

同轴送粉喷嘴保护气体流场研究

赵维义¹ 顾蕴松² 易德先¹ 胡芳友¹

(1. 海军航空工程学院青岛分院, 青岛, 266041; 2. 南京航空航天大学航空宇航学院, 南京, 210016)

摘要:为解决飞机结构损伤激光在线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(Particle image velocimetry, PIV)和Fluent软件对喷嘴保护气体流场进行了研究。将喷嘴气流的同轴射流和同轴冲击射流的数值计算结果和实验测量结果进行了比较,分析了喷嘴气流速度变化对流场稳定性的影响。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、内环、外环喷出的气流速度接近一致时,流场比较稳定;喷嘴中心气流速度小于内环和外环的气流速度时,工件表面出现漩涡,破坏了流场的稳定性。

关键词:激光技术;同轴送粉喷嘴;气体流场;粒子图像测速

中图分类号:O353.5 **文献标识码:**A **文章编号:**1005-2615(2012)02-0198-06

Shielding Gas Flow Field on Coaxial Powder Feeder Nozzle

Zhao Weiyi¹, Gu Yunsong², Yi Dexian¹, Hu Fangyou¹

(1. Qingdao Branch, Naval Aeronautical and Astronautical University, Qingdao, 266041, China;

2. College of Aerospace Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

Abstract: To improve the shielding effect of gas flow in laser on-line repair of aircraft structure damage, the shielding gas flow field on coaxial powder feeder nozzles is studied by particle image velocimetry (PIV) and Fluent software. Experimental and numerical simulation results of coaxial jets and coaxial impinging jets of nozzle gas flow are compared. The influence of change of nozzle gas velocity on stability of flow field is analyzed systemically. The results show that gas flow field tends to be more stable when the velocity of three-section gas flow decreases gradually from center to outer. When the three-section gas flow velocity is consistent, the flow state is the best. When gas velocity from center nozzle is smaller than that from outer ring, vortex is caused on the flat, and the stability of gas flow field is disturbed.

Key words: laser technique; coaxial powder feeder nozzle; gas flow field; particle image velocimetry (PIV)

飞机损伤结构的激光在线修复是以激光熔覆技术为基础、修复损伤的结构件^[1-2]。同轴送粉喷嘴是激光在线修复系统的关键部件之一,是保证激光修复质量的重要环节之一。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,在金属基体上逐层修复损伤的金属结构^[3]。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,可起到保护聚焦透镜、输送

金属粉末、隔绝熔池及附近高温区域空气的作用,保证修复的质量^[4-5]。喷嘴喷出的保护气流是一种柔性的保护气套,保护效果易受气流参数的影响。激光修复过程中,经常会出现气体保护效果不好的问题,周围空气容易混入喷嘴喷出保护气流中,高温金属熔池容易与混入的空气发生反应,生成氧化物和氮化物,影响结构件的修复质量。

目前国内外对激光同轴送粉喷嘴的结构参数、

送粉参数对粉末流浓度及速度分布、粉末汇集性能的影响规律等气固两相流动进行了深入研究^[6-7],而对喷嘴的气体流场研究较少。本文对喷嘴气体的同轴射流和同轴冲击射流(冷态)进行了粒子图像测速(Particle image velocimetry, PIV)实验和数值计算,研究保护气体流场的特性,为喷嘴结构设计和保护流场参数选择提供依据。

1 同轴送粉喷嘴

同轴送粉喷嘴为轴对称结构,如图1所示,由喷嘴中心、喷嘴内环、喷嘴外环和冷却通道组成。喷嘴中心是激光束通道,通惰性气体保护聚焦镜头。喷嘴内环是粉末通道,气体携带粉末从内环喷出,形成环形汇聚粉末流。喷嘴外环为外保护气体通道,通保护气流隔绝周围空气。冷却通道是通入循环冷却液带走工作时产生的热量,降低喷嘴温度,保证工作过程稳定,延长喷嘴的使用寿命。

