

文章编号 1004-924X(2015)06-1620-07

微米级球形金属粉体的稳定脉冲微输送

王洪成^{1*}, 章维一², 戴振东¹

- (1. 南京航空航天大学 航天学院, 江苏 南京 210016;
2. 南京理工大学 机械工程学院, 江苏 南京 210094)

摘要:针对激光熔覆或 3D 微打印等金属零件先进制造技术对稳定微量输送金属粉体的要求,分析了微米尺度金属粉体脉冲输送机理。为提高金属粉体脉冲输送分辨率和输送稳定性,设计了余弦修圆波形、正弦修圆波形和正弦余弦组合修圆波形作为压电致动器的驱动电压波形。对平均粒径为 100 μm 的均匀球形 TC4 钛合金粉体进行了脉冲微输送实验。实验结果表明:余弦修圆波形使粉体做“前进”运动,正弦修圆波形使粉体做“后退”运动;分散态粉体单颗稳定输送达粉体总量的 90%,密集态粉体脉冲微输送过程中密实度可控,粉体微输送过程稳定,无结拱现象发生。本文的研究结果也可为其微米尺度材料或其他形状粉体的脉冲微输送提供参考。

关键词:激光熔覆;金属微粉体;微输送;脉冲惯性力;微喷嘴

中图分类号:TP271.3;TG156.99 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152306.1620

Stable pulse micro-feeding of micron spherical metal fine powder

WANG Hong-cheng^{1*}, ZHANG Wei-yi², DAI Zhen-dong¹

- (1. College of Astronautics, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;
 2. School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)
- * Corresponding author, E-mail: whch31@163.com

Abstract: For the requirements of stable micro-feeding of micron metal powder in advanced metal part manufacturing technology including laser cladding and 3D micro-printing, the pulse micro-feeding mechanism of micron spherical metal fine powder was researched. To improve the resolution and stability of metal powder micro-feeding, three driving voltage waveforms, including cosine-shape rounded wave, sine-shape rounded wave and sine-cosine integrated rounded wave, were designed as the driving voltages of the piezoelectric actuator. A pulse micro-feeding experiment for the uniform spherical TC4 titanium alloy powder with an average diameter of 100 μm was performed. The experiment result show that the cosine-shape rounded wave makes the powder go forward while the sine-shape rounded wave makes the powder go back. The percentage of the dispersing state powder transported one by one has reached 90%. The powder degree of compaction can be controlled. The

收稿日期:2014-11-27; **修订日期:**2015-01-27.

基金项目:中国博士后科学基金资助项目(No. 2014M551584);江苏省博士后科研基金资助项目(No. 1402006B);江苏省三维打印装备与制造重点实验室开放基金资助项目(No. L2014071302)

powder micro-feeding process is stable without the phenomenon of powder arch accumulation. The obtained results provide references for the micro-feeding of other kinds of powder with different materials and different shapes.

Key words: laser cladding deposition; metal fine powder; micro-feeding; pulse inertia force; micro-nozzle

1 引言

粉体微输送技术是指对微米尺度粉体实现小质量、短距离的输送,以达到对粉体的转移、分散、混合等目的^[1-2],被广泛应用于激光熔覆^[3-5]、增材制造^[6-7]和药物控释^[8-9]等领域.在粉体微输送过程中,粉体在微喷嘴出口处的状态可分为密集态和分散态,密集态是指粉体在微喷嘴出口处同一时刻以多个粉体同时喷出,分散态是指粉体在微喷嘴出口处以离散形态喷出.气力输送^[10-11]和载气式同轴输送^[12-13]是密集态粉体的主要微输送方式,其通过压力气流携带粉末从喷嘴流出形成粉体流实现粉体的微输送,但输送过程中容易形成粉体密集堆积相而堵塞流道,输送稳定性较差^[14].超声输送^[15-16]是分散态粉体的主要微输送方式,其利用压电换能器产生的超声波通过水或铝块等介质使毛细管产生振动,通过改变管内粉体与管壁间的摩擦力来控制粉体输送率,使粉体输送分辨率达到每秒几毫克,但不易实现粉体输送过程的精确控制.微流体脉冲惯性力驱动技术^[17-18]能够实现平均粒径为 $48\ \mu\text{m}$ 的球形 TC4 钛合金粉几百微克量级的微量输送,但仍然存在着粉体输送分辨率不高和喷嘴易堵塞等问题^[19].本文在分析微流体脉冲惯性力驱动机理的基础上,设计了余弦修圆波形、正弦修圆波形和正弦余弦组合修圆波形 3 种压电致动器驱动电压波形,通过密集态和分散态粉体脉冲微输送的实验研究,有效地提高了粉体脉冲输送分辨率和输送稳定性。

