

激光熔覆同轴送粉喷嘴研制

王维¹ 才磊¹ 杨光¹ 钦兰云¹ 卞宏友¹ 王刚¹ 齐鹏¹ 魏强¹ 佟明²

(¹沈阳航空航天大学 航空制造工艺数字化国防重点学科实验室, 辽宁 沈阳 110136)

²天津汽车模具股份有限公司, 天津 300308

摘要 针对现有送粉喷嘴粉末汇聚性差、出粉口容易堵塞以及受热变形的缺点,设计了一种四孔式同轴送粉喷嘴。喷嘴中央为激光束及保护气通道,沿中心锥孔轴向均布的 4 个小孔,为粉末通道。建立了数值计算模型,应用 FLUENT 软件对粉末通道不同出口形状和不同倾角条件下粉末流场情况进行数值模拟,选择最优方案。计算结果表明,在其他工艺参数一定的前提下,采用收缩出口与粉末通道倾角为 70°时有利于改善熔覆成形效果。最后利用研制的送粉喷嘴进行粉末汇聚、激光熔覆成形等实验,验证该送粉喷嘴的实验效果。

关键词 激光技术;激光熔覆成形;数值模拟;送粉喷嘴;粉末通道

中图分类号 TN249 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201239.0403003

Research on the Coaxial Powder Feeding Nozzle for Laser Cladding

Wang Wei¹ Cai Lei¹ Yang Guang¹ Qin Lanyun¹ Bian Hongyou¹ Wang Gang¹

Qi Peng¹ Wei Qiang¹ Tong Ming²

(¹Key Laboratory of Fundamental Science for National Defence of Aeronautical Digital Manufacturing Process, Shenyang Aerospace University, Shenyang, Liaoning 110136, China)

²Tianjin Motor Dies Company Limited, Tianjin 300308, China

Abstract Aiming at the disadvantages of existing powder feeding nozzle, which include powder convergent inferior, powder outlet is easy to block and thermal deformation, designed a four hole coaxial powder feeding nozzle. The center of nozzle is laser beam as well as shielding gas channel and the four holes which along the center bore axially uniform distribution is powder channel. Numerical calculation model is established by using FLUENT software on the powder flow numerical simulation under the condition of the powder feeding channel outlet in different shape and different dip angle, and the optimal scheme is selected. The results show that the contraction of export and the powder channel angle of 70° is beneficial to improve the cladding forming effect with other process parameters invariable. Finally, with the developed powder feeding nozzle for powder together, laser cladding forming test and so on, validates the experimental effect of powder feeding nozzle.

Key words laser technique; laser cladding forming; numerical simulation; powder feeding nozzle; powder feeding channel

OCIS codes 140.3390; 350.3390; 120.4610; 220.4610

1 引言

激光熔覆成形技术是一种兴起于 20 世纪 80 年代新型的先进制造技术^[1]。该技术将激光熔覆表面强化技术和快速原型制造技术相结合,具有成形零件复杂、加工材料范围广泛、柔性化程度高等独特优点,广泛应用于复杂零件的直接制造和修复,具有广阔的发展前景^[2]。同轴送粉技术是激光熔覆成形材料供给方式中较为先进的供给方式,粉末流与激光

束同轴耦合输出,而同轴送粉喷嘴作为同轴送粉系统的关键部件之一,已成为各科研单位的研究热点。目前,国内外大多数研究单位均研制出了适合本单位需要的同轴送粉喷嘴,但现有的同轴送粉喷嘴大多存在粉末汇聚性差、粉末利用率低、出粉口容易堵塞等缺点^[3~9]。本文设计了一种应用于激光熔覆成形系统的四孔式同轴送粉喷嘴,主要研究了喷嘴送粉通道出口形状和送粉通道倾角对熔覆成形效果的

收稿日期: 2011-11-21; 收到修改稿日期: 2012-01-06

基金项目: 国防基础科研项目(A3520061304)和辽宁省科技厅国际合作项目(2007405005)资助课题。

作者简介: 王维(1957—),男,工学博士,教授,博士生导师,主要从事激光快速成形、激光再制造技术和复杂曲面数控加工等方面的研究。E-mail: Wangw@syjae.edu.cn

影响。为减少设计成本、缩短设计周期,本设计基于数值计算模型,应用 FLUENT 软件对送粉通道不同出口形状和不同倾角条件下粉末流场情况进行数值模拟,确定最终方案,进而依照此方案加工出喷嘴实体,最终通过实验验证了喷嘴设计的合理性。

