

# 增材制造用高流动性铝合金粉末制备技术研究

刘英杰<sup>1,2,3</sup>, 胡强<sup>1,2,3</sup>, 赵新明<sup>2,3</sup>, 王志刚<sup>2</sup>, 张少明<sup>3</sup>, 王永慧<sup>1</sup>, 张金辉<sup>2</sup>

(1. 有研科技集团有限公司 有研粉末新材料研究院, 北京 101407)

(2. 北京康普锡威科技有限公司, 北京 101417)

(3. 北京有色金属研究总院, 北京 100088)

**摘要:** 采用自主开发的旋转盘离心雾化实验装置进行雾化制备增材制造用铝合金粉末实验研究, 通过开展雾化盘实验研究优选出粒度分布较均匀收得率较好的盘形, 并获得其结构和工艺参数的影响规律; 通过对制得的铝合金粉末性能和 3D 打印成型件物理性能进行检测。结果表明: 离心雾化制备的铝合金粉末具有高流动性、窄粒度、高球形度、高松比, 表面光洁无卫星粉, 无空心粉等特点, 同时 3D 打印离心雾化样件熔覆道均匀, 孔洞缺陷少, 致密度和力学性能明显优于气雾化样件, 尤其是抗拉强度和屈服强达到 495 和 320 MPa, 相比气雾化粉打印样件提高近 10%。

**关键词:** 增材制造; 离心雾化; 铝合金粉末; 粉末性能

**中图分类号:** TF123.2<sup>+</sup>4; TG146.21

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-185X(2021)05-1767-08

增材制造技术是近年来发展起来的先进制造工艺。增材制造技术是基于快速原型 (rapid prototyping) 技术中的“离散-堆积”原理, 将 CAD/CAM 技术、分层制造技术、逆向工程技术、增材制造技术、激光技术和材料科学等先进技术集于一体的新型先进制造技术<sup>[1]</sup>。其优点是: 这种加工方法极大地节省材料, 降低成本; 无模具近终成形, 产品研制周期短、加工速度快; 可实现数字化、智能化和无纸化制造; 可进行个性化制作和远程制作; 材料具有优越的组织性能; 可加工复杂结构的零件。

目前增材制造技术处于快速发展时期, 无论是国家政策、政府科技投入、国内外技术产业高比重投入都到了高峰期, 产业链渐趋完善。且近年来随着增材制造技术在航空航天、汽车等领域的应用不断深入, 轻质合金材料需求得到了快速增长, 其中铝元素由于资源丰富、轻质、比强度高优点, 成为未来需求增长最快的材料之一, 2019 年 SmarTech 发布了一份关于铝合金增材制造市场机会的跟踪和预测报告, 指出 2018 年增材制造铝合金粉出货量增长 43%, 占增材制造金属总体市场近 10%, 且未来 10 年将以每年近 50% 速度增长。

增材制造技术对原料粉末要求较高, 常用的粉末粒度为微米级, 粒度分布较窄 (一般在 15~53  $\mu\text{m}$  或 20~63  $\mu\text{m}$ ), 粉末形状多为球形, 以保证均匀分散度、良好的流动性能; 氧含量低, 成分均匀, 粒度分布均匀; 此外对粉末的松装密度、振实密度等也有一定的要求。

现有生产增材制造用粉末的方法有惰性气体雾化法、等离子旋转电极法和射频等离子体法等<sup>[2,3]</sup>, 且制备的粉末常存在着球形度较差、卫星球、空心粉、粒度大且分布宽等问题, 很难获得高品质增材制造用铝合金粉末。相比于其它雾化技术, 旋转盘离心雾化技术运行成本低, 粉末球形度好、氧含量易控制, 可连续工业化生产等优点, 使其成为最有竞争力的制备技术。但旋转盘离心雾化技术目前还主要应用于低温焊粉、功能粉体材料等领域<sup>[4,5]</sup>。土耳其卡拉迪兹技术大学冶金与材料科学系公开发表的文章提出了一种喷水冷却旋转盘雾化方法<sup>[6]</sup>, 主要利用喷水冷却金属材质旋转盘的方法, 来实现对驱动旋转盘转动的高速电机保护, 由于该过程冷速达  $10^6\sim 10^8$  K/s 可制备细小晶粒的粉末, 但也是由于雾化盘冷速太快导致制备粉末球形度差, 如铝合金粉形貌绝大部分是韧带、不规则、针状、马铃薯状等, 因此水冷雾化盘方式很难制备高球形度增材制造用金属粉末<sup>[7-10]</sup>。本实验通过自主研发设计的旋转盘离心雾化实验装置, 进行增材制造用高流动性铝合金粉末离心雾化制备技术研究。