2 实验

2.1 实验系统

基于微流体脉冲惯性力驱动的球形金属粉体微输送系统如图 1 所示,由计算机及控制软件、波形发生器、功率放大器、压电致动器(P-844.10,德

国 PI 公司)、3 自由度调节架、显微 CCD 摄像机和微喷嘴等组成.压电致动器左侧(固定端)固定在机架上,右侧(可动端)通过连接件与微喷嘴刚性连接.压电致动器可在驱动电压信号作用下沿极化轴方向在原长 L 的基础上瞬间产生伸长量 ΔL .驱动电压波形、幅值 U_0 和频率 f_0 以及玻璃微喷嘴内径 d 可作为球形粉体微输送过程的驱动-控制参量.微喷嘴由内径 $4.6\ \text{mm}$ 、外径 $6.3\ \text{mm}$ 的硼硅酸盐玻璃管经玻璃冷热加工工艺制备,玻璃管经自制控制仪控制后和截取后的显微图片如图 2 所示,出口内径大小可达 $10\sim 1\ 000\ \mu\text{m}$ 以上.所用微输送介质为激光熔覆技术中常用的平均粒径为 $100\ \mu\text{m}$ 的均匀球形 TC4 粉。

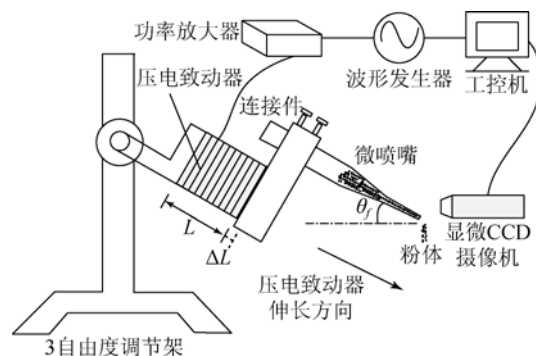
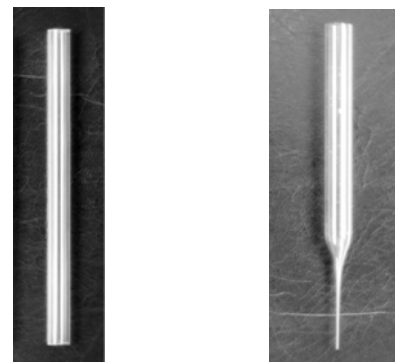
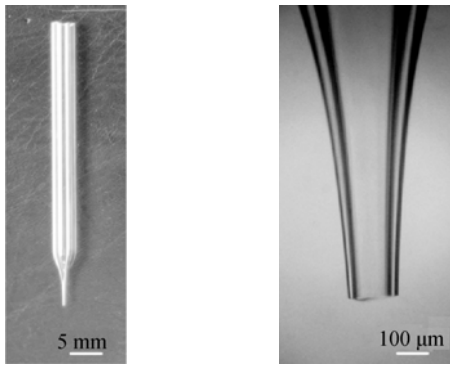


图 1 基于微流体脉冲惯性力驱动的金属粉体微输送系统

Fig. 1 Metal powder micro-feeding system actuated by microfluidic pulse inertia force



(a) 硼硅酸盐玻璃管 (b) 拉制后的微喷嘴
(a) Borosilicate glass pipe (b) Micro-nozzle after pulling



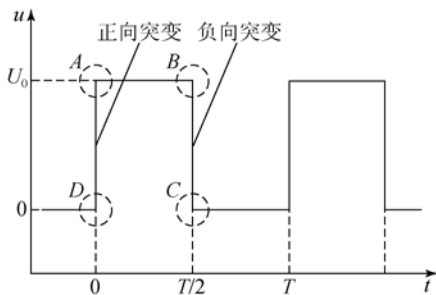
(c) 截取后的微喷嘴实物图 (d) 截取后的微喷嘴显微图
(e) Micro-nozzle after cutting (d) Micrograph of micro-nozzle after cutting

