

文章编号: 0258-7025(2010)12-3162-06

载气式同轴送粉喷嘴的数值模拟及实验研究

路桥潘 张安峰 李涤尘 朱刚贤 同治强 付伟

(西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 陕西 西安 710049)

摘要 为了提高同轴送粉喷嘴的汇聚性, 增大粉末汇聚焦距, 解决成形过程中粉末利用率低及粉末反弹造成的喷嘴堵粉等问题, 研究了同轴送粉喷嘴结构参数中的粉腔间隙和粉腔锥角对粉末汇聚的影响规律。计算结果表明, 在其他工艺参数一定的条件下, 粉腔间隙越小, 粉末的汇聚性越好; 粉腔锥角越大, 粉末的汇聚焦距越大, 有利于零件的成形。所建模型和模拟结果对同轴送粉喷嘴的结构优化设计具有参考价值。并对模拟结果进行了实验验证, 得到了工艺参数对单道高度和宽度的影响, 并优化了工艺参数, 最终制造出高度均匀的薄壁零件。

关键词 光学制造; 激光金属直接制造; 同轴送粉喷嘴; 数值模拟; 工艺参数

中图分类号 TG665; TN249 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20103712.3162

Numerical Simulation and Experimental Research on Gas-Carrier Coaxial Powder Nozzle

Lu Qiaopan Zhang Anfeng Li Dichen Zhu Gangxian Tong Zhiqiang Fu Wei

(State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 710049, China)

Abstract In order to solve the problems of poor utilization of powder and nozzle blocked by rebounded powder by improving the powder gathering characteristic and increasing the powder focal length, the influence of the cone ring gap and the cone angle of the coaxial nozzle on the powder convergence is studied. The results show that the powder gathering characteristic is better when the cone ring gap is smaller and the nozzle focal length is longer when the cone angle is bigger with other process parameters invariable. The conclusion is valuable for the coaxial nozzle designing and performance improving. The simulation results are verified by experiments. The effects of process parameters on the height and width of the single-trace are studied. The thin wall parts are manufactured by optimizing the process parameters.

Key words optical fabrication; laser direct metal manufacturing; coaxial nozzle; numerical simulation; process parameters

1 引 言

激光金属直接制造(LDMM)技术是近十几年来兴起的一种先进制造技术^[1~6], LDMM 技术采用高能激光为热源, 以预置或同步供给金属粉末或金属丝为成形材料, 在金属基体上逐层堆积而成形为金属零件。同轴送粉喷嘴是实现激光直接制造的

关键部件, 它的主要作用是把金属粉末均匀、稳定地输送到熔池中。在同轴送粉中, 由于粉末流与激光束同轴输出, 所以当粉末汇聚性差、汇聚焦距太小时(粉末汇聚焦距是指喷嘴出口到粉末汇聚焦点的距离), 在成形过程中粉末的反弹容易造成喷嘴堵粉而影响零件的成形质量, 国内外针对这一问题已做了

收稿日期: 2010-04-01; 收到修改稿日期: 2010-05-10

基金项目: 国家 973 计划(2007CB707704)、国家自然科学基金(50675171)和长江学者和创新团队发展计划(PCSIRT0646)资助课题。

作者简介: 路桥潘(1983—), 男, 硕士研究生, 主要从事激光金属直接成形方面的研究。E-mail: lqp2004@163.com

导师简介: 张安峰(1956—), 男, 博士, 副教授, 主要从事控形控性快速成形制造技术及其精密成形工艺和不锈钢抗菌材料抗菌机理与性能等方面的研究。E-mail: zhangaf@mail.xjtu.edu.cn

大量的研究。Lin^[7]研究了雷诺数为 2000 时,同轴送粉喷嘴内的气粉两相流动,计算和分析了粉末流浓度的分布规律;杨洗陈等^[8~10]研究建立了同轴送粉喷嘴粉末流浓度场和温度场的理论模型,开发了一种新型数字粒子图像测速(DPIV)系统来检测粉末流的浓度场分布,并研究了金属粉末流和载流气体的动量和质量传输过程。

