

# 转盘雾化制备铝合金粉末过程中的 液体铺展和粒径分布研究

李龙<sup>1, 2, \*</sup>, 彭磊<sup>1, 2</sup>, 赵伟<sup>1, 2</sup>

1. 中国科学院力学研究所 高温气体动力学国家重点实验室, 北京 100190
2. 中国科学院大学 工程科学学院, 北京 100049

**摘要:**为研究高球形度、高粒径集中度、无卫星粉的增材制造用铝合金粉末制备技术,开发了一套高温转盘雾化实验装置。基于该装置,研究了铝液的流动铺展规律,发现、命名并分析了转盘表面存在的 4 个典型区域。采用扫描电子显微镜 (SEM)分析了 1060 纯铝和 AlSi10Mg 铝合金粉末样品的微观结构。采用单峰 Extreme 模型,对典型实验的粉末粒径分布曲线进行了拟合分析。研究结果表明:铝液流量减小引起了分裂模式转变,进而提高了细粉率、降低了中位径。研究对比了平面、锥面和弧面等 3 种盘面构型对中位径的影响。分析了转盘直径和转速对 1060 纯铝粉中位径的影响规律,通过线性回归拟合得到了一个新的中位径理论公式。

**关键词:**多相流; 粉体; 制备; 粒径分布; 转盘; 雾化; 铝合金

**中图分类号:**TF123; TG146.2<sup>+1</sup> **文献标识码:**A

## Study of liquid spreading and particle size distribution during the preparation of aluminum alloy powder by rotary disc atomization

LI Long<sup>1, 2, \*</sup>, PENG Lei<sup>1, 2</sup>, ZHAO Wei<sup>1, 2</sup>

1. State Key Laboratory of High-Temperature Gas Dynamics, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China
2. School of Engineering Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract:** An experimental setup using high temperature rotating disc centrifugal atomization was developed to study the preparation technology of the aluminum alloy powder for additive manufacturing with high sphericity, high particle size concentration and no satellite powder. The flow spreading pattern of the aluminum liquid was investigated, and four typical regions were found to exist on the surface of the disc, which were named and analyzed. The microstructures of the 1060 and AlSi10Mg powder samples were analyzed by scanning electron microscopy (SEM). The powder particle size distribution curves for typical experiments were analyzed by fitting a single-peak Extreme model. A shift in the splitting mode caused by a decrease in the flow rate of the aluminum liquid was investigated, which was effective in increasing the fines rate and reducing the median diameter. The effects of three different disk configurations, plane, tapered and curved, on the median diameter were compared. The effect law of the rotational speed and disc diameter on the median diameter of 1060 aluminum powder was analyzed, and a new theoretical formula of the particle size was obtained by regression analysis.

**Keywords:** multiphase flow; powders; preparation; size distribution; rotary disc; atomization; aluminum alloy

收稿日期: 2023-04-28; 修回日期: 2023-07-03; 录用日期: 2023-07-18

基金项目: 高温气体动力学国家重点实验室青年基金项目 (QN20210004)

\* 通信作者 E-mail: lilong@imech.ac.cn

引用格式: 李龙, 彭磊, 赵伟. 转盘雾化制备铝合金粉末过程中的液体铺展和粒径分布研究 [J]. 实验流体力学, doi: 10.11729/sytltx20230059.  
LI L, PENG L, ZHAO W. Study of liquid spreading and particle size distribution during the preparation of aluminum alloy powder by rotary disc atomization[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, doi: 10.11729/sytltx20230059.

## 0 引言

随着“工业 4.0”和“中国制造 2025”的提出,增材制造技术在航空、航天和汽车等领域的应用不断深入,以铝合金为代表的轻质合金材料需求快速增长。铝合金具有资源丰富、密度低、比强度较高的优点。2019 年 SmarTech 报告指出,2018 年增材制造铝合金粉出货量增长 43%,且未来 10 年将以每年近 50% 的速度增长。

增材制造要求铝合金粉末具有粒径集中度高(15~53  $\mu\text{m}$  和 53~150  $\mu\text{m}$ )、球形度高、含氧量低、无卫星粉和空心粉等特性。金属液体雾化是增材制造用金属粉末的主要制备方式<sup>[1]</sup>,主要基于气雾化、等离子体旋转电极雾化<sup>[2-3]</sup>和等离子体雾化<sup>[4]</sup>等原理。采用这些方法制备的金属粉末粒径大、粒径分布宽、球形度差且含有卫星粉和空心粉,无法为增材制造提供高性能粉末。与气雾化和旋转电极雾化相比,采用转盘雾化技术制备的金属粉末具有粒径小、粒径集中度高、球形度高、无卫星粉和空心粉、成本低廉等优势,更加适用于增材制造。

受限于高温热烧蚀,转盘雾化技术目前主要用于制备低温锡粉和功能材料等,转盘雾化制备铝合金及更高温度合金粉末的相关实验研究仍在开展之中。20 世纪 90 年代,佐藤富雄等<sup>[5-7]</sup>采用钼盘片制备了铝镁钨合金粉末,后又进一步分析了粉末高温酸化特性<sup>[8]</sup>。Angers 等研究了转盘表面涂层技术<sup>[9]</sup>并采用倒置转盘雾化技术制备了 2024 铝合金粉末<sup>[10]</sup>,研究了 AZ91 镁合金在转盘雾化中产生的不规则颗粒<sup>[11]</sup>。Labrecque 等<sup>[12]</sup>也对倒置转盘离心雾化制备镁合金技术进行了研究。陈振华等<sup>[13-14]</sup>提出了金属熔体多级快速凝固过程成粉理论并制取了铝锌合金

粉末。温树德<sup>[15]</sup>基于转盘雾化技术研究了铅和铝雾化,并对 8640 钢进行了试探性雾化。Öztürk 等<sup>[16-18]</sup>基于带鳍片转盘,采用喷嘴冷却转盘方法研究了锡、铝等金属的雾化技术。Eslamian 等<sup>[19]</sup>在采用转盘离心雾化 6061 铝合金的过程中添加碳化硅粉末,形成了金属基复合粉末。刘英杰等<sup>[20]</sup>采用转盘雾化法制备了 AlSi10Mg 铝合金粉末,并对粉末各项性能和 3D 打印结构件性能进行了测试。Plookphol 等<sup>[21]</sup>分析了转盘离心雾化制备 SAC305 粉末的影响参数。Zhang 和 Zhao<sup>[22-25]</sup>研究了离心雾化转杯几何形状和关键工艺参数对锡粉粒径和分布的影响并对金属液体的流动发展进行了分析。Alejandra 等<sup>[26]</sup>研究了向雾化颗粒吹气对离心雾化制备铜粉的影响。王东祥等<sup>[27-30]</sup>分析了转盘雾化的若干流体力学问题,并采用熔融铝进行了离心雾化高温相似试验研究。从现有研究成果看,转盘雾化制备铝合金粉末技术目前仍处于实验室研究阶段,以制备少量样品和分析粉末性能为主,转盘表面金属液体的流体动力学问题研究和系统的粉末粒径分布规律研究较少。