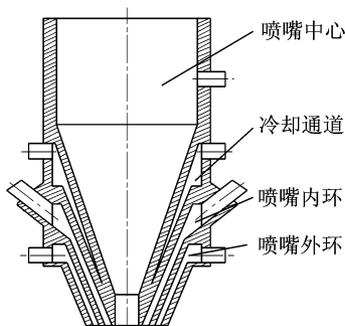


图1 同轴送粉喷嘴结构

2 喷嘴保护气体流场实验

2.1 实验装置

实验在南京航空航天大学流动控制与噪声研究室完成,实验测量装置如图2所示,主要包括:喷嘴气体流动系统、PIV系统等,实验测量了喷嘴气体流场轴截面速度。

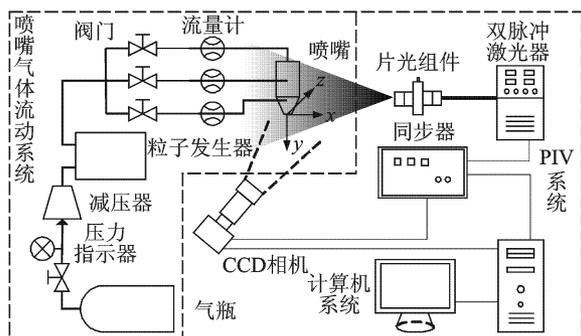


图2 PIV实验装置原理图

高压气瓶出来的空气经减压器、示踪粒子发生器,分3路通过流量计,从喷嘴喷出。示踪粒子选用平均直径 $0.5\ \mu\text{m}$ 的碳化硅粒子。为防止周围环境对气体流场的干扰,喷嘴流场实验测量段放置在玻璃罩内,玻璃罩侧面底部有宽 $5\ \text{cm}$ 的开口,以保持罩内气体压力稳定。PIV系统光源采用双脉冲激光器(波长 $532\ \text{nm}$,脉冲持续时间 $10\ \text{ns}$),激光束经导光臂传到片光源的透镜组,形成厚度约 $1\ \text{mm}$ 的片光,照亮测试区域;成像系统为互/自相关CCD数码相机,分辨率为 $1\ 016\ \text{像素}\times 1\ 008\ \text{像素}$;同步器控制双脉冲激光和CCD相机同步工作。

2.2 实验方法

喷嘴出口距平面挡板 $10\ \text{mm}$,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 ,测量喷嘴的3个喷口在不同流速时的同轴射流和同轴冲击射流的速度场。实验时气流参数见表1。

表1 PIV速度测量实验的气流参数

气流参数	喷嘴中心			喷嘴内环			喷嘴外环		
气体流量/ ($\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$)	5	10	15	20	10	15	10	15	20
气流速度/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	3.9	7.9	11.8	15.7	5.2	7.8	3.6	5.4	7.2
雷诺数 Re	1 397	2 794	4 190	5 588	967	1 450	574	861	1 148

测量喷嘴同轴射流情况时,喷嘴出口距玻璃罩底面约 $350\ \text{mm}$,测量区域为 $22\ \text{mm}\times 22\ \text{mm}$ 。测量喷嘴同轴冲击射流速度场时,喷嘴出口距平板表面 $10\ \text{mm}$,测量的物理区域为 $27\ \text{mm}\times 10\ \text{mm}$ 。

3 喷嘴保护气体流场数值模型

由于喷嘴喷出气流的速度小于 $20\ \text{m/s}$,属于不可压缩流体,因此采用基于雷诺平均的N-S方程,湍流模型为RNG $k-\epsilon$ 模型进行数值模拟。

