

三通道激光熔覆同轴送粉喷嘴气体速度场试验

赵维义, 胡芳友, 易德先

(海军航空工程学院 青岛分院 航空机械系, 山东 青岛 266041)

摘 要: 在激光熔覆过程中,三通道同轴送粉喷嘴是关键部件,它利用惰性气体将金属粉末稳定地输送到熔池,同时形成保护流场,隔绝周围的空气。喷嘴气体流场对粉末的汇聚和高温区域的保护具有显著的作用,直接影响粉末利用率、金属材料性能和零件的成形精度。为了研究喷嘴保护流场特性,文中采用粒子图像测速(PIV)技术结合数值模拟计算,对自研的三通道同轴送粉喷嘴气体速度场分布进行了试验和分析。结果表明,喷嘴中心、内环和外环三个通道出口的气流速度一致时,喷嘴所形成的流场较为稳定,没有涡流存在。因此,粉末的汇聚性及对熔池的保护效果好;当外通道气流速度大于内通道时,在工件表面上出现旋涡,流场呈不稳定状态;随喷嘴与工件表面距离增加,有效保护范围减小。

关键词: 激光熔覆; 气体流场; PIV; 同轴送粉喷嘴

中图分类号: TG174.4; TN248 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-9289(2012)01-0051-05

Experiment of Shielding Gas Flow Field on a Three Tunnels Coaxial Powder Feeding Nozzle

ZHAO Wei-yi, HU Fang-you, YI De-xian

(Department of Aero Mechanics, Qingdao Branch, Naval Aeronautical and Astronautical University, Qingdao Shandong 266041)

Abstract: In laser cladding, the three-duct coaxial powder feeding nozzle is an important component, which stably feeds metal powder to the melting pool with inert gas, and also forms shielding gas flow field to isolate the surrounding air. The gas flow field of the nozzle is significant for converging of the power and protection of the high-temperature area, which directly affects the power usage, performance of the metal material, and the forming precision of the parts. In this paper, in order to study the features of the shielding gas flow field, experiment and analysis on distribution of the gas velocity field of the three-duct coaxial powder feeding nozzle were carried out by adopting the PIV technology, combined with numerical simulation and calculation. The result indicates that stable flow field can be obtained in the nozzle when the gas velocities at the outlets of the central, inner ring and outer ring ducts are consistent and the vortex disappears. It is beneficial to the convergence of the power and protection of the melting pool. When gas velocity in the outer duct is greater than that in the inner duct, vortex appears on the workpiece surface, and the flow field becomes unstable. With the increase of the distance from the nozzle to the workpiece, the range of efficient protection decreases.

Key words: laser cladding; shielding gas flow field; PIV; coaxial powder feeding nozzle

0 引 言

三通道同轴送粉喷嘴是激光熔覆系统的关键部件,它依靠惰性气体将金属粉末稳定地输送到熔池,同时隔绝金属熔池周围的空气,形成保

护流场,使熔池及周围高温区域免受有害气体的影响,并保护光学聚焦镜头免受飞溅的金属及粉末的污染^[1-3]。然而喷嘴保护流场的效果会受到喷嘴各通道气流速度及外部环境的影响,如果在激光加工过程中,外部空气进入喷嘴保护气体

收稿日期: 2011-09-15; 修回日期: 2011-12-21

作者简介: 赵维义(1960—),男(汉),山东潍坊人,副教授,硕士;研究方向:空气动力学

网络出版日期: 2012-02-13 22:22; 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20120213.2222.001.html>

引文格式: 赵维义, 胡芳友, 易德先. 三通道激光熔覆同轴送粉喷嘴气体速度场试验 [J]. 中国表面工程, 2012, 25(1): 51-55.

