

文章编号 1004-924X(2018)06-1398-09

## 声辐射力驱动角形金属粉末微输送特性

王洪成, 张 婷, 吴立群\*, 陈让让, 张俐楠  
(杭州电子科技大学 机械工程学院, 浙江 杭州 310018)

**摘要:**为解决载气式、超声振动和惯性力等现有微输送方法在较宽输送速率范围内难以克服的角形金属粉体堵塞难题, 本文研究以超声驻波场声辐射力为驱动力, 通过悬浮分散微喷嘴内密集态粉末颗粒, 实现金属粉末的稳定微输送。以激光熔覆技术中常用且易堵塞的 100 目、200 目和 300 目角形铬粉和 200 目角形钛合金粉为对象, 进行脉冲式和连续式两种模式的微输送精度和稳定性实验研究。实验显示, 300 目角形铬粉单脉冲输送质量可控范围为 0.4~16 mg 且连续输送速率可控范围为 6.0~65 mg/s; 脉冲微输送质量的变异系数随微喷嘴内径的增大而大幅降低(小于 2%)、连续输送速率的变异系数均低于 6%。实验结果表明, 声辐射力驱动微米级角形金属粉末具有较大的输送速率可控范围、输送精度、稳定性和多种角形金属粉末的普适性, 可从根本上解决角形粉末喷嘴微输送的堵塞问题。本文研究结果也可为其它尺度金属粉末和非金属粉末的微输送提供参考。

**关键词:**激光熔覆; 金属粉末; 微输送; 超声驻波; 声辐射力

**中图分类号:** TG156.99; TP271.3 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20182606.1398

## Micro-feeding characteristics of chromium powder with irregular micron-size particles actuated by acoustic radiation force

WANG Hong-cheng, ZHANG Ting, WU Li-qun\*, CHEN Rang-rang, ZHANG Li-nan

(School of Mechanical Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)

\* Corresponding author, E-mail: wuliquan@hdu.edu.cn

**Abstract:** Stable micro-feeding of micron-size metal powder is one of the core issues in advanced metal parts manufacturing technology, including laser cladding deposition and 3D micro-printing. This study solves the difficult problem associated with the aggregation of irregular shape metal powder, which is unavoidable in existing methods when the feeding mass has a broad range. Such methods are based on the use of a gas-powder feeding system, ultrasonic vibration, pulse inertia force and etc. This study uses acoustic radiation force in an ultrasonic standing wave field as the driving force, so that the aggregating powder is suspended in a nozzle to realize a stable pulse dose in a continuous feed mode. The commonly used irregular shape chromium and titanium alloy powder, which can block the nozzle easily during laser cladding deposition, is adopted as the research object to conduct experiments on micro-feeding accuracy and stability. The particle sizes are 100-mesh, 200-mesh, and 300-mesh. The experimental results show that the pulse dose mass for the 300-mesh irregular shape chromium powder is in

**收稿日期:** 2017-10-17; **修订日期:** 2017-12-08.

**基金项目:** 浙江省自然科学基金资助项目(No. LQ17E050012, No. LZ15E050004); 国家自然科学基金资助项目(No. 51775154); 江苏省三维打印装备与制造重点实验室开放基金项目(No. BM2013006); 浙江省公益性技术应用研究计划资助项目(No. 2016C31045)

the range 0.4 to 16 mg and that the continuous feed rate is in the range 6.0 to 65 mg/s. The coefficient of variation for the pulse dose process decreases with an increase in the outlet diameter of the micro-nozzle, and the minimum value of the coefficient of variation is below 2%. All the coefficients of variation for the continuous feeding rate are below 6%. As a result, the proposed method for micro-feeding micron-size irregular shape metal powder, actuated by acoustic radiation force, has high accuracy, high stability, and good universality for different particles. Thus, this method can solve the problem of powder aggregation. The results proposed in this paper can also serve as reference for the micro-feeding of other kinds of powders based on different materials and with different shapes.

**Key words:** laser cladding deposition; metal powder; micro-feeding; ultrasonic standing wave; acoustic radiation force

## 1 引言

激光熔覆作为一种新兴的表面改性技术,将微米级金属粉末直接送入由激光产生的熔池中凝固成型,形成一种新的复合材料,达到改善基体表面耐磨、耐热、耐腐蚀及其强度的目的<sup>[1]</sup>,在航空航天、机械电子和武器制造等行业具有巨大的应用潜力<sup>[2]</sup>。对于以侧向送粉和同轴送粉<sup>[3]</sup>为主要方式的同步送粉激光熔覆技术,金属粉末微输送是关键技术,输送的精度和稳定性对熔覆零件的精度和性能起着决定性的作用<sup>[4-5]</sup>。按照机理,送粉方式主要有载气式送粉和超声振动送粉。其中,载气式送粉<sup>[6]</sup>是基于固气两相流原理通过压力气流携带粉末从喷嘴流出,但输送过程中容易形成粉末密集堆积面而堵塞流道,粉末汇聚性差,需要设计准直气罩<sup>[7]</sup>以控制粉末流向;超声振动送粉压电换能器产生的超声波直接<sup>[8]</sup>或通过水介质间接<sup>[9]</sup>与微喷嘴相连产生振动,通过优化喷嘴内粉末与管壁间的摩擦力、喷嘴尺寸和超声频率等参量可实现微米级铜、锌、铁粉输送速率为0.5~11 mg/s,但仍存在粉末在较宽输送速率范围内喷嘴出口易堵塞导致输送不稳定的难题。基于此,课题组前期以低频压电换能器产生的脉冲惯性力为主动动力<sup>[10]</sup>,通过组合驱动电压波形的手段在一定程度上可改善均匀球形 TC4 钛合金粉末微输送过程中的结拱现象<sup>[11]</sup>。

