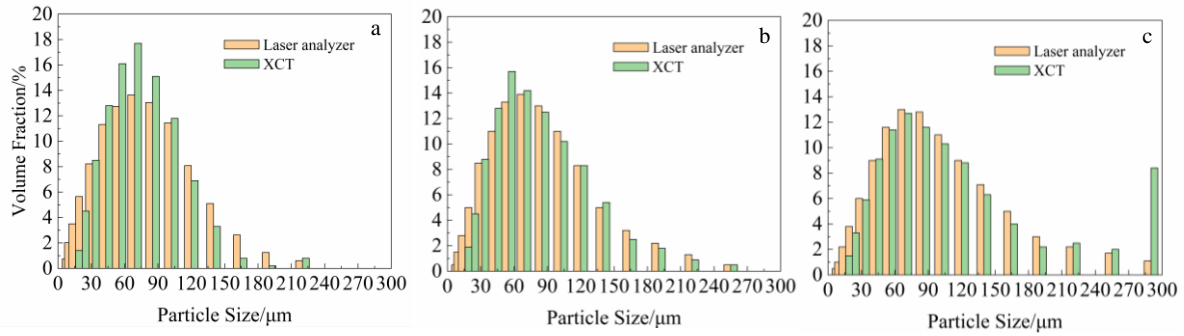


图 11 不同导流管内径条件下粉末的粒度分布

Fig.11 Particle size distribution of powders under different tube inner diameters: (a) 2 mm, (b) 4 mm, and (c) 6 mm

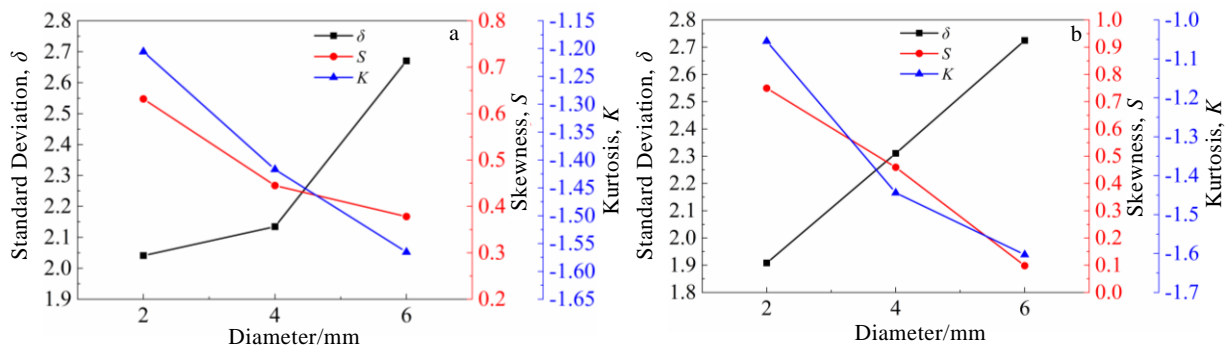


图 12 粒度分布曲线的标准差 ( $\delta$ ), 偏度 ( $S$ ) 以及峰度 ( $K$ )

Fig.12 Standard deviation ( $\delta$ ), skewness ( $S$ ) and kurtosis ( $K$ ) of particle size distribution curve: (a) laser analyzer and (b) XCT

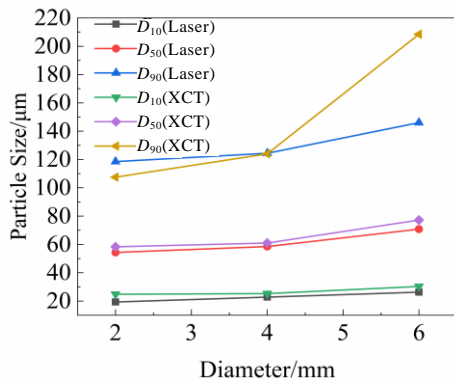


图 13 不同导流管内径下 AlSi10Mg 粉末的  $D_{10}$ ,  $D_{50}$  以及  $D_{90}$

Fig.13  $D_{10}$ ,  $D_{50}$  and  $D_{90}$  of AlSi10Mg powders under different tube inner diameters