图 2 硼硅酸盐玻璃管微喷嘴制备过程

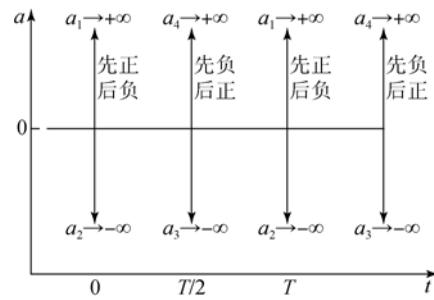
Fig. 2 Fabrication of borosilicate glass micro-nozzle

2.2 球形金属粉体脉冲微输送机理

微流体脉冲驱动效果包括流体的驱动方向和驱动速度。其中,在一维微流道中,流体的驱动方向包括:(1)前进:驱动方向与压电驱动器伸长方向相同;(2)后退:驱动方向与压电驱动器伸长方向相反。由于压电器件电压-时间曲线与伸长位移-时间曲线相似,当压电驱动器的驱动电压波形为方波(图 3(a))时,在一个脉冲驱动周期中,粉体的脉冲驱动过程为:当 $t=0$ 时,电压(位移)发生正向突变,微喷嘴固壁速度 v 在该时刻变化过程为 $0 \rightarrow +\infty \rightarrow 0$,加速度 a 在该时刻产生先正后负的无穷加速度,即 a 的变化过程为 $0 \rightarrow +\infty \rightarrow -\infty \rightarrow 0$,如图 3(b)所示。当 $a = a_1 \rightarrow +\infty$ 时,粉体在固壁摩擦力或粉体颗粒间的摩擦力 f 的作用下,相对于机架获得速度 v ,其方向与 f 相同。此时,摩擦力 f 为主动力;当 $a = a_2 \rightarrow -\infty$ 时,粉体在相对于固壁的惯性力 F 的作用下克服与 F 方向相反的摩擦力 f' 向前运动,此时,摩擦力 f' 为阻力;相反,当 $t=T/2$ 时,电压(位移)发生负向突变,微流道固壁产生先负后正的无穷加速度,粉体向后运动。



(a) 电压(位移)-时间曲线
(a) Voltage (displacement)-time



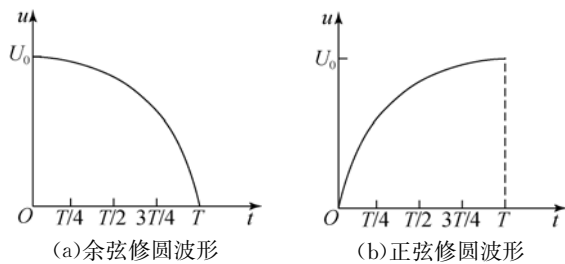
(b) 加速度-时间曲线

(b) Acceleration-time curve

图 3 驱动电压为方波时微喷嘴固壁理论运动学特性
Fig. 3 Theoretical kinematics characteristics of micro channel solid wall with driving voltage of square wave

2.3 驱动电压波形的设计

为了使粉体在一个驱动周期内产生单一的“前进”或“后退”脉冲驱动效果,设计了如图 4 所示的余弦修圆波形和正弦修圆波形。余弦修圆波形仅存在电压(位移)正向突变点,使粉体产生单一的“前进”驱动效果,正弦修圆波形存在电压(位移)负向突变点,使粉体产生单一的“后退”驱动效果。这两种波形能够最大程度地降低压电致动器可动端在驱动电压缓慢变化时产生的冲击。



(a) Cosine-shape rounded wave (b) Sine-shape rounded wave

图 4 波形示意图

Fig. 4 Diagrammatics of waves

为了验证驱动电压波形对粉体脉冲输送效果的影响,分别以正弦修圆波形和余弦修圆波形进行了水平直玻璃管(如图 2(a)所示)内金属粉体的脉冲驱动实验,实验过程中玻璃管轴线与水平方向的夹角 θ_t 为 0° 。