相比于球形粉末,角形(非球形或不规则形状)粉末在沉积时具有分散和反弹程度较小,汇聚性、稳定性和利用率较高等方面的明显优势<sup>[12]</sup>且价格低廉。然而,角形粉末尺度不均一和低流动性也会带来更严重的粉末堵塞现象。解决角形粉

末在微喷嘴内堵塞的根本方法是充分打散集聚在一起的粉末颗粒,而超声驻波悬浮<sup>[13]</sup>是利用高频超声波在声源和反射端之间反复叠加形成高强驻波,高强驻波在媒质中通过非线性效应产生足够大的声辐射力抵消重力以实现规则球形物体稳定悬浮<sup>[14-15]</sup>和圆柱形物体的悬浮旋转运动<sup>[16]</sup>。因此,本文利用超声驻波场中声辐射力实现微喷嘴内集聚的角形金属粉末的悬浮分散,从而从根本上解决了角形金属粉末在微输送过程中的堵塞难题。

## 2 实验

### 2.1 实验系统

如图1所示,超声驻波场声辐射力驱动角形金属粉末微输送实验系统由调节架、连接件、内构锥形微喷嘴、超声电源(杭州鑫特超声设备有限公司,超声频率为30 kHz,额定输出功率为300 W)、压电换能器、变幅杆、铝质反射端、显微摄像系统、二维工作台及其控制器和精密电子天平(BSM-120.4,分辨率为0.1 mg)等部分组成。其中,超声电源、压电换能器、变幅杆和反射端构成超声驻波场发生系统。压电换能器将超声电源产生的交变电流信号转变为机械振动,变幅杆(辐射端)将微小的机械振动信号放大传播到空气媒质中,形成超声波,超声波在行进过程中遇到铝质反射端沿原路返回并在铝质表面产生半波损失,当辐射端与反射端的距离为超声波半波长的整数倍时,将形成超声驻波场。

内构锥形微喷嘴由内径3.2 mm、外径5.2 mm的硼硅酸盐玻璃管经加热拉制而成<sup>[17]</sup>。硼硅酸盐玻璃管经自制拉制仪拉制和截取后的显微

图片如图 2 所示,出口端部平整,出口内径  $D$  在  $10\sim 1\ 000\ \mu\text{m}$  内可控。

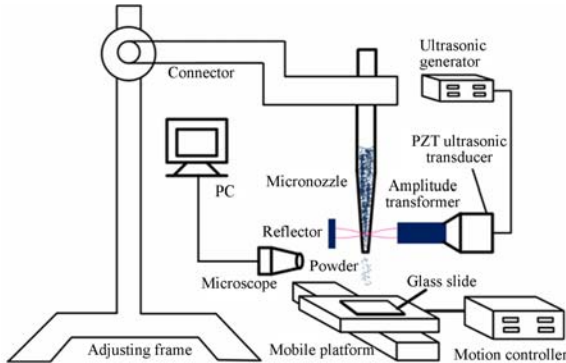
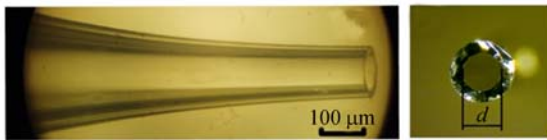


图 1 声辐射力驱动角形金属粉末微输送实验系统示意图

Fig. 1 Irregular shape metal powder micro-feeding system actuated by acoustic radiation force