本文利用 FLUENT 软件中的离散相模型,重点研究了同轴送粉喷嘴粉腔间隙和粉腔锥角对粉末汇聚特性的影响规律,对同轴送粉喷嘴的结构优化设计具有参考价值。

2 同轴送粉喷嘴模型的建立

为提高同轴送粉喷嘴的粉末汇聚性和增大粉末汇聚焦距,针对不同的粉腔间隙和粉腔锥角,用 FLUENT 软件模拟其对粉末汇聚直径和汇聚焦距的影响。考虑到所用金属粉末颗粒的直径大小分布,粉腔间隙 δ 和粉腔锥角 α 的取值如表 1 所示,外层保护气气腔间隙 ε 为 1.5 mm 不变。

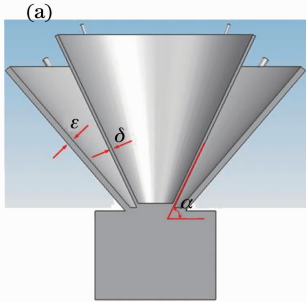


表 1 粉腔间隙和粉腔锥角的取值

Table 1 Values of the cone ring gap and the cone angle

Cone ring gap δ /mm	0.5	1.0	1.5	
Cone angle α /($^{\circ}$)	60	65	70	75

2.1 建模及划分网格

同轴送粉喷嘴示意图如图 1 所示,由于同轴送粉喷嘴是轴对称结构,所以建模计算时只需要取物理模型的 1/2,这样可以减少模拟的计算时间,建立的喷嘴三维模型如图 2(a)所示。图 2(b)为模型的网格划分及边界条件,未标出的边界条件均为壁面。

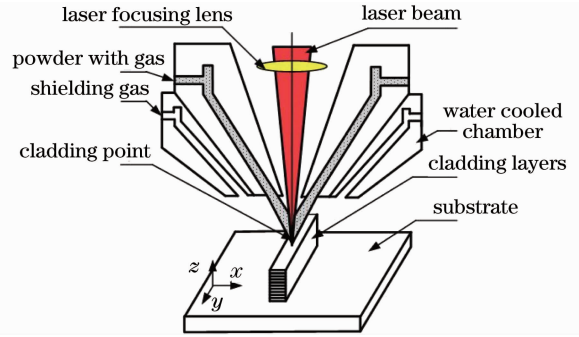


图 1 同轴送粉喷嘴示意图

Fig. 1 Schematic of the coaxial powder nozzle

图 2 (a)喷嘴三维模型,(b)边界条件

Fig. 2 (a)3D model of the nozzle, (b)boundary condition

2.2 粉末流场计算模型选择

根据文献[11]的研究,在同轴喷嘴的粉末流场中,不管是喷嘴内压缩惰性气体中的颗粒部分,还是喷嘴外大气环境空气中的颗粒部分,粉末的体积加载率(单位时间内通过截面的颗粒体积与气体体积之比)都远小于 10%,在 FLUENT 软件中,当颗粒的体积分数小于 10%时,颗粒被当作离散相来处理,流体相被当作连续相来处理。所以采用遵循欧拉-拉格朗日方程的离散相模型,通过求解 Navier-Stokes 方程,可以计算出粉末颗粒的运动规律。

3 粉末流场模拟计算

3.1 模型假设

1)不考虑激光能量对气、粉两相运动的影响,计

算在冷态下进行;

2)气、粉两相具有相同的速度,都是均匀流场;

3)只考虑惯性力和重力对粉末颗粒运动的影响,忽略附加质量力、升力等;

