

文章编号 1004-924X(2011)05-1030-09

金属微粉体脉冲输送的微特性实验

侯丽雅^{1*}, 王振琪¹, 章维一¹, 杨眉¹, 林峰²

(1. 南京理工大学机械工程学院, 江苏南京 210094;

2. 清华大学机械工程系, 北京 100084)

摘要: 采用以脉冲为微流动基本形态、脉冲当地惯性力为主动力的微流体数字化技术进行了金属微粉体(作为流体)脉冲输送微特性的实验, 以解决激光金属粉体融覆沉积工艺中微粉体的精确稳定输送问题。建立了金属微粉体脉冲输送系统; 以角形铬粉为实验材料, 实验研究了驱动电压 U 、频率 f 、微喷嘴内径 d 、输送角度 θ 等 4 种系统参量对铬粉脉冲输送微特性(粉体输送率和输送稳定性)的影响规律; 以此规律为依据, 确定和选择铬粉脉冲输送的系统参量, 验证粉体微输送效果。实验显示, 金属微粉体脉冲输送系统具有精确稳定的脉冲输送微特性, 表征输送稳定性的变异系数 $C \cdot V < 7\%$, 铬粉输送率 Q 可达每秒几十微克量级。结果表明: 微流体数字化技术可实现金属微粉体的脉冲精确稳定输送; 提出的研究方法可用于不同工程应用背景的微粉体脉冲输送的理论和实验研究。

关键词: 脉冲输送; 粉体输送; 微特性; 微流体数字化; 激光粉体熔覆沉积

中图分类号: TG156.99 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20111905.1030

Experiments of micro characteristics of pulse-transfer for micro metallic powders

HOU Li-ya^{1*}, WANG Zhen-qi¹, ZHANG Wei-yi¹, YANG Mei¹, LIN Feng²

(1. School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;

2. Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

* Corresponding author, E-mail: hou_liya@hotmail.com

Abstract: To achieve the stable and precise transfer of micro metallic powders in the laser microcladding fabrication, the micro characteristics of micro metallic powder transfer, called pulse-transfer, are studied based on a new principle of microfluidic drive and control, in which microfluidic flows are driven by the pulsed local inertia force in micro channels. By using this technique, the flow of microfluidics can be controlled in pulse (or digital) demands. An experimental system of pulse-transfer for micro metallic powders is built to determine influencing rules of four system parameters, voltage amplitude U , frequency f , the inner diameter d of micro-nozzle, and the angle of transfer θ , on micro characteristics (powder transfer rate and stability) of irregular micro chromium powders. The system parameters are optimized according to the influencing rules for transferring irregular micro chromium pow-

收稿日期: 2010-06-23; 修订日期: 2010-09-14.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 50975152); 南京理工大学自主科研专项计划资助项目(No. 2010GJPY006); 教育部博士学科点专项科研基金资助项目(No. 20060288005)

ders, and the effects of powder transfer are experimentally investigated. Experimental results indicate that the pulse-transfer system has excellent micro characteristics, and its powder transfer rate Q is within a few ten μg per second and relative standard deviation $C \cdot V$ for evaluating transfer stability is smaller than 7%. The transfer of micro metallic powders with greater stability and precision is experimentally verified by using the technique of microfluidic digitalization, which demonstrates that the research method can be applied to experimental and theoretical studies of micro powder transfer in different fields of engineering.

Key words: pulse-transfer; powder transfer; micro characteristics; digitalization of microfluid; Direct Laser Powder Deposition(DLPD)

1 引言

金属微粉体输送是激光粉体熔融沉积工艺(Direct Laser Powder Deposition, DLPD)的关键技术。DLPD是将粉体材料直接送入由激光产生的熔池中,粉体融化后沉积、凝固成型。DLPD工艺中熔池尺寸是影响制造精度的主要因素,而熔池尺寸受粉体输送技术的制约^[1]。在激光金属粉体融覆沉积的金属粉体输送中,因输送流道内径小、平均流速低、微粉体内摩擦大,且为低雷诺数流,因此对微粉体输送的抗堵塞性和粉体广适性,微粉体输送量的一致性和分辨率等微特性都有很高的要求。目前与金属微粉体的低雷诺数流输送作业相关的现有技术主要有粉体气力输送和声波输送两种。

在干粉体输送方面,研究和用得最多的是气力输送技术^[2-6]。粉体气力输送技术分为浓相输送和稀相输送,浓相输送容易形成粉体密集堆积相而堵塞流道;稀相输送出口粉体则容易散开,造成粉体利用率很低,所以无论浓相还是稀相,都存在粉体输送量分辨率不高,输送过程可控性不高的问题。

