

文章编号: 0258-7025(2010)08-2098-06

# 激光同轴送粉喷嘴保护气体冲击射流场研究

易德先 胡芳友 赵维义 崔爱永 卢长亮

(海军航空工程学院青岛分院, 山东 青岛 266041)

**摘要** 为解决飞机结构损伤激光在线快速修复过程中同轴送粉喷嘴气体保护效果不佳的问题,利用粒子图像测速(PIV)、烟雾流动显示技术和 Fluent 软件对喷嘴保护气体流场进行了研究。系统分析了喷嘴气流速度变化、侧吹气流速度对喷嘴气体冲击射流场的影响。结果表明,当喷嘴三个喷口气流速度接近一致时,湍流扩散区消失,流场稳定。当喷嘴中心气流速度小于外环气流速度时,工件表面出现旋涡,破坏了流场的稳定性。侧风对喷嘴气体保护范围影响较大,随着侧风速度增大,气流轴线偏离喷嘴轴线距离增大。当侧风速度超过喷嘴气流速度 50% 时,喷嘴保护气流混入空气,完全失去对金属熔池的保护。

**关键词** 激光技术;保护气体流场;粒子图像测速;烟雾流动显示;同轴送粉喷嘴

**中图分类号** O353.5;TN249 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL20103708.2098

## Research on Shielding Gas Impacting Jet Flow Field on Laser Coaxial Powder Feeder Nozzle

Yi Dexian Hu Fangyou Zhao Weiyi Cui Aiyong Lu Changliang

(Qingdao Branch of Naval Aeronautical Engineering Institute, Qingdao, Shandong 266041, China)

**Abstract** Using particle image velocimetry (PIV), smoke flow visualization technology and Fluent software, shielding gas flow fields of coaxial powder feeder nozzle are researched in order to improve the shielding effect of gas flow on laser on-line rapid repair of aircraft structure damage. Influences of gas velocity from nozzle, crosswind velocity are systematically analyzed on gas impacting jet flow field. The results show that when the velocities of three-section gas flow are nearly consistent, the turbulent diffusion area disappears and a stable flow field can be obtained. When the gas velocity from center nozzle is smaller than that from outer ring, a vortex is generated and disturbs the stability of gas flow field. The crosswind produces prominent interfere to the gas protective range. With the increase of velocity of crosswind, the axis of shielding gas fields and nozzle get apart. When the velocity of crosswind surpasses 50% of the velocity of gas from nozzle, the shielding gas fails to protect molten pool totally because ambient air is mixed.

**Key words** laser technique; shielding gas flow field; particle image velocimetry; smoke flow visualization; coaxial powder feeder nozzle

## 1 引 言

飞机结构损伤件的激光在线快速修复是以激光熔覆技术为基础,逐层熔覆,在线修复飞机损伤的构件<sup>[1,2]</sup>。同轴送粉喷嘴是激光在线修复系统的关键部件之一,是保证飞机结构修复质量的重要环节。同轴送粉具有各向同性的优点,能很好地适应激光扫描方向、速度的变化,适合复杂轨迹运动,在基体

上逐层堆积,修复损伤的部位<sup>[3]</sup>。惰性保护气体在激光在线修复过程中起着非常重要的作用,一是保护聚焦透镜免受飞溅物和熔化金属颗粒的污染;二是输送金属粉末,为激光金属熔池提供稳定、连续和精确的粉末流;三是隔绝金属熔池及附近高温区域的空气,使金属高温区域免受空气中有害气体的影响,保证修复质量<sup>[4,5]</sup>。激光修复过程中,应选择合