建立模型及网格划分时,考虑到同轴送粉喷嘴为锥形圆柱体,同轴射流和同轴冲击射流的计算模型与边界条件都是完全轴对称形式,因此可利用轴对称模型建立二维半平面长方形的计算区域。图3为同轴射流的计算区域及边界条件,图4为同轴冲击射流的计算区域及边界条件,坐标系 oxy 如图3所示。采用CFD软件Fluent 6.3.26进行数值模拟。喷嘴入口气流采用速度入口条件,其中 u_1 为喷嘴中心气流速度, u_2 为内环气流速度(输送粉末), u_3 为外环气流速度。喷嘴出口处为压力出口条件,与周围环境的相对压力 $p=0\ \text{Pa}$ 。射流进口速度分布为充分发

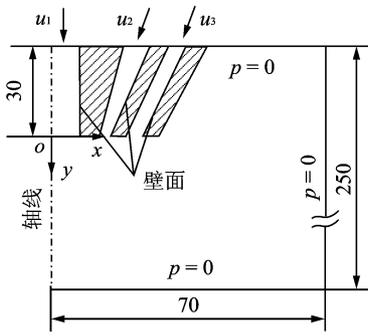


图3 同轴射流计算区域和边界条件

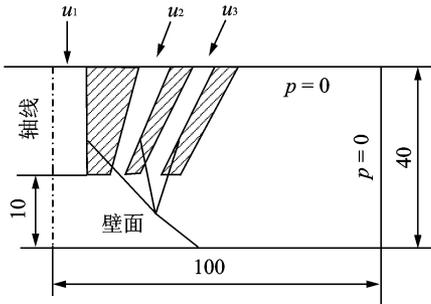


图4 同轴冲击射流计算区域和边界条件

展的湍流。网格划分采用结构化网格,喷嘴出口和平面附近的网格划分较密。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。

4 实验与计算结果分析

通过对实验与计算结果的分析比较,获得了完整的同轴送粉喷嘴保护气体流场,同时验证了喷嘴气体流场数值模型的有效性。下面以输入喷嘴的气体流量分别为 $Q_1=10\text{ L/min}$, $Q_2=15\text{ L/min}$, $Q_3=10\text{ L/min}$ 为例分析。

4.1 同轴射流

图5为实验得到的喷嘴气体同轴射流场轴截面上的速度分布,图6为计算结果。将距喷嘴出口5和10 mm(虚线处)处横截面上的速度分布进行对比,数值计算和PIV测量结果基本一致。

图7为距喷嘴出口1.2和5 mm时,数值计算和PIV测量得到的气流轴向速度沿横截面分布曲线。图7(a)为距喷嘴出口1.2 mm处横截面上的气流轴向速度分布。可见,喷嘴中心和外环处的数值