利用压电陶瓷的逆压电效应产生的超声振动在输送管管壁上激起的衰减行波来进行粉体输送的研究开始于1998年^[7],之后人们围绕着超声波粉末微输送装置^[8-9]、行波型超声波输送装置^[10-11]、垂直驱动型超声波送料器^[12]、多振子驻波型超声波粉体输送^[13]等展开了多项研究。超声行波粉体输送中,主动力是摩擦力(固壁-粉粒及粉粒-粉粒间),摩擦力依赖于摩擦系数、粉粒形

状和密集程度等要素,因而输送粉体的广适性差。

将压电换能器产生的超声波通过水介质使毛细管振动可实现粉体微量输送,输送速率达到每秒几毫克^[14]。使毛细管振动的方式有超声波轴向振动^[15]、由计算机波形文件激发声扬声器并将其声振动传递给毛细管等方式^[16]。利用声波振动毛细管来进行粉体输送,输送分辨率虽较高,但还未能实现粉体输送的精确控制。

微流体数字化技术以脉冲为微流动基本形态,以脉冲当地惯性力为主动动力,适用于各种液体和粉体(作为流体),流体的流动分辨率达飞升级^[17-20],已在流体为液体的细胞工程、微胶囊制备、芯片点样、微化学反应等方面的应用及相应的微流体器件上展开了研究^[19-23]。微流体数字化技术也被初步应用在金属熔覆沉积制造的研究中,得到了用微流体数字化粉体输送系统进行球形TC4钛合金粉微熔覆沉积制造的初步研究结果^[24-25]。文献^[25]对角形(不规则)TC4钛合金粉的输送进行了初步实验,发现了角形粉体比球形粉体存在由于低流动性带来的粉体易堵塞现象。由于角形金属微粉体价格比球形粉体要低很多,同时角形金属微粉体还有沉积时粉体反弹小可提高粉体利用率的优点^[25],有必要对角形金属粉体的微流体数字化输送(本文称为金属微粉体脉冲输送)进行研究。另一方面,金属微粉体脉冲输送中的系统参量(驱动控制参量、微喷嘴几何尺寸、输送角度等)对粉体输送微特性(微粉体输送量的稳定性和分辨率)影响规律的研究是金属微粉体脉冲输送技术的基础研究内容之一,研究结果可望应用于不同工程应用背景的微粉体脉冲输

送的理论 and 实验研究。

2 金属微粉体脉冲输送系统

2.1 工作原理

金属微粉体的脉冲输送系统基于南京理工大学微系统研究室发明的、拥有自主知识产权的微流体数字化技术,即微流体脉冲驱动-控制技术^[17-19]。

微粉体脉冲输送原理为:使输送管壁沿其自身切向即纵向做加速度绝对值变化的运动,加速度绝对值大时,粉体相对于固壁的切向惯性力大于粉体受到的阻力;加速度绝对值小时,粉体相对于固壁的切向惯性力小于粉体受到的阻力,以惯性力与阻力间相对大小的变化,来影响微粉体的脉冲流动(微输送)。

2.2 实验系统

金属微粉体脉冲输送系统的构成如图 1 所示,系统由计算机及控制软件、信号发生器、功率放大器、压电陶瓷致动器(WTDS 型电致伸缩陶瓷位移器,中国电子科技集团公司第二十六研究所)、三自由度调节架、二维步进电机(上海斯达普实业有限公司)、精密电子天平(日本 SHIMADZU 公司,型号 AUY120,精度 0.1 mg)、显微 CCD 摄像机(台湾 MINTRON 公司,型号 MTC-23K9HC)、硼硅酸盐玻璃微喷嘴、秒表等构成。

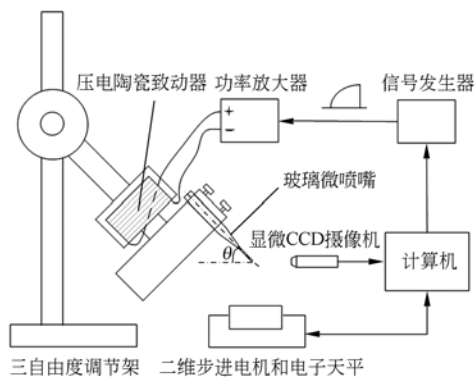


图 1 金属微粉脉冲输送系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of pulse-transfer system for micro metallic powders

玻璃微喷嘴原材料为外径 6.3 mm,内径 4.6 mm 的玻璃管,由自制控制仪拉制,微喷嘴内径可达 10 μm ,实验用微喷嘴内径为 150~400 μm 。图 2 为拉制成型的玻璃微喷嘴。