## 1 雾化实验装置

雾化实验装置主要由熔炼炉, 感应加热中间包, 离心雾化旋转盘, 强冷高速电机, 雾化室, 收粉罐等组成, 雾化装置原理如图 1 所示。该自主开发的离心

收稿日期: 2020-08-06

基金项目: 北京市科委技术委员会市区两级重大紧迫任务科技支撑资助 (Z181100009818004)

作者简介: 刘英杰, 男, 1986 年生, 博士生, 高级工程师, 北京有色金属研究总院, 北京 100088, 电话: 010-60689832, E-mail: liuyingjie8686@163.com

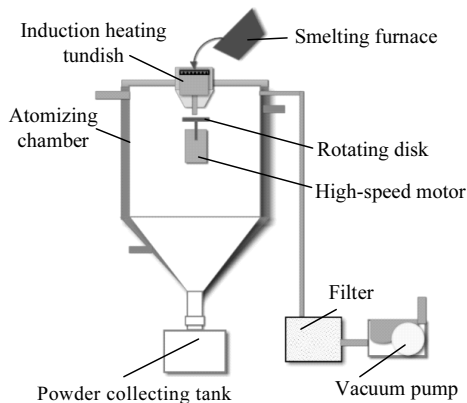


图 1 雾化装置原理图

Fig.1 Schematic diagram of atomizing device

表 1 离心雾化 AlSi10Mg 合金化学成分

Table 1 Chemical composition of centrifugal atomization AlSi10Mg alloy (ω/%)

Si	Mg	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	Sn	Ti	Zn	Al
9.0~11.0	0.25~0.45	≤0.05	≤0.25	≤0.10	≤0.05	≤0.02	≤0.02	≤0.15	≤0.10	Bal.

实验装置准备后对雾化室进行抽真空，真空度达到  $1 \times 10^{-2}$  Pa 后充氮气，通过在线测氧仪检测氧含量  $< 500 \mu\text{g/g}$  为合格即完成气氛准备，接下来开始雾化实验，方法如下所述：将 AlSi10Mg 合金加入熔炼炉中，加热熔化成熔体，然后将上述熔体送到雾化室上部感应加热中间包内；熔炼炉中的熔体通过感应加热中间包底部导流管输送至雾化旋转盘上；调整强冷高速电机，驱动雾化旋转盘使金属熔体在离心力作用下破碎为均一稳定的金属液滴；雾化液滴在雾化室内分散、冷却、凝固，得到均匀分布的金属粉末；金属粉末通过收粉罐收集冷却后，进行分级封装储存。

样品特性测试与表征，采用西安铂力特 S200 打印机打印测试样件，采用 Beckman Coulter LS13 320 激光粒度仪测试粒度分布，采用场发射 JSM-7001F 扫描电镜 (SEM) 和 Zeiss-Axiovert 200-AMT 光学显微镜 (OM) 对金属粉末的形貌和样件内部显微结构表征，振实密度及松装密度按照国标 GB-1479-1484 测量，粉末流动性用 XF-02 霍尔流速计测量。

### 3 结果与分析

#### 3.1 旋转雾化盘研究

针对前期旋转盘离心雾化铝合金初探实验，发现制备的铝合金粉末  $20 \sim 63 \mu\text{m}$  粉占比约 25%， $15 \sim 53 \mu\text{m}$  粉占比小于 20%，即雾化原粉中位径偏粗收得率低，根据文献中给出的经验公式(1)<sup>[7]</sup>可知，主要原因在于

雾化实验装置，通过复合型雾化盘结构设计实现雾化盘材质复合，解决了雾化盘的耐温耐冲刷问题，并利用 ANSYS 有限元软件对雾化盘强度进行优化，使其达到强度要求（工作时最大应力  $\leq 20 \text{ MPa}$ ）。同时利用 ANSYS - Fluent 进行传热模拟优化设计雾化盘连接杆，使其带有散热结构（工作时最高使用温度  $\leq 750 \text{ K}$ ），达到阻止温度通过连接杆向下传递，实现高速电机在线冷却保护。

## 2 实验

本实验利用自主研发的离心雾化实验装置，开展增材制造用铝合金粉末雾化制备研究，铝合金材料选用增材制造领域用量最多的 AlSi10Mg 为研究材料，合金化学成分如表 1 所示。

铝合金熔体的表面张力和密度比值大。为提高雾化效率将开展离心雾化旋转盘盘形研究，但对于雾化盘形的影响机制目前可以借鉴和应用的理论模型很少，对此通过对比相同工艺条件下球形、锥形、双锥形 3 种盘形如图 2 所示。优选出粒度分布较均匀收得率较好的盘形，再针对较优盘形的结构尺寸和转速对雾化粉粒度分布影响规律进行研究，为高效离心雾化器开发优化提供依据。

$$d_m = 4.27 \times 10^6 \frac{1}{\omega^{0.95}} \cdot \frac{1}{D^{0.61}} \left( \frac{\gamma}{\rho} \right)^{0.42} Q^{0.12} \quad (1)$$