(a) 横截面 (b) 轴向剖面  
(a) Cross section (b) Axial section

图 2 内构锥形玻璃微喷嘴显微照片

Fig. 2 Micrograph of micro glass tapered nozzle

### 2.2 实验材料

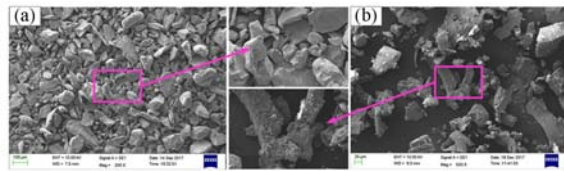
本文以激光熔覆技术中常用的 100 目、200 目和 300 目角形铬粉和 200 目角形钛合金粉(上海馨鼎金属材料有限公司)为对象进行微输送实验研究。四种规格的角形金属粉末粒径分布如表 1 所示,铬粉和钛合金粉的密度分别为  $7.2\ \text{g}/\text{cm}^3$  和  $4.5\ \text{g}/\text{cm}^3$ 。图 3 所示为 200 目两种金属粉末的扫描电镜图,粉末颗粒形状不规则,单个颗粒尺寸跨度较大。相比于尺寸均一的球形粉末,角形铬粉极易在喷嘴内集聚并形成图 4 所示的结块、塞状和结拱等多种结构的堵塞现象。结块的主要成因是较大颗粒卡在微喷嘴内部阻碍上方粉末向下运动;塞状的主要成因是喷嘴截面尺寸相同的端部过长;结拱的主要成因是粉末颗粒在喷嘴某一截面密集程度过大,形成较为稳定的“拱形”结构。除此之外,颗粒与微喷嘴内壁、颗粒间的相互摩擦产生的静电也将加剧堵塞现象的发生。

表 1 角形金属粉末粒径分布

Tab. 1 Particle size distribution of metal powders

Powder materials	Mesh	$d_{av}/\mu\text{m}$	$d_{10}/\mu\text{m}$	$d_{50}/\mu\text{m}$	$d_{90}/\mu\text{m}$	$D_{100}/\mu\text{m}$
Chromium	100	157.1	34.3	123.8	272.1	300
Chromium	200	78.2	21.8	62.6	142.0	160
Chromium	300	45.4	15.1	36.7	95.1	120
Titanium Alloy	200	75.2	23.2	63.4	148.3	163

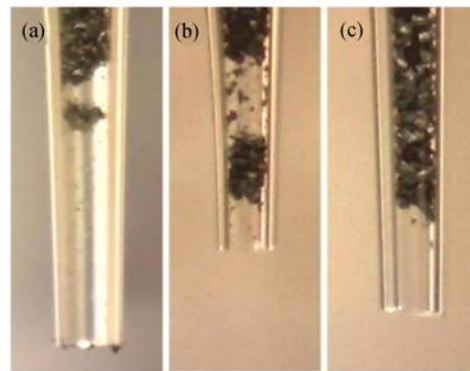
注:  $d_i$  表示测试粉末颗粒累计粒度分布百分数达到  $i\%$  时所对应的粒径,它的物理意义是粒径小于它的颗粒数占  $i\%$ ;  $d_{av}$  表示粒度分布的平均粒径。



(a) 铬粉 (b) 钛合金粉  
(a) Chromium (b) Titanium alloy

图 3 角形金属粉末扫描电镜图

Fig. 3 SEM images of irregular shape metal powders



(a) 结块 (b) 塞状 (c) 结拱  
(a) Arching (b) Plugging (c) Blocking

图 4 角形铬粉堵塞现象

Fig. 4 Aggregating phenomena of irregular shape in micro-nozzle

### 2.3 声辐射力驱动角形金属粉末微输送过程分析

实验过程中,微喷嘴竖直装夹且出口部分位于变幅杆端部和铝质反射端之间,如图 5 所示。变幅杆作为声源发射端通过空气媒介向反射端发送超声波,声源按余弦规律作简谐运动,其振动方程表示为:

$$y_1 = A \cos(\omega t - k z), \quad (1)$$

式中:  $y_1$  为声源的振动位移,  $A$  为声源的振动幅值,  $\omega$  为声源的振动圆频率 ( $2\pi f$ , 本文  $f = 30$  kHz),  $k$  为波数 ( $k = \omega/c$ ,  $c$  为声速)。由于微喷嘴内壁壁厚极小(通常小于  $10 \mu\text{m}$ )且玻璃是较好的声学材料, 声波通过玻璃的穿透力较强。因此, 本文忽略微喷嘴材料对声波传播路径的影响。当声波到达与传播方向垂直的铝质反射端平面时, 由于相比空气媒介铝具有较大的声学阻抗, 声波将在铝质表面发生反射并产生半波损失, 反射波的波动方程为:

$$y_2 = A\cos(\omega t + kz + \pi) = -A\cos(\omega t + kz). \quad (2)$$

入射波和反射波叠加后在空气媒介中的波动方程为:

$$y = y_1 + y_2 = 2A\sin(\omega t)\sin(kz). \quad (3)$$

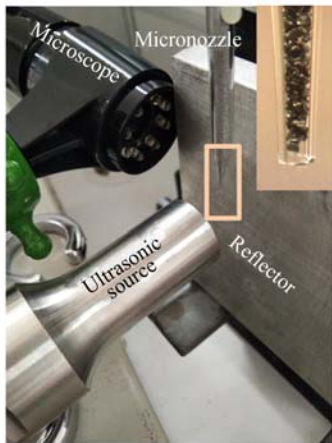


图 5 声辐射力驱动角形金属粉末微输送实物照片  
Fig. 5 Photo of irregular shape metal powder micro-feeding system actuated by acoustic radiation force