本文基于独立开发的一套高温转盘雾化制粉实验装置,针对 1060 纯铝和 AlSi10Mg 铝合金,研究金属液体的铺展流动特征,分析流量、转速、盘径和转盘表面构型等对金属粉末性能的影响规律,基于线性回归理论分析得到粒径公式,以期铝合金粉末的转盘离心雾化制备提供理论和技术支撑。

## 1 实验材料和方法

### 1.1 实验材料

采用 1060 纯铝和 AlSi10Mg 铝合金作为实验材料,化学成分见表 1 和 2,表 3 和 4 分别列出了两者的物理性质(表中温度为实验中熔融铝液温度)。

表 1 1060 纯铝的化学成分 (%)

Table 1 Chemical composition of 1060 pure aluminum (%)

Al	Fe	Si	Cu	Zn	V	Mn	Mg	Ti
99.6	0.35	0.25	0.05	0.05	0.05	0.03	0.03	0.03

表 2 AlSi10Mg 铝合金的化学成分 (%)

Table 2 Physical properties of 1060 pure aluminum (%)

Al	Si	Zn	Mg	Fe	Mn	Ti	Cu	Ni	Sn	Pb
else	9.70	0.60	0.50	0.50	0.40	0.10	0.07	0.05	0.05	0.05

注:“else”表示铝合金中除其他化学成分外,其余皆为 Al 的含量。

表 3 1060 纯铝的物理性质  
Table 3 Physical properties of 1060 pure aluminum

Temperature /K	Density / $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	Viscosity / $(\text{Pa} \cdot \text{s})$	Surface tension coefficient / $(\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$
1150	2.310	$0.926 \times 10^{-3}$	0.843

表 4 AlSi10Mg 铝合金的物理性质<sup>[31]</sup>  
Table 4 Physical properties of AlSi10Mg alloy<sup>[31]</sup>

Temperature /K	Density / $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	Viscosity / $(\text{Pa} \cdot \text{s})$	Surface tension coefficient / $(\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$
1150	2719	$1.3 \times 10^{-3}$	0.826

### 1.2 高温转盘雾化制粉实验装置

本文基于现有研究积累，开发了一套高温转盘雾化制粉实验装置(图 1 和 2)。该装置主要由加热炉、坩埚(内有塞杆)、转盘、高速电机、雾化室、真空泵、循环水冷系统(包括冷却水池、水泵、冷却水管道等)、氮气充装及循环冷却系统(含氮气钢瓶、风机、冷却风嘴及相关管道等)、集粉罐、高清摄像机、计算机等组成。加热炉为电阻式，电压 380 V，最高温度 1200 °C，温度误差  $\pm 1$  °C。坩埚、塞杆都为石墨材质，坩埚容积 8.8 L，塞杆头部为锥面，与坩埚下底面内锥孔配合密封。雾化室直径 2.5 m，高度 3.5 m，上半部为圆柱体，下半部为 80°倒锥体。高速电机为标准电主轴，采用变频器控制转速，最高转速  $6 \times 10^4$  r/min。雾化室壁面为夹层冷却结构，以循环冷却水增压冷却。水泵为不锈钢多级离心泵(上海雨洲泵业制造有限公司，32CDLF4-160 型)，流量  $4 \text{ m}^3/\text{h}$ 。

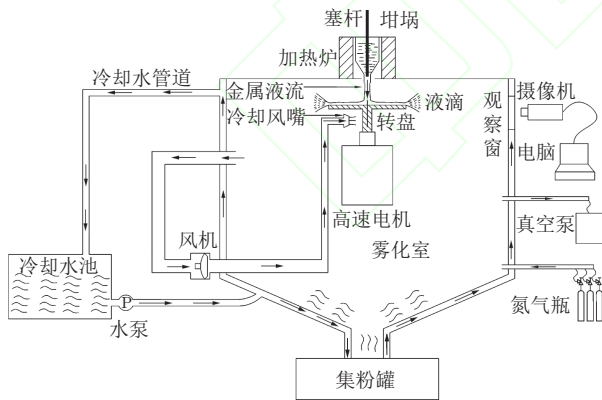


图 1 高温转盘雾化制粉实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of high-temperature rotary disc atomization powder-making experimental device

为防止粉末氧化并提高球形度，雾化室内部为惰性气体环境：先以真空泵将雾化室抽真空，再充入高纯氮气至微正压。真空泵为旋片式(上海万经泵业制造有限公司，2X-100 型)，极限压力  $6 \times 10^{-2}$  Pa。采用标准 40 L 钢瓶供应氮气(体积分数 99.9%)，减压后充入雾化室并保持微正压 100 Pa，防止外部空

气进入。为快速冷却飞离转盘边缘的金属液滴，同时防止转盘上表面热量经转轴向下传递至高速电机内部，设计了一路氮气循环冷却系统，对转盘和转轴周围液滴进行冷却。冷却氮气采用高压风机(浙江亚士霸电机有限公司，HG-3000 型，最大风压 38 kPa，流量  $318 \text{ m}^3/\text{h}$ )增压。雾化室侧壁开了 2 个标准视窗(视窗直径约 90 mm)，视窗外安装 2 台高清摄像机，视频信号通过网线传输至计算机进行实时显示和存储。雾化室下部安装了收集粉末的集粉罐。



图 2 高温转盘雾化制粉实验装置照片

Fig. 2 Photograph of high temperature disc atomization powder making experimental device

### 1.3 不同构型的转盘设计

转盘是雾化制粉装置的核心部件，需承受高温金属液体的持续冲刷，应具有耐高温、耐熔蚀的特性；为保证金属液体与转盘充分接触，转盘上表面应具有良好的润湿性；为防止金属液体的热量沿转轴向下传递至高速电机内部，转盘还应具有低热导率。本文设计了平面、锥面和弧面等 3 种构型的转盘(图 3)，用以研究不同构型转盘的雾化性能。为保证润湿性及耐高温、耐熔蚀特性，转盘以耐高温、耐熔蚀的复合材料制作，并进行了提高润湿性的加工