使用 XCT 计算空心粉率，导流管内径为 2、4 和 6 mm 时的空心粉率分别为 0.39%、0.43%、3.35%，整体空心粉率较低，但是 6 mm 时空心粉率明显增大。

表 7 不同导流管内径下粉末的细粉收得率

Table 7 Yield of fine powder under different tube inner diameters

Diameter/mm	Yield of fine powder/%
2	48.7
4	43.3
6	29.7

表 8 不同导流管内径下粉末的流动性，松装密度和振实密度  
Table 8 Flowability, apparent density and tap density of powders under different tube inner diameters

Diameter/mm	Flowability/ s (50 g) <sup>-1</sup>	Apparent density/ g cm <sup>-3</sup>	Tap density/ g cm <sup>-3</sup>
2	57.8	1.41	1.51
4	59.3	1.42	1.52
6	70.9	1.38	1.50

### 3 讨论

#### 3.1 雾化压力对单相气体流场的影响

图 15 为不同雾化气体压力下层流雾化单相气体

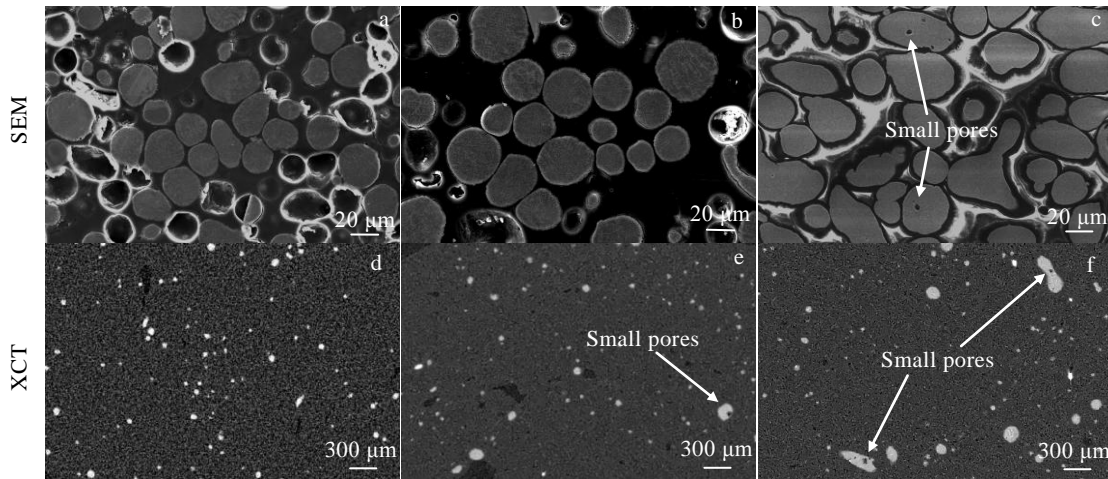


图 14 不同导流管内径下粉末的截面形貌

Fig.14 Cross section morphologies of powders under different tube inner diameters: (a, d) 2 mm, (b, e) 4 mm, and (c, f) 6 mm

流场的形貌对比图。可以发现与传统雾化喷嘴不同，Laval 喷嘴层流雾化的气体流场在导流管出口附近没有明显的回流区<sup>[20-21]</sup>，这样可以有效避免液滴之间的相互碰撞。由于未完全冷却的小颗粒与大颗粒之间的相互碰撞是卫星粉形成的主要原理<sup>[22]</sup>，降低液滴之间的碰撞几率可以有效减少卫星粉等不规则粉末的形成。这是基于 Laval 喷嘴的层流雾化方法获得的粉末中卫星粉较少的主要原因。

此外使用 Laval 喷嘴进行气雾化时可以轻易在较低气体压力（1.5 MPa）下获得较高气体流速，气体流场稳定时速度峰值超过 600 m/s。与传统气雾化喷嘴相比，基于 Laval 喷嘴的层流雾化制粉工艺在同样压力条件下气体流速更高。而且气流在速度未衰减时就已经与金属熔体接触，故气流与金属熔体相互作用时

的速度更高，可以将更多的气体动能转化为熔体破碎的势能，更大的气体与熔体速度差也提供了更大的剪切应力，使金属熔体更易破碎。因此使用 Laval 喷嘴层流气雾化法制备的金属粉末细粉收得率较高，在 2.5 MPa 条件下细粉收得率接近 50%，高于传统气雾化技术，同时粒度分布也更窄。