4)忽略颗粒间碰撞,粉末颗粒间不存在颗粒压力和颗粒粘性。

3.2 计算结果及分析

图 3 为粉末汇聚浓度和粉末汇聚平面示意图(粉末汇聚平面是指粉末汇聚浓度最大处的横截面)。在粉末汇聚平面上,不同的腔间隙和粉腔锥角下粉末汇聚浓度随着距喷嘴中心距离远近的分布规律如图 4,5 所示;粉腔间隙和粉腔锥角对粉末汇聚焦距的影响规律如图 6 所示。

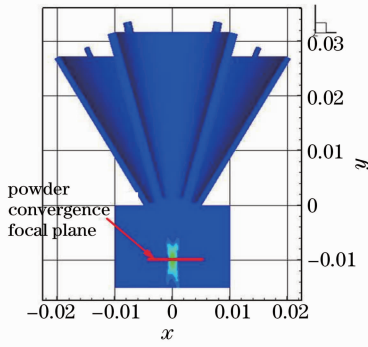


图 3 粉末浓度分布和粉末汇聚焦平面示意图

Fig. 3 Schematic of powder concentration distribution and powder convergence focal plane

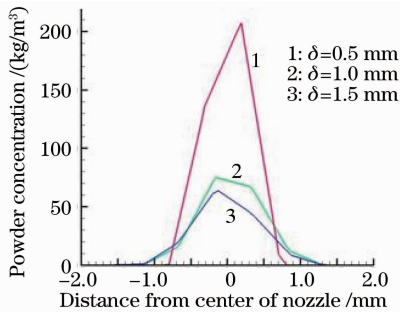


图 4 不同粉腔间隙下的粉末汇聚浓度

Fig. 4 Concentration of powder with different cone ring gaps

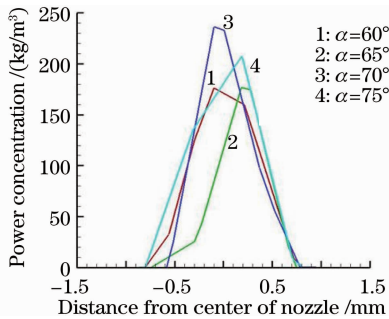


图 5 不同粉腔锥角下的粉末汇聚浓度

Fig. 5 Concentration of powder with different cone angles

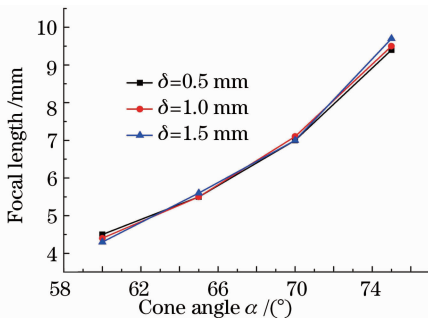


图 6 不同粉腔锥角和粉腔间隙下的粉末汇聚焦距

Fig. 6 Focal length of the powder convergence with different cone angles and cone ring gaps

将粉末汇聚浓度值降到中心最大浓度值的 $1/e^2$ 时对应的直径定义为粉末汇聚直径^[12]。从图 4 可以看出,当粉腔间隙 $\delta=0.5$ mm 时粉末汇聚直径约为 1 mm;当 $\delta=1.5$ mm 时粉末汇聚直径约为 2 mm。在一定范围内粉腔间隙越小粉末的汇聚性越好;由图 5 可以看出,不同的粉腔锥角下,粉末汇聚直径和粉末最大汇聚浓度都变化不大,所以粉末的汇聚浓度和汇聚直径主要受粉腔间隙的影响,且粉末汇聚浓度近似为高斯分布。

由图 6 可以看出,粉末汇聚焦距主要受粉腔锥角的影响,其他条件不变时,粉末汇聚焦距随着粉腔锥角的增大而增大,大的粉末汇聚焦距可以使成形时同轴喷嘴距离零件较远,具有防止粉末反弹堵塞激光出口、方便观察、减少喷嘴在成形中对弧光辐射的吸收等优点。