在分散态粉体脉冲输送实验中,波形选用使粉体产生单一“前进”驱动效果的余弦修圆波形,微喷嘴出口内径 $d=120 \mu\text{m}$,略大于粉体平均直径 $100 \mu\text{m}$,微喷嘴轴线与水平方向的夹角 θ_t 为 4° 。

密集态粉体在微输送实验中,粉体不断向微

喷嘴出口流动,当粉体在近出口处聚集量不断增大时将导致粉体密实度不断提高,易产生粉体结拱现象,影响粉体的稳定输送,粉体密实度增加及结拱如图 5 所示。提高粉体脉冲输送稳定性的目的就是控制粉体在微输送过程中的密实度,以避免结拱现象。采用微喷嘴出口处空隙的长度来表征粉体的密实度,空隙越大,密实度越大。实验过程中,设计了由 6 个余弦修圆波形和 3 个正弦修圆波形组成的组合修圆波形,如图 6 所示。微喷嘴竖直固定在压电致动器可动端,出口内径 $d=200\ \mu\text{m}$ 。压电致动器的驱动电压 $U_0=30\ \text{V}$,频率 $f_0=2\ \text{Hz}$ 。

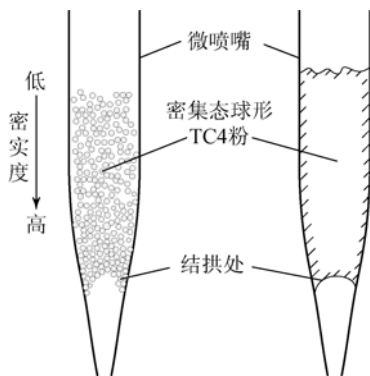


图 5 因密实度增加导致的粉体结拱示意图

Fig. 5 Diagram of powder arch accumulation due to increasing degree of compaction

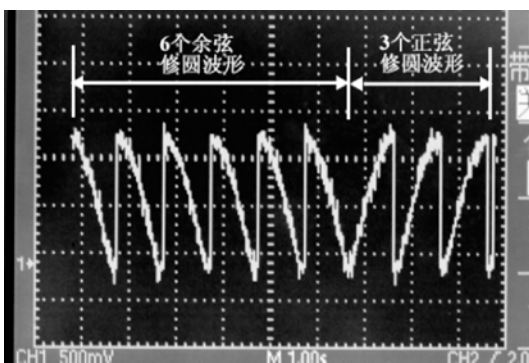


图 6 驱动电压正弦余弦组合修圆波形

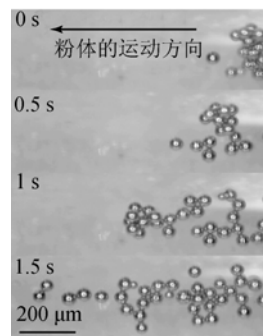
Fig. 6 Sine-cosine integrated rounded wave of driving voltage

3 实验结果与分析

3.1 驱动电压波形对粉体脉冲驱动方向的影响

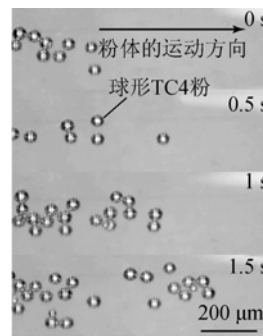
球形 TC4 粉体在水平直玻璃管中的脉冲驱

动效果如图 7 所示,驱动电压频率为 2 Hz。当驱动电压波形为正弦修圆波形时,粉体在相邻 4 个脉冲驱动下作“后退”运动;当驱动电压波形为余弦修圆波形时,粉体在相邻 4 个脉冲驱动下作“前进”运动。这一方面验证了 2.2 节对球形金属粉体脉冲微输送过程的分析,另一方面为分散态和密集态粉体的脉冲输送稳定性实验提供波形选择的实验依据。



(a) 正弦修圆

(a) Sine-shape rounded wave



(b) 余弦修圆

(b) Cosine-shape rounded wave

图 7 驱动电压波形对粉体脉冲驱动方向的影响

Fig. 7 Influence of driving voltage wave on direction of powder moving

3.2 分散态球形 TC4 粉的稳定输送

在分散态球形 TC4 粉脉冲输送实验中,微喷嘴内粉体在沿微喷嘴轴线方向上不同位置处的排列如图 8 所示,脉冲惯性力作用促使尺寸均匀的球形粉体在微喷嘴内整齐排列。设微喷嘴任一横截面内径尺寸为 d_i ,粉体平均粒径为 d_0 ,当 $d_i=2d_0\sim 3d_0$ 时,粉体上下间隔呈紧密排列状;当 $d_i=1.5d_0\sim 2.5d_0$ 时,粉体呈类“锯齿”状排列;