图 15 还显示，随着雾化气体压力的不断增大，气体流场的高速区明显延长，气液相互作用区域也明显扩大，表明在较高的雾化压力下，液体受气体作用发生破碎的时间和距离更长。已有研究表明气液流量比（gas-to-melt mass flow rate, GMR）更高时，粉末的  $D_{50}$  通常更小，细粉收得率更高<sup>[23-24]</sup>。本研究同样表明随雾化压力的增大，雾化过程中 GMR 值变大，细粉收得率有明显提升。

### 3.2 雾化压力对金属熔体破碎形貌的影响

图 16 为不同雾化压力下 AlSi10Mg 金属熔体的破碎形貌，其中图 16a~16c 条件为 1.5 MPa，图 16d~16f 条件为 2.0 MPa，图 16g~16i 条件为 2.5 MPa，每个条件下从左至右分别为熔体破碎的初始阶段、收缩阶段以及稳定阶段。在熔体破碎的初始阶段，可以看出熔体流从导流管流入 Laval 喷嘴直接与高压气体相互作用，熔体流的末端开始雾化过程，并且在雾化压力为 2.5 MPa 时，熔体流下半部分受气流挤压已经产生一定量的收缩，如图 16g 所示。在熔体破碎的收缩阶段，可以看到，主熔体流发生不同程度的细化，随着雾化压力的增大，主熔体流的尺寸更小，更细的初次雾化主熔体流在二次雾化过程中更易破碎成细小液滴，若主熔体流较粗，则二次雾化产生大尺寸粉末的几率较大。因此在雾化过程的稳定阶段，在较低的雾化压力

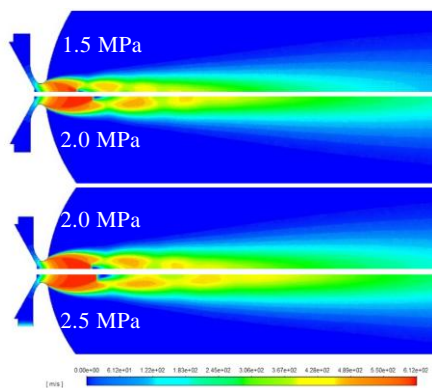


图 15 不同雾化压力下的气体流场形貌

Fig.15 Morphologies of gas flow field under different atomization pressures



条件下仍存在未完全破碎的主熔体流，大尺寸液滴比例较高，凝固后产生较多的大尺寸粉末及不规则粉末，如图 16c 所示；而雾化压力为 2.5 MPa 时主熔体流几乎完全破碎，大尺寸液滴比例明显减少，因此细粉收得率较高，如图 16i 所示。这种变化规律主要是由于当雾化气体压力更大时，同样熔体流量下气体流量较高，GMR 相应更高，熔体破碎效率更高。

### 3.3 导流管内径对金属熔体破碎形貌的影响

图 17 为不同导流管内径条件下 AlSi10Mg 金属熔体的破碎形貌，其中图 17a~17c 条件为 2 mm，图 17d~17f 条件为 4 mm，图 17g~17i 条件为 6 mm。在熔体破碎的初始阶段，由于较窄的导流管内径熔体流量较少，初期雾化产生的小液滴也较少，而导流管内径为 6 mm 时，由于熔体流量较大，初期雾化产生的小液滴较多，但主熔体流尺寸仍然较大，如图 17g 所示。在熔体破碎的收缩阶段，可以看到，主熔体流发

生不同程度的细化，从图 17b 可以看出，2 mm 内径下主熔体流尺寸几乎收缩为细丝状，可看作低维度雾化，这样可以使后续雾化过程更加彻底；通过比较可以看出随着导流管内径的增大，主熔体流尺寸也相应增大。在雾化过程的稳定阶段，通过图 17c 可以观察到 2 mm 条件下主熔体流基本完全破碎成小液滴；图 17f 显示导流管内径为 4 mm 时，仍然存在部分尚未完全破碎的主熔体流，且出现了少量尺寸较大的不规则液滴；而当导流管内径为 6 mm 时，不仅主熔体流尺寸依然较大，而且在熔体流的尾端出现了较多大尺寸熔体，如图 17i 所示。这种变化规律主要是由于当导流管内径较大时，同样气体流量条件下熔体流量较高，GMR 相应更低，熔体破碎效率较差。综上，通过对不同阶段熔体破碎形貌的模拟，印证并解释了 Laval 喷嘴层流雾化工艺粉末粒径随导流管内径增大而增大的规律。