收稿日期:2009-12-07;收到修改稿日期:2010-01-06

作者简介:易德先(1974—),男,博士研究生,工程师,主要从事激光加工技术在航空飞行器维修领域中的应用研究。

E-mail: yidexian@126.com

导师简介:胡芳友(1960—),男,教授,博士生导师,主要从事激光加工技术在航空飞行器维修领域中的应用研究。

E-mail: fyh1960@sina.com

适的保护气体参数,保护好金属熔池及附近区域,否则空气中的活性气体氧容易与金属零件高温区域反应生成氧化物,影响结构件的修复质量。

国内外学者对激光同轴送粉喷嘴气固两相流动进行了深入研究,分析了喷嘴的结构参数、送粉参数对粉末流浓度、速度分布、粉末汇集性能的影响规律<sup>[6~13]</sup>,而对喷嘴保护气体流场研究较少<sup>[14]</sup>。对同轴送粉喷嘴保护气体流场研究可分冷态(不通光、不通粉)和热态(通光、通粉)两步进行。为搞清楚喷嘴保护气流速度变化对喷嘴气体流场的单独影响,采用粒子图像测速(PIV)、烟气流场实验和数值模拟研究保护气体冲击射流场的变化规律。本文重点报道冷态情况下喷嘴气体流场的研究结果。

## 2 实验装置与数值模拟

### 2.1 粒子图像测速实验装置

实验测量装置包括喷嘴气体流动系统和 PIV 系统,如图 1 所示。

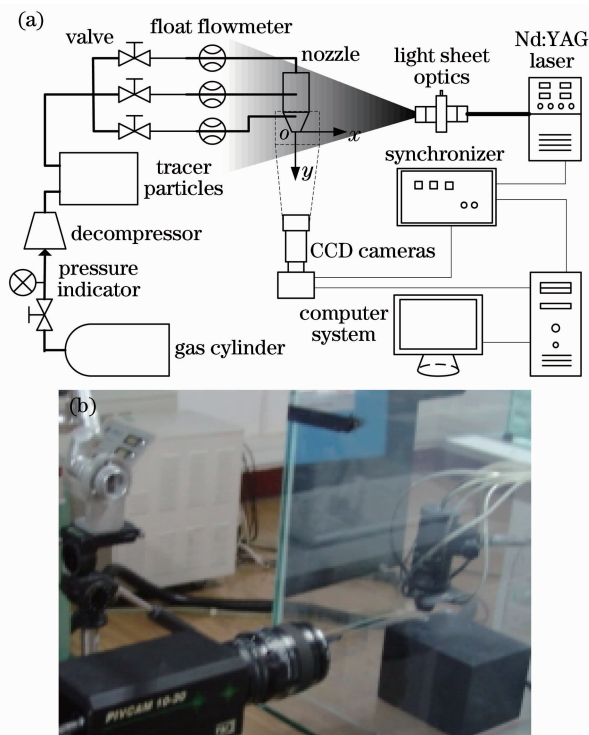


图 1 粒子图像测速实验装置。(a) 原理图;(b) 实验装置

Fig. 1 PIV experimental apparatus. (a) schematic diagram;

(b) picture of the experimental apparatus

#### 2.1.1 喷嘴气体流动系统

高压气瓶出来的空气经减压器(型号:YQAR-731L)、示踪粒子发生器分三路通过流量计,从喷嘴喷出。选用平均直径 $0.5\ \mu\text{m}$ 的碳化硅粒子(质量浓度为 $3.21 \times 10^3\ \text{kg}/\text{m}^3$ ,折射指数为2.65)作为示踪

粒子。为防止周围环境对气体流场测量的干扰,喷嘴流场实验测量段放置在有机玻璃罩内( $1500\ \text{mm} \times 800\ \text{mm} \times 600\ \text{mm}$ ),有机玻璃罩侧面靠近底部有宽5 cm的开口,以保持有机玻璃罩内气体压力稳定。同轴送粉喷嘴由中心、内环、外环和冷却水套组成。中心是激光束通道,通惰性气体保护聚焦透镜,内环是载气粉末流通道,外环接保护气体。

#### 2.1.2 PIV 系统

实验光源采用 New Wave 公司双脉冲 Nd:YAG 激光器(波长 $\lambda = 532\ \text{nm}$ ,脉冲持续时间为10 ns),脉冲激光束经导光臂传到片光源的透镜组形成片光,片光厚度约1 mm,照亮测试的流场区域。用 TSI 公司 PIVCAM10-30 互/自相关 CCD 数码相机拍摄,分辨率为 $1016\ \text{pixel} \times 1008\ \text{pixel}$ 。同步器控制双脉冲激光和 CCD 相机同步工作。