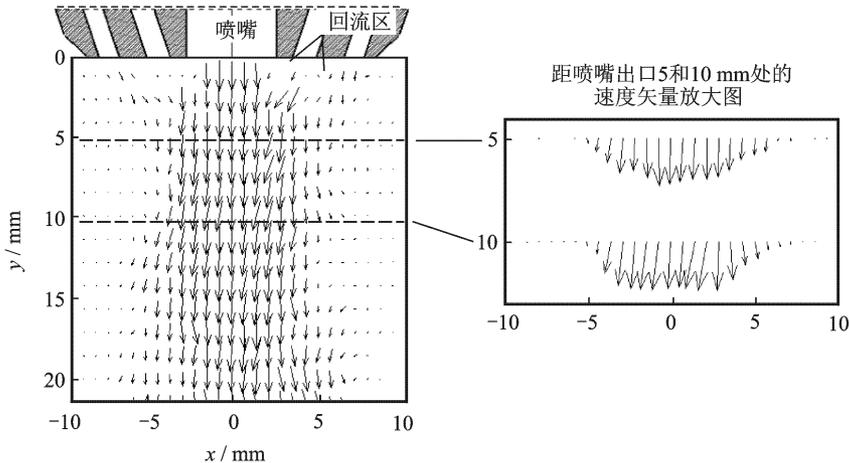


图5 PIV实验测量同轴射流的速度场

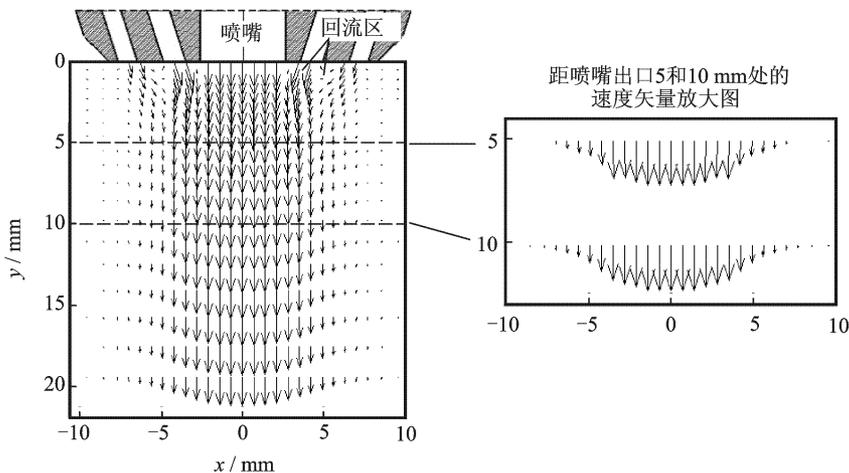


图6 计算得到的同轴射流的速度场

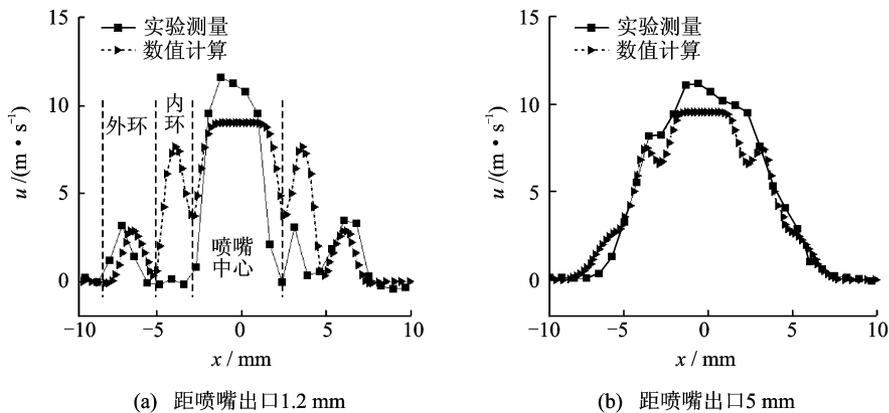


图 7 气流轴向速度沿径向分布

计算结果与PIV 测量结果吻合较好,内环处的对比结果有所差别,该处的数值反映回流区的大小,数值计算得到的回流区的长度小于实验测量结果。图 7(b)为距喷嘴出口 5 mm 处横截面上的气流轴向速度分布,两种结果吻合较好,超过 5 mm 的各截面,两者也基本一致。在流场中心区域数值计算结果小于实验测量结果,误差小于 20%。

4.2 同轴冲击射流

图 8,9 分别为 PIV 测量和数值计算得到的喷嘴气体同轴冲击射流流截面上的速度分布。将图 8,9 中距喷嘴出口 1,5 和 9 mm(虚线)处气流速度结

果进行对比,数值计算和 PIV 测量结果基本一致。

图 10 为不同出口截面上,数值计算和实验得到的气流速度分布对比曲线。图 10(a)在距喷嘴出口 1 mm 处横截面上,同样可以看到,喷嘴内环出口处的数值计算结果与实验测量结果存在差异,数值计算得到的回流区小于实验测量结果。图中气流的轴向速度远大于径向速度,气流径向速度指向喷嘴轴线。图 10(b)在距喷嘴出口 5 mm 处横截面上,两种结果吻合较好,气流的径向速度很小。图 10(c)在距喷嘴出口 9 mm 处横截面上,从图中可以看出,气流的轴向速度小于径向速度,说明气流已进入冲