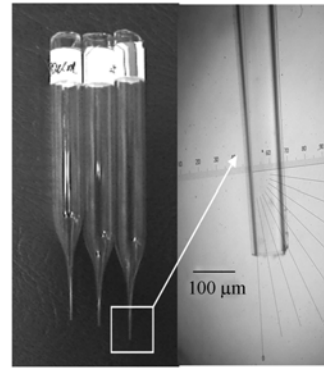


图 2 拉制成型的玻璃微喷嘴

Fig. 2 Photograph of a micro nozzle pulled from glass capillary tubes

2.3 实验材料

实验用粉体材料采用北京有研粉末新材料有限公司生产的角形铬粉(见图 3),与实验相关的物性参数为:平均粒径 75 μm ,用标准筛筛选粉体的目数为-300~+170 目。

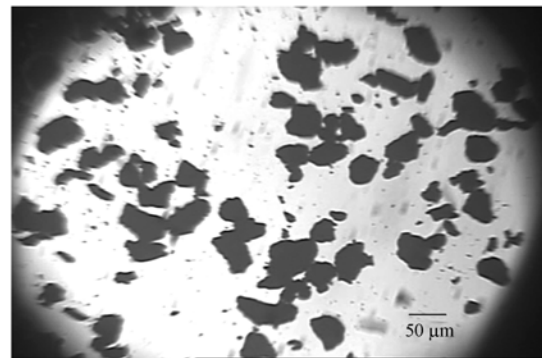


图 3 角形铬粉(-300~+170 目)

Fig. 3 Irregular chromium powders (-300~+170 mesh)

2.4 实验步骤

(1)启动计算机,打开信号发生器与功率放大器电源开关,接入压电陶瓷致动器。从已建立的波形数据库(由基础实验建立并不断完善)中选择并设置驱动-控制波形。

(2)根据微特性要求选择微喷嘴几何参量及输送角度,将装入粉体的微喷嘴固定于夹持装置。

(3)进行粉体输送实验,同时摄制实验录像,作为微特性评价的辅助依据(根据实验内容确定),收集粉体并记录输送时间。

(4)称量并计算粉体输送率。

(5)拍摄粉体输送照片,作为微特性评价的辅助依据(根据实验内容确定)。

3 金属微粉体脉冲输送微特性实验

3.1 微特性评价指标

本文选取微粉体输送率和输送稳定性作为微特性评价指标。

粉体输送率 Q :单位时间内输送的粉体质量,体现粉体输送的分辨率。粉体输送率的计算公式为: $Q=m/t$, m 为输送的粉体质量, t 为粉体输送的时间。

输送稳定性:指任意单位时间内的送粉质量、或单次送粉量大小是否稳定,体现粉体输送过程的不堵塞性。粉体输送稳定性可用变异系数来表征,变异系数 $C \cdot V$ 的计算公式为:

$C \cdot V = (S/\bar{x})100\%$, S 为粉体输送量的标准差, \bar{x} 为粉体输送量的平均数。

影响金属微粉体脉冲输送微特性因素有很多,可分为驱控参量(电压幅值、驱动频率、驱动波形)、几何参量(微喷嘴内径等)、物性参量(粉体形状、颗粒度)、输送环境参量(输送角度、输送高度)等。

本文研究电压幅值 U 、驱动频率 f 、微喷嘴内径 d 、输送角度 θ 对金属微粉脉冲输送系统工作微特性的影响规律。电压幅值(0~100 V)与驱动频率(0~200 Hz)可由程序控制任意调节,玻璃微喷嘴内径可在 100~1 000 μm 选用,输送角度由三自由度调节架在 0~90°任意调节。

3.2 系统参量对粉体输送率的影响

3.2.1 驱动电压幅值 U

实验条件: $f=10\text{ Hz}$, $d=300\ \mu\text{m}$, $\theta=60^\circ$, $t=200\ \text{s}$ 。

改变驱动电压幅值 U ,测出铬粉的输送率 Q 。图 4 是电压幅值 U 对铬粉输送率的影响曲线,从图中可知,电压幅值从 0 增加到 65 V 时,输送率在 1.267~4.194 mg/s 变化,并随电压幅值增大而增大;当电压幅值为 65~80 V 时,输送率随电压幅值增大而减小。

电压幅值反映了切向惯性力的大小,当电压幅值从 0 V 变化到 65 V 时,切向惯性力逐渐增大,粉体的加速度与运动速度增大,使得粉体输送率也相应增大;当电压幅值从 65 V 到 80 V 时,粉体所受加速度进一步增大,使得粉体的密实度增加,粉体受到的阻力增大,粉体输送率相应降低。