### 2.2 烟雾流动显示实验装置

高压气瓶出来的空气经减压器(型号:YQAR-731L)、烟雾发生器分三路通过流量计,从喷嘴喷出。旋涡气泵(型号:HG1100B)流出的气体经阀门、玻璃转子流量计(型号:LZB-50)、直径100 mm 侧风管吹向喷嘴的侧面,模拟外界气流对喷嘴气体保护区域的影响。侧吹管内安装有气筛,抑制气流的径向速度分量,减小侧吹气流的紊流度。

选用香燃烧产生的烟作为流动显示粒子<sup>[15]</sup>。连续激光器(功率为200 mW,波长 $\lambda$ 为532 nm,光束发散角小于1 mrad)发出的激光束经柱面镜形成片光,经0.8 mm宽的狭缝后,照亮测试的流场区域,用 CCD 数码相机拍摄并记录,经计算机分析处理,得到喷嘴气体流动图像,实验装置如图 2 所示。



图 2 烟雾流动显示实验装置

Fig. 2 Picture of the smoke flow visualization experimental apparatus

### 2.3 实验方法

激光片光平面与喷嘴中心轴线重合并照亮所测量的流场区域,CCD 相机光轴与片光平面垂直。喷

嘴出口距工件表面(平面)10 mm, CCD 相机拍摄聚焦平面为喷嘴轴对称面。调节输入同轴送粉喷嘴的气体流量, 分别控制中心气流速度  $v_1$ , 内环气流速度  $v_2$  和外环气流速度  $v_3$ 。

PIV 实验测量喷嘴三个喷口不同气流速度情况下, 对气体冲击射流场的影响。每次采集物理区域大小为  $27 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ , 互相关算法得到速度场(在南京航空航天大学流动控制与噪声研究室完成本实验)。

烟雾流动显示实验时, 调整喷嘴三个喷口的气流速度一致, 即  $v_1 = v_2 = v_3$ , 主要测量不同喷嘴气流速度情况下, 侧吹气流速度对喷嘴气流的影响。

## 2.4 数值计算

同轴送粉喷嘴出口气体速度小于  $20 \text{ m/s}$ , 为不可压缩气体, 采用随机数发生器(RNG)  $k-\epsilon$  湍流模型对同轴送粉喷嘴气体冲击射流场进行计算<sup>[16]</sup>。采用流体动力学(CFD)软件 Fluent 6.3.26 进行数值模拟, 边界条件为: 进口处给定速度入口条件, 出口处为压力出口边界条件, 如图 3 所示。同轴送粉喷嘴为圆柱体, 轴对称结构, 利用轴对称模型建立二维半平面计算区域, 计算区域大小为  $100 \text{ mm} \times 68 \text{ mm}$ , 喷嘴离工件(挡板)10 mm。计算中心气流速度  $v_1$ , 内环气流速度  $v_2$  和外环气流速度  $v_3$  对气体流场的影响。网格是离散的基础, 网格划分的质量直接决定着数值模拟结果的精确度和收敛的快慢。采用结构化网格划分, 喷嘴出口和工件表面附近的网格划分较密, 并考虑喷嘴边缘倒角的影响。采用 Fluent 软件计算喷嘴流场时, 不考虑气体与激光束、气体与工件之间的热交换。