根据声波传播过程中介质质点振动的运动方程、连续性方程和物态方程建立声压  $p$ 、介质质点振动速度  $u$  和媒介密度的变化量  $\rho$  三个声场特征参数之间的关系。

$$\begin{cases} v = v_0 \sin(kz) \cos(\omega t) \\ p = -p_0 \cos(kz) \sin(\omega t) \end{cases}, \quad (4)$$

式中:  $v_0$  为速度幅值,  $p_0$  为声压幅值,  $z$  为在声波传播方向上距离波节的位置。

依据 Govkov 理论<sup>[18]</sup>, 通过对声辐射时间平均势  $V$  的计算, 可得出超声驻波场中球形颗粒所受轴向声辐射力的计算公式:

$$F_z = \frac{5}{6} \pi R^3 \rho k v_0^2 \sin(2kz), \quad (5)$$

式中:  $R$  为球形颗粒的密度,  $F_z$  的方向指向驻波节点。

如果将角形粉末颗粒近似为由无数个极小球形颗粒堆积而成, 那么在宏观上角形粉末颗粒所受声辐射力表现为无数个球形颗粒所受的合力, 方向也指向驻波节点。当微喷嘴轴线位于驻波节点附近或与驻波节点重合时, 角形金属颗粒将在声辐射力作用下沿微喷嘴径向向轴线(即驻波节点附近)运动。

根据能量守恒定律, 当声源能量一定时, 声源和反射端距离越长, 声辐射力越小。因此, 本文在给微喷嘴预留足够空间的条件下尽可能地提高声辐射力, 将辐射端与反射端的距离设定为半波长的 4 倍(图 6), 即有:

$$B = 4 \cdot \frac{\lambda}{2} = 2\lambda = 2c \cdot \left(\frac{1}{f}\right) = 22.5 \text{ mm}, \quad (6)$$

其中:  $c$  为声波在空气媒介中的传播速率,  $340 \text{ m/s}$ ;  $f$  为超声频率,  $30 \text{ kHz}$ 。

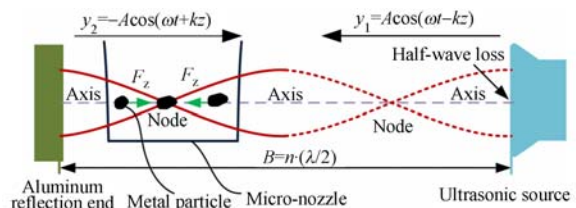


图 6 超声驻波场形成及微粒受力示意图

Fig. 6 Formation of ultrasonic standing wave field and forces applied on particles

与球形颗粒不同的是, 角形颗粒的不规则形状会加剧颗粒运动的不稳定性。其原因在于, 虽然超声驻波场声压呈非线性分布, 但声压相对于声源轴线是轴对称的, 因此中心对称的球形粉末颗粒在声场中某一位置所受的声辐射力合力矩是确定的; 而角形颗粒在声场中某一位置姿态的改变将导致所受声辐射力合力矩的变化, 并造成在声场中运动的不稳定性, 这种不稳定性也有利于打散密集堆积相粉末。

如图 7 所示, 驻波场中粉末颗粒的位置可分为 3 类。在假设颗粒间无碰撞的情况下, 其受力和运动分析如下: I 位置位于声源轴线的上方, 声辐射力  $F_z$  指向波节, 其水平分量  $F_{xz}$  驱动颗粒向波节(微喷嘴轴线)运动, 垂直分量  $F_{zy}$  与自身重力  $G_0$  同向并驱动颗粒向下运动, 直至从微喷嘴出口喷出; II 位置位于声源轴线的下方, 类似地,

水平分量  $F_{zx}$  驱动颗粒向波节运动,  $F_{zy}$  与自身重力  $G_0$  反向。若颗粒质量较小,  $|G_0| < |F_{zy}|$  时, 颗粒向波节运动, 然而由式(5)可知, 颗粒所受声辐射力随  $z$  的减小而减小, 即距离波节越近, 声辐射力越小, 因此在颗粒向波节运动的过程中  $F_{zy}$  不断减小; 当  $|F_{zy}| < |G_0|$  时, 颗粒将向下运动直至从微喷嘴出口喷出。Ⅲ位置刚好位于波节的下方, 由以上分析可知,  $|F_{zy}| = |F_z| < |G_0|$ , 颗粒向下运动, 直至从微喷嘴出口喷出。因此, 微输送过程中, 颗粒因自身形状不规则产生的不规则运动和颗粒间随机、频繁的大量碰撞都有利于打散粉末, 且最终在声辐射力和重力合力的作用下输送出微喷嘴。

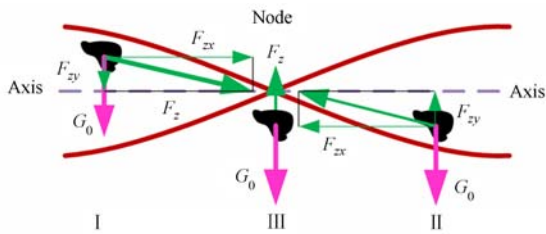


图 7 驻波场中粉末颗粒受力示意图

Fig. 7 Force analysis of particles in ultrasonic standing wave

#### 2.4 两种微输送模式及其表征

激光熔覆技术中, 根据场合的不同金属粉末微输送模式可分为脉冲式和连续式两种, 本文将在粉末上分别施加脉冲声辐射力和连续声辐射力来实现上述两种模式的微输送并研究其输送特性。