4 同轴送粉喷嘴的汇聚性拍摄实验

根据 3 节的模拟优化结果,选择同轴送粉喷嘴的粉腔间隙 $\delta=0.5$ mm,粉腔锥角 $\alpha=75^\circ$ 来设计制造同轴送粉喷嘴,实物如图 7 所示。为检验同轴送粉喷嘴的汇聚性和确定粉末的汇聚焦距,用 Trouble Shooter 高速摄影机拍摄粉末的输送过程。图 8 为高速摄影



图 7 同轴送粉喷嘴实物图

Fig. 7 Picture of the coaxial powder nozzle

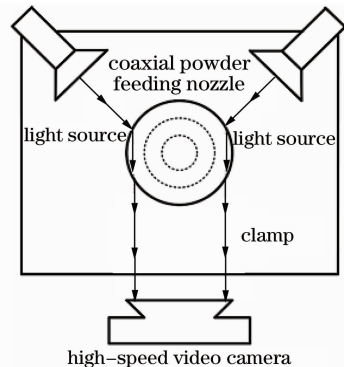


图 8 高速摄影机拍摄示意图

Fig. 8 Schematic of the high-speed video camera shooting

机和同轴送粉喷嘴的相对位置示意图(俯视图),图 9 为改进前后喷嘴粉末输送的视频截图,拍摄中所用粉末均为不锈钢 316 L,送粉量 $M_p = 7.8 \text{ g/min}$,载气量 $q = 4 \text{ L/min}$ 。由图 9 可以看出,通过优化结构

参数,改进后的喷嘴粉末流先汇聚后发散,与改进前的喷嘴相比,具有较好的汇聚性和较大的粉末汇聚焦距,改进后喷嘴的粉末汇聚焦距约为 12 mm,和模拟结果基本一致。

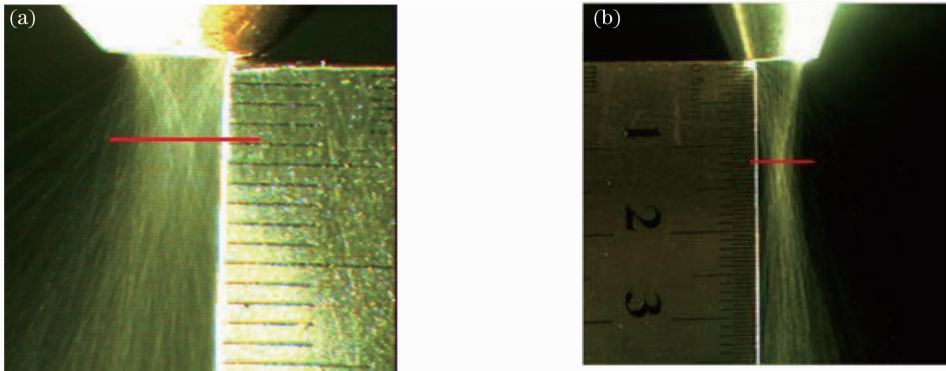


图 9 粉末的汇聚性。(a)改进前,(b)改进后

Fig. 9 Pictures of the powder convergence. (a) before improved, (b) After improved

5 同轴送粉喷嘴的零件成形实验

5.1 实验设备及材料

为确定同轴送粉喷嘴的最佳工艺参数,进行了一系列单道工艺实验。实验所用激光器为 GSI 公司的 JK1002 型 Nd:YAG 激光器,最大输出功率为 1 kW,光斑直径为 0.5 mm。实验基板材料和所用粉末材料均为 316L 不锈钢。

根据前期的实验,部分工艺参数优化如表 2 所示。在这些工艺参数不变的情况下,零件成形质量主要受激光功率 P ,喷嘴距离基板的距离 H 和单层提升量 ΔZ 的影响。在不同的工艺参数下分别进行单道实验。单道熔覆层经过线切割、清洗、打磨后在 KEYENCE VH-600 光学显微镜下测量高度和宽度,测量示意图如图 10 所示。