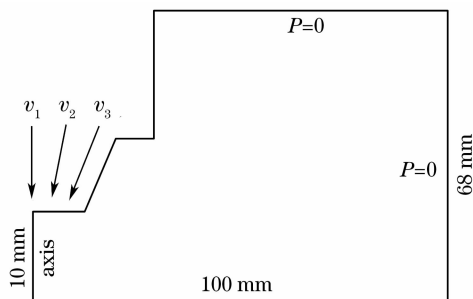


图 3 计算区域和边界条件

Fig. 3 Calculation field and boundary condition

## 3 结果与分析

### 3.1 气体速度场

图 4(a)为 PIV 测量得到的喷嘴气流速度场, 图 4(b)为数值计算得到的速度场, 图 4(c)为烟雾流动

显示照片。可看出 PIV 测量和计算得到的速度场结构相似。图 5 为距离工件表面  $5.0 \text{ mm}$ ,  $1.0 \text{ mm}$  处喷嘴气流速度沿径向分布曲线。PIV 测量得到的流场与数值计算有一定的偏差, 这是因为 PIV 测量的是瞬时速度, 而数值计算得到的是平均速度, 两者存在差异, 但流场结构基本一致。可以看出, 刚从喷嘴喷出的气体仍具有自由射流特征, 轴向速度分量远远大于径向速度分量, 由于外喷口具有一定的锥度, 射流收敛。三个喷口气体流出速度不同, 有明显的速度差异, 速度界面之间存在强烈的剪切作用, 在交界区产生剧烈的湍流扩散, 图中有明显的湍流扩散区。接近工件表面, 气流轴向速度急剧减小, 径向速度增加, 流线发生偏转, 靠近工件表面, 主要是径向速度, 气流比较平稳地沿工件表面流动。在激光

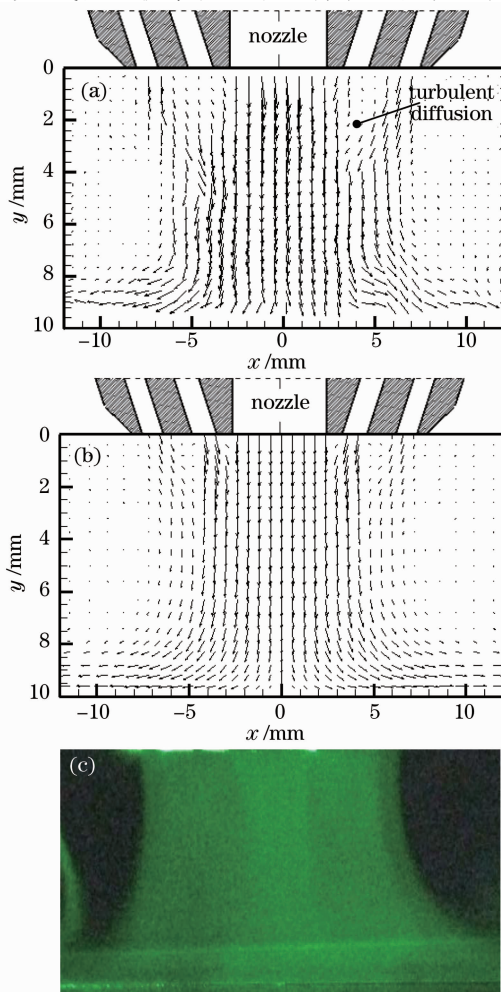


图 4 速度场 ( $v_1 = 7.9 \text{ m/s}$ ,  $v_2 = 7.8 \text{ m/s}$ ,  $v_3 = 3.6 \text{ m/s}$ ) (a) PIV 测量流场; (b) 数值计算流场; (c) 流动显示照片  
Fig. 4 Velocity field ( $v_1 = 7.9 \text{ m/s}$ ,  $v_2 = 7.8 \text{ m/s}$ ,  $v_3 = 3.6 \text{ m/s}$ ). (a) PIV measurement velocity field; (b) simulation velocity field; (c) picture of flow visualization