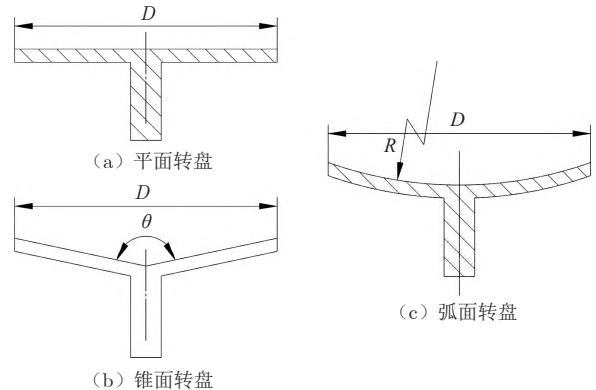


图 3 不同构型的转盘

Fig. 3 Disc configuration

处理。转盘具体参数见后文实验结果介绍。

#### 1.4 转盘雾化实验

实验中,将雾化室抽真空至压力 100 Pa 以下,然后充入体积分数 99.9% 的氮气至微正压 100 Pa (表压)。向坩埚中投入一块铝锭(直径 80 mm,长 150 mm),加热炉升温至 880 °C,铝锭完全熔化为铝液。启动高速电机至设定转速,拔出塞杆,铝液垂直流下至转盘中心,迅速沿盘面铺展流动至转盘边缘,高速甩出雾化为液滴。液滴在表面张力作用下收缩为球形并在飞行过程中与氮气快速对流换热,凝固为粉末,最终下落汇集至集粉罐中。图 4 为转盘雾化制备球形铝粉实验的典型照片。从图中可以看到:亮红色的高温铝液在铺展过程中与转盘发生热传递,使得转盘升温变红;转盘周围布满大量凝固后飘落的铝粉。



图 4 转盘雾化制备球形铝粉的实验图片

Fig. 4 Picture of spherical aluminum powder prepared by centrifugal atomization of rotating disc

#### 1.5 粉末取样及筛分处理

受水跃或沉积层的影响,部分铝液并非均匀铺展于盘面,而是斜向飞溅而出,形成大片铝渣或铝丝。研究者普遍认为铝渣或铝丝不属于离心雾化产物,需以筛网将其过滤,收集粒径 750  $\mu\text{m}$  以下的粉末进行统计分析。采用二分器从收集的粉末中取出 50 g 样品进行筛分,将各筛网上的粉末收集至样品

瓶并精确称重,基于筛下质量百分比计算粉末累积质量分数。

使用的分析测试仪器包括:扫描电子显微镜(Hitachi SU1510,二次电子分辨率 3.0 nm);粉末二分器(国标 3 mm  $\times$  32 格,浙江欣锴实验仪器设备有限公司);机械振筛机(河南亚创机械设备有限公司, YC-200 型);标准分样筛(直径 200 mm, 60、100、150、300、400 目,上海言锦筛网加工厂);高精度电子秤( $3000 \pm 0.02$  g)。

## 2 实验结果与讨论

### 2.1 转盘表面铝液铺展流动形貌表征

图 5 为雾化实验结束后转盘上表面的照片(实验转速分别为 18000、24000、30000 r/min)。以 18000 r/min 转速的转盘为例(图 6):在直径 25 mm 范围内,铝膜铺覆稀疏且非常薄,命名为“光洁区(clean area)”;在直径 25~44 mm 范围内,转盘表面铺覆了薄薄的铝层,手触有磨砂感,命名为“磨砂区(frosted area)”。在直径 44~48 mm 范围内,磨砂层上表面又覆了一层非常薄的铝膜,命名为“铺展区(spreading area)”;“铺展区”之外(直径大于 48 mm)即为常见的“沉积层区(deposit layer area)”。

从图 5 和 6 可以看到:越靠近转盘边缘,沉积层越厚(可达 1~2 mm);在部分实验中,甚至还出现了沉积层上又覆一层沉积层的“二次沉积”现象;随着转速升高,“磨砂区”范围扩大,在部分实验中,沉积层出现了螺旋棱或径向棱,相关研究认为该现象可能是由转盘和氮气的对流换热所造成的:转盘边缘处的金属液膜较薄,加热量小于冷却量,液膜更容易降温凝固并累积。

沉积层容易造成离心雾化过程中出现“水跃”,

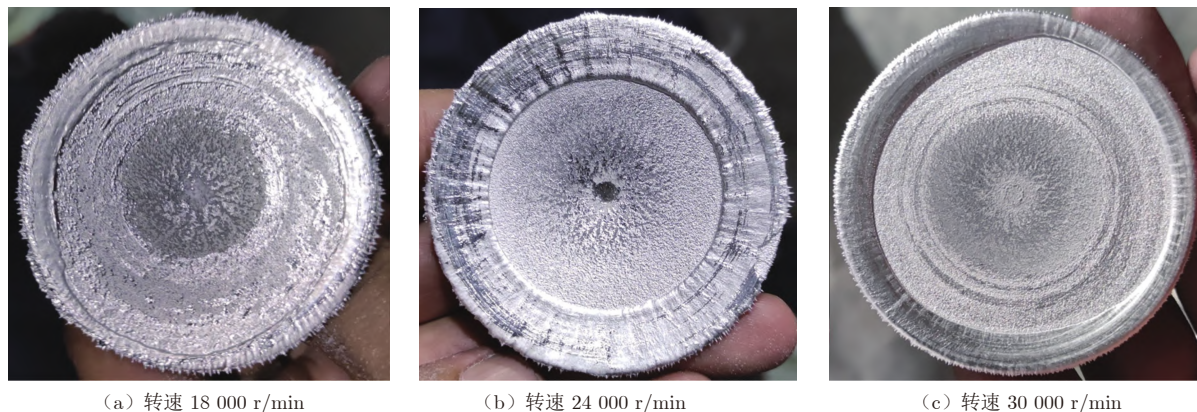


图 5 雾化实验结束后的转盘上表面照片

Fig. 5 Photograph of the disc at the end of atomization

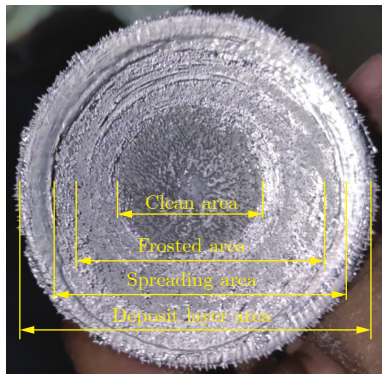


图 6 转盘表面各典型区域命名

Fig. 6 Description of the different typical areas on the disc surface

产生较大的铝渣，降低粉末收集率，因此实验中应尽量减少沉积层。在转盘雾化实验中，由于铝液流动不够充分且在转盘停止后易迅速凝固为尺寸较大的铝渣，难以观察转盘表面各典型区域，导致相关研究较少，因此，转盘表面各典型区域的产生原因还亟待开展进一步的研究分析。

图 7 为转速 30000 r/min 的实验结束后的转盘照片。从图中可以看到转盘边缘存在许多“锯齿”（约 420 个），雾化液滴就是在这些锯齿点位上形成。该实验现象与佐藤富雄等<sup>[6]</sup>的研究结果一致。