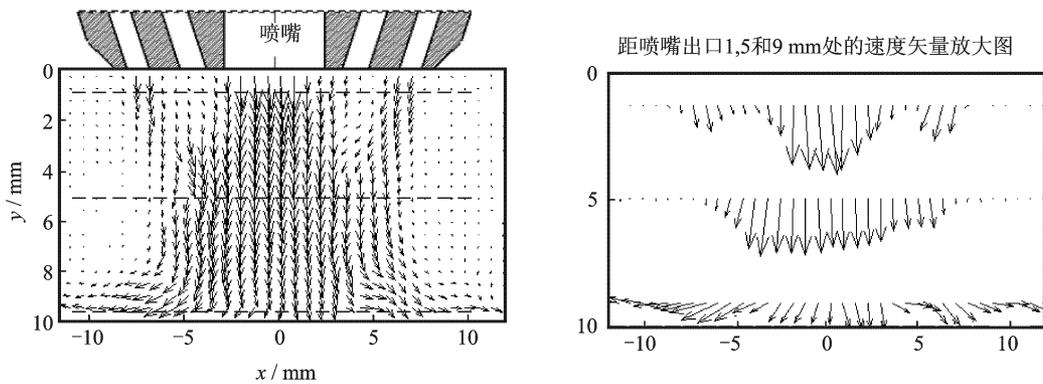


图 8 PIV 测量得到的同轴冲击射流速度场

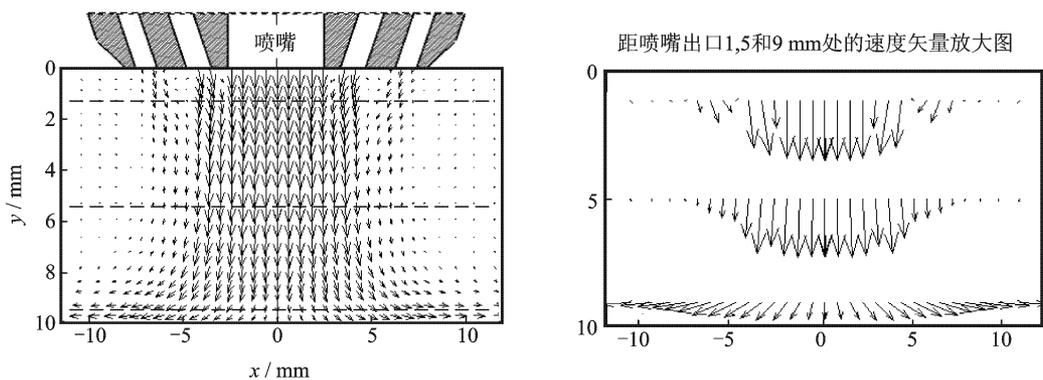


图 9 计算得到的同轴冲击射流速度场

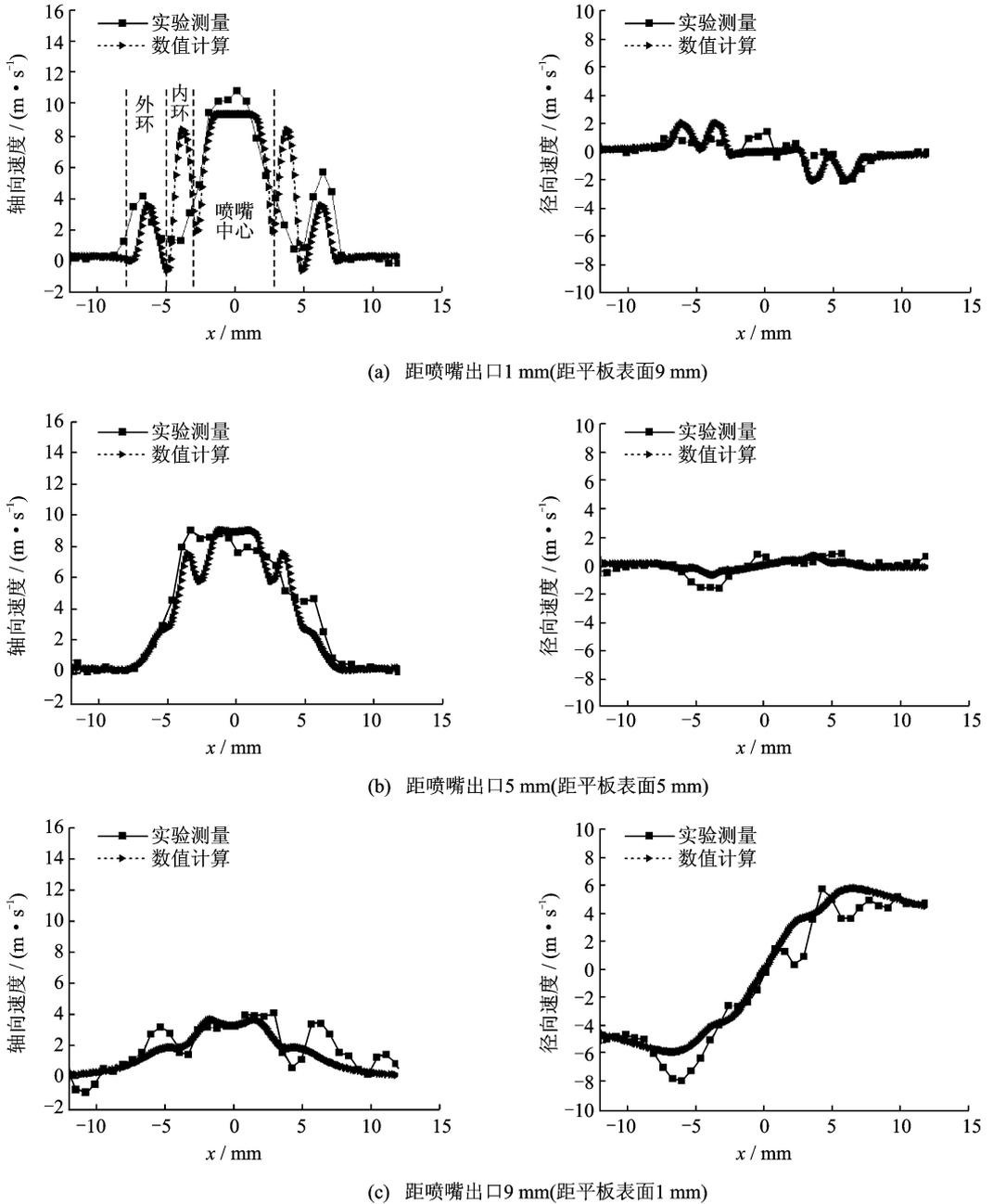