当 d_i 进一步缩小, 粉体排列状态由“锯齿”状逐步过渡到等间距的直线排列。在微喷嘴出口处, 相邻粉体之间相互碰撞使粉体颗粒间形成等间距间隔, 这有利于粉体做稳定的单颗输送, 如图 8(d) 所示。表 1 记录了 50 个连续脉冲惯性力作用下每个脉冲对应的粉体微输送量(单位: 颗), 其中 90% 的脉冲能够稳定输送出单颗球形 TC4 粉。实验结果表明, 采用余弦修圆波形可实现分散态球形金属粉体的单颗稳定输送, 间接地提高了粉体的输送分辨率。

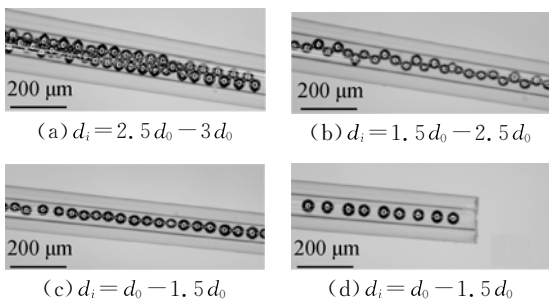


图 8 分散态均匀球形 TC4 粉单颗稳定输送时在微喷嘴内的排列状态显微照片

Fig. 8 Micrograph of dispersed uniform spherical TC4 powder order status in micro-nozzle when they are micro-fed one by one

表 1 单个脉冲驱动下球形 TC4 粉体输送颗粒数记录

Tab. 1 Recorder of spherical TC4 powder numbers with each pulse inertia force

序号	颗数	序号	颗数	序号	颗数	序号	颗数	序号	颗数
1	1	11	1	21	1	31	1	41	1
2	1	12	1	22	1	32	1	42	1
3	1	13	1	23	0	33	2	43	1
4	1	14	1	24	1	34	1	44	1
5	1	15	1	25	1	35	1	45	1
6	2	16	1	26	1	36	1	46	2
7	1	17	1	27	1	37	1	47	1
8	1	18	1	28	1	38	1	48	1
9	1	19	0	29	1	39	1	49	1
10	0	20	1	30	0	40	0	50	1

3.3 密集态球形 TC4 粉的稳定输送

在图 6 所示的一个组合修圆波形周期中, 连续 11 个脉冲惯性力驱动下粉体在微喷嘴中的排列状态显微照片如图 9 所示, 微喷嘴出口处粉体因密实度增减产生的间隙(Gap)大小在竖直方向上的长度变化如图 10 所示。当 t 为 0~3 s 时, 余弦修圆波形能够最大限度地使粉体做“前进”运动, 使微喷嘴内粉体迅速向微喷嘴出口处聚集, 有效地提高了粉体的输送效率。然而, 大量粉体在微喷嘴出口处迅速聚集将导致粉体密实度不断增加, 使出口处间隙逐渐增大, 导致“结拱”现象的发生, 当 t 为 3 s 时, 粉体密实度达到最大值, 间隙长度可达 500 μm , 严重影响了粉体的稳定输送。

当 t 为 3.5~4.5 s 时, 正弦修圆波形具有使粉体做后退运动的驱动效果, 粉体做远离微喷嘴出口方向的运动, 从而使因密实度增加产生的空隙在 3 个正弦修圆波形的脉冲驱动下逐渐减小, 最终改善粉体因密实度增加导致的输送不稳定现象。当 t 为 4.5 s 时, 粉体密实度降至最小, 间隙长度仅有 78 μm 。当 t 为 5~5.5 s 时, 即下一个组合修圆波形驱动周期中前两个余弦修圆脉冲驱动下粉体的排列状态, 粉体因密实度增加产生的空隙又逐渐增大。如此循环, 采用组合修圆波形可在提高粉体输送效率的同时减小粉体密实度, 提高输送的稳定性。