式中， $Q$ —液态金属流量( $\text{m}^3/\text{s}$ )； $D$ —雾化盘的直径( $\text{m}$ )； $\gamma$ —液态金属表面张力( $\text{N/m}$ )； $\omega$ —雾化盘的转速( $\text{r/s}$ )； $\rho$ —液态金属的密度 ( $\text{kg/m}^3$ )； $d_m$ —粉末平均中位径 ( $\mu\text{m}$ )。

对于旋转盘离心雾化过程液态金属在旋转盘边缘分裂主要以 3 种形式：滴状分裂、纤维状分裂和膜状分裂，如图 3 所示<sup>[11-14]</sup>。这 3 种模式之间转变的临界流量可利用经验公式(2)来预测<sup>[14,15]</sup>。为排除复杂因素干扰更准确对比研究旋转盘盘形影响规律，以下实验旋转盘直径和雾化工艺的选择借助经验公式(2)计算，确保雾化实验液态金属在旋转盘边缘是纤维状分裂模式，如图 4 所示。

$$Q_t = \frac{K \gamma^{0.88} D^{0.68}}{\mu^{0.17} \omega^{0.6} \rho^{0.71}} \quad (2)$$

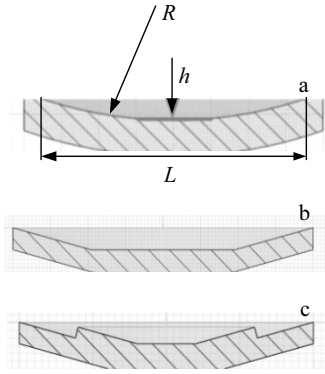


图 2 雾化盘面

Fig.2 Atomization disk surface: (a) spherical disk, (b) conical disk, and (c) double conical disk



图 3 雾化盘边缘 3 种分裂模式

Fig.3 Atomization modes at the edge of atomization disk<sup>[14]</sup>: (a) direct droplet formation (DDF), (b) ligament disintegration (LD), and (c) film disintegration (FD)

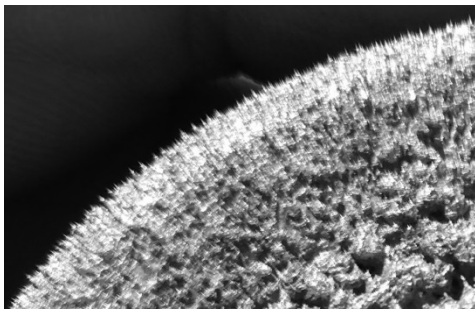


图 4 雾化实验后旋转盘边缘铝合金凝固状态

Fig.4 Remaining solid aluminium alloy at the edge of rotating disk after atomization experiment

式中,  $Q_c$ —临界流量( $m^3/s$ );  $\mu$ —液态金属粘度( $Pa \cdot s$ );  $K$  是一个常数, 从滴状分裂 (DDF) 到丝状分裂 (LD) 转变  $K$  为 0.07, 从 LF 到膜状分裂 (FD)  $K$  为 1.33; 其余符号与公式(1)相同。

雾化盘形对比实验结果如图 5 所示。可知离心雾化制备粉末粒度符合正态分布, 相比于锥形盘、双锥

盘, 球形盘雾化粉粒径相对小粒度分布窄粉末收得率较高。根据文献中给出的经验公式(1)<sup>[7]</sup>, 可计算在不考虑盘形影响, 本实验雾化参数下旋转圆盘雾化粉末中位径为  $82 \mu m$ 。公式(1)预测值与锥形盘雾化粉末中位径  $83 \mu m$  相近, 但球形盘雾化粉末中位径为  $75 \mu m$ , 相比低约  $7 \mu m$ , 双锥盘雾化粉末中位径为  $91 \mu m$ , 相比高约  $9 \mu m$ 。

在以上研究基础上, 接下来针对球形盘的关键结构尺寸球形盘深度、直径以及球形盘转速对雾化粉粒度分布的影响规律进行探究, 其中球形盘不同深度  $h$  是通过保证弦长  $L$  不变, 改变球面半径  $R$  获得如图 2 所示, 实验结果如图 6 所示。为保证其它参数不变只改变球形盘的深度  $h$ , 根据雾化实验制备粉粒度分布, 绘制粉末粒径累计体积为 10% ( $D_{10}$ ), 25% ( $D_{25}$ ), 50% ( $D_{50}$ ), 75% ( $D_{75}$ ), 90% ( $D_{90}$ ) 的变化曲线。通过图 6 可知随着球形盘深度从 5 mm 升到 8 mm, 相应粒度分布整体下降  $4\sim 5 \mu m$ , 因此球形盘深度增加在一定程度上使雾化粉粒径减小。主要原因是在一定范围内盘深度增加, 离心力在盘面法线方向的分量增加, 即熔体液膜向盘面施加压力增加, 促进熔体和盘面之间的动态润湿, 将延迟液膜在盘内分解破裂, 同时降低液膜与盘面的相对滑移<sup>[16,17]</sup>。