内,将会导致高温金属熔池与空气发生反应,生成氧化物和氮化物,造成材料性能显著下降。

由于惰性保护气体(如 Ar、He)都是透明介质,直接观测其流场较为困难,喷嘴的保护效果大多只能通过实际激光加工试验验证,再由试验现象和激光加工效果反推喷嘴保护效果^[4-5]的方法,这延长了喷嘴的设计和改进行周期。粒子图像测速(PIV)技术是一种非接触瞬态流场测量技术,它突破了传统单点测量的限制,可同时无接触测量流场中一个截面上的二维速度分布,具有较高的测试精度($<2\%$)和空间分辨率($<0.5\text{ mm}$),已成为一种被广泛接受的、用于测量流场瞬时速度的有效手段^[6-8]。文中采用 PIV 技术对自研三通道同轴送粉喷嘴的自由射流及冲击射流特性(冷态)进行了研究,以为为喷嘴的结构设计提供依据,同时也为选择适合的送粉速度和保护流场参数提供参考。

1 试验

1.1 试验及测量装置

试验装置如图 1 所示,主要由高压气瓶(10 MPa)、减压器(YQAR-731L)、示踪粒子发生器(碳化硅粒子直径 $0.5\ \mu\text{m}$,密度 $(3.21 \times 10^3\ \text{kg}/\text{m}^3)$,折射指数 2.65)、调节阀及流量计、三通道同轴送粉喷嘴等组成。高压空气经减压器减压到 0.15 MPa 后,至粒子发生器,经调节阀及流量计至喷嘴。为消除环境对流场的干扰,将喷嘴放置在玻璃罩内($1\ 500\ \text{mm} \times 800\ \text{mm} \times 600\ \text{mm}$),玻璃罩侧面有开口,以保持罩内气压稳定。测量装置为 PIV 系统,主要由双脉冲激光器、片光组件、CCD 数字相机及同步器等组成。

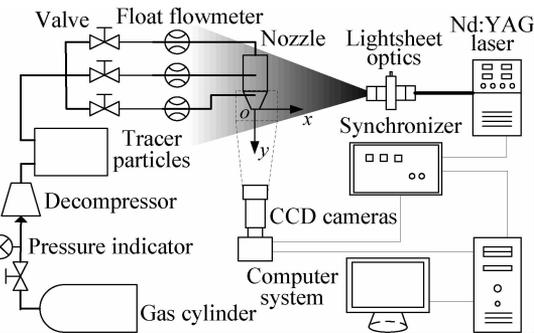


图 1 PIV 系统和实验装置原理图

Fig. 1 PIV system and schematic diagram of the experimental setup

1.2 三通道同轴送粉喷嘴结构

三通道同轴送粉喷嘴的结构及尺寸如图 2 所示,主要由中心通道、内环通道、外环通道构成。在激光熔覆过程中,中心通道喷出的气体用来防止熔池液态金属飞溅到透镜表面,内环是熔覆金属粉末递送通道,外环通道用来喷射惰性气体,对熔池和外围高温区域实施保护。

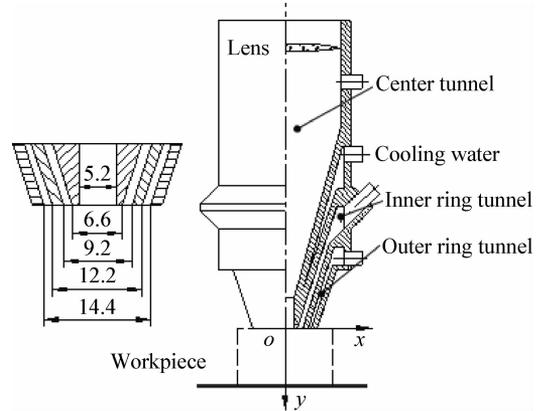


图 2 三通道同轴送粉喷嘴结构

Fig. 2 Coaxial powder feeding nozzle structure

1.3 试验方法及步骤

三通道同轴送粉喷嘴为轴对称结构,因此测量轴截面上的气体流场即可得到整个喷嘴速度场。实验选取的测量区为图 2 中喷嘴出口下方的矩形虚线区域,坐标系 xoy 如图 2 所示,原点 o 位于喷嘴轴线的出口截面处。喷嘴各通道的气体流量及流速见表 1。