(1) 脉冲输送模式: 采用单脉冲声辐射力作用下粉末输送质量及其不同脉冲输送量的变异系数分别表征脉冲输送的精度(脉冲输送质量越小, 精度越高)和稳定性;

(2) 连续输送模式: 采用单位时间粉末输送量(输送速率)及其多个单位时间内输送量的变异系数分别表征连续输送的精度(输送速率越小, 精度越高)和稳定性。

变异系数用  $C \cdot V$  表示, 计算方法如下:

$$C \cdot V = (S/\bar{x}) \times 100\%, \quad (7)$$

式中:  $S$  为粉末输送精度的标准差,  $\bar{x}$  为粉末输送精度的均值。

此外, 颗粒目数和微喷嘴出口内径  $D$  两个主

要参量将作为微输送特性研究的系统参量。实验过程中, 先将金属粉末在载玻片上进行喷点和喷线实验, 再使用电子天平进行粉末输送精度和变异系数(稳定性)的测量。载玻片放置在二维工作台上并随工作台以设定方向和速度相对微喷嘴运动。为尽可能地降低粉末沉积时的反弹和分散程度对观测结果的影响, 本文采取以下两个措施: (a) 尽可能减小微喷嘴端部与载玻片上表面的距离, 约  $1 \sim 2$  mm; (b) 在载玻片上表面均匀涂覆一层橄榄油。

### 3 实验结果与分析

#### 3.1 脉冲输送模式

脉冲输送模式中, 设定超声电源的通断频率为 1 Hz,  $t=0 \sim 1/6$  s 和  $t=2/3 \sim 1$  s 内超声电源断开,  $t=1/6$  s  $\sim 2/3$  s 内超声电源接通, 微喷嘴在  $t=0 \sim 1$  s 时间间隔内完成一个脉冲输送周期。如图 8 所示。从  $t=1/6$  s 开始, 微喷嘴出口附近的颗粒在声辐射力的作用下开始运动; 当  $t=1/2$  s 时, 受声辐射力作用参与输送的颗粒量达到最大; 当  $t=2/3$  s 时, 微喷嘴出口附近的颗粒继续快速向下运动, 远离出口的粉末驻波场消失致使向下运动的速度减缓, 向下运动的动能随颗粒间和颗粒与微喷嘴内壁的相互碰撞而逐渐被消耗, 在微喷嘴出口处形成新的平衡状态并为下一次输送做准备。

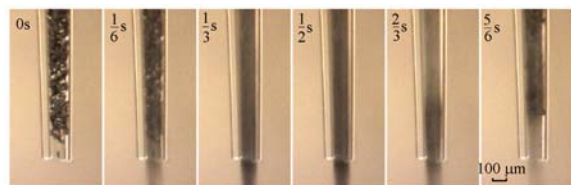


图 8 角形铬粉脉冲微输送显微照片

Fig. 8 Micrograph of chromium powder pulse micro-dosing

图 9 探索了 100 目、200 目和 300 目粒径角形铬粉和 200 目钛合金粉脉冲微输送质量随微喷嘴出口内径  $D$  的变化规律, 并给出二次多项式拟合曲线, 对于上述不同规格的角形金属粉末脉冲微输送质量均随微喷嘴出口内径  $D$  的增大而增大。上述 3 种铬粉和 1 种钛合金粉在微喷嘴内径等于 350, 200, 100 和 200  $\mu$ m 时获得的最小脉冲

输送质量(即最高脉冲输送精度)分别为 1.2, 0.8, 0.4 和 0.5 mg;当微喷嘴内径为 450 μm 时, 300 目铬粉的最大脉冲输送质量约为 16 mg。

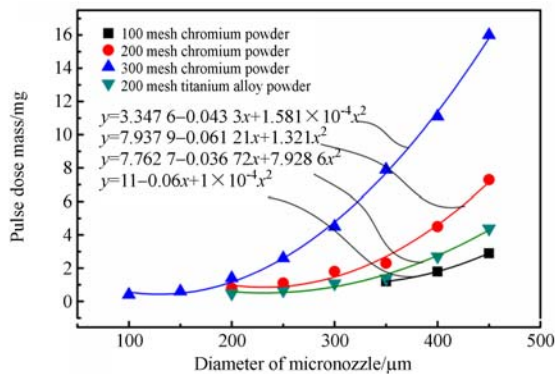


图 9 微喷嘴内径对金属粉末脉冲微输送精度的影响  
Fig. 9 Variation of metal powder micro-dosing accuracy with outlet diameter of nozzle