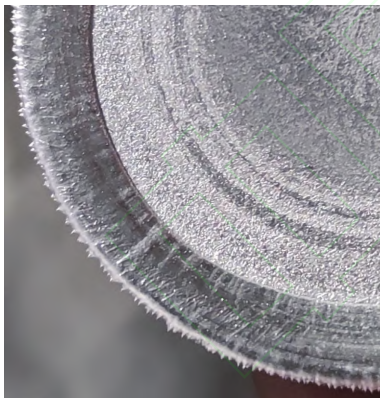


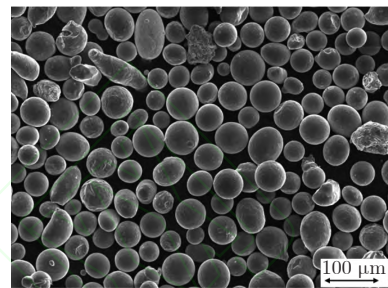
图 7 转盘边缘锯齿形雾化点照片

Fig. 7 Photo of the jagged atomization point on the edge of the disc

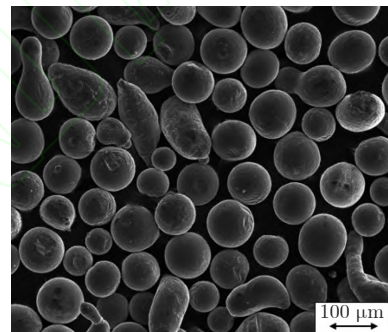
## 2.2 粉末微观形貌表征

选取粒径在 15~53 μm 之间的 1060 纯铝和 AlSi10Mg 合金铝粉末分析微观形貌。图 8 为粉末的扫描电镜图片。图 9<sup>[20]</sup> 给出了典型的气雾化制备的 AlSi10Mg 合金铝粉末形貌进行对比。从图中可以看出，在同样的惰性气体环境下，转盘雾化粉末的球形度好、表面光洁、大小均匀、无卫星粉，而气雾化粉末中充满了大小不一的卫星粉。造成这种差异的主要原因在于：在气雾化制粉过程中，液体被气流破碎为大小不一的液滴，在湍流和旋涡作用下，发生多次

碰撞和黏附，小颗粒和大颗粒液滴团聚为卫星粉；而在转盘雾化制粉过程中，液体从转盘中心向边缘铺展、分散流动，在转盘边缘雾化为液滴后，沿转盘切线方向飞出，继续在雾化室内分散运动，而雾化室内氮气比较稳定，液滴在飞行过程中不易碰撞和团聚，避免了卫星粉的出现。卫星粉会导致粉末流动性变差，在增材制造中产生孔隙缺陷。因此，转盘雾化制备的粉末球形度和流动性更好，非常适合增材制造。



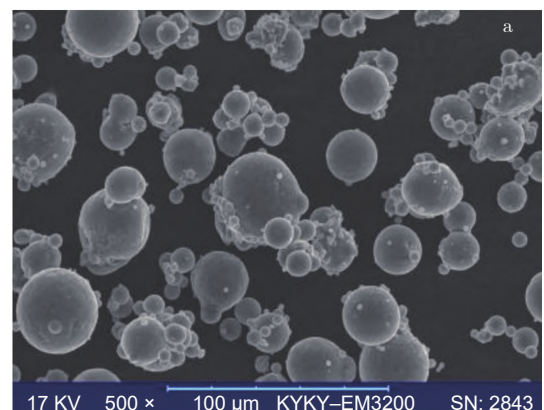
(a) 1060 纯铝粉扫描电镜图片



(b) AlSi10Mg 合金铝粉扫描电镜图片

图 8 粒径 15~53 μm 的粉末扫描电镜图片

Fig. 8 Scanning electron microscope images of powders between 15-53 μm

图 9 惰性气雾化的 AlSi10Mg 粉末扫描电镜图片<sup>[20]</sup>Fig. 9 Scanning electron microscope image of AlSi10Mg powder atomized by inert gas<sup>[20]</sup>

## 2.3 粉末粒径分布分析

从某次典型实验(转速 39900 r/min, 转盘直径 59 mm)制备的 1060 纯铝粉中取样 50 g 进行数据分

析,得到该样品的粒径分布曲线,如图10所示(左侧纵坐标为差分布,右侧为累积分布)。为表征粉末的粒径集中度,采用单峰 Extreme 函数对差分曲线进行拟合分析,函数表达式如下:

$$\begin{aligned} y &= y_0 + Ae^{(-e^{-z} - z + 1)} \\ z &= (x - x_c)/w \end{aligned} \quad (1)$$

式中:  $x$ 、 $y$  分别为横、纵坐标;  $z$  为计算中间值;  $x_c$  为中心点横坐标;  $y_0$  为偏移量;  $A$  为幅值;  $w$  为宽度。

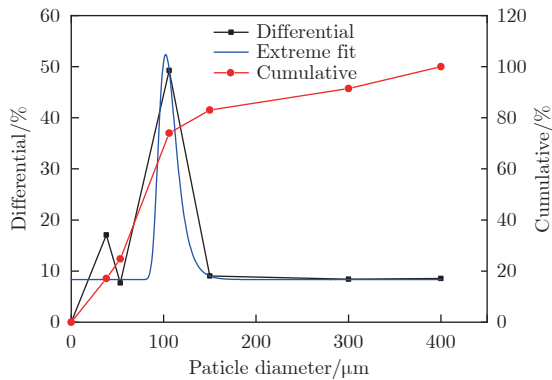


图10 粉末粒径差分布、累积分布及 Extreme 函数拟合  
Fig. 10 Particle size differential distribution, cumulative distribution, and Extreme fit

从图中可以看到,实验数据峰值出现在  $105.7 \mu\text{m}$  处。Extreme 函数拟合曲线的  $y_0 = 0.08343$ ,  $A = 0.44052$ , 中心  $x_c = 102.18724$ , 宽度  $w = 9.27$ , 说明该样品粒径分布非常窄。0~150  $\mu\text{m}$  累积分布为 83.04%, 对应增材制造中使用的 15~53  $\mu\text{m}$ (选择性激光熔化 SLM, Selective Laser Melting) 和 53~150  $\mu\text{m}$ (激光近净成型 LENS, Laser Engineered Net Shaping) 这 2 个区间,说明转盘雾化制备的粉末粒径分布非常符合增材制造的要求。

## 2.4 分裂模式对粒径分布的影响

在转盘离心雾化过程中,由于液体流速和转盘转速不同,液体存在 3 种分裂模式,即直接滴状分裂(DDF)、丝状分裂(LD)和膜状分裂(FD)<sup>[32]</sup>,如图 11 所示。