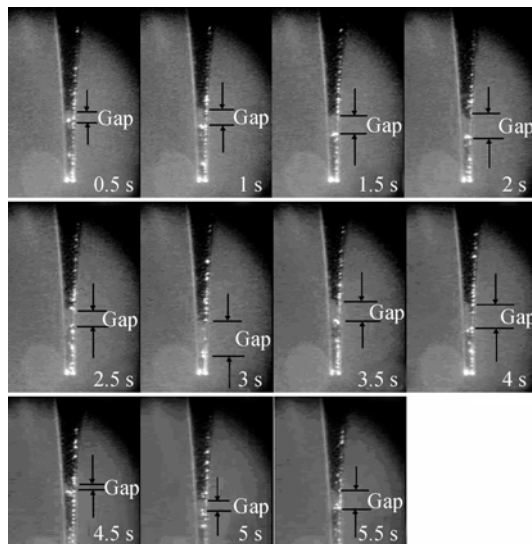


图 9 密集态均匀球形 TC4 粉体稳定输送过程显微图片
Fig. 9 Micrograph of densely state uniform spherical TC4 powder in micro-feeding process

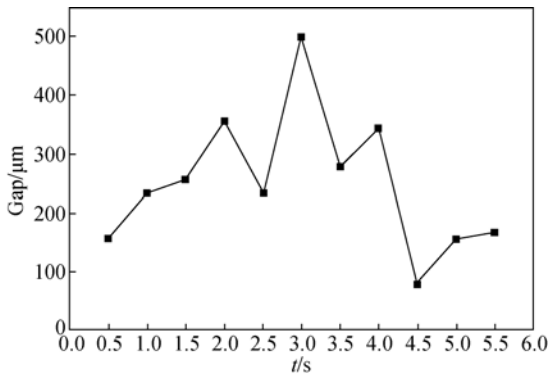


图10 组合修圆波形对密集态粉体输送过程中密实度的影响

Fig. 10 Influence of integrated rounded wave on the degree of compaction of powder in micro-feeding processing

参考文献:

- [1] MOLINDER R, WIINIKKA H. Feeding small biomass particles at low rates [J]. *Powder Technology*, 2015, 269: 240-246.
- [2] YANG S, EVANS J R G. Metering and dispensing of powder; the quest for new solid freeforming techniques [J]. *Powder Technology*, 2007, 178(1): 56-72.
- [3] 张佳虹, 孙荣禄. 钛合金表面激光熔覆的研究进展 [J]. *材料导报*, 2014, 28(6): 89-93.
ZHANG J H, SUN R L. Research progress of laser cladding on surface of titanium alloy [J]. *Materials Review*, 2014, 28(6): 89-93. (in Chinese)
- [4] BARTKOWSKI D, MŁYNNARCZAK A, PIASECKI A, et al.. Microstructure, microhardness and corrosion resistance of stellite-6 coatings reinforced with WC particles using laser cladding [J]. *Optics & Laser Technology*, 2015, 68: 191-201.
- [5] ZHANG H, ZOU Y, ZOU Z D, et al.. Microstructure and properties of Fe-based composite coating by laser cladding Fe-Ti-V-Cr-C-CeO₂ powder [J]. *Optics & Laser Technology*, 2015, 65: 119-125.
- [6] BROOKESK. 3D Print Show [J]. *Metal Powder Report*, 2014, 69(1): 33-35.
- [7] STICHEL T, LAUMER T, BAUMÜLLER T, et al.. Powder layer preparation using vibration-con-

4 结 论

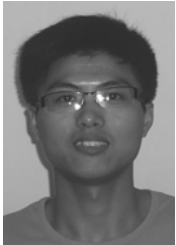
本文分析了微米尺度金属粉体脉冲输送机理,设计了余弦修圆波形、正弦修圆波形和正弦余弦组合修圆波形作为压电致动器的驱动电压波形,并进行了平均粒径为 100 μm 的均匀球形 TC4 粉体的脉冲输送实验研究。结果表明:余弦修圆波形使粉体做“前进”运动,正弦修圆波形使粉体做“后退”运动;采用正弦修圆波形实现了分散态粉体单颗稳定输送达粉体总量的 90%;采用正弦余弦组合修圆波形实现了对密集态球形 TC4 粉体脉冲微输送过程中密实度的控制,消除了粉体“结拱”现象,提高了粉体输送稳定性。本文的研究结果可为微米尺度其它材料或形状粉体的脉冲微输送提供参考。

trolled capillary steel nozzles for additive manufacturing [J]. *Physics Procedia*, 2014, 56: 157-166.