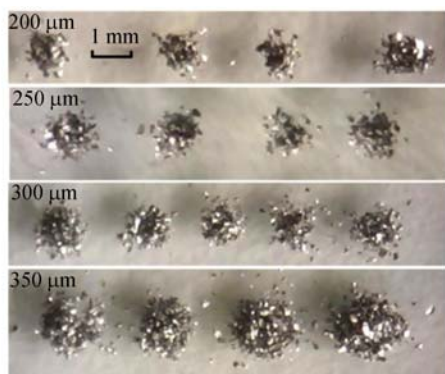


图 10 角形铬粉脉冲微输送喷点照片  
Fig. 10 Dots of irregular shape chromium powders

虽然通过减小微喷嘴内径可提高脉冲微输送精度,但对于某一种粒径的角形铬粉,喷嘴内径应略大于铬粉中最大颗粒的尺寸。例如 200 目铬粉的  $d_{max} = 160 \mu\text{m}$ ,当微喷嘴内径小于 200 μm 时有可能因大颗粒堵塞微喷嘴而导致输送不稳定。此外,当微喷嘴内径一定时,粒径较小的铬粉因流动性较好而获得了较大的脉冲输送量,即脉冲微输送精度降低。表 2 记录了 200 目角形铬粉脉冲微输送质量实验的原始数值并给出了变异系数(样本容量为 10)。实验结果表明:当喷嘴内径与最大颗粒尺寸相当时,较大颗粒的运动对粉末流动的影响较大,因此变异系数较大(当喷嘴内径为 200 μm 时,变异系数超出 20%);当喷嘴内径较大时,由于较大颗粒对粉末流动影响减弱且单脉

冲输送量提高等因素,脉冲输送质量的变异系数可获得大幅提高,输送稳定性增强(当喷嘴内径为 450 μm 时,变异系数小于 2%)。图 10 所示为微喷嘴内径分别为 200, 250, 300 和 350 μm 时脉冲微输送 200 目角形铬粉在载玻片上的照片。

表 2 200 目角形铬粉脉冲微输送稳定性

Tab. 2 Data of stability experiments for pulse micro-dosing of 200 mesh irregular shape chromium powder (mg)

Samples	$D/\mu\text{m}$					
	200	250	300	350	400	450
1	0.6	1.1	1.7	2.2	4.8	7.2
2	0.7	1	1.8	2.3	4.2	7.3
3	0.8	0.9	1.6	2.1	4.3	7.2
4	0.6	0.9	1.9	2.2	4.6	7.4
5	0.8	1.2	1.8	2.2	4.5	7.6
6	0.9	1.1	2	2.3	4.4	7.3
7	1.1	1.3	1.9	2.5	4.5	7.1
8	0.8	1.3	1.8	2.1	4.3	7.2
9	0.9	1.1	1.7	2.5	4.5	7.3
10	1	1.2	1.8	2.4	4.7	7.4
$\bar{x}$	0.8	1.1	1.8	2.3	4.5	7.3
$C \cdot V/\%$	20.2	13.1	6.42	6.47	4.16	1.94

### 3.2 连续输送模式

连续输送模式中,超声驻波场声辐射力持续施加在微喷嘴内的粉末颗粒上,微喷嘴出口附近的粉末先从出口喷出,远离出口的粉末持续向下运动。当时间  $t = 1/3 \text{ s}$  时,输送过程逐渐趋于稳定,如图 11 所示。

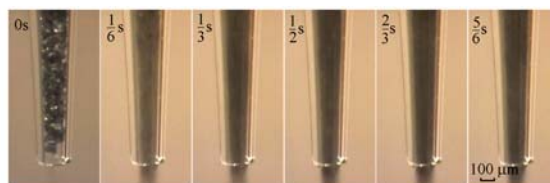


图 11 角形铬粉连续微输送显微照片  
Fig. 11 Micrograph of continuous micro-feeding of irregular shape chromium powder

图 12 探索了 100 目、200 目和 300 目粒径角形铬粉和 200 目钛合金粉连续微输送速率随微喷嘴出口内径  $D$  的变化规律,并给出了二次多项式拟合曲线。实验结果与脉冲微输送相似,不同粒径的角形铬粉的连续微输送速率均随微喷嘴出口

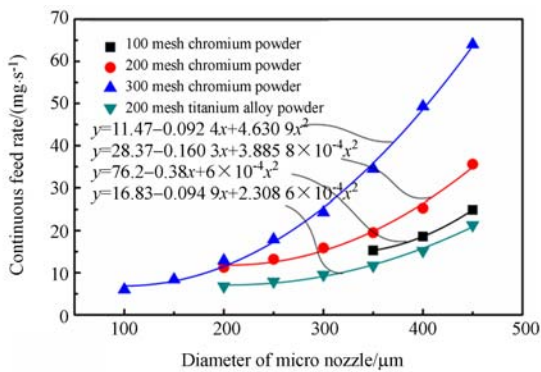


图 12 微喷嘴内径对金属粉末连续微输送速率的影响  
Fig. 12 Variation of metal powder micro-feeding accuracy with outlet diameter of nozzle