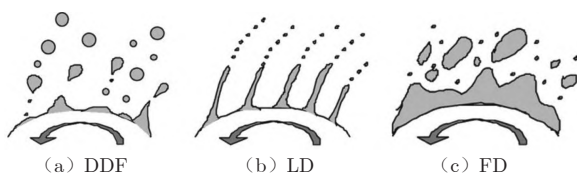


图 11 转盘离心雾化中的 3 种分裂模式<sup>[32]</sup>  
Fig. 11 Three disintegration modes in centrifugal atomization<sup>[32]</sup>

随着液体流速增大,分裂模式逐渐由 DDF 模式向 LD 模式和 FD 模式变化。Champagne 等<sup>[33-34]</sup>发

现,对于各种金属(如 Al、Cu 和 Zn),DDF 模式下液滴的最终形状为球形,而 LF 模式下更易形成椭球形状。从 DDF 模式到 LF 模式和 LF 模式到 FD 模式的转变流量公式<sup>[34]</sup>为:

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

式中:  $D$  为转盘直径,单位 m;  $\omega$  为转速,单位 rad/s;  $\rho$  为密度,单位  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $\sigma$  为表面张力,单位 N/m;  $\mu$  为动力学黏性系数,单位 Pa·s;  $K$  为常数(从 DDF 向 LD 转变时,  $K = 0.07$ ; 从 LD 向 FD 转变时,  $K = 1.33$ )。从式(2)可以看出:当转速  $\omega$  增大、转盘直径  $D$  减小时,转变流量  $Q_t$  降低,有利于从 DDF 模式过渡到 LF 模式,并最终过渡到 FD 模式。

为研究不同分裂模式对雾化效果的影响,采用不同孔径的坩埚导液管来控制铝液流量。图 12 为相同条件下(转速 18000 r/min,转盘直径 59 mm,转盘为弧面盘(弧面半径 90 mm),加热温度 880  $^{\circ}\text{C}$ )、金属流量  $Q$  分别为 5.33 和 1.23 mL/s 的 1060 纯铝粉的粒径差分布和累积分布。从粒径分布曲线(红色和黑色曲线)可以看到:与大流量(5.33 mL/s)粉末相比,小流量(1.23 mL/s)粉末的粒径分布曲线更窄,即小流量粉末粒径集中度更高,细粉末含量也更高。从粒径累积分布曲线(蓝色和绿色曲线)可以看到:小流量下 0~150  $\mu\text{m}$  粉末的质量分数为 63.3%,粉末中位径  $d_{50} = 137.1 \mu\text{m}$ ;大流量的 0~150  $\mu\text{m}$  粉末含量为 51.52%,中位径  $d_{50} = 151.3 \mu\text{m}$ 。

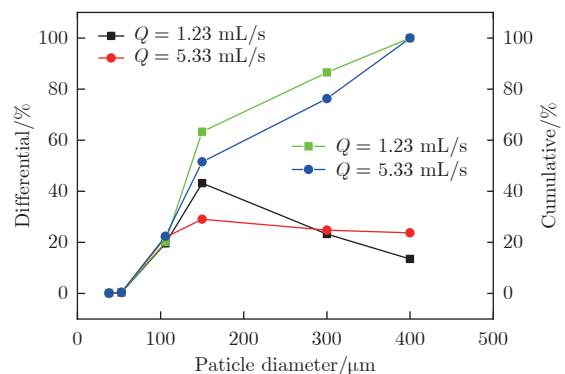


图 12 不同流量下的粉末粒径分布和累积分布  
Fig. 12 Powder particle size distribution and cumulative percentage at different flow rates

结合表 3 中 1060 纯铝的物理性质,根据式(2)可以计算得到不同转速下 DDF 模式向 LD 模式转变的临界流量  $Q_1$  和 LD 模式向 DD 模式转变的临界流量  $Q_2$ ,如表 5 所示。从表中可以看到,对于上文转速 18000 r/min、转盘直径 59 mm 的实验,  $Q_1 =$

1.28 mL/s。实验中的小流量 1.23 mL/s 低于临界流量  $Q_1$ , 属于 DDF 模式; 而大流量 5.33 mL/s 处于  $Q_1$  和  $Q_2$  之间, 属于 LD 模式。

表 5 离心分裂模式转变临界流量

Table 5 Centrifugal atomization critical flow rate at different speeds

$\omega / (\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	$D / \text{mm}$	$Q_1 / (\text{mL} \cdot \text{s}^{-1})$	$Q_2 / (\text{mL} \cdot \text{s}^{-1})$
6000	59	2.47	46.93
12000	59	1.63	30.97
18000	59	1.28	24.28
24000	59	1.08	20.43

本节实验得到的数据表明, DDF 模式下的液滴中位径小于 LD 模式(即小流量下的中位径更小), 粒径分布也更窄, 这与 Champagne 的分裂模式理论一致。因此, 在其他条件相同时, 采用较小流量使分裂模式变为 DDF 模式, 能够获得更小的粉末中位径和更高的细粉率。

## 2.5 中位径影响参数规律

转盘雾化粉末的中位径与液体密度、表面张力、转速、转盘直径等参数相关。Walton 等<sup>[35]</sup>给出了计算离心雾化粉末中位径  $d_{50}$  的公式:

$$d_{50} = 3.8 \left( \frac{\sigma}{\rho D \omega^2} \right)^{0.5} \quad (3)$$

Labrecque 等<sup>[12]</sup>结合体积流量的影响, 给出了 AZ91 镁合金离心雾化粉末中位径的理论公式:

$$d_{50} = 4.27 \times 10^6 \cdot \frac{1}{\omega^{0.95}} \cdot \frac{1}{D^{0.61}} \cdot \left( \frac{\sigma}{\rho} \right)^{0.42} \cdot Q^{0.12} \quad (4)$$

Champagne 等<sup>[36]</sup>提出了预测离心雾化粉末中位径的公式:

$$d_{50} = \frac{3.65Q^{0.06}}{\omega D^{0.58}} \left( \frac{\sigma}{\rho} \right)^{0.46} \quad (5)$$

Dunkley 等<sup>[37]</sup>给出了球形液滴中位径计算公式:

$$d_{50} = \left( \frac{6\sigma}{\rho \omega^2 R} \right)^{0.5} \quad (6)$$

Tornberg<sup>[38]</sup>提出了一个中位径理论公式:

$$d_{50} = \sqrt{\frac{4.8\sigma}{\rho \omega^2 R [1 - (\omega R)^{0.93} \mu]}} \quad (7)$$

