

文章编号: 0258-7025(2007)Supplement-0346-04

# 激光再制造超细粉送粉器的实验研究

冯立伟, 杨洗陈, 罗 涛, 雷剑波

(天津工业大学激光技术研究所, 天津 300160)

**摘要** 针对超细粉输送过程中易出现挤压、摩擦、阻塞等现象, 提出了超细粉雾化机制, 阐述了超细粉送粉器的基本原理, 设计了一种新型的超细粉送粉器, 讨论了送粉器性能和超细粉末长距离输送实验。结果表明, 采用特殊结构的搅拌器, 避免了超细粉团聚现象, 增强了超细粉的输送性能; 载气量最佳工作区间为 3~8 L/min; 送粉速率与粉轮转速呈线性关系; 送粉稳定性好, 误差不大于 1.8%; 在送粉速度一定时, 载气量越大, 挺度越长, 且粉嘴口径减小时挺度越长, 因而具有良好的长距离输送能力。

**关键词** 激光技术; 送粉器; 超细粉; 激光熔覆; 气力输送; 雾化

中图分类号 TN249 文献标识码 A

## Experimental Measurement of Superfine Powder Feeder for Laser Refabrication

FENG Li-wei, YANG Xi-chen, LUO Tao, LEI Jian-bo

(Laser Processing Center, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300160, China)

**Abstract** Powder was likely to be pressed, rubbed, blocked in the delivery process of superfine powder, so superfine powder atomization mechanism was developed and the basic principle of superfine powder feeder was introduced, then a new type of superfine powder feeder was designed. Performance experiments and distant delivery experiments were performed. It was shown that the adoption of special structured mixer avoided aggregation's occurrence, enhanced the delivery performance of the superfine powder; linear relation occurred between powder feed rate and wheel speed; optimum working range of air flux was 3~8 L/min; stability was fine and its delivery error was less than 1.8%; stiffness was proportional to air flux, but it was incerse proportion to nozzle, and its distant delivery ability was good.

**Key words** laser technique; powder feeder; superfine powder; laser cladding; pneumatic conveying; atomization

## 1 引 言

近年来, 以激光熔覆为基础的激光再制造技术已日臻成熟, 在开展重大工程装备修复方面, 产生了显著的经济效益和社会效益<sup>[1~3]</sup>。送粉器作为激光再制造系统的重要组成部分, 主要用来严格按工艺要求向工件输送粉末, 其关键的技术要求是能保证定量、稳定、连续、均匀地送粉, 所以送粉器的技术性能对熔覆层质量有很大的影响。

当前典型的送粉器有螺杆式送粉器、刮板式送粉器、鼓轮式送粉器等, 主要用于输送普通粒度的合

金粉末。随着纳米材料的发展, 多种微纳米级的粉末材料大量用于激光熔覆, 如超细氧化物陶瓷粉末、钴包碳化物复合粉末等, 它们可以显著地细化组织、减小应力, 提高材料的硬度和耐腐蚀性能。但由于超细粉颗粒尺寸极小, 具有高表面能, 产生强分子间作用力, 易形成团聚体, 从而使粉末流动性变差, 分散性降低, 严重影响了粉末的均匀混合和送粉的连续性, 易出现挤压、摩擦、阻塞等现象, 不能稳定地向工件送粉。

在 Yang Xichen 等<sup>[4]</sup>工作的基础上, 本文提出

**基金项目:** 天津市科委重点攻关项目(033188011)资助课题。

**作者简介:** 冯立伟(1982—), 男, 山东潍坊人, 硕士研究生, 主要从事激光加工理论及应用方面的研究。

E-mail: feng\_liwei@163.com

**导师简介:** 杨洗陈(1941—), 男, 吉林长春人, 教授, 博士生导师, 主要从事激光与材料相互作用和激光加工理论及应用方面的研究。E-mail: yangxichen@126.com

一种超细粉雾化送粉机制,研制出一种新型超细粉送粉器。实验表明,该送粉器送粉性能良好,适合于超细粉的输送。

## 2 原理和结构

在常规送粉中,由于普通粉末颗粒较大,流动性好,粉末能自由流动,因而靠自重便可实现顺利输送;而超细粉末具有很强的粘附作用,为使之自由流动,必须对粉末进行雾化,呈悬浮状态。根据气力输送理论,当送粉管中气流平均速度大于超细粉末的悬浮速度时,粉末处于悬浮状态,达到雾化效果。用公式可表示为:

$$v_a = v_t, \quad (1)$$

$$v_t = \frac{d_s^2(\rho_s - \rho_a)g}{18\mu_a}, \quad (2)$$

其中  $v_a$  为气流平均速度(m/s);  $v_t$  为粉末悬浮速度(m/s);  $\rho_s$  为粉末的密实密度( $\text{kg}/\text{m}^3$ );  $\rho_a$  为空气的密度( $\text{kg}/\text{m}^3$ );  $d_s$  为粉末颗粒的当量球直径(m);  $\mu_a$  为空气的粘滞系数( $\text{kg} \cdot \text{s}/\text{m}^2$ )。

雾化后的粉末分子间作用力大大减小,避免了团聚现象,同时处于雾化状态的粉末在适当的气流作用下,便于实现平稳、均匀的输送。为此,可采取以下措施:

1) 进粉过程中,超细粉末易团聚,因此设计特殊的雾化器,强行打散团聚的粉末,同时通入压缩气体,初步实现雾化;

2) 设计特殊结构的粉轮和粉轮腔,利用粉轮上分布的小槽输送粉末,减少粉末的挤压、摩擦和阻塞,并可对粉末进行精确计量输送,粉轮运转速度均匀连续可调;

3) 出粉过程中,也通入压缩气体,保持合理的

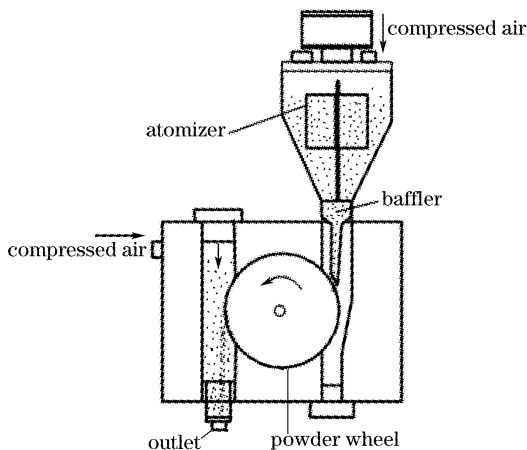


图1 超细送粉器原理结构图

Fig. 1 Schematic diagram of superfine powder feeder

混合比(粉末流量与空气流量之比),消除粉末与送粉管壁的粘滞阻力,使超细粉保持雾化状态,并为粉末提供输送动力。

根据上述原理,本文设计了超细粉送粉器,其结构原理如图1所示。

## 3 性能试验

选取 NiO<sub>2</sub>C, WC/Co 两种超细合金粉末,进行送粉性能试验。其中 NiO<sub>2</sub>C 粉末比重为 7.5,粒度为 20~25  $\mu\text{m}$ ,流动性较差; WC/Co 粉末比重为 8.3,粒度为 20~25  $\mu\text{m}$ ,流动性差。下面主要研究送粉速率、载气量、粉轮转速对送粉性能的影响。

### 3.1 粉轮转速对送粉速率的线性作用

粉末定量输送是靠粉轮完成的。在粉轮上均布着若干形状、容积相同的槽,槽容积很小,是输送粉末的主要结构。理论上送粉速率  $M_p$  可表示为:

$$M_p = nN_cV_c\rho, \quad (3)$$

其中  $n$  为粉轮转速,  $N_c$  为槽个数,  $V_c$  为槽的容积,  $\rho$  为超细粉末密度。

由(3)式知,  $n$  越大,  $M_p$  就越大。图2为送粉速率  $M_p$  与粉轮转速  $n$  的实验曲线,其中载气量为 4 L/min。可以看出,送粉速率与转速基本呈线性关系,与理论计算一致,这表明采取的措施已有效克服了团聚现象,实现了稳定连续气力输送。