内径  $D$  的增大而增大。上述 4 种规格的金属粉末分别在微喷嘴内径等于 350, 200, 100 和 200  $\mu\text{m}$  时获得最小输送速率(即最高脉冲输送精度), 分别为 15.3, 11.3, 6.0 和 6.5  $\text{mg/s}$ 。当微喷嘴内径为 450  $\mu\text{m}$  时, 300 目铬粉的最大连续微输送速率可达 65  $\text{mg/s}$ 。所不同的是, 由于声辐射力持续施加时间间隔的差异, 连续输送模式下单位时间内(1s内)粉末输送量在数值上远大于

表 3 200 目角形铬粉连续微输送稳定性

Tab. 3 Data of stability experiments for continuous micro-feeding of 200 mesh irregular shape chromium powder (mg/s)

Samples	$D/\mu\text{m}$					
	200	250	300	350	400	450
1	11.5	13.1	15.1	18.6	25.7	35.9
2	11.5	12.4	16.8	18.9	26.5	34.2
3	10.2	13.9	16.7	19.3	23.8	37.8
4	10.7	14.1	15.2	19.8	25.6	36.3
5	11.7	13.8	15.4	18.1	24.4	35.2
6	10.5	12.6	16.5	19.3	25.8	34.5
7	11.8	13.5	15.9	20.7	26.3	37.7
8	11.3	12.1	16.6	19.7	24.3	33.5
9	11.7	13.4	15.4	20.2	23.6	36.7
10	12.1	12.9	15.1	20.6	26.8	34.1
$\bar{x}$	11.3	13.2	15.9	19.5	25.3	35.6
$C \cdot V/\%$	5.52	5.11	4.48	4.35	4.59	4.29

脉冲输送质量。然而, 连续输送速率的变异系数较为稳定, 可控制在 6% 以下, 具有更好的输送稳定性, 如表 3 所示。图 13 所示为微喷嘴内径为 300  $\mu\text{m}$  时, 200 目角形铬粉连续微输送成线照片, 通过调整二维工作台的移动速度可获得不同线宽的铬粉粉线。

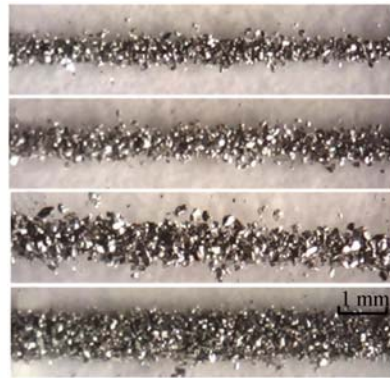


图 13 角形铬粉连续微输送成线照片  
Fig. 13 Lines of irregular shape chromium powder

## 4 结 论

本文提出以超声驻波场声辐射力为扰动力进行脉冲和连续两种模式的角形金属粉末微输送, 利用超声驻波场中作用于粉末颗粒的声辐射力将微喷嘴内粉末由密集态转变化分散态, 从根本上解决了角形粉末微输送的堵塞难题。在角形粉末颗粒微输送的过程中, 颗粒因自身形状的不规则产生的不规则运动和颗粒间随机、频繁的大量碰撞都有利于打散密集堆积相粉末, 最终在声辐射力和重力的联合作用下输送出微喷嘴。声辐射力驱动 100 目、200 目、300 目角形铬粉和 200 目角形钛合金粉的微输送精度和稳定性实验结果显示, 300 目角形铬粉的单脉冲输送质量为 0.4~16  $\text{mg}$  且连续输送速率为 6.0~65  $\text{mg/s}$ ; 脉冲输送质量的变异系数随喷嘴尺寸的增大而大幅降低(小于 2%), 连续输送速率的变异系数均低于 6%。由此表明, 声辐射力驱动微米级角形金属粉末具有较大的输送速率可控范围、较高的输送精度和稳定性, 并且适用于多种角形金属粉末。