- [8] 王小鹏, 陈天宁, 李欣欣. 基于轴向振动配粉技术的药物微量配粉 [J]. *光学精密工程*, 2014, 22(6): 1584-1589.
WANG X P, CHEN T N, LI X X. Drug quantitative dispensing based on axial vibration microfeeding technology [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(6): 1584-1589. (in Chinese)
- [9] WANG X P, CHEN T N, YANG Z X, et al.. Study on structural optimum design of implantable drug delivery micro-system [J]. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 2007, 15(1): 47-56.
- [10] MITTAL A, MALLICK S S, WYPYCH P W. An investigation into flow mode transition and pressure fluctuations for fluidized dense-phase pneumatic conveying of fine powders [J]. *Particulate*, 2014, 16: 187-195.
- [11] 刘强, 段广彬, 王锐, 等. 水平渐缩管道浓相气力输送流动阻力特性研究 [J]. *流体机械*, 2013, 41(1): 6-9.
LIU Q, DUAN G B, WANG K, et al.. Research on flow resistance characteristics of horizontal shrinking pipeline in dense phase pneumatic conveying [J]. *Fluid Machinery*, 2013, 41(1): 6-9. (in Chinese)
- [12] 刘昊, 虞钢, 何秀丽, 等. 粉末性质对同轴送粉激光熔覆中粉末流场的影响规律 [J]. *中国激光*,

- 2013, 40(5): 0503008-1-9.
- LIU H, YU G, HE X L, *et al.*. Effect of powder properties on the convergence of powder stream in coaxial laser cladding [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(5): 0503008-1-9. (in Chinese)
- [13] 王维, 才磊, 杨光, 等. 激光熔覆同轴送粉喷嘴研制[J]. *中国激光*, 2012, 39(4): 67-73.
- WANG W, CAI L, YANG G, *et al.*. Research on the coaxial powder feeding nozzle for laser cladding [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(4): 67-73. (in Chinese)
- [14] 刘立峰, 董丽莹, 董玲, 等. 激光制造中同轴粉末流场分析与检测[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(8): 140-145.
- LIU L F, DONG L Y, DONG L, *et al.*. Research of coaxial powder stream field in laser manufacturing [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(8): 140-145. (in Chinese)
- [15] QI L H, ZENG X H, ZHOU J M, *et al.*. Stable micro-feeding of fine powders using a capillary with ultrasonic vibration [J]. *Powder Technology*, 2011, 214(2): 237-242.
- [16] 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)
- [17] 王洪成, 侯丽雅, 章维一. 驱动电压波形修圆对微流体脉冲惯性力和驱动效果的影响[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(10): 2251-2259.
- WANG H CH, HOU L Y, ZHANG W Y. Influence of rounded driving voltage waves on microfluidic pulse inertia force and driving effects [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(10): 2251-2259. (in Chinese)
- [18] WANG H CH, ZHANF W Y, DAI Z D. A novel approach for encapsulating cells into monodisperse picolitre droplets actuated by microfluidic pulse inertia force [J]. *Analytical Methods*, 2014, 6(24): 9754-9760.
- [19] 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 micro metallic powders [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(5): 1030-1038. (in Chinese)

作者简介:



王洪成(1985—),男,江苏淮安人,博士后,2008年、2013年于南京理工大学分别获得学士、博士学位,主要从事机械设计,微流体驱动-控制技术及其应用、机电一体化系统设计等方面的研究。
E-mail: whch31@163.com

导师简介:



戴振东(1962—),男,陕西三原人,教授,博士生导师,1983年、1986年、1999年于南京航空航天大学分别获得学士、硕士、博士学位,主要从事智能仿生机器人的机构学、动力学与控制、仿生设计及仿生伪装、精密机电系统及控制等研究。E-mail: zddai@nuaa.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)