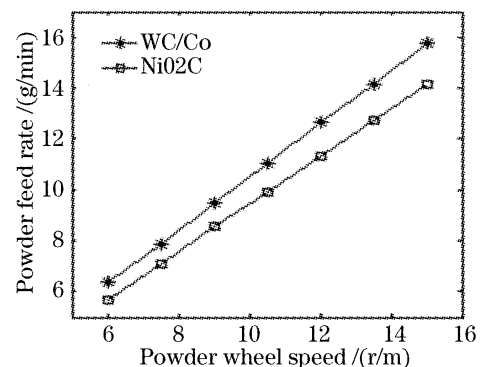


图2 送粉速率与粉轮转速的关系曲线

Fig. 2 Relationship curve between feed rate and wheel speed

### 3.2 载气量对送粉速率的影响

在送粉器中,气流用于协助粉末流动、减少粉末间摩擦,有利于超细粉末的顺利输送,同时要求气体对送粉速率不能产生影响。图3为粉轮转速  $n = 12$  r/min时载气量与送粉速率的关系曲线。可以看出,载气量在 3~8 L/min 内时,载气量对送粉速率影响很小;而不在此区间内时,载气量对送粉速率影响很大。大量实验证明,载气量最佳工作区间为

3~8 L/min。

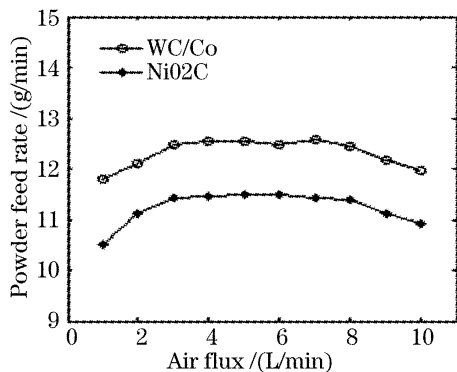


图 3 送粉速率与载气量的关系曲线

Fig. 3 Relationship curve between feed rate and air flux

### 3.3 送粉器的送粉稳定性

送粉器稳定性是指在粉轮转速和载气量固定的条件下,送粉速率随时间的变化状态。为此,设粉轮转速  $n=6\sim 15$  r/min,载气量  $V=4$  L/min,每 1 min 测量送粉速率 1 次,总计 10 min,分析得到 WC/Co 粉末的送粉速率与送粉时间的关系曲线,如图 4 所示。

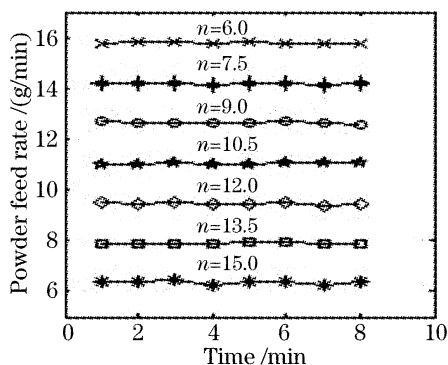


图 4 送粉速率与时间的关系曲线

Fig. 4 Relationship curve between feed rate and time

由图 4 可以看出,同一转速下,在所测时间内粉末的送粉速率  $M_p$  与时间  $t$  的关系曲线基本是一条与时间轴平行的直线,说明送粉器有良好的输送稳定性。送粉稳定性可用送粉误差评定,表示为:

$$\epsilon = \frac{S}{\Delta} \times 100\%, \quad (4)$$

其中  $S$  为每组数据均方根误差,大小为

$$S = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (M_i - \Delta)^2},$$

$M_i$  为第  $i$  次送粉速率。 $\Delta$  为每组实验的平均送粉速率,大小为

$$\Delta = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n M_i.$$

对 WC/Co 粉末的送粉误差进行统计,得到图 5 所示的曲线。可见,在不同粉轮转速下误差始终控制在 1.8% 之内,显示了良好的送粉稳定性。

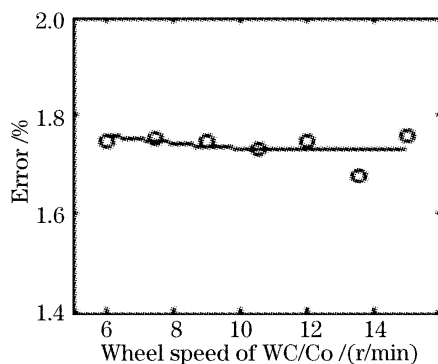


图 5 粉末的送粉误差曲线

Fig. 5 Transport error curve of powder

## 4 超细粉长距离输送实验

为了检测长距离送粉性能,进行了挺度实验。挺度是评价粉末输送性能的一个指标。粉末从粉嘴喷出以后在一段距离内几乎以直线的方式传输,这段直线距离定义为粉末流的挺度。挺度对激光熔覆有非常重要的作用,如果挺度长,粉末从粉嘴送出后,在分散前就送入了激光熔池,不仅提高了粉末利用率,而且提高了熔覆的质量。