国为民等<sup>[39]</sup>认为, 熔化的薄层液态金属雾化为极小的液滴瞬间抛出时, 所受的离心力理论上与表面张力相等。离心雾化粉末中位径的理论公式<sup>[39]</sup>为:

$$d_{50} = \sqrt{\frac{12\sigma}{\rho \omega^2 D}} \quad (8)$$

以上各式中:  $R$  为转盘半径, 单位 m;  $Q$  为金属液体流量, 单位  $\text{m}^3/\text{s}$ 。

以上理论模型虽然不尽相同, 但液滴中位径的变化规律基本一致, 在液体物性参数固定的情况下, 都是随着转速和转盘直径的增大而减小; 对于不同的液体, 密度越大、表面张力越小, 中位径越小。

### 2.5.1 不同转速对中位径的影响

在其他参数固定(加热温度  $880^\circ\text{C}$ , 转盘直径 60 mm, 弧面半径 90 mm, 金属流量 5.33 mL/s)的情况下, 分别进行了转速为 6000、12000、18000、24000 r/min 的离心雾化实验, 4 个转速对应的中位径  $d_{50}$  分别为 266.8、179.0、147.7、116.0  $\mu\text{m}$ 。图 13 为实验值与理论公式(3)~(8)的计算值对比。从图中可以看到, 各曲线的整体趋势都是中位径随转速增大而减小: 当转速在 10000 r/min 以下时, 理论计算值明显大于实验值, Champagne 公式的计算值更接近实验值; 当转速在 10000 r/min 以上时, 实验值位于各计算值之间, 国为民(Guo)和 Labrecque 公式的计算值与实验值吻合较好。

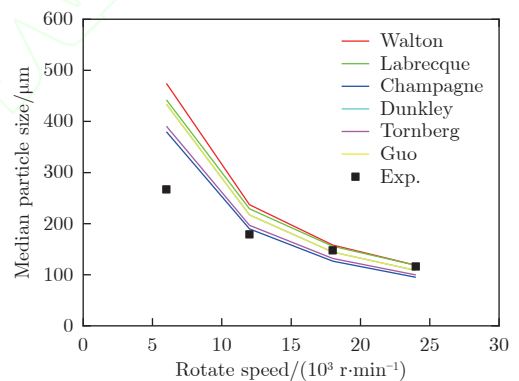


图 13 不同转速下的粉末中位径实验值与计算值对比  
Fig. 13 Comparison of experimental data and theoretical values of  $d_{50}$  at different rotational speeds

实验刚开始时, 转盘初始温度较低, 铝液会迅速在转盘表面凝结, 使转盘动平衡变差, 若此时转盘转速较高, 极易导致转盘剧烈振动甚至损坏。为保护转盘和电极, 在实验中采用了逐渐增大转盘转速直至实验所需转速的方式。因此, 高转速实验条件下制备的粉末中会掺混一部分较低转速下产生的相对较粗的粉末, 降低了高转速实验条件下的细粉率, 导致通过实验得到的  $d_{50}$  值偏大, 而实际高转速下的  $d_{50}$  相对较小, 与理论计算值更为接近。针对这一问题, 需要进一步改进实验方法和分析手段来进行验证。

### 2.5.2 不同转盘直径对粉末中位径的影响

在其他参数固定(加热温度  $880^\circ\text{C}$ , 转盘弧面半

径 90 mm, 金属流量 2.94 mL/s, 转速 24000 r/min) 的情况下, 针对直径 40、50、60 mm 的转盘进行实验, 将实验值与理论计算值进行对比, 结果如图 14 所示。可以看到, 粉末中位径的实验值和计算值都呈现出随转盘直径增大而减小的规律: 直径为 40 mm 时, 中位径为 123.4  $\mu\text{m}$ , 与 Tornberg 公式的计算值最为接近; 直径为 50 和 60 mm 时, 中位径分别为 96.4 和 86.5  $\mu\text{m}$ , 与 Champagne 公式的计算值最为接近。

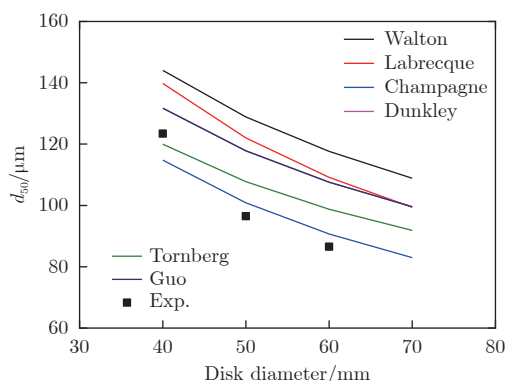


图 14 不同转盘直径下的粉末中位径实验值与计算值对比

Fig. 14 Experimental data and theoretical values of median diameter of powders with varying disc diameters

### 2.5.3 不同转盘构型对粉体中位径的影响

在其他参数固定(加热炉温度 880  $^{\circ}\text{C}$ , 转盘直径 60 mm, 转速 24000 r/min, 流量 2.94 mL/s) 的情况下, 基于图 3 中的 3 种转盘构型, 分别针对平面盘、12 $^{\circ}$ 锥面盘、弧面盘 A(弧面半径 90 mm) 和弧面盘 B(弧面半径 80 mm) 进行实验。对实验得到的粉末进行取样和筛分, 分别统计  $d_{10}$ 、 $d_{50}$  和  $d_{90}$ (粒径累计分布为 10%、50%、90% 时对应的粒径), 结果如图 15 所示。从图中可以看到: 在 4 种转盘构型下,  $d_{10}$  都约为 54.0  $\mu\text{m}$ , 而  $d_{50}$ 、 $d_{90}$  的差异较大; 弧面盘

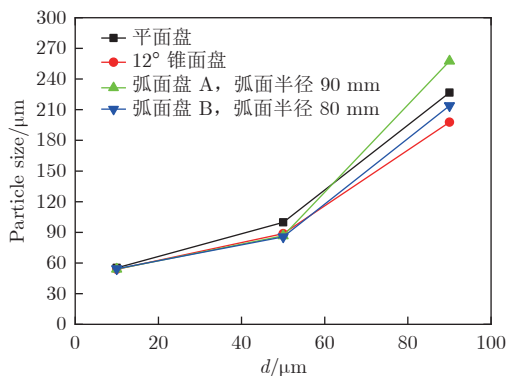


图 15 不同转盘构型下的粉末粒径统计

Fig. 15 Particle size statistics for different disc configurations

B 的  $d_{50}$  最小(85.5  $\mu\text{m}$ ), 平面盘的  $d_{50}$  最大(99.8  $\mu\text{m}$ ); 12 $^{\circ}$ 锥面盘的  $d_{90}$  最小(197.8  $\mu\text{m}$ ), 弧面盘 A 的  $d_{90}$  最大(257.6  $\mu\text{m}$ )。因此, 若需要粒径非常小的粉末, 可以采用  $d_{50}$  最小的弧面盘 B(弧面半径 80 mm); 若需绝大部分粉末都较细, 可以采用  $d_{90}$  最小的 12 $^{\circ}$ 锥面盘。