表 1 气体流量及流速参数

Table 1 Parameters of air flow and velocity

Tunnel	Air flow/ $(\text{L} \cdot \text{min}^{-1})$	Air velocity/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
Center	3	2.35
	5	3.92
	10	7.85
Inner ring	5	2.58
	10	5.17
	15	7.75
Outer ring	10	3.63
	15	5.44
	20	7.25
	25	9.01

测量时,激光片光面与喷嘴轴线重合,CCD 相机的光轴与激光片光平面垂直,相机焦平面为喷嘴轴对称面。通过调节浮子流量计上的阀门,调节输入喷嘴的气体流量,分别控制喷嘴中心气流速度 u_1 、内环气流速度 u_2 和外环气流速度 u_3 。实验分自由射流(无工件)和冲击射流(有工件)两种状态,分别测量喷嘴三个通道在不同喷流速度时,同轴自由射流和同轴冲击射流的速度场。

测量同轴自由射流时,喷嘴出口距玻璃罩的底面 350 mm。PIV 测量采集区域 22 mm × 22 mm,激光脉冲间隔为 4 s,每对图像计算可得到 900 个速度矢量。

测量同轴冲击射流时,喷嘴出口与工件表面的距离为 10 mm,工件尺寸 500 mm × 500 mm。每次采集的区域为 27 mm × 10 mm,速度矢量的空间分辨率 0.7 mm,两次激光脉冲间隔为 4 s,每对图像计算将得到 800 个速度矢量。

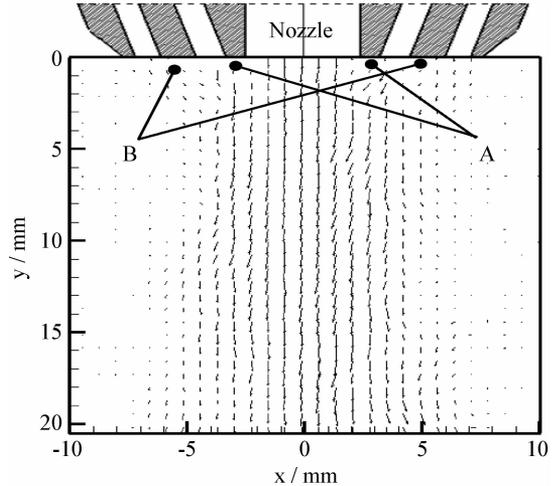
2 结果与分析

2.1 自由射流

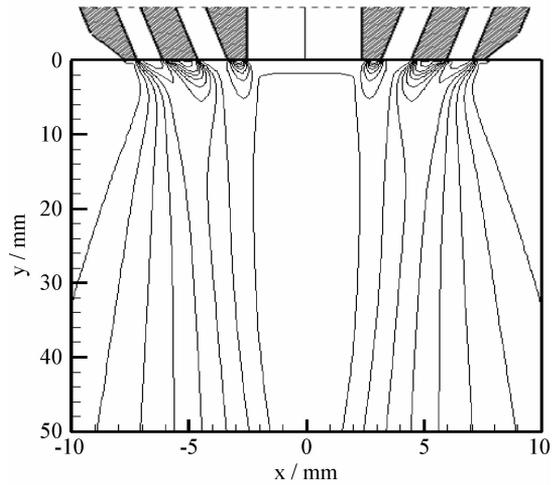
图 3(a)为中心通道流量 $Q_1 = 10 \text{ L/min}$ 、内环通道流量 $Q_2 = 15 \text{ L/min}$ 、外环道流量 $Q_3 = 10 \text{ L/min}$ 时,自由射流速度场试验结果。可见,在三个通道之间的遮蔽区(A、B)存在涡流,数值计算的速度云图(图 3(b))可以直观地看出遮蔽区的涡流,壁厚越大,涡流区尺度越大。三个通道气流的相对速度直接影响涡流区的长度,试验结果显示,当速度差较大时,由于各环气流之间存在较大的内摩擦力,从而影响流场的稳定性,容易形成涡流。各环气流速度相等时,气流之间的内摩擦力锐减,涡流区仅由喷口之间的遮蔽区形成,涡流区范围最小。由于涡流的存在会影响粉末递送时的汇聚质量,因此在进行喷嘴设计时应尽量减小喷口通道之间的壁厚,同时保持各环喷嘴的气流速度相等。