图10 不同截面轴向和径向速度分布

击区,气流沿工件表面向四周流动。数值计算结果与实验测量结果基本吻合,实验测量结果存在波动。

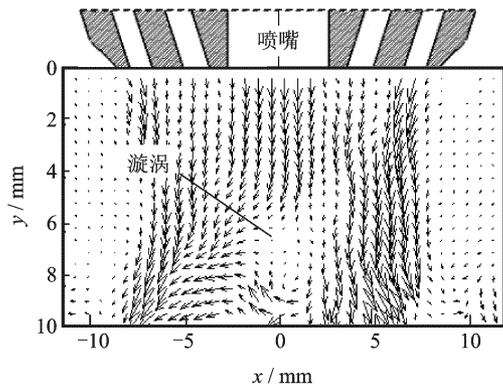
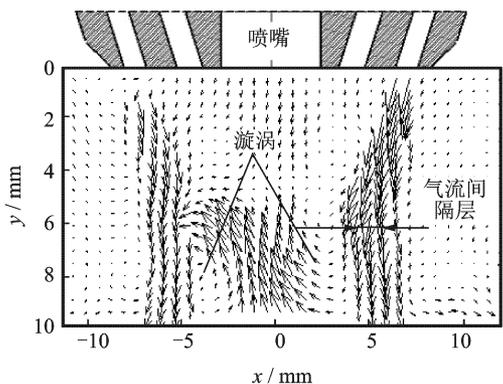
4.3 气流速度变化对流场稳定性影响