表 2 工艺参数

Table 2 Process parameters

Powder mass flow rate $M_p / (\text{g/min})$	Carrier gas flow rate $q / (\text{L/min})$	Shielding gas flow rate $Q / (\text{L/min})$	Scanning velocity $V / (\text{mm/s})$
7.8	8	4	10

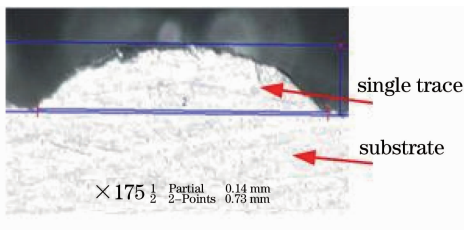


图 10 光学显微镜下测量单道熔覆层的高度和宽度示意图

Fig. 10 Schematic of the height and width of the single trace measured by optical microscope

5.2 实验结果及分析

喷嘴与基板相距不同距离下,激光功率分别为 230 W 和 270 W,单道的平均高度和平均宽度如图 11,12 所示。

由图 11 可以看出随着喷嘴与基板之间距离的增加,单道高度先增大后减小,在 $H = 13 \text{ mm}$ 处达

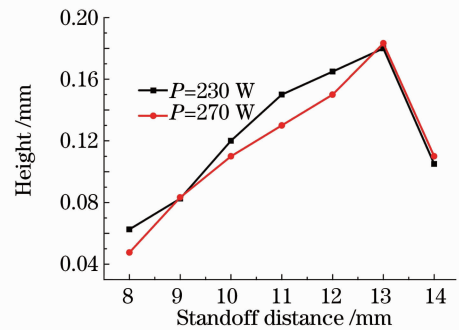


图 11 不同距离下的单道高度

Fig. 11 Heights of the single traces with different standoff distances

到最大值,根据文献[13]中研究的激光直接制造在开环情况下的成形规律,要想获得良好的成形质量,成形零件时应选择喷嘴距离基板的距离 H 在 8~13 mm 之间;由图 12 可以看出喷嘴距基板不同距离