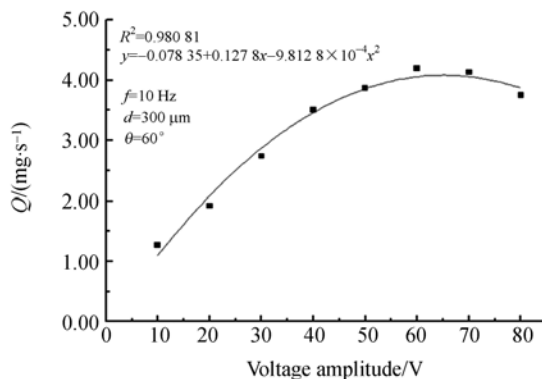


图 4 驱动电压幅值对铬粉输送率的影响

Fig. 4 Influence of different voltage amplitudes on transfer rates of micro chromium powders

3.2.2 驱动频率 f

实验条件: $U=50\ \text{V}$, $d=280\ \mu\text{m}$, $\theta=90^\circ$, $t=200\ \text{s}$

图 5 为驱动频率对铬粉输送率的影响规律曲线,从图中可以看出,随着驱动频率的增大,铬粉的输送速率呈递增的趋势。其他条件不变,驱动频率在 1~50 Hz 变化,则铬粉输送率在 0.216~4.421 mg/s 变化。

在铬粉脉冲输送实验中,观察到当频率较低时(1~5 Hz),粉体呈现显著脉冲流动现象;当频率较高时(>10 Hz),随着单位时间内的工作脉冲增加,粉体呈现近似连续流动现象。

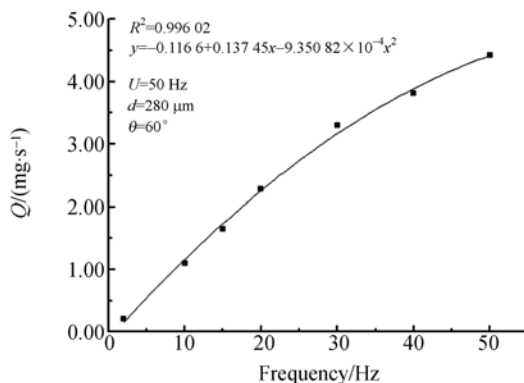


图 5 驱动频率对铬粉输送率的影响

Fig. 5 Influence of different frequencies on transfer rates of micro chromium powders

3.2.3 微喷嘴内径 d

实验条件: $U=50\ \text{V}$, $f=30\ \text{Hz}$, $\theta=90^\circ$, $t=200\ \text{s}$

微喷嘴内径 d 共选取 24 组, 最小为 $150\ \mu\text{m}$ 、最大为 $380\ \mu\text{m}$, 相邻微喷嘴内径相差 $10\ \mu\text{m}$ 。

图 6 为微喷嘴内径 d 对铬粉输送率 Q 的影响规律曲线, 当 d 在 $150\ \mu\text{m}$ 到 $380\ \mu\text{m}$ 之间递增时, Q 也随之增大。当其他条件不变, 改变 d , Q 在 $0.224\sim 8.538\ \text{mg/s}$ 间变化。

实验中发现, 当 $d < 100\ \mu\text{m}$ 时, 产生堵塞现象使微输送无法进行; 当 $d > 400\ \mu\text{m}$ 时, 铬粉会出现漏粉现象。实验表明, 微喷嘴内径 d 应选取粉体平均粒径的 2~5 倍, 以实现金属微粉体的正常稳定输送。

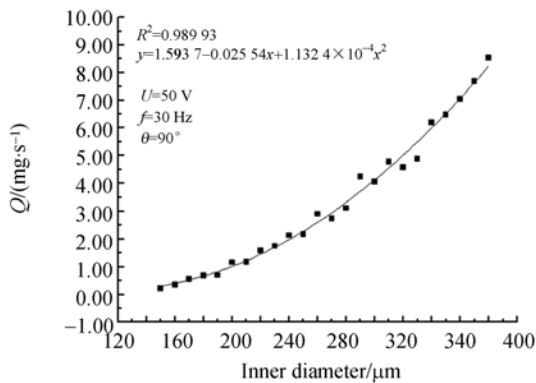


图 6 微喷嘴内径对铬粉输送率的影响

Fig. 6 Influence of different inner diameters of micro nozzles on transfer rates of micro chromium powders