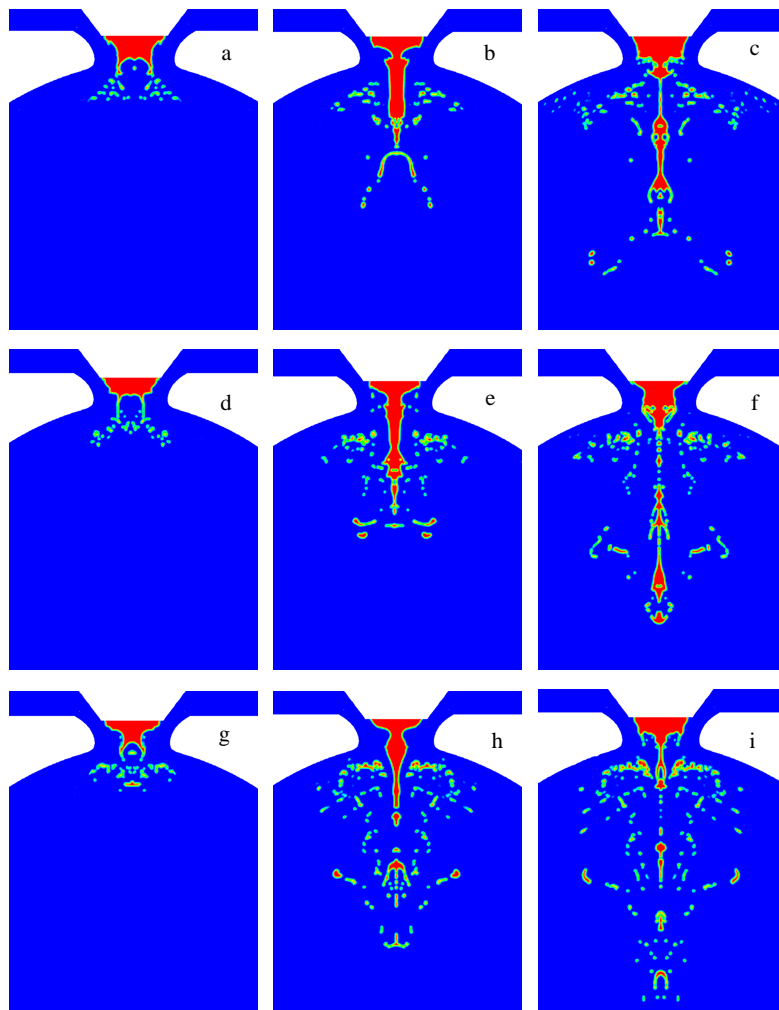


图 16 不同雾化压力下 AlSi10Mg 金属熔体的破碎形貌

Fig.16 Morphologies of AlSi10Mg melt under different atomization pressures: (a-c) 1.5 MPa, (d-f) 2.0 MPa, and (g-i) 2.5 MPa