图 7 为保证其它参数不变只改变球形盘的直径, 并根据实验制备粉粒度分布, 绘制粉末粒径累计体积为 10% ( $D_{10}$ ), 25% ( $D_{25}$ ), 50% ( $D_{50}$ ), 75% ( $D_{75}$ ), 90% ( $D_{90}$ ) 的粒径变化曲线。通过图 7 可知雾化盘直径从 70 mm 增加到 85 mm, 雾化粉粒径减小  $9\sim 10 \mu m$ 。图 8 为保证其它参数不变只改变球形盘的转速, 并根据实验制备粉粒度分布, 绘制粉末粒径累计体积为 10% ( $D_{10}$ ), 25% ( $D_{25}$ ), 50% ( $D_{50}$ ), 75% ( $D_{75}$ ), 90% ( $D_{90}$ ) 的粒径变化曲线。通过图 8 可知, 球形盘转速对粉末粒度分布影响非常明显, 转速在 350~500 Hz 以内每提高 50 Hz 转速雾化粉粒径分布平均降约  $10 \mu m$ 。通过以上实验研究可获得球形盘的关键结构尺寸以及球形盘转速对雾化粉粒度分布的影响趋势和规律。但盘径变大旋转装置动平衡变差, 对雾化盘及设备精度提出更高的要求, 因此相比较提高转速对于制备细粉是最有效的方式。

### 3.2 雾化粉末性能研究

#### 3.2.1 粒度分布

利用以上优化的球形盘制备 AlSi10Mg 粉, 并用 270 目网筛分, 取 -270 目 (粒度  $< 53 \mu m$ ) 粉进行粒度检测如图 9 所示。其标准几何偏差  $\delta=1.21$ , 相对市场现有气雾化 AlSi10Mg 粉标准几何偏差  $\delta=1.42$  减小 15%, 因此, 离心雾化制备的 AlSi10Mg 粉末粒度分布