3.2.4 输送角度 θ

实验条件: $U = 50\ \text{V}$, $f = 30\ \text{Hz}$, $d = 280\ \mu\text{m}$, $t = 200\ \text{s}$

图 7 为输送角度 θ 对铬粉输送率 Q 的影响规律, 图中可见, 当 θ 在 $0\sim 90^\circ$ 递增时, Q 在 $0.067\sim$

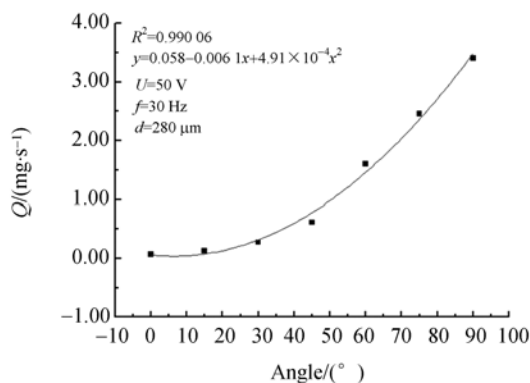


图 7 输送角度对铬粉输送率的影响

Fig. 7 Influence of different angles of transfer on transfer rates of micro chromium powders

$3.404\ \text{mg/s}$ 递增。在输送角度 θ 逐渐增大的过程中, 粉体受到的重力沿管壁法向的分量逐渐减小, 使得粉体受到的阻力变小, 根据粉体在微管中脉冲流动的机理, 可知粉体的输送率也随之增加。在进行粉体输送过程中, 需要根据工况调节输送角度。

3.3 输送稳定性

铬粉脉冲输送实验的 5 组系统参量按表 1 设置。任意抽取 60 s 进行称量并计算平均输送速率, 抽样 10 次, 测出 5 组不同系统参量下的粉体输送率如表 2 所示, 可见粉体输送率变异系数 $C \cdot V$ 均小于 7%。图 8 显示出输送微米干粉体的脉冲输送系统具有良好的输送稳定性。

表 1 铬粉脉冲输送的系统参量

Tab. 1 System parameters for pulse-transfer of chromium powders

系统参量	U/V	f/Hz	$d/\mu\text{m}$	$\theta/(\text{°})$
No. 1	50	25	240	90
No. 2	20	25	240	90
No. 3	50	10	240	90
No. 4	50	25	180	90
No. 5	50	25	240	30

表 2 铬粉的脉冲输送稳定性实验数据

Tab. 2 Data of stability experiments for pulse-transfer of chromium powders (mg/s)

样本	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5
1	1.873 3	1.446 7	0.113 3	0.524 4	0.356 6
2	1.806 7	1.404 2	0.102 1	0.491 7	0.353 3
3	1.788 3	1.382 6	0.101 7	0.481 2	0.351 6
4	1.758 3	1.416 7	0.112 6	0.467 9	0.336 7
5	1.726 7	1.371 8	0.121 4	0.497 6	0.352 3
6	1.743 3	1.351 7	0.117 6	0.502 5	0.320 0
7	1.716 7	1.380 5	0.124 5	0.470 0	0.362 5
8	1.733 3	1.305 4	0.118 3	0.484 4	0.308 7
9	1.726 7	1.327 8	0.108 7	0.472 3	0.331 7
10	1.703 3	1.318 8	0.121 2	0.493 3	0.296 7
\bar{x}	1.757 7	1.370 6	0.114 1	0.488 5	0.337 1
$C \cdot V$	2.79%	3.13%	6.62%	3.36%	6.26%

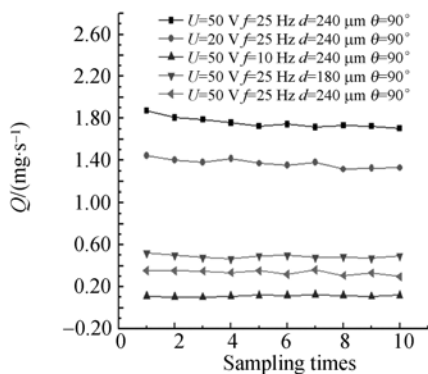


图 8 不同系统参量的脉冲输送稳定性曲线

Fig. 8 A series of stability curves of pulse-transfer using different system parameters

3.4 金属微粉体输送实验

金属微粉体的脉冲输送微特性实验得出的系统参量对微特性的影响规律可为金属微粉体脉冲输送提供系统参量的选择原则。具体为:待输送金属微粉体的颗粒度(粒径)为给定条件,输送角度 θ 由粉体输送用途决定,微喷嘴内径 d 在粉体平均粒径的 2~5 倍中选取。设置合适的驱动电压幅值 U 或频率 f 可获得所需的粉体输送率 Q ,即可将 U (或 f) 设为定值,改变 f (或 U) 以获得 f (或 U) 与 Q 的对应关系。