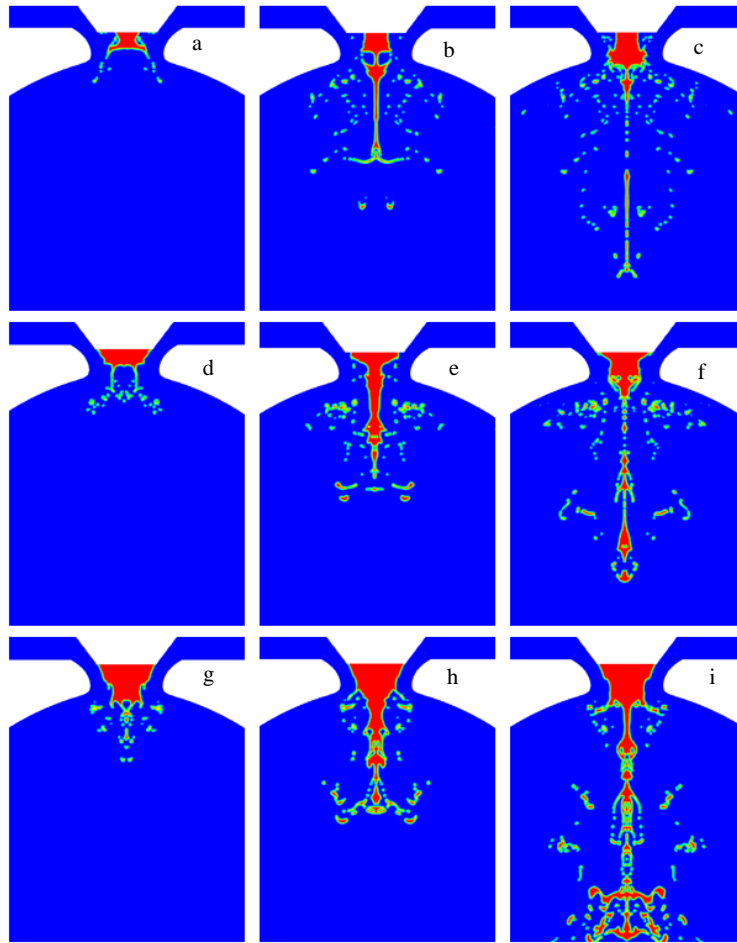


图 17 不同导流管内径下 AlSi10Mg 金属熔体的破碎形貌

Fig.17 Morphologies of AlSi10Mg melt under different tube inner diameters: (a-c) 2 mm, (d-f) 4 mm, and (g-i) 6 mm

## 4 结 论

1) 基于 Laval 喷嘴的层流雾化技术制备的 AlSi10Mg 金属粉末整体球形度较好, 细粉收得率较高, 且粉末粒度分布窄, 粉末截面形貌和 XCT 统计的空心粉率结果均表明粉末中空心粉数量少, 且空心粉中孔隙以微孔为主, 由于 Laval 喷嘴层流雾化单相气体流场中导流管出口处不存在明显回流区, 减少了液滴的相互碰撞, 故卫星粉较少。

2) 随着雾化气体压力的增大, 粉末的细粉收得率增大, 在 2.5 MPa 条件下细粉收得率接近 50%, 且粉末粒度分布区间更窄, 不规则粉末及空心粉比例降低, 这是因为较高的雾化气体压力可以带来更高的气液流量比, 且高速气体与熔体流更大的速度差带来了更大的剪切应力, 使金属熔体更易破碎成尺寸较小的液滴。

3) 随着导流管内径变窄, 在相同雾化压力下由于气液流量比增大, 熔体流更易发生破碎, 故在较小的

内径条件下细粉收得率更高, 粒度分布较窄, 不规则粉末和空心粉较少。

致谢: 感谢上海同步辐射光源为本工作提供的 Avizo 软件与数据后处理支持。

### 参考文献 References

- [1] Chen Chaoyue, Xie Yingchun, Yan Xingchen *et al.* *Additive Manufacturing*[J], 2019, 27: 595
- [2] Aboulkhair N T, Everitt N M, Ashcroft I *et al.* *Additive Manufacturing*[J], 2014, 1-4: 77
- [3] Gu Dongdong, Meiners W, Wissenbach K *et al.* *International Materials Reviews*[J], 2012, 57(3): 133
- [4] Baesso Ilaria, Karl David, Spitzer Andrea *et al.* *Additive Manufacturing*[J], 2021, 47: 102 250
- [5] Li Xinggong(黎兴刚), Liu Chang(刘畅), Zhu Qiang(朱强). *Aeronautical Manufacturing Technology(航空制造技术)*[J], 2019, 62(22): 1