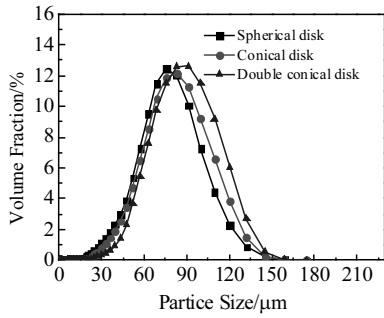


图 5 雾化盘形对粒度分布的影响

Fig.5 Influence of atomization disk shape on particle size distribution

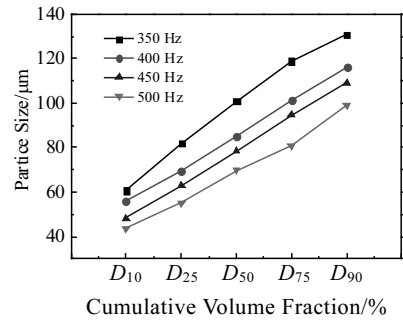


图 8 球形盘转速对粒度分布的影响

Fig.8 Influence of spherical disk speed on particle size distribution

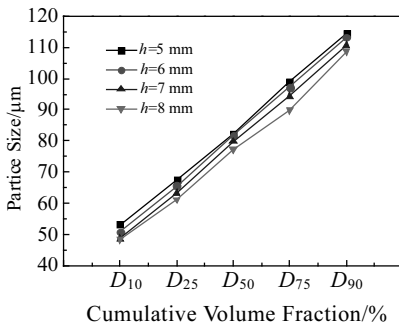


图 6 球形盘深度对雾化粉粒度的影响

Fig.6 Influence of spherical disk depth (*h*) on atomized powder particle size

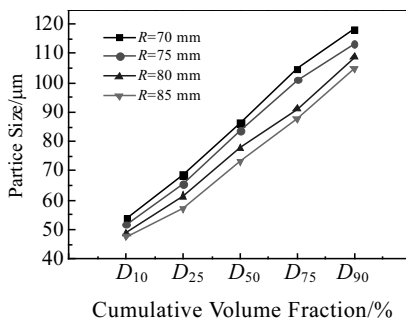


图 7 球形盘直径对粒度分布的影响

Fig.7 Influence of disk diameter (*R*) on particle size distribution

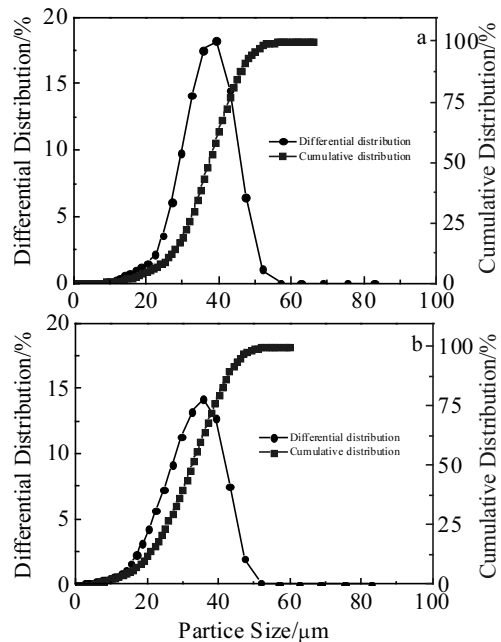


图 9 离心雾化制备与气雾化制备的 AlSi10Mg 粉末粒度分布  
Fig.9 Particle size distribution of powder prepared by centrifugal atomization (a) and gas atomization (b)

较窄，粒径均匀，归因于旋转盘边缘液膜处于纤维状破碎形式使雾化液滴均一稳定<sup>[18-22]</sup>。

### 3.2.2 粉末形貌及性能

图 10 为气雾化和离心雾化制备的 AlSi10Mg 粉末形貌。从图可看出，离心雾化制备的粉末球形度好，表面光洁无卫星球，粒度窄而均匀。对粒度区间 15~

53 μm 的气雾化和离心雾化粉末进行性能对比如表 2。可知离心雾化制备的 AlSi10Mg 粉末性能得到明显提升，其松装密度提高约 16%，尤为突出的是粉末流动性，气雾化制备的 AlSi10Mg 粉末几乎无流动性，而离心制备粉末流动性为 49.65 s/50 g。其主要原因是气雾化制备过程中，金属熔体从导流管流出后，被喷嘴射出的高速气流冲击破碎形成许多细小液滴，然后在飞行过程中快速冷凝成粉，并在气场作用下与大液滴碰撞接触，粘附在大液滴上形成卫星粉<sup>[23-25]</sup>。而离心雾化是将离心能量传递给液态金属，使熔融金属在离心力作用

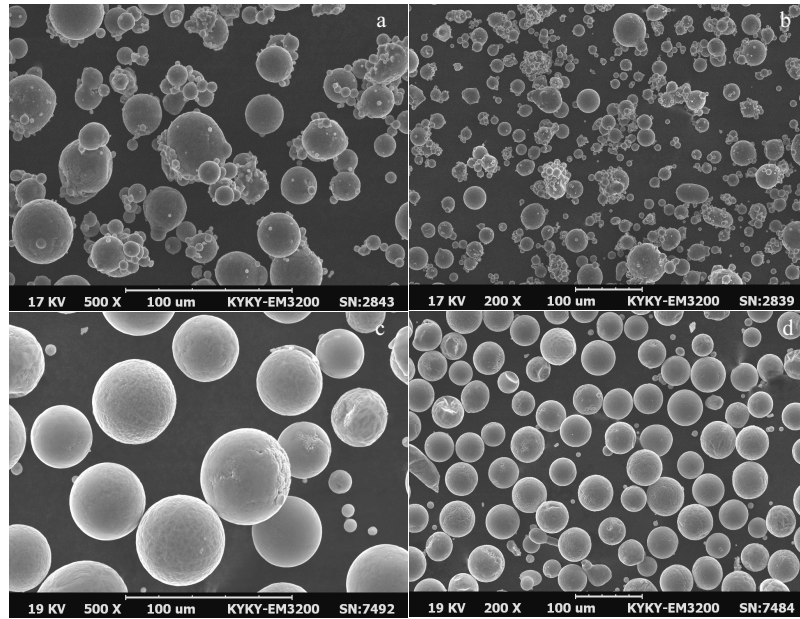


图 10 气雾化和离心雾化 AlSi10Mg 的粉末 SEM 形貌

Fig.10 SEM morphologies of AlSi10Mg powders prepared by gas atomization (a, b) and centrifugal atomization (c, d)

表 2 AlSi10Mg (15~53 μm)粉末性能对比

Table 2 Comparison of AlSi10Mg (15~53 μm) powder properties

Preparation method	Oxygen content/μg·g <sup>-1</sup>	Fluidity/s·50 g <sup>-1</sup>	Apparent density/g·cm <sup>-3</sup>	Tap density/g·cm <sup>-3</sup>
Gas atomization	<350	-	≤1.3	1.54
Centrifugal atomization	<200	49.65	1.51	1.67

下破碎雾化，从旋转盘边缘抛出后，落入惰性气氛冷却介质中自由凝固收缩，雾化过程中没有高速气流的干扰，因而颗粒的碰撞得到明显抑制，卫星颗粒大幅度减少。同时，金属液滴在惰性气氛中自由凝固收缩，粉末光洁球形度好。因此离心雾化制备粉末具有好的形貌和流动性。