2.2 冲击射流

图 4 为喷嘴出口流速 $u_1 = 7.85 \text{ m/s}$, $u_2 = 5.17 \text{ m/s}$, $u_3 = 5.44 \text{ m/s}$ 时,冲击射流的实验结果。可以看出,喷嘴气体冲击射流场大致可分为自由射流区、冲击区和壁面射流区。刚从喷嘴流出的气体仍具有自由射流的特征,轴向速度分量远远大于径向速度分量;气流冲击壁面后流动方向急剧变化,形成冲击区;随后沿壁面流动,形成

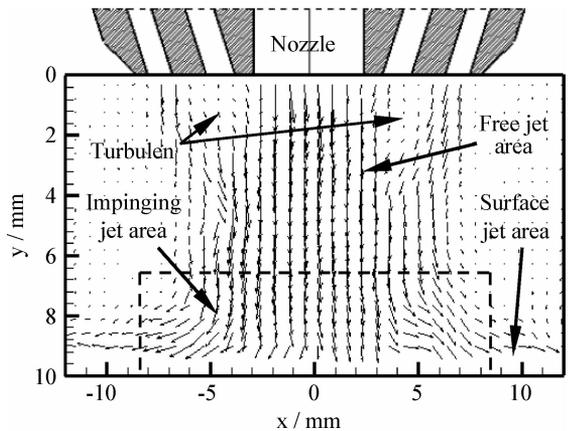


(a) PIV test results



(b) Velocity contour of numerical calculation

图 3 喷嘴自由射流试验
Fig. 3 Free jet flow of the nozzle



$$u_1=7.85 \text{ m/s}, u_2=5.17 \text{ m/s}, u_3=5.44 \text{ m/s}$$

图 4 喷嘴气体冲击射流场速度分布

Fig. 4 Velocity distribution of nozzle gas impinging jet field

壁面射流区。由于三个喷口气流速度不同,因此各环气流之间存在强烈的剪切作用,形成较大的内摩擦力,从而影响了流场的稳定性,在交界区产生剧烈的紊流流动。随着距喷嘴出口距离的增加,各喷嘴冲击射流的速度差逐渐减小。图5给出了距喷嘴出口分别为1.2 mm、3.1 mm和5.4 mm时,冲击射流轴向速度沿径向的分布曲线,可见在5.4 mm测量截面处,曲线较为平滑,各环喷嘴的速度差较小。产生剧烈的紊流流动。随着距喷嘴出口距离的增加,各喷嘴冲击射流的速度差逐渐减小。

调整输入各通道的气体流量,适当增大外环通道出口速度,减小三个通道之间的速度差,流场中的涡流区随之减小,当三个通道气流速度接近一致,且内通道速度略大于外通道时,涡流消

失,流场品质最好。当外通道气流速度($u_3 = 7.25 \text{ m/s}$)大于内通道($u_2 = 5.17 \text{ m/s}$)时,在工件表面上开始出现旋涡,如图6所示,流场呈不稳定状态。外通道气流速度持续增大(或减小内通道流速),当外通道出口流速($u_3 = 9.0 \text{ m/s}$)大于内通道($u_2 = 2.6 \text{ m/s}$)的四倍时,在工件表面出现两个旋涡,如图7所示。激光熔覆时工件表面的旋涡正好位于金属熔池部位,该处是金属粉末汇聚的部位,所以旋涡会影响粉末的汇聚,破坏同轴送粉的各向同性。