### 2.5.4 中位径线性拟合公式

通过量纲分析可知, 粉末中位径  $d_{50}$  与雾化参数  $[\sigma/(\rho D\omega^2)]^{0.5}$  成线性关系。图 16 给出了 1060 纯铝粉的中位径  $d_{50}$  实验值随雾化参数  $[\sigma/(\rho D\omega^2)]^{0.5}$  的变化情况及线性拟合曲线。中位径线性回归拟合公式为:

$$d_{50} = 3.22 \left( \frac{\sigma}{\rho D\omega^2} \right)^{0.5} \quad (9)$$

拟合曲线的截距为 0, 拟合斜率为 3.22, 标准误差为 0.102, 表明中位径与雾化参数线性关系良好。

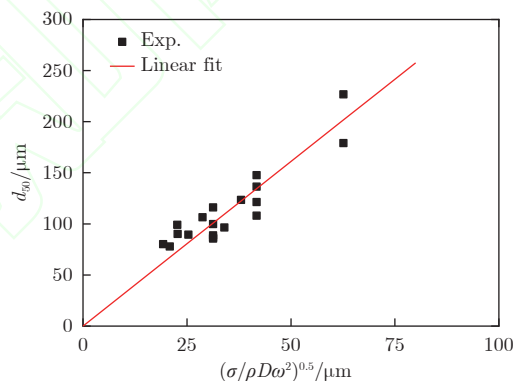


图 16 1060 纯铝粉中位径实验值及线性拟合曲线

Fig. 16 Data of median diameter of 1060 pure aluminum with atomization parameters and linear fitting curve

## 3 结论

本文开展了转盘雾化制备铝合金粉末的实验研究, 得到如下结论:

1) 铝液在转盘表面铺展流动的过程中, 存在“光洁区”“磨砂区”“铺展区”和“沉积层区”等 4 个典型区域。

2) 液体流量降低, 会使转盘雾化分裂模式由丝状分裂向直接滴状分裂转变, 能够降低粉末中位径并提高细粉率。

3) 在本文实验的平面、锥面和弧面转盘中, 弧面盘的  $d_{50}$  最小, 锥面盘的  $d_{90}$  最小。

4) 1060 纯铝粉的中位径  $d_{50}$  与雾化参数  $(\sigma/\rho D\omega^2)^{0.5}$  的线性关系良好, 通过线性回归拟合, 提出了一个新的中位径理论公式。



致谢: 本文实验操作得到了技术人员樊志勇的帮助, 扫描电镜实验得到了雷现奇老师的帮助, 特此致谢。

### 参考文献:

- [1] NEĪKOV O D, NABOYCHENKO S, MOURACHOVA I. Handbook of non-ferrous metal powders: technologies and applications[M]. Burlington: Elsevier, 2009: 125-127.
- [2] KAUFMANN A R. Method and apparatus for making powder: US3099041[P/OL]. 1963-07-30[2023-04-28]. <https://www.freepatentsonline.com/3099041.pdf>.
- [3] KAUFMANN A. Production of pure, spherical powders: US3802816[P]. 1974-04-09[2023-04-28]. <https://www.freepatentsonline.com/3802816.pdf>
- [4] 邹宇, 廖先杰, 赖奇, 等. 3D打印用球形钛粉制备技术研究现状[J]. 中国材料进展, 2019, 38(11): 1093-1101.  
ZOU Y, LIAO X J, LAI Q, et al. Research status of preparation technology of spherical titanium powder for 3D printing[J]. Materials China, 2019, 38(11): 1093-1101. doi: 10.7502/j.issn.1674-3962.201808033
- [5] SATOH T, OKIMOTO K, CHOI C J, et al. Comparison of characteristics of rapidly solidified Zn-22Al superplastic ribbon by melt spinning and the powder by centrifugal atomization[J]. Journal of the Japan Society of Powder and Powder Metallurgy, 1991, 38(1): 6-9. doi: 10.2497/jjspm.38.6
- [6] SATOH T, OKIMOTO K, NISHIDA S I. Optimum producing conditions of rapidly solidified powder using centrifugal atomization method[J]. Journal of the Japan Society of Powder and Powder Metallurgy, 1993, 40(12): 1149-1153. doi: 10.2497/jjspm.40.1149
- [7] SATOH T, OKIMOTO K, NISHIDA S I, et al. Characteristics of Al-10%Mg pre-alloyed powder and its extruded bar using centrifugal atomization process[J]. Journal of the Japan Society of Powder and Powder Metallurgy, 1994, 41(8): 933-938. doi: 10.2497/jjspm.41.933
- [8] SATOH T, SAKAMOTO M, LIU H N. Application of rapid solidification process to high chromium cast iron and evaluation of mechanical properties and oxidation resistance of the P/M alloys[J]. Journal of the Japan Society of Powder and Powder Metallurgy, 2001, 48(12): 1119-1125. doi: 10.2497/jjspm.48.1119
- [9] ANGERS R, TREMBLAY R, DESROSIERS L, et al. Rotating disk coatings for centrifugal atomization of aluminium and magnesium alloys[J]. Canadian Metallurgical Quarterly, 1996, 35(3): 291-297. doi: 10.1016/0008-4433(96)00004-3
- [10] ANGERS R, DUBÉ D, TREMBLAY R. Inverted disk centrifugal atomization of 2024[J]. International Journal of Powder Metallurgy, 1994, 30(4): 429-434.
- [11] ANGERS R, TREMBLAY R, DUBÉ D. Formation of irregular particles during centrifugal atomization of AZ91 alloy[J]. Materials Letters, 1997, 33(1-2): 13-18. doi: 10.1016/s0167-577x(97)00072-4
- [12] LABRECQUE C, ANGERS R, TREMBLAY R, et al. Inverted disk centrifugal atomization of AZ91 magnesium alloy[J]. Canadian Metallurgical Quarterly, 1997, 36(3): 169-175. doi: 10.1016/S0008-4433(97)00007-4
- [13] 陈振华, 周多三, 王云, 等. 快速凝固Al-Zn-Mg-Cu粉末合金的研究[J]. 湖南冶金, 1991(2): 22-24.
- [14] 陈振华, 黄培云, 蒋向阳, 等. 制取快速凝固微细金属粉末的装置和原理[J]. 中国有色金属学报, 1994, 4(1): 43-49. doi: 10.3321/j.issn:1004-0609.1994.01.011
- [15] 温树德. 采用离心式雾化生产金属粉末[J]. 国外金属热处理, 1997(3): 29-32.
- [16] ÖZTÜRK S, ARSLAN F. Production of rapidly solidified metal powders by water cooled rotating disc atomisation[J]. Powder Metallurgy, 2001, 44(2): 171-176. doi: 10.1179/003258901666220
- [17] ÖZTÜRK S, ARSLAN F, ÖZTÜRK B. Effect of production parameters on cooling rates of AA2014 alloy powders produced by water jet cooled, rotating disc atomisation[J]. Powder Metallurgy, 2003, 46(4): 342-348. doi: 10.1179/003258903225008599
- [18] ÖZTÜRK S, ÖZTÜRK B, USTA G. Characteristics of rapidly solidified Cu-10%Sn alloy powders produced by water jet cooled rotating disc atomisation[J]. Powder Metallurgy, 2011, 54(5): 577-584. doi: 10.1179/1743290110y.0000000002
- [19] ESLAMIAN M, RAK J, ASHGRIZ N. Preparation of aluminum/silicon carbide metal matrix composites using centrifugal atomization[J]. Powder Technology, 2008, 184(1): 11-20. doi: 10.1016/j.powtec.2007.07.045
- [20] 刘英杰, 胡强, 赵新明, 等. 增材制造用高流动性铝合金粉末制备技术研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2021, 50(5): 1767-1774.  
LIU Y J, HU Q, ZHAO X M, et al. Investigation of Centrifugal Atomization Technology of High Fluidity Aluminium Alloy Powder for Additive Manufacturing[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2021, 50(5): 1767-1774.
- [21] PLOOKPHOL T, WISUTMETHANGOON S, GONSRANG S. Influence of process parameters on SAC305 lead-free solder powder produced by centrifugal atomization[J]. Powder Technology, 2011, 214(3): 506-512. doi: 10.1016/j.powtec.2011.09.015
- [22] ZHANG L P, ZHAO Y Y. Particle size distribution of tin powder produced by centrifugal atomisation using rotating cups[J]. Powder Technology, 2017, 318: 62-67. doi: 10.1016/j.powtec.2017.05.038
- [23] ZHAO Y Y. Analysis of flow development in centrifugal atomization: part I. Film thickness of a fully spreading melt[J]. Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering, 2004, 12(5): 959-971. doi: 10.1088/0965-0393/12/5/013
- [24] ZHAO Y Y. Analysis of flow development in centrifugal atomization: part II. Disintegration of a non-fully spreading melt[J]. Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering, 2004, 12(5): 973-983. doi: 10.1088/0965-0393/12/5/014
- [25] ZHAO Y Y. Considerations in designing a centrifugal atomiser for metal powder production[J]. Materials &