喷嘴喷出的三股气流速度变化时,流场结构也发生变化。研究表明:喷嘴中心、内环、外环气流速度之间的相互关系是流场稳定性的主要影响因素。

当气流速度为 $u_1 > u_2, u_1 > u_3$ 时,即喷嘴中心气流速度最大,在工件表面上,由喷嘴中心气流产生的冲击压力最大,喷嘴气流进入壁面射流区以后,压力恢复为周围环境压力。喷嘴喷出的三股气

流进入冲击区后,射流弯曲,由喷嘴中心沿工件表面向四周流动,此时气体流场比较稳定,见图8。当 $u_1 \approx u_2, u_1 \approx u_3$ 时,三股气流之间的速度梯度较小,紊流扩散作用相对较弱,此时流态最好。

当喷嘴喷出的气流速度为 $u_3 > 1.2u_1$ 时,即喷嘴外环的气流速度大于喷嘴中心速度,工件表面上出现一个漩涡,见图11。当喷嘴气流速度 $u_3 > 2u_1$ 时,在工件表面上出现两个方向相反的漩涡,见图12。当外环的气流速度大于内环、中心速度时,外环气流在表面上产生的冲击压力比内环、中心的大。喷嘴喷出的气流冲击表面后形成壁面射流,相互

图11 $u_3 > 1.2u_1$ 时的同轴冲击射流速度场图12 $u_3 > 2u_1$ 时的同轴冲击射流速度场

撞后,形成上反气流。当外环气流速度稍大于中心气流速度时,加上喷嘴并不可能完全同心,所以喷嘴喷出的气流速度存在差异,冲击压力差相差较小,在工件表面产生单个漩涡。当内环的气流速度大于喷嘴中心、外环的气流速度时,同样会在工件表面上产生漩涡。

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,工件表面产生一对漩涡。这时,漩涡区和混合区相隔一层较薄的气流间隔层,见图12,在外界干扰下,可能被冲破,使得漩涡区和混合层连通起来,削弱了气流的保护作用。在激光修复过程中,尽量让喷嘴中心、内环和外环气流速度大小接近,得到较为稳定喷嘴气体流场。

5 结束语

喷嘴同轴射流、同轴冲击射流的数值计算结果与PIV测量结果吻合较好,因此数值计算可以较准确测算喷嘴保护气体流场。PIV测量与数值计算结果表明:喷嘴各环的气流速度影响保护气体流场的

稳定性。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,当喷嘴中心、内环和外环气流流速大小接近时,流态较好。当内环、外环气流速度大于喷嘴中心气流速度时,工件表面附近出现漩涡,破坏了流场稳定性。

参考文献:

- [1] 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.
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.
- [2] 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.
Hu Fangyou, Hui Li, Yi Dexian, et al. Laser repair of aircraft battle damage [J]. Chinese Journal of Laser, 2009, 36(9): 2245-2250.
- [3] Lin J, Steen W M. Powder flow and catchment during coaxial laser cladding[C]// Society of Photo-Optical Instrumentation Engineering (SPIE). [S. l.]: SPIE, 1997, 3097: 517-528.
- [4] Ancona A, Sibillano T, Lugará 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.
- [5] 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.
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.
- [6] 杨楠,杨洗陈. 激光熔覆中粉嘴流场的数值模拟[J]. 中国激光,2008,35(3):452-455.
Yan Nan, Yang Xichen. Numerical simulation of flow field of nozzle in laser cladding [J]. Chinese Journal of Laser, 2008, 35(3): 452-455.
- [7] 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.
Jin Xiaoshu, Yang Xichen, Feng liwei, et al. Numerical simulation of coaxial powder flow with carry gas in laser manufacturing [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(5): 161-166.