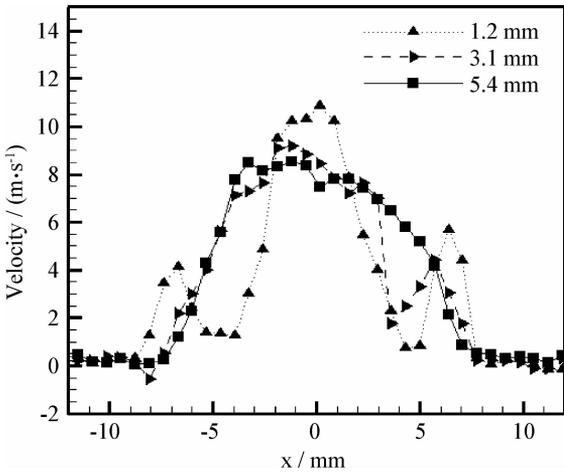


图5 气体轴向速度沿径向分布曲线

Fig. 5 Profiles of the gas axial velocity

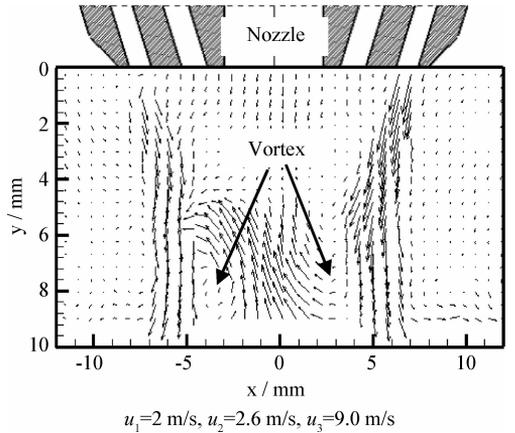


图7 冲击射流速度分布

Fig. 7 Velocity distribution of the impinging jet field

2.3 保护效果

激光熔覆时要想获得良好的金属熔池区保护,关键是喷嘴要具有稳定的保护流场。另外,喷嘴与工件的距离也直接影响保护区域的大小。图8给出了喷嘴距离工件表面0.97 mm和2.34 mm

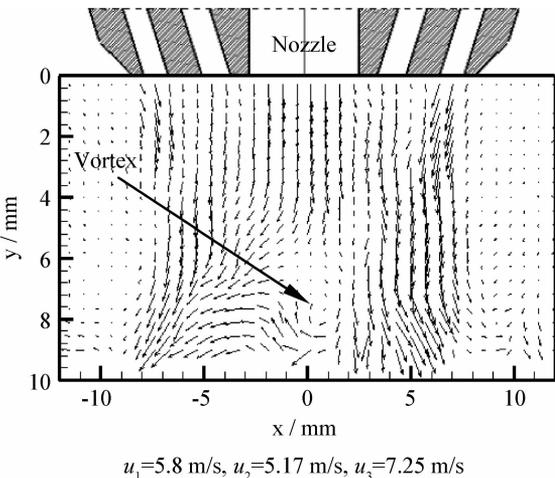


图6 冲击射流速度分布

Fig. 6 Velocity distribution of the impinging jet field

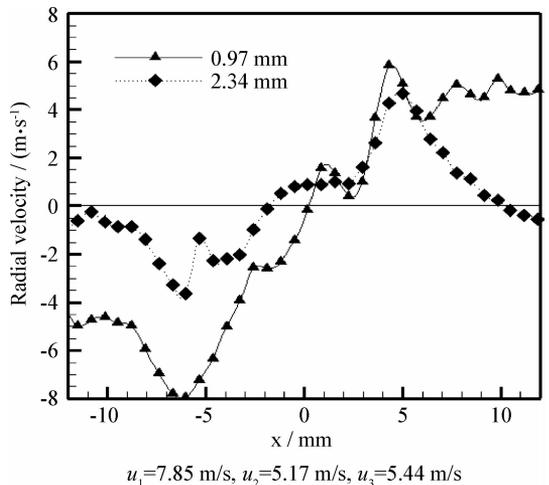


图8 气体轴向速度沿径向分布

Fig. 8 Profiles of the the gas axial velocity

时气体的径向速度曲线。可以看出,当喷嘴接近工件表面时,气流径向速度更为稳定,射流平稳的沿工件表面向四周流动,能在较大范围内排开工件表面的空气,金属熔池有效保护区域增大;随着喷嘴与工件表面距离的增加,工件表面流场中心外气流速度锐减,有效保护范围减小。

3 结 论

采用 PIV 技术实现了对三通道同轴送粉喷嘴出口气流瞬态流场的测量,得到了清晰的二维流场图像。利用试验结果和数值模拟计算,对喷嘴保护气体流场(冷态)进行研究,得到如下结论:

(1) 喷嘴三个通道出口流速相近,且内通道略大于外通道时,保护流场品质较好,无紊流现象。

(2) 外通道出口流速大于内通道时,工件表面开始出现旋涡,随着内外通道速度差的增大,紊流加剧。当外通道流速大于内通道四倍时,工件表面出现两个旋涡。

(3) 减小喷嘴与工件之间的距离,喷嘴保护气体对金属熔池的保护效果增加。

参考文献

- [1] Ancona A, Sibillano T, Lugarà P M, et al. An analysis of the shielding gas flow from a coaxial conical nozzle during high power CO₂ laser welding [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2006, 39(3): 563-574.
- [2] Lin J, Steen W M. Powder flow and catchment during coaxial laser cladding [C]. SPIE, 1997, 3097: 517-528.
- [3] 陈建敏, 王凌倩, 周健松等. 激光熔覆 Ni 基涂层研究进展 [J]. 中国表面工程, 2011, 24(2): 13-21.
- [4] 张林杰, 张建勋, 王蕊, 等. 侧吹气体对不锈钢薄板 CO₂ 激光焊接过程的影响 [J]. 应用激光, 2005, 25(4): 217-221.
- [5] 洪蕾, 吴钢, 陈武柱. 保护气流对 CO₂ 激光焊接铝合金的影响 [J]. 中国激光, 2005, 32(11): 1571-1576.
- [6] 杨祖清. 流动显示技术 [M]. 国防科研试验工程技术系列教材. 北京: 国防工业出版社, 2002: 241-243.
- [7] Liu Z, Zheng Y, Jia L, et al. Study of bubble induced flowstructure using PIV [J]. Chemical Engineering Science, 2005, 60(13): 3537-3552.
- [8] 徐玉明, 迟卫, 莫立新. PIV 测试技术及其应用 [J]. 舰船科学技术, 2007, 29(3): 101-105.

作者地址: 海军航空工程学院

266041

青岛分院 航空机械系

Tel: (0532) 5883 3165

E-mail: hjhyzwy@sina.com

• 本刊理事长介绍 •

范多旺,男,1955年3月生,兰州交通大学教授,博士生导师。现任国家绿色镀膜技术与装备工程技术研究中心主任、光电技术与智能控制教育部重点实验室主任、甘肃省国际太阳能利用技术中心主任等职务。现为“兰州交通大学绿色镀膜与智能控制”全国专业技术人员先进集体带头人,教育部“长江学者和创新团队发展计划”创新团队带头人,甘肃省特聘科技专家。

主要从事太阳能聚光集热发电、聚光光伏发电关键件和成套系统、平板太阳能集热材料装备、轨道交通自动控制装备真空光电子成套装备关键技术创新和集成创新等方面的研究开发、成果转化和产业化工作。领导建设了6个国家级和省部级创新平台,主持完成了一批包括科技攻关计划、支撑计划、863计划项目在内的国家级科研项目和省部级重大科技与产业创新项目,获得了29件授权专利,获得1项国家科技进步二等奖、4项省部级科技进步一等奖、6项省部级科技进步二等奖、1项信息产业部十五期间优秀项目奖和1项甘肃省十五期间十大科技成果奖,其中“超大容积高端汽车灯具镀膜系列装备与工艺研发及产业化”2007年获得国家科技进步二等奖。

范多旺教授先后获得全国五一劳动奖章、全国优秀科技工作者、国务院政府特殊津贴专家、中国科协西部开发突出贡献奖、铁道部有突出贡献的中青年科技专家、全国机械工业优秀企业家、甘肃省“十五”期间“十大杰出人才”、全国高等学校优秀骨干教师、甘肃省劳动模范、甘肃省科技功臣、兰州市科技功臣等荣誉称号。他所带领的团队先后被授予“全国铁路科技进步先进集体”、“信息产业科技创新先进集体”、“全国专业技术人员先进集体”荣誉称号及“甘肃省五一劳动奖状”;其中“大型真空光电子关键技术集成与智能控制”创新团队于2011年通过了教育部组织的验收。