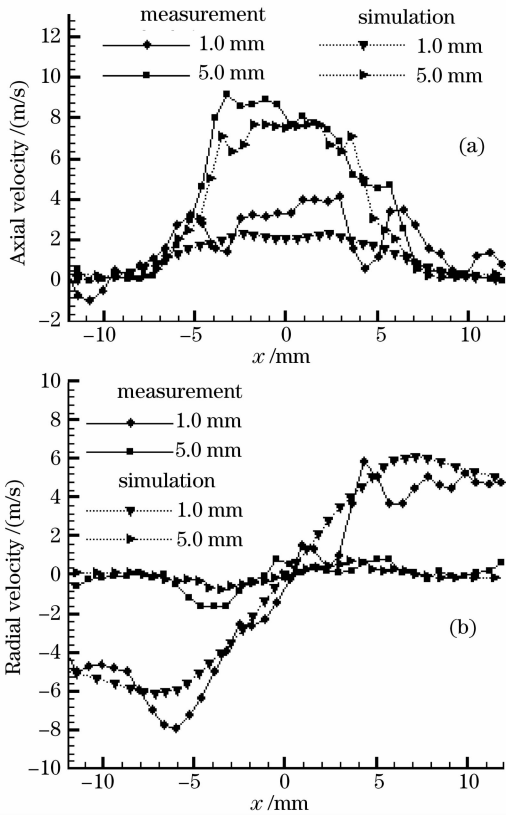


图 5 速度沿径向分布。(a) 轴向速度；(b) 径向速度  
Fig. 5 Distributions of velocity. (a) axial velocity;  
(b) radial velocity

在线修复过程中,气流以喷嘴为中心,沿工件表面向四周流动,可排除金属熔池附近的空气,保护金属熔池及附近高温区域免受空气中有害气体的影响。

### 3.2 气体速度变化对流场的影响

实验表明,喷嘴中心、内环、外环气流速度之间的相互关系是流场稳定的主要影响因素。

当  $v_1 > v_2 > v_3$  时,流场稳定,如图 4(a)所示,随着速度的增大,气流刚性增加,抵抗外界气流干扰能随之增强。当  $v_1 \approx v_2 \approx v_3$  时,喷嘴喷出的气流速度接近一致时,没有速度差异,湍流扩散区消失,此时流态最好。

当  $v_3 > 1.2v_1$  时,在工件表面出现旋涡,如图 6 (a)所示。 $v_3 > 4v_1$  时,在工件表面出现两个方向相反的旋涡,如图 6(b)所示。这是因为实验时喷嘴并不完全同心,喷嘴两侧喷出气流速度存在差异,当外环气流速度  $v_3$  稍大于中心气流速度  $v_1$  时,容易在工件表面出现旋涡;当外环气流速度远大于中心气流速度时,外环气流的约束作用增强,出现了双旋涡。旋涡区和周围空气相隔一层较薄的气流层“b”,如果气流间隔层“b”较薄,则在外界干扰下,可能被冲破,使得旋涡区和周围空气连通起来,削弱了气流

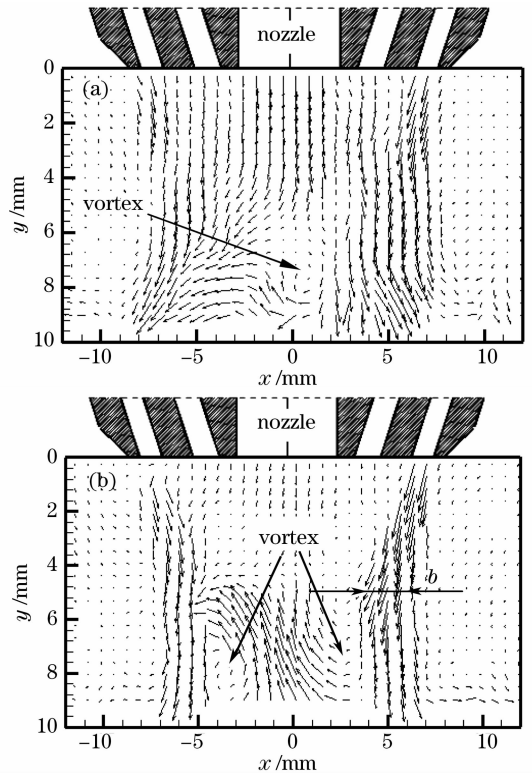


图 6 喷嘴气体冲击射流场速度分布

Fig. 6 Velocity distribution of nozzle gas impacting jet field. (a)  $v_1 = 5.8 \text{ m/s}$ ,  $v_2 = 5.2 \text{ m/s}$ ,  $v_3 = 7.3 \text{ m/s}$ ; (b)  $v_1 = 2 \text{ m/s}$ ,  $v_2 = 2.6 \text{ m/s}$ ,  $v_3 = 9.0 \text{ m/s}$