3.2.3 微观组织

对离心雾化制备的 AlSi10Mg 粉进行粒度分级，得到 45~53 μm 样品，利用牙托粉镶样，对镶好的样进行粗磨、精磨和抛光，再用 Keller 试剂(2.5 mL HNO<sub>3</sub>+1.5 mL HCl+1 mL HF+95 mL H<sub>2</sub>O)腐蚀 20 s 后用乙醇清洗烘干，得到如图 11 所示的金相显微组织。从图 11 可看出离心雾化粉主要是中心为等轴晶，边部有少量枝晶和二次枝晶，利用关于铝合金粉末晶体结构中树枝状或非树枝状（等轴晶和细化晶粒）的晶粒直径与冷速经验公式（3）可估计不同粒径粉末的冷速<sup>[9]</sup>。

$$\lambda = A\varepsilon^{-n} \tag{3}$$

式中，λ—晶粒平均尺寸（μm）；ε—冷速（K/s）；A 和 n 为常数，对于铝合金分别为 45 和 0.25。

针对离心雾化制备的铝合金粉末，利用以上经验公式经计算得到 45~53 μm 粉的离心雾化冷速范围为 10<sup>3</sup>~10<sup>4</sup> K/s，相比于气雾化冷速范围 10<sup>4</sup>~10<sup>5</sup> K/s 小 1~2 个数量级<sup>[26]</sup>。因此，离心雾化的凝固时间更长，破碎液滴可球化时间更长更充分，球形度更好。

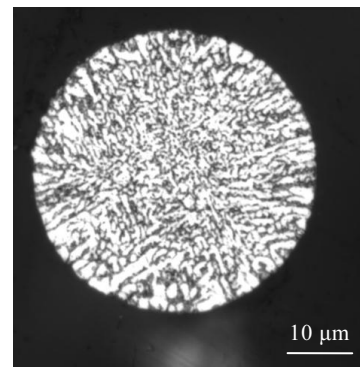


图 11 离心雾化 AlSi10Mg 粉横截面微观组织

Fig.11 Cross-section microstructure of centrifugal atomization AlSi10Mg powder

3.3 成型件物理性能研究

表 3 为 AlSi10Mg 沉积态件性能。从表 3 可以看出离心雾化样件的致密度和力学性能更好，尤其是抗拉强度和屈服强度达到 495 和 320 MPa，相比市场现有气雾化粉打印样件提高近 10%。图 12 为打印的气雾化和离心雾化 AlSi10Mg 的沉积态样件显微结构。从照片可以看出离心雾化样件孔洞缺陷少，熔覆道均匀。主要原因是离心雾化制备粉末的高流动性、高球形度、高松比等特性，对铺粉过程获得均匀平整的粉末层至关重要。一般来说，高球形度、高流动性粉末

表 3 AlSi10Mg 沉积态件性能

Table 3 Mechanical properties of AlSi10Mg as SLM-fabricated

Property	Centrifugal atomization	Gas atomization
Density/g·cm <sup>-3</sup>	2.668	2.650
Tensile strength/MPa	495	457
Yield strength/MPa	320	297
Elastic modulus/GPa	70.3	70.5
Elongation/%	9	9

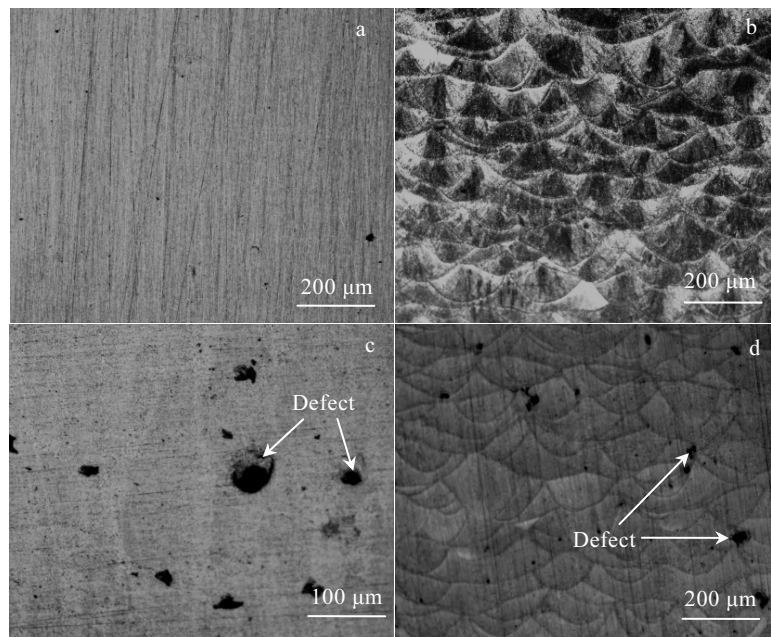


图 12 离心雾化和气雾化 AlSi10Mg 沉积态件显微结构

Fig.12 Microstructures of AlSi10Mg as SLM-fabricated: polishing surface (a) and deposition surface (b) of as centrifugal atomization; polishing surface (c) and deposition surface (d) of as gas atomization