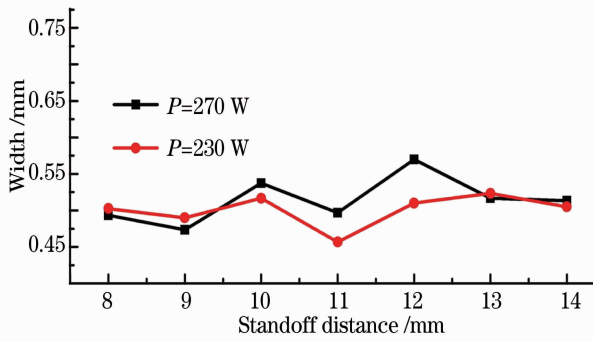


图 12 不同距离下的单道宽度

Fig. 12 Widths of the single traces with different standoff distances

时单道的宽度变化不是很大,都在 0.5mm 左右。

不同激光功率下,单道熔覆层的平均高度和平均宽度如图 13,14 所示。

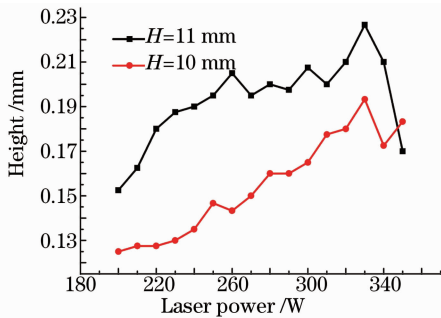


图 13 不同激光功率下的单道高度

Fig. 13 Heights of the single traces with different laser powers

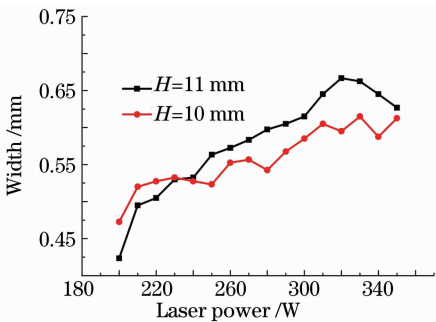


图 14 不同激光功率下的单道宽度

Fig. 14 Widths of the single traces with different laser powers

由图 13,14 可以看出,随着激光功率的增大,单道熔覆层的高度和宽度都有所增加,在 330 W 时最大,再继续增大激光功率会使熔覆层过烧而流淌,反而减小单道的高度。

由以上单道工艺实验的结果可得优化后的工艺参数:喷嘴出口距离基板的距离 $H=11$ mm,激光功率 $P=230$ W。

在单道工艺的基础上,用优化后的工艺参数来成形薄壁墙零件,其他工艺参数如表 2 所示。根据文献[14]中的研究,提升量 ΔZ 应略小于第一层的高度,这样在后续的成形过程中会形成一种负反馈,能消除成形表面微小的凹凸不平,获得良好的成形质量,由图 13 可以看出,在 $H=11$ mm, $P=230$ W 时单道的平均高度为 0.19 mm,在薄壁成形时选择提升量 $\Delta Z=0.15$ mm。

在上述工艺参数下成形 150 层,成形的薄壁墙如图 15(a)所示,高度测量值为 22.8 mm,和理论高度 22.5 mm 较好符合;薄壁墙表面平整,但在起始端和结束端有凸起,这是因为成形时在薄壁墙的两端工作台有加速和减速的过程,造成激光在薄壁墙两端停留时间长,导致输入熔池的能量增大,粉末的熔化量增多,这样多层累加就会形成凸起。对于形状闭合的零件,可以采用每层错开起始端的扫描方式来消除起始端和结束端的凸起,采用这种扫描方式,用相同的工艺参数来成形薄壁叶片,效果如图 15(b)所示,可以看出薄壁叶片表面平整无凸起。

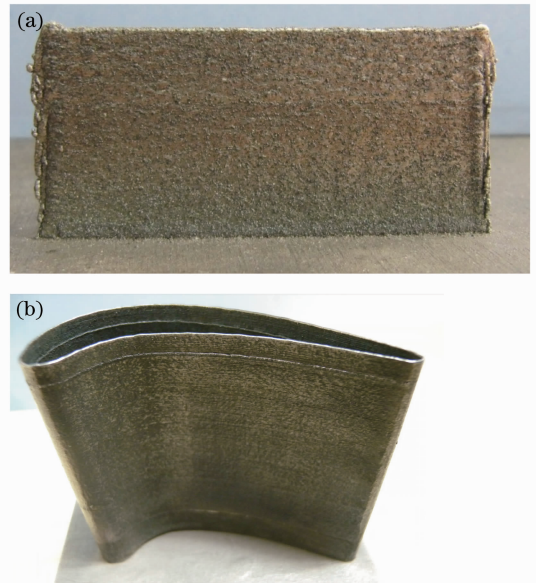


图 15 (a)薄壁墙,(b)叶片轮廓薄壁

Fig. 15 (a)Thin wall part, (b) thin wall blade part

6 结 论

采用气固两相流理论对载气式同轴送粉喷嘴的流场进行了数值模拟,应用 FLUENT 软件中的离散相模型计算粉末流场浓度分布规律及粉末的汇聚特性,并得出如下结论:

1) 同轴送粉喷嘴的粉腔间隙是影响粉末汇聚的主要因素,在一定范围内,粉腔间隙越小,粉末汇聚

性越好。

2) 粉末汇聚焦距主要受粉锥角的影响, 锥角越大则粉末汇聚焦距越大, 大的粉末汇聚焦距可以使成形过程中喷嘴出口距离成形零件的距离较远, 从而解决了粉末反弹造成的喷嘴堵粉等问题。