## 参考文献:

- [1] 王彦芳,李豪,石志强,等. 激光熔覆高耐蚀 Fe 基固溶体合金涂层[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(8): 0806001.  
WANG Y F, LI H, SHI ZH Q, *et al.*. Laser cladding Fe-based solid solution alloy coating with high corrosion resistance [J]. *Infrared Laser Eng.*, 2017, 46(8): 0806001. (in Chinese)
- [2] 钟敏霖,刘文今. 国际激光材料加工研究的主导领域与热点[J]. 中国激光, 2008, 35(11): 1653-1659.  
ZHONG M L, LIU W J. Leading areas and hot topics on global laser materials processing research [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, 35(11): 1653-1659. (in Chinese)
- [3] 彭如意,罗岚,刘勇,等. 同轴送粉器喷嘴研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(8): 080004.  
PENG R, LUO L, LIU Y, *et al.*. Research progress in coaxial powder feeding nozzles[J]. *Laser & Optoelectronics Process*, 2017, 54(8): 080004. (in Chinese)
- [4] 邓志强,石世宏,周斌,等. 弧形悬垂实体结构激光熔覆成形[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(10): 1006004.  
DENG ZH Q, SHI SH H, ZHOU B, *et al.*. Laser cladding forming of arcuate cantilevered entity part [J]. *Infrared Laser Eng.*, 2017, 46(10): 1006004. (in Chinese)
- [5] LUO L R, SHAN X, ZOU Z H, *et al.*. A high performance NiCoCrAlY bond coat manufactured using laser powder deposition[J]. *Corrosion Science*, 2017, 126: 356-365.
- [6] KOVALENKO V, YAO J H, ZHANF Q L, *et al.*. Development of multichannel gas-powder feeding system coaxial with laser beam[C]. *Proceedings of 18th CIRP Conference on Electro Physical and Chemical Machining*, 2016, 42: 96-100.
- [7] 雷定中,石世宏,傅戈雁. 激光宽带熔覆光内送粉喷嘴准直气罩研制[J]. 激光技术, 2015, 39(5): 590-593.  
LEI D ZH, SHI SH H, FU G Y. Research of collimator hood of inside-laser powder feeding nozzle for broadband laser cladding [J]. *Laser Technology*, 2015, 39(5): 590-593. (in Chinese)
- [8] LU X S, YANG S F, EVANS J R G. Dose uniformity of fine powders in ultrasonic microfeeding [J]. *Powder Technol.*, 2007, 175: 63-72.
- [9] QI L, ZENG X H, ZHOU J M, *et al.*. Stable micro-feeding of fine powders using a capillary with ultrasonic vibration[J]. *Powder Technol.*, 2011, 214: 237-242.
- [10] 侯丽雅,王振琪,章维一,等. 金属微粉体脉冲输送的微特性实验[J]. 光学精密工程, 2011, 19(5): 1030-1038.  
HOU L Y, WANG ZH Q, ZHANG W Y, *et al.*. Experiments of micro characteristics of pulse-transfer for metallic powders [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(5): 1030-1038. (in Chinese)
- [11] 王洪成,章维一,戴振东. 微米级球形金属粉体稳定脉冲微输送方法[J]. 光学精密工程, 2015, 23(6): 1620-1626.  
WANG H CH, ZHANG W Y, DAI ZH D. Stable pulse micro-feeding method of micron spherical metal fine powder [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(6): 1620-1626. (in Chinese)
- [12] 林峰,吴涛,齐海波,等. 基于粉末精确喷射的TC4粉末微熔覆沉积制造初步研究[C]. 第13届全国特种加工学术会议论文集: 中国南昌, 2009: 546-552.  
LIN F, WU T, QI H B, *et al.*. Study on TC4 powder laser micro cladding deposition manufacturing by powder precise jet[C]. *Proceedings of the 13th International Conference on Non Traditional Machining, Nanchang, P. R. China*, 2009: 546-552. (in Chinese)
- [13] ASIER M, SUE A S, BRUCE W D, *et al.*. Holographic acoustic elements for manipulation of levitated objects[J]. *Nature Communications*, 2015, 6: 8661.
- [14] 庄龙,吴立群,杜锡标,等. 基于超声复合场的空间悬浮微粒任意点输运方法[J]. 中国机械工程, 2015, 26(22): 3040-3050.  
ZHUANG L, WU L Q, DU X B, *et al.*. Approach to arbitrary transportation of suspended particles based on ultrasonic composite field[J]. *China Mechanical Engineering*, 2015, 26(22): 3040-3050. (in Chinese)
- [15] KREIMER M, AIGNER I, SACHER S, *et al.*. Mechanical strength of microspheres produced by drying of acoustically levitated suspension droplets [J]. *Powder Technol.*, 2018, 325: 247-260.
- [16] 秦修培,耿德路,洪振宇,等. 超声悬浮过程中圆柱体的旋转运动机理研究[J]. 物理学报, 2017, 66(12): 124301.

- QIN X P, GENG D L, HONG ZH Y, *et al.*. Rotation mechanism of ultrasonically levitated cylinders [J]. *Acta Phys. Sin.*, 2017, 66 (12): 124301. (in Chinese)
- [17] WANG H C, HOU L Y, ZHANF W Y. A drop-on-demand droplet generator for coating catalytic materials on microhotplates of micropellistor[J]. *Sens. Actuators B*, 2013, 183: 342-349.
- [18] BARMATZ M, COLLAS P. Acoustic radiation potential on a sphere in plane, cylindrical, and spherical standing wave fields[J]. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1985, 77(3): 928-945.

**作者简介:**

王洪成(1985—),男,江苏淮安人,讲师,2013年于南京理工大学获得博士学位,2013年~2015年于南京航空航天大学机械工程博士后流动站工作,主要从事精密仪器及机械、微纳制造、微流体系统设计及控制等方面的研究。  
E-mail: wanghc@hdu.edu.cn.

**通讯作者:**

吴立群(1965—),男,浙江义乌人,教授,1990年于中国科技大学获得硕士学位,2002年于浙江大学获得博士学位,长期从事超声微加工理论与测试应用等方面的工作。E-mail: wuliqun@hdu.edu.cn