铺粉过程中不易堵塞供粉系统，能铺成均匀薄层，同时松装密度高的粉末单层铺粉时填充密度高，熔池有更好的流体动力学稳定性<sup>[27]</sup>，进而提高 3D 打印零件的尺寸精度、表面质量，以及零件的致密度、组织均匀性和力学性能<sup>[28]</sup>。并且离心雾化法制备金属粉末的过程几乎不会产生空心粉，但气雾化法会产生空心粉末，主要归因于气雾化熔体破碎形成熔滴的袋式破碎机制，在袋式破碎过程中，熔体在雾化气体作用下首先形成袋状液膜，随后液膜破碎形成细小的熔滴，但破碎过程伴随着快速冷却与凝固，液膜熔体黏度急速升高，袋状液膜的破碎过程可能被抑制，变形过程增大，袋状液膜开口处闭合，导致袋内的雾化介质气体被包裹在熔滴内，且之后的凝固过程中无法排出便形

成空心粉末<sup>[29,30]</sup>。这种空心粉末在后续 3D 打印成形件内部容易形成孔洞缺陷<sup>[31]</sup>。

4 结论

1) 雾化盘形对比实验可知离心雾化制备铝合金粉末粒度符合正态分布，相比于锥形盘、双锥盘，球形盘雾化粉中位径相对小粒度分布窄粉末收得率较高。

2) 球形盘深度从 5 mm 升到 8 mm，相应粒度分布整体下降 4~5 μm；直径从 70 mm 增加到 85 mm，雾化粉粒径减小 9~10 μm；球形盘转速在 350~500 Hz 以内每提高 50 Hz 转速雾化粉粒径分布平均降约 10 μm。

3) 离心雾化 AlSi10Mg 粉末相对市场现有气雾化

粉标准几何偏差减少约 15%, 松装密度提高约 16%, 粉末流动性由无变为 49.65 s/50 g, 且球形度高、表面光洁无卫星粉、无空心粉。

4) 3D 打印离心雾化样件熔覆道均匀, 孔洞缺陷少, 致密度和力学性能明显优于市场现有气雾化样件, 尤其抗拉强度和屈服强度达到 495 和 320 MPa, 相比气雾化粉打印样件提高近 10%。