的保护作用。

在激光在线修复时,工件熔池区域的气体被加热,并产生热对流,其流动方向恰好与喷嘴中流出的保护气流方向相反。保护气流区的外环喷出的气流温度较低,相对于中心部分具有较大粘滞力,对气流的受热上浮起着抑制作用,在热态时工件上更容易出现旋涡。因此在设计同轴送粉喷嘴时,适当增大外环的间隙,增大气流间隔层“b”的厚度,以增强喷嘴气流抵抗干扰的能力,提高保护效果。

### 3.3 侧风的影响

飞机结构损伤的激光修复过程中,喷嘴喷出柔性保护气套,受到外界侧风(自然风或强迫通风)吹动而产生变形和弯曲,当侧吹气流速度增加时,保护气流变形和弯曲越严重,缩小有效的保护范围,甚至会使金属熔池完全暴露在空气中而失去保护作用。图 7 是喷嘴出口距离工件表面 10 mm,喷嘴气流速度为 4 m/s,侧向速度为 2 m/s 时的烟雾流动显示照片。图 8 为数值计算得到的不同喷嘴气体速度时,侧向速度与保护范围之间的关系。当工件表面的保护气体向四周流出时,受气体与工件表面摩擦的影

响,速度不断降低,径向速度大于侧面气流速度的区域,认为保护气体能够排除该区域的空气,是激光修复过程中的有效保护区域。从图中可以看出,在喷嘴出口距工件表面距离一定时,随着喷嘴气流速度增大,气流保护范围随之增大。随着侧向气流速度增大,保护气流变形和弯曲越严重,保护范围随之减小,当侧向气流速度大于喷嘴气体喷出速度 50% 以后,周围空气进入喷嘴气流区域,喷嘴气流完全失去对金属熔池的保护。

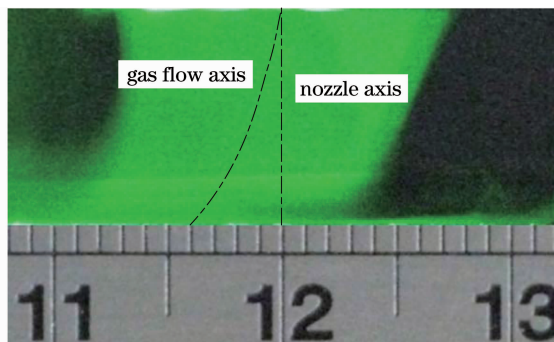


图 7 烟雾流动显示

Fig. 7 Picture of smoke flow visualization

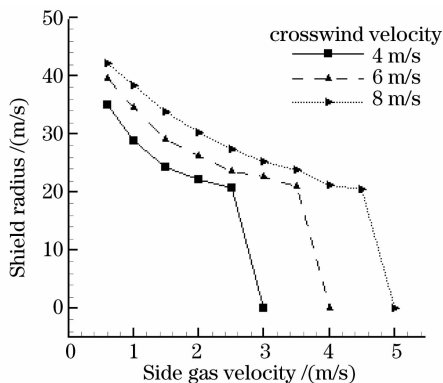


图 8 保护半径随侧向气流速度变化曲线

Fig. 8 Change of protection radius under various crosswind velocity

因此在激光在线修复过程中,应采取措施防止外界的干扰气流,并适当增大喷嘴气流速度,增强喷嘴气流的抗干扰能力。

## 4 结 论

利用粒子图像测速、烟雾流动显示技术和 Fluent 软件对喷嘴保护气体流场进行了研究。结果表明,喷嘴中心、内环和外环气流流速由内向外递减时可获得稳定的流场。喷嘴中心气流速度大于外环气流速度时,工件表面出现旋涡,外环气流速度大于中心气流速度 4 倍以上时,工件表面出现双旋涡,破坏了流场的稳定性。适当增大喷嘴外环的间隙,

增加气流间隔层“b”的厚度,可增强喷嘴气流抵抗干扰的能力,提高保护效果。侧向干扰气流对气体流场影响较大,本实验参数内,当侧向干扰气流速度大于喷嘴喷出气体速度的 50% 以后,干扰气流进入喷嘴气流区域,喷嘴气流完全失去对金属熔池的保护。