实验粉体为角形铬粉,平均粒径 $75 \mu\text{m}$;输送角度 $\theta=90^\circ$ 。实验选择驱动频率为 f (固定),改变驱动电压幅值 U ,其实验路线如下:

(1) 确定微喷嘴内径 d

图 6(微喷嘴内径对铬粉输送率的影响)的实验条件为 $U=50 \text{ V}$, $f=30 \text{ Hz}$, $\theta=90^\circ$,图中 $d=150 \mu\text{m}$ 时, $Q=0.224 \text{ mg/s}$;若将微喷嘴内径 d 按粉体平均粒径最小倍数 2 选为 $150 \mu\text{m}$,调整驱动电压 U 或频率 f 应能获得小于 0.224 mg/s 的粉体输送率 Q 。

(2) 设置驱动频率 f

图 5(驱动频率对铬粉输送率的影响)的实验条件为 $U=50 \text{ V}$, $d=280 \mu\text{m}$, $\theta=90^\circ$,且 f 增大,输送率 Q 亦增大,选择 f 为 10 Hz ,由于微喷嘴内径 d 已确定为 $150 \mu\text{m}$,小于图 5 中的 $d=280 \mu\text{m}$,可以预测粉体输送率 Q 应小于图 5 中 $f=10 \text{ Hz}$ 时对应的 1 mg/s 。

(3) 设置几种驱动电压 U

图 4(驱动电压幅值对铬粉输送率的影响)的实验条件为 $f=10 \text{ Hz}$, $d=300 \mu\text{m}$, $\theta=60^\circ$,电压

幅值 U 在 $0\sim65 \text{ V}$ 间取值时,粉体输送率 Q 随 U 减小而减小。为获得分辨率较高的粉体输送率 Q ,取 4 种较小的 U 值: $20, 15, 10, 5 \text{ V}$,进行金属微粉体的输送实验。

实验条件: $d=150 \mu\text{m}$, $\theta=90^\circ$, $f=10 \text{ Hz}$, $U=20, 15, 10, 5 \text{ V}$ 。

图 9 为 4 种电压幅值下的铬粉输送效果,表 3 为对应的铬粉线宽(L)。由图 9 和表 3 可知,粉体输送率最小为 0.028 mg/s ,最大为 0.057 mg/s 。

表 3 电压幅值与铬粉线宽和输送率

Tab. 3 Linewidth of chromium powders and transfer rates in different voltage amplitudes

U/V	$L/\mu\text{m}$	$Q/\mu\text{g} \cdot \text{s}^{-1}$
20	225	57
15	200	43
10	175	35
5	150	28

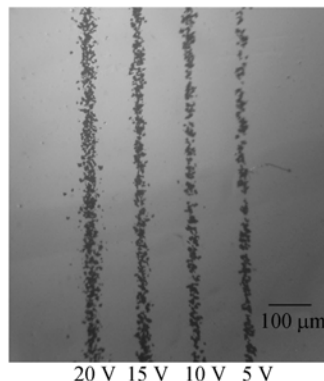


图 9 光学显微镜 20×下的铬粉粉线

Fig. 9 Observed linewidth of transferred chromium powders by an optical microscope (20×)

4 结 论

本文综合对角形铬粉(平均粒径 $75 \mu\text{m}$)输送微特性实验研究结果以及文献[24-25]采用微流体数字化粉体输送系统对球形 TC4 钛合金(平均粒径 $50 \mu\text{m}$)的研究结果论证了微流体数字化技术可实现金属微粉体的脉冲精确输送,且具有对输送材料的广适性,可输送不同材料、不同形状和颗粒度的粉体。金属微粉体的脉冲输送系统具有输送分辨率高、输送稳定性好等良好的粉体输送

微特性。与文献[9]对 H13 工具钢(平均粒径 22 μm)的微输送进行了对比,结果表明,本论文得到的粉体输送稳定性(用变异系数表征) $<7\%$,文献[9]为 $10\% \sim 15\%$;本论文粉体输送率(体现粉体输送分辨率)可达每秒几十微克量级,文献[9]为每秒几百微克量级。本论文研究了驱动电压、频率、微喷嘴内径、输送角度 4 种系统参量对铬粉输