- Design, 2006, 27(9): 745–750.  
doi: 10.1016/j.matdes.2005.01.011
- [26] ALEJANDRA CEGARRA SALGES S, PIJUAN J, HERNÁNDEZ R, et al. Effect of processing parameters on copper powder produced by novel hybrid atomisation technique[J]. Powder Metallurgy, 2020, 63(2): 142–148.  
doi: 10.1080/00325899.2020.1724431
- [27] WANG D X, LING X, PENG H, et al. Experimental investigation of ligament formation dynamics of thin viscous liquid film at spinning disk edge[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2016, 55(34): 9267–9275.  
doi: 10.1021/acs.iecr.6b01428
- [28] 王东祥, 凌祥, 彭浩, 等. 转盘表面黏性薄液膜稳态流动特性数值模拟[J]. 化工学报, 2017, 68(6): 2321–2327.  
WANG D X, LING X, PENG H, et al. Numerical simulation of stable flow dynamics of viscous film on spinning disk surface[J]. CIESC Journal, 2017, 68(6): 2321–2327.  
doi: 10.11949/j.issn.0438-1157.20170040
- [29] 王东祥, 崔政伟, 俞建峰, 等. 牛顿型黏性物料转盘离心雾化成粒特性[J]. 食品与机械, 2018, 34(10): 75–80.  
WANG D X, CUI Z W, YU J F, et al. Particle characteristics of centrifugal atomization by rotary disk for Newtonian viscous fluid[J]. Food & Machinery, 2018, 34(10): 75–80.  
doi: 10.13652/j.issn.1003-5788.2018.10.016
- [30] WANG D X, LING X, PENG H, et al. High-temperature analogy experimental investigation on dry granulating characteristic of rotating disk for waste heat utilization of molten slag[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 125: 846–855.  
doi: 10.1016/j.applthermaleng.2017.07.075
- [31] XU J X, CHEN C Y, SHEN L Y, et al. Atomization mechanism and powder morphology in laminar flow gas atomization[J]. Acta Physica Sinica, 2021, 70(14): 140201.  
doi: 10.7498/aps.70.20202071
- [32] HINZE J O, MILBORN H. Atomization of liquids by means of a rotating cup[J]. Journal of Applied Mechanics, 1950, 17(2): 145–153.  
doi: 10.1115/1.4010093
- [33] CHAMPAGNE B, ANGERS R. Fabrication of powders by the rotating electrode process[J]. International Journal of Powder Metallurgy, 1980, 16(4): 359–365.
- [34] CHAMPAGNE B, ANGERS R. REP atomization mechanisms[J]. PMI Powder Metallurgy International, 1984, 16: 125–128.
- [35] WALTON W H, PREWETT W C. The production of sprays and mists of uniform drop size by means of spinning disc type sprayers[J]. Proceedings of the Physical Society. Section B, 1949, 62(6): 341–350.  
doi: 10.1088/0370-1301/62/6/301
- [36] CHAMPAGNE B, ANGERS R. Size distribution of powders atomized by the rotating electrode process[J]. Modern Development in Powder Metallurgy, 1980, 12: 83–104.
- [37] DUNKLEY J J, ADERHOLD D. Centrifugal atomization of metal powders[J]. Advances in Powder Metallurgy and Particulate Materials, 2007, 1: 2–8.
- [38] TORNBERG C. Gas Efficiency in different atomization systems[J]. Advances in Powder Metallurgy & Particulate Materials, 1992, 1: 127–135.
- [39] 国为民, 陈生大, 冯涤. 等离子旋转电极法制取镍基高温合金粉末工艺的研究[J]. 航空工程与维修, 1999(5): 44–46.  
GUO W M, CHEN S D, FENG D. Study on process on nickel superalloy powder by the plasmarotation electrode[J]. Aviation Engineering & Maintenance, 1999(5): 44–46.  
doi: 10.3969/j.issn.1672-0989.1999.05.019

#### 作者简介:



李 龙(1985—), 男, 宁夏固原人, 博士, 副研究员。研究方向: 超声速燃烧实验技术, 火箭发动机燃烧, 离心雾化制备金属粉末技术。通信地址: 北京市海淀区北四环西路 15 号中国科学院力学研究所 LHD(100190)。  
E-mail: lilong@imech.ac.cn

(编辑: 孙春晖)