图 6 为在不同载气量下,粉轮转速  $n=12$  r/min,送粉管长度  $L=2$  m,粉嘴口径  $D=2$  mm 时,拍摄的 WC/Co 粉末的粉流状态图片。可以看出,在送粉速率一定时,载气量越大,挺度越长。

图 7 是在载气量  $V=4$  L/min,粉轮转速  $n=$

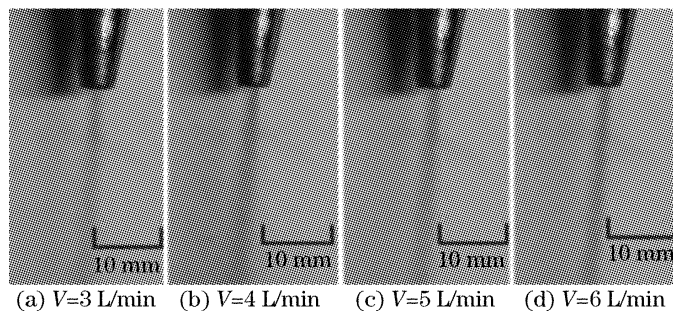


图 6 不同载气量下粉流的对比照片

Fig. 6 Photos of powder stream in different air flux

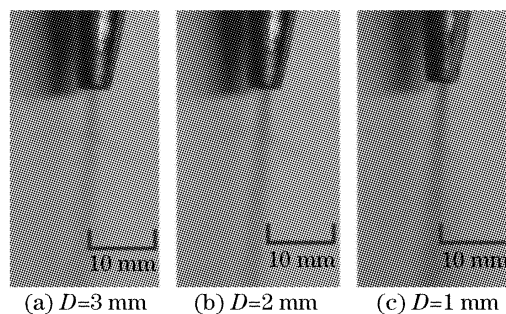


图 7 不同送粉口径下粉流的对比照片

Fig. 7 Photos of powder stream in different nozzle

12 r/min, 送粉管长度  $L=2$  m, 粉嘴的口径  $D$  分别为 3 mm, 2 mm, 1 mm 时 WC/Co 粉末粉流的状态图片。可见, 当粉嘴口径减小时, 粉末流挺度变大, 这是因为送粉管口径减小, 出口气流速度增大, 粉末在气流作用下不易发散, 故挺度变长。

## 5 结 论

对超细粉送粉器进行了实验研究, 并测试了其性能。结果表明, 送粉速率与粉轮的转速存在良好的线性关系; 载气量在 3~8 L/min 内时为最佳工作区; 送粉器具有良好的送粉稳定性, 输送误差不超过 1.8%; 在送粉速率一定时, 载气量越大, 挺度越长, 而粉嘴口径减小时挺度变长, 因而能够实现长距离输送粉末。该超细粉送粉器可以连续均匀地输送超细粉末, 满足激光再制造的工艺要求, 可应用于大中

型、重要零部件的激光再制造。

## 参 考 文 献

- 1 Yang Xichen, Wang Yunshan, Li Huishan *et al.*. Study on microstructure of SiCp/Al composite materials by CO<sub>2</sub> laser cladding/injection [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(3): 436~440  
杨洗陈, 王云山, 李会山 等. 激光制备 SiCp/Al 复合材料组织研究 [J]. *中国激光*, 2005, **32**(3): 436~440
- 2 Zhong Minlin, Yang Lin, Liu Wenjin *et al.*. Laser direct manufacturing W/Ni telescope collimation component [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(4): 482~486  
钟敏霖, 杨 林, 刘文今 等. 激光快速直接制造 W/Ni 合金太空望远镜准直器 [J]. *中国激光*, 2004, **31**(4): 482~486
- 3 Yang Xichen, Li Huishan, Wang Yunshan *et al.*. Laser refabrication technology for repairing expensive and important equipments [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2003, **40**(10): 53~57  
杨洗陈, 李会山, 王云山 等. 用于重大装备修复的激光再制造技术 [J]. *激光与光电子学进展*, 2003, **40**(10): 53~57
- 4 Yang Xichen, Wang Jianjun, Gao Shuying *et al.*. A new coaxial powder feeder without carrying gas for laser direct materials deposition [C]. *SPIE*, 2002, **4915**: 153~161