## 参 考 文 献

- 1 Yang Xichen, Li Huishan, Wang Yunshan *et al.*. Laser refabricating 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
- 2 Hu Fangyou, Hui Li, Yi Dexian *et al.*. Laser repair of aircraft battle damage [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(9):2245~2250  
胡芳友,回丽,易德先等.飞机损伤的激光抢修技术[J].*中国激光*, 2009, **36**(9):2245~2250
- 3 J. Lin, W. M. Steen. Powder flow and catchment during coaxial laser cladding [C]. *SPIE*, 1997, **3097**:517~528
- 4 Antonio Ancona, Teresa Sibillano, Pietro Mario Lugarà *et al.*. An analysis of the shielding gas flow from a coaxial conical nozzle during high power CO<sub>2</sub> laser welding [J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2006, **39**(3):563~574
- 5 Jin Xiaoshu, Yang Xichen, Wang Yunshan *et al.*. Research on the coaxial powder feeder nozzle in 3D direct manufacturing and re-manufacturing [J]. *Applied Laser*, 2008, **28**(4):266~270  
靳晓曙,杨洗陈,王云山等.激光三维直接制造和再制造新型同轴送粉喷嘴的研究[J].*应用激光*, 2008, **28**(4):266~270
- 6 Yang Xichen. Momentum and mass transferences of coaxial powder stream in laser manufacturing [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(11):1664~1679  
杨洗陈.激光制造中同轴粉末流动量和质量传输[J].*中国激光*, 2008, **35**(11):1664~1679
- 7 Yang Xichen, Lei Jianbo, Liu Yunwu *et al.*. Experimental measurement of metal powder stream concentration field in laser manufacturing [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(7):993~997  
杨洗陈,雷剑波,刘运武等.激光制造中金属粉末流浓度场的检测[J].*中国激光*, 2006, **33**(7):993~997
- 8 Yang Nan, Yang Xichen. Numerical simulation of flow field of nozzle in laser cladding [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(3):452~455  
杨楠,杨洗陈.激光熔覆中喷嘴流场的数值模拟[J].*中国激光*, 2008, **35**(3):452~455
- 9 Jin Xiaoshu, Yang Xichen, Feng Liwei *et al.*. Numerical simulation of coaxial powder flow with carrying gas in laser manufacturing [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2007, **43**(5):161~166  
靳晓曙,杨洗陈,冯立伟等.激光制造中载气式同轴送粉粉末流场的数值模拟[J].*机械工程学报*, 2007, **43**(5):161~166
- 10 Li Huishan, Wang Chunxian, Fu Jicheng *et al.*. Research on the coaxial carrier-gas powder feed laser cladding [J]. *Applied Laser*, 2006, **26**(4):223~226  
李会山,王春娴,付继成等.同轴载气送粉激光熔覆粉末流参数研究[J].*应用激光*, 2006, **26**(4):223~226
- 11 Jehnming Lin. Numerical simulation of the focused powder streams in coaxial laser cladding [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2000, **105**(1-2):17~23
- 12 Lin Li. Modelling powder concentration distribution from a coaxial deposition nozzle for laser-based rapid tooling [J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2004,

- 126**(1):33~41
- 13 Heng Pan, Frank Liou. Numerical simulation of metallic powder flow in a coaxial nozzle for the laser aided deposition process [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2005, **168**(2):230~244
- 14 Huang Rui, Hu Zhihua, Chen Kai. The study of laser welding shielded gas by schlieren [J]. *Welding Technology*, 2007, **36**(2):8~11  
黄 瑞,胡治华,陈 铠. 激光焊接保护气体流态的纹影法研究 [J]. 焊接技术, 2007, **36**(2):8~11
- 15 Gu Yunsong, Ming Xiao. Investigation on the characteristics and structures of unsteady flow field near the zero-mass flux jet with PIV [J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2005, **19**(1):83~86  
顾蕴松,明 晓. 应用 PIV 技术研究“零质量”射流的非定常流场特性[J]. 实验流体力学, 2005, **19**(1):83~86
- 16 Wang Fujun. Computational Fluid Dynamics Analysis——CFD Software Principle and Application [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004. 124~125  
王福军. 计算流体力学分析——CFD 软件原理与应用[M]. 北京:清华大学出版社, 2004. 124~125