送量及输送稳定性的影响,得出了系统参量对铬粉输送微特性的影响规律,为铬粉的脉冲输送提供了系统参量的确定和选择依据,实验得到了很好的输送效果。本论文关于金属微粉体脉冲输送系统参量对铬粉输送微特性影响规律的研究思路和方法可作为不同工程应用背景的微粉体脉冲输送的理论和依据。

参考文献:

- [1] COSTA L, VILAR R. Laser powder deposition [J]. *Rapid Prototyping J.*, 2009, 15(4): 264-279.
- [2] CECILIA ARAKAKI, ALI GHADERI, *et al.*. Air mass balance for mass flow rate calculation in pneumatic conveying [J]. *Powder Technology*, 2010, 202: 62-70.
- [3] LIANG C, CHEN X P, ZHAO C S, *et al.*. Flow characteristics and dynamic behavior of dense-phase pneumatic conveying conveying of pulverized coal with variable moisture content at high pressure [J]. *Korean J. Chem. Eng.*, 2009, 26(3): 867-873.
- [4] LIU Z M, DU B, ZHAO W L, *et al.*. Effect of characterization of powder on particle velocity in dense-phase pneumatic conveying [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2009, 147 012068.
- [5] SATORU WATANO. Mechanism and control of electrification in pneumatic conveying of powders [J]. *Chemical Engineering Science*, 2006, 61(7): 2271-2278.
- [6] RÖCK M, MORGENEYER M, SCHWEDES J, *et al.*. Steady state flow of cohesive and non-cohesive powders, Investigations in experiment and simulation [J]. *Granular Matter.*, 2008, 10: 285-293.
- [7] TAKANO T, TOMIKAWA Y. Excitation of a progressive wave in a lossy ultrasonic transmission line and an application to a powder-feeding device [J]. *Smart Mater Struct.*, 1998, 7: 417-421.
- [8] LU X S, YANG S F, EVANS J R G. Dose uniformity of fine powders in ultrasonic microfeeding [J]. *Powder Technology*, 2007, 175: 63-72.
- [9] LU X S, YANG S F, EVANS J R G. Microfeeding with different ultrasonic nozzle designs [J]. *Ultrasonics*, 2009, 49(6-7): 514-521.
- [10] KÜHNEA U, FRITSCHING U. Dosage of highly disperse powders by ultrasound agitated tube modules [J]. *Powder Technology*, 2005, 155: 117-124.
- [11] MRACEK M, WALLASCHEK J. A system for powder transport based on piezoelectrically excited ultrasonic progressive waves [J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2005, 90: 378-380.
- [12] 姜斌, 刘晓论, 杨志刚, 等. 垂直驱动型超声波送料器的研究 [J]. *光学 精密工程*, 2008, 16(6): 1083-1086.
- JIANG B, LIU X L, YANG ZH G, *et al.*. Study on vertical drive ultrasonic feeder [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(6): 1083-1086. (in Chinese)
- [13] 何勃, 王宏祥. 压电式多振子驻波型物料输送装置 [P]. 中国: 200610046279. 2, 2006-09-06.
- HE Q, WANG H X. *Standing wave type piezoelectric multi-vibrators material transmission device* [P]. CN: 0610046279. 2, 2006-09-06. (in Chinese)
- [14] MATSUSAKA S, URAKAWA M, MASUDA H. Micro-feeding of fine powders using a capillary tube with ultrasonic vibration [J]. *Advanced Powder Technology*, 1995, 6(4): 283-293.
- [15] LI X CH, CHOI H, YANG Y. Micro rapid prototyping system for micro components [J]. *Thin Solid Films*, 2002, 420-421: 515-523.
- [16] YANG SH F, EVANS J R G. A multi-component powder dispensing system for three dimensional functional gradients [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2004(379): 351 - 359.
- [17] 章维一, 侯丽雅. 影响流体流动的方法及其装置和应用 [P]. 中国: 03152948. 8, 2004-08-25.
- ZHANG W Y, HOU L Y. *Method and device interfering fluidic flow and their applications* [P]. CN: 03152948. 8, 2004-08-25. (in Chinese)
- [18] 章维一, 侯丽雅. 微流体数字化的科学与技术问题 (I): 概念、方法和效果 [J]. *科技导报*, 2005, 23(8): 4-9.