- [6] Sun Pei, Fang Zhigang, Zak, Zhang Ying *et al.* *JOM*[J], 2017, 69(10): 1853
- [7] Ünal R. *Powder Metallurgy*[J], 2007, 50(4): 302
- [8] Aydin Ozer, Unal Rahmi. *Computers & Fluids*[J], 2011, 42(1): 37
- [9] Schulz G. *Metal Powder Report*[J], 1996, 51(11): 30
- [10] Khatim O, Planche M P, Dembinski L *et al.* *Surface & Coatings Technology*[J], 2010, 205(4): 1171
- [11] Allimant A, Planche M P, Bailly Y *et al.* *Powder Technology*[J], 2009, 190(1-2): 79
- [12] Planche M P, Khatim O, Dembinski L *et al.* *Powder Technology*[J], 2012, 229: 191
- [13] Xu Jinxin(徐金鑫), Chen Chaoyue(陈超越), Shen Luyu(沈鹭宇) *et al.* *Acta Physica Sinica*(物理学报)[J], 2021, 70(14): 134
- [14] Zhao Shaoyang(赵少阳), Tang Huiping(汤慧萍), Chen Gang(陈刚) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2018, 47(12): 3853
- [15] Wang Wenqiang(王文强), Ao Bo(敖波), Wu Guanhua(邬冠华) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2020, 49(6): 2024
- [16] Zhou Xin, Dai Ning, Cheng Xiaosheng *et al.* *Additive Manufacturing*[J], 2021, 40: 101 913
- [17] Xia Min(夏敏), Wang Peng(汪鹏), Zhang Xiaohu(张晓虎) *et al.* *Acta Physica Sinica*(物理学报)[J], 2018, 67(17): 41
- [18] Urionabarrenetxea Ernesto, Avello Alejo, Rivas Alejandro *et al.* *Materials & Design*[J], 2021, 199: 109 411
- [19] Balbaa M A, Ghasemi A, Fereiduni E *et al.* *Additive Manufacturing*[J], 2021, 37: 101 630
- [20] Wei Mingwei, Chen Suiyuan, Sun Miao *et al.* *Powder Technology*[J], 2020, 367: 724
- [21] Ridolfi Maria Rita, Folgarait Paolo. *International Journal of Multiphase Flow*[J], 2020, 132: 103 431
- [22] Özbilen S. *Powder Metallurgy*[J], 2013, 42(1): 70
- [23] Li Xinggang, Fritsching Udo. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2017, 239: 1
- [24] Lagutkin Stanislav, Achelis Lydia, Sheikhaliev Sheikhalii *et al.* *Materials Science and Engineering A*[J], 2004, 383(1): 1

## Study on Process Parameters and Powder Properties of Laminar Gas Atomization Based on Laval Nozzle

Shen Luyu<sup>1</sup>, Chen Chaoyue<sup>1</sup>, Li Xinggang<sup>2</sup>, Shuai Sansan<sup>1</sup>, Xu Songzhe<sup>1</sup>, Hu Tao<sup>1</sup>, Jin Xiaoli<sup>3</sup>, Li Shanqing<sup>3</sup>, Wang Jiang<sup>1</sup>, Ren Zhongming<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Advanced Special Steels, School of Materials Science and Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

(2. Academy for Advanced Interdisciplinary Studies, Southern University of Science and Technology, Shenzhen 518055, China)

(3. Central Research Institute, Baoshan Iron & Steel Co., Ltd, Shanghai 201900, China)

**Abstract:** Laminar gas atomization technology based on Laval nozzle can efficiently prepare high-performance metal powders, but there is no systematic research on the process parameters and powder properties of this technology. In this work, AlSi10Mg alloy powders were prepared by laminar gas atomization equipment based on Laval nozzle. At the same time, the effects of atomization gas pressure and tube inner diameter on the overall morphology, three-dimensional morphology, sphericity, particle size distribution, physical properties and internal defects of the powders were studied by traditional analysis methods and X-ray computed tomography technology. Combined with the numerical simulation of single-phase gas flow field and gas-liquid two-phase flow, the influence of process parameters on powder properties was explained. The results show that the performance of AlSi10Mg powders prepared by laminar gas atomization technology based on Laval nozzle is better than traditional gas atomization methods. Due to the higher gas pressure and narrow tube inner diameter, the gas-to-melt mass flow rate is higher, and the metal melt is more likely to be broken. Therefore, the powders have better sphericity, narrow particle size distribution, high fine powder yield of nearly 50%, and less irregular powders and hollow powders. The overall performance of AlSi10Mg alloy powders prepared by laminar gas atomization can meet the requirements of additive manufacturing.

**Key words:** laminar gas atomization; AlSi10Mg alloy powder; parameters; X-ray computed tomography; numerical simulation

Corresponding author: Wang Jiang, Ph. D., Professor, State Key Laboratory of Advanced Special Steels, School of Materials Science and Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, P. R. China, E-mail: jiangwang@i.shu.edu.cn