3) 针对模拟计算的结果, 用优化后的结构参数设计制造同轴送粉喷嘴; 用高速摄影机拍摄喷嘴的粉末输送过程验证了模拟结果的正确性; 并对同轴送粉喷嘴进行工艺参数优化, 用优化后的工艺参数成形出了高度均匀的薄壁零件。

参 考 文 献

- Zhang Anfeng, Li Dichen, Lu Bingheng. Development of research on laser direct metal rapid prototyping technology [J]. *Ordnance Material Science and Engineering*, 2007, **30**(5): 68~72
张安峰, 李涤尘, 卢秉恒. 激光直接金属快速成形技术的研究进展[J]. *兵器材料科学与工程*, 2007, **30**(5): 68~72
- Zhong Minlin, Liu Wenjin. Leading areas and hot topics on global laser materials processing research[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(11): 1653~1659
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
- Yang Sen, Zhong Minlin, Zhang Qingmao *et al.*. Directly rapid fabrication of metal components by laser cladding [J]. *Powder Metallurgy Technology*, 2002, **20**(4): 234~238
杨森, 钟敏霖, 张庆茂等. 金属零件的激光直接快速制造[J]. *粉末冶金技术*, 2002, **20**(4): 234~238
- Zhang Kuiwu. Industrial applications of laser clad and laser deposited metal parts and graded materials [J]. *Heat Treatment of Metals*, 2002, **27**(9): 1~4
张魁武. 国外激光熔覆应用和直接熔覆金属零件及梯度材料制造[J]. *金属热处理*, 2002, **27**(9): 1~4
- Yang Xichen, Li Huishan, Liu Yunwu *et al.*. Laser remanufacturing technology and its industrial application [J]. *Chinese Surface Engineering*, 2003, **16**(4): 43~46
杨洗陈, 李会山, 刘运武等. 激光再制造技术及其工业应用[J]. *中国表面工程*, 2003, **16**(4): 43~46
- Zhang Dongyun, Wang Ruize, Zhao Jianzhe *et al.*. Latest advance of laser direct manufacturing of metallic parts [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(1): 18~25
张冬云, 王瑞泽, 赵建哲等. 激光直接制造金属零件技术的最新进展[J]. *中国激光*, 2010, **37**(1): 18~25
- Lin Jehnming. Numerical simulation of the focused powder streams in coaxial laser cladding [J]. *J. Material Processing Technology*, 2000, **105**(1-2): 17~23
- 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
- Li Li, Yang Xichen, Dong Zhe. CCD measurement of temperature field of coaxial powder flow in laser cladding [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(9): 2431~2437
栗丽, 杨洗陈, 董哲. 激光熔覆中同轴粉末流温度场的 CCD 检测[J]. *中国激光*, 2009, **36**(9): 2431~2437
- 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
- Zhang Anfeng, Zhou Zhimin, Li Dichen *et al.*. Numerical simulation of gas-solid two-phase flow field on coaxial powder nozzle in laser metal direct manufacturing [J]. *J. Xi'an Jiaotong University*, 2008, **42**(9): 1169~1173
张安峰, 周志敏, 李涤尘等. 同轴送粉喷嘴气固两相流场的数值模拟[J]. *西安交通大学学报*, 2008, **42**(9): 1169~1173
- Jichang Liu, Lijun Li. Study on cross-section clad profile in coaxial single-pass cladding with a low-power laser[J]. *Optics & Laser Technology*, 2005, **37**(6): 478~482
- Li Peng, Ji Shengqin, Zeng Xiaoyan *et al.*. Direct laser fabrication of thin-walled metal parts under open-loop control [J]. *Machine Tools & Manufacture*, 2007, **47**(6): 996~1002
- Huang Weidong, Lin Xin, Chen Jing *et al.*. Laser Solid Forming [M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2007. 51~53
黄卫东, 林鑫, 陈静等. 激光立体成形[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2007. 51~53