#### 参考文献 References

- [1] Le Guomin(乐国敏), Li Qiang(李强), Dong Xianfeng(董鲜峰) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2017, 46(4): 1162
- [2] Geng Jiangjiang(耿江江). *Thesis for Master*(硕士论文)[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2017
- [3] Liu Yunzhong(刘允中), Chen Zhenghua(陈振华), Huang Peiyun(黄培云). *Material Review*(材料导报)[J], 1997, 11(5): 11
- [4] Wang Chonglin(王崇琳), Wei Shuangqi(魏双祺), Song Jide(宋积德) et al. *Chinese Patent*(中国专利), 200410021160.0[P], 2005
- [5] Zhang Shaoming(张少明), Xu Jun(徐骏), Hu Qiang(胡强) et al. *Chinese Patent*(中国专利), 201210212549.8[P], 2012
- [6] Öztürk S, Arslan F. *Powder Metallurgy*[J], 2001, 44(2): 171
- [7] Öztürk S, Arslan F, Öztürk B. *Powder Metallurgy*[J], 2005, 48(2): 163
- [8] Öztürk S, Usta G, Öztürk B. *Powder Metallurgy*[J], 2011, 54(3): 393
- [9] Öztürk S, Arslan F, Öztürk B. *Powder Metallurgy*[J], 2003, 46(4): 342
- [10] Öztürk S, Öztürk B, Usta G. *Powder Metallurgy*[J], 2011, 54(5): 577
- [11] Liu Junxiang, Yu Qingbo, Guo Qiang. *Chemical Engineering Science*[J], 2012, 73(19): 44
- [12] Liu Junxiang, Yu Qingbo, Li Peng et al. *Applied Thermal Engineering*[J], 2012, 40(6): 351
- [13] Wang Dongxiang, Ling Xiang, Peng Hao. *Applied Thermal Engineering*[J], 2015, 84: 437
- [14] Tian Liang, Anderson Iver, Riedemann Trevor et al. *Powder Technology*[J], 2017, 308: 84
- [15] Xie J W, Zhao Y Y, Dunkley J J. *Powder Metallurgy*[J], 2004, 47(2): 168
- [16] Ahmed Mahmoud, Youssef M S. *Chemical Engineering Science*[J], 2014, 107: 149
- [17] Zhang Liping, Zhao Yuyuan. *Powder Technology*[J], 2017, 318: 62
- [18] Wang Dongxiang(王东祥), Cui Zhengwei(崔政伟), Yu Jianfeng(俞建峰) et al. *Food & Machinery*(食品与机械)[J], 2018, 34(10): 75
- [19] Wang Dongxiang(王东祥), Ling Xiang(凌祥), Peng Hao(彭浩) et al. *CIESC Journal*(化工学报)[J], 2017, 68(11): 4121
- [20] Wang Dongxiang(王东祥), Ling Xiang(凌祥), Peng Hao(彭浩). *Journal of Nanjing Tech University, Natural Science Edition*(南京工业大学学报, 自然科学版)[J], 2015, 37(3): 67
- [21] Liu Junxiang, Yu Qingbo, Li Peng et al. *Applied Thermal Engineering*[J], 2012, 40: 351
- [22] Wang Dongxiang, Ling Xiang, Peng Hao. *Applied Thermal Engineering*[J], 2014, 63: 387
- [23] Zhang Shuguang(张曙光), Yang Bicheng(杨必成), Yang Bo(杨博) et al. *Acta Metallurgica Sinica*(金属学报)[J], 2002, 38(8): 888
- [24] Zhao Xinming, Xu Jun, Zhu Xuexin et al. *Science in China Series E*[J], 2009, 52(10): 3046
- [25] Zhao Xinming(赵新明), Xu Jun(徐骏), Zhu Xuexin(朱学新) et al. *Powder Metallurgy Technology*(粉末冶金技术)[J], 2010, 28(1): 21
- [26] Zhao Xinming(赵新明), Xu Jun(徐骏), Zhu Xuexin(朱学新) et al. *Journal of University of Science and Technology Beijing*(北京科技大学学报)[J], 2009, 31(10): 1270
- [27] Lee Yousub, Zhang W. *26th Solid Freeform Fabrication Symposium*[C]. Austin: SFFS, 2015: 1154
- [28] Gao Chaofeng(高超峰), Yu Weiyong(余伟泳), Zhu Quanli(朱权利) et al. *Powder Metallurgy Industry*(粉末冶金工业)[J], 2017, 27(5): 53
- [29] Rabin B H, Smolik G R, Korth G E. *Materials Science and Engineering A*[J], 1990, 124(1): 1
- [30] Li Xinggang(黎兴刚), Liu Chang(刘畅), Zhu Qiang(朱强). *Aeronautical Manufacturing Technology*(航空制造技术)[J], 2019, 62(22): 22
- [31] Chen Yingying(陈莹莹), Xiao Zhiyu(肖志瑜), Li Shangkui(李上奎) et al. *Powder Metallurgy Industry*(粉末冶金工业)[J], 2018, 28(4): 56

## Investigation of Centrifugal Atomization Technology of High Fluidity Aluminium Alloy Powder for Additive Manufacturing

Liu Yingjie<sup>1,2,3</sup>, Hu Qiang<sup>1,2,3</sup>, Zhao Xinming<sup>2,3</sup>, Wang Zhigang<sup>2</sup>, Zhang Shaoming<sup>3</sup>, Wang Yonghui<sup>1</sup>, Zhang Jinhui<sup>2</sup>

(1. GRIPM Research Institute, GRINM Group Co., Ltd, Beijing 101407, China)

(2. Beijing COMPO Advanced Technology Co., Ltd, Beijing 101417, China)

(3. Beijing General Research Institute for Nonferrous Metals, Beijing 100088, China)

**Abstract:** An experimental device for centrifugal atomization of rotating disk was developed independently, then, high fluidity aluminium alloy powder for additive manufacturing was produced by the self-developed experimental device, and the better shape of the atomized disk was obtained by experimental study. The properties of aluminum alloy powder produced by centrifugal atomization and the physical properties of 3D printed parts were tested. Results show that the powder made by centrifugal atomization is of high fluidity, narrow size distribution, good sphericity, high apparent density, no hollow powder and the surface is smooth without satellite powder, etc. Moreover, the 3D printing sample of centrifugal atomization powder has more uniform laser cladding coating and less hole defects, and its density and mechanical properties are significantly better than those of gas atomization powder, especially, the tensile strength and yield strength of 3D printing sample reaches 495 and 320 MPa, which are nearly 10% higher than those of gas atomization powder.

**Key words:** additive manufacturing; centrifugal atomization; aluminum alloy powder; powder properties

---

Corresponding author: Hu Qiang, Ph. D., Professor, Beijing General Research Institute for Nonferrous Metals, Beijing 100088, P. R. China, Tel: 0086-10-61667637, E-mail: huqiang@grinm.com