- ZHANG W Y, HOU L Y. Scientific and technological problems of digitalization of microfluids (Part I): concepts, methods and results [J]. *Science & Technology Review*, 2005, 23(8):4-9. (in Chinese)
- [19] 章维一,侯丽雅. 微流体数字化的科学与技术问题(II):物质数字化及物质能量信息统一数字化概念研究[J]. 科技导报, 2006, 24(3):41-47.
- ZHANG W Y, HOU L Y. Scientific and technological problems of digitalization of microfluids (Part II): Conceptual study of digitalization of matter and integrated digitalization of matter-energy-information [J]. *Science & Technology Review*, 2006, 24(3):41-47. (in Chinese)
- [20] 科学技术部基础研究司科技部高技术研究发展中心, 新微流体数字化技术可使液滴量分辨率达到飞升级[J]. 基础科学研究快报, 2004, 4(150):6-7.
- HTRDC, MOST, P R CHINA. Single droplet is obtained in femtoliter scale by new microfluids digitalization technology [J]. *Basic Scientific Research Express*, 2004(4):6-7. (in Chinese)
- [21] 张晓乐,侯丽雅,章维一. 数字化微喷射用直列微喷嘴制作工艺[J]. 光学精密工程, 2008, 16(11):2221-2227.
- ZHANG X L, HOU L Y, ZHANG W Y. Fabrication of in-line micropipette for digital micro-jetting experiment [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(11):2221-2227. (in Chinese)
- [22] 耿鑫,侯丽雅,章维一. 微流体数字化喷点技术的实现[J]. 光学精密工程, 2009, 17(8):1902-1907.
- GENG X, HOU L Y, ZHANG W Y. Implementation of digital dispensing technology for microfluids [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(8):1902-1907. (in Chinese)
- [23] 穆莉莉,侯丽雅,章维一. 基于微流体数字化技术的流式细胞术的设计[J]. 化工学报, 2010, 61(4):949-954.
- MU L L, HOU L Y, ZHANG W Y. Design of flow cytometry based on microfluids digitalization technology [J]. *Journal of Chemical Industry and Engineering*, 2010, 61(4):949-954. (in Chinese)
- [24] 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,南昌:中国机械工程学会特种加工分会, 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: Non Traditional Machining Branch of CMES*, 2009:546-552. (in Chinese)
- [25] 吴涛. 基于数字化喷射的高精度金属熔覆沉积制造技术研究[D]. 清华大学本科综合训练论文, 2009.
- WU T. *Study on high precise metal cladding deposition manufacturing by powder digital jet* [D]. Beijing: Tsinghua University, 2009. (in Chinese)

作者简介:



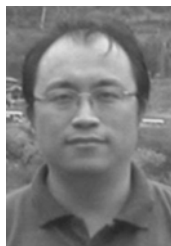
侯丽雅(1954—),女,江西余干人,教授,1984年于北京航空航天大学获硕士学位,1995年于(日)法政大学获博士学位,主要从事微系统与纳米系统、微流体数字化技术、生物制造工程等方面的研究。E-mail:hou_liya@hotmail.com



王振琪(1986—),男,江苏南通人,硕士研究生,2008年于南京理工大学获学士学位,主要从事微流体数字化技术的研究。E-mail:wangzhq0618@gmail.com



章维一(1943—),男,浙江临海人,教授,1982年于中国纺织大学获硕士学位,1990年于北京航空航天大学获博士学位,主要从事微系统与纳米系统、微流体数字化技术、医学工程等方面的研究。E-mail:zhangweiyi_email@163.com



林峰(1966—),男,福建福州人,教授,博士生导师,1990年、1998年于清华大学分别获得学士、博士学位,主要从事快速成形、快速制造、生物制造和重型装备等方面的研究和开发。Email:linfeng@tsinghua.edu.cn



杨眉(1984—),女,博士研究生,2006年于中北大学获学士学位,主要从事微流体数字化技术的研究。E-mail:nemo1984@126.com

● 下期预告

大口径大曲率半径光学元件的高精度检测新技术

杨李茗,叶海仙

(成都精密光学工程研究中心,四川 成都 610041)

针对目前光学加工车间已有的检测设备无法实现大口径大曲率半径光学元件的高精度检测,提出利用长程轮廓仪的检测原理优势,研究进行大口径大曲率半径(正、负)光学元件精确测量的可行性、方法和初步精度分析,并通过实验证明了长程轮廓仪检测大曲率半径光学元件的应用可行性。分析计算了长程轮廓仪测量曲率半径的算法精度,设计了合理的机械结构,进行旋转测量,得到了全口径的曲率半径分布,并与球径仪、刀口仪的测量结果进行了对比。对 $R=37.108\text{ m}$ 和 $R=41.065\text{ m}$ 的球面镜测量结果显示,长程轮廓仪测量重复性可以达到 0.05% 以内,与球径仪、刀口仪的测量值相差均在 0.05% 以内。这些研究结果表明长程轮廓仪可以用来解决目前几十米的大 R 曲率半径光学元件难以高精度测量的难题。