2 同轴送粉喷嘴的原理与结构

基于固气两相流理论,针对现有同轴送粉喷嘴存在的问题,设计了一种四孔式同轴送粉喷嘴。喷嘴中央为激光束及保护气通道,沿中心锥孔轴向均布四个小孔,为粉末通道。图 1 为同轴送粉示意图。

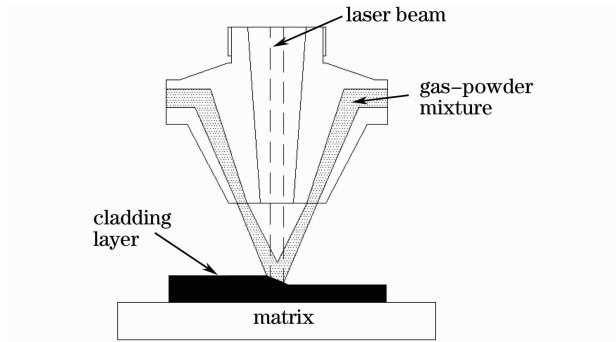


图 1 同轴送粉示意图

Fig. 1 Schematic of coaxial powder feeding

由于喷嘴末端距离激光加工工作点较近,喷嘴在热积累、激光反射以及熔池辐射和溅射的作用下,升温很快,严重时可能烧坏喷嘴,堵塞粉末通道,因而该喷嘴选择紫铜制造,主要是考虑到紫铜的机加工工艺性较好,且导热性能良好,在冷却系统的作用下能够保证送粉喷嘴处于一个相对稳定的低温状态。

该送粉喷嘴采用同轴送粉,粉末流由送粉器送出,经混粉器均匀混合后由分粉器分为四路送入,经过锥形喷嘴后,粉末流汇聚输出,送入聚焦的激光光束中,形成熔池,完成熔覆成形制造。图 2 为送粉喷嘴示意图。

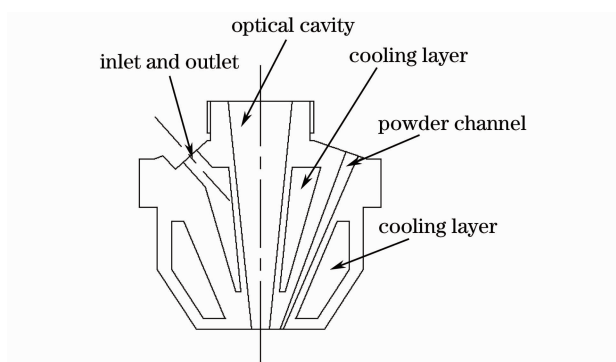


图 2 同轴送粉喷嘴示意图

Fig. 2 Schematic of coaxial powder feeding nozzle

在加工过程中,为了保证送粉喷嘴良好的冷却效果,设计采用内腔冷却层和外腔冷却层双层冷却结构,保证在长时间激光成形加工中,喷嘴下端不会由于熔池的近距离辐射以及激光照射基板的反射而使喷嘴升温较高,造成喷嘴送粉通道变形,出粉口堵塞。

3 同轴送粉喷嘴的分析

3.1 送粉通道出口形状的选择

3.1.1 模型建立与边界条件设置

根据理论分析和实践经验选择了平行出口和收缩出口两种形式(如图 3 所示),进行数值模拟。首先应用 CATIA 软件建立喷嘴的三维流场几何模型,粉末通道出口中心为坐标零点,在出粉口下端设置一个圆柱形的流场区域,如图 4(a)所示。其次,将模型进行网格划分和边界条件设置,如图 4(b)所示。

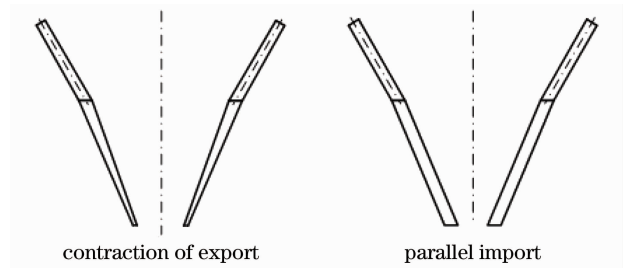


图 3 送粉通道出口形式结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of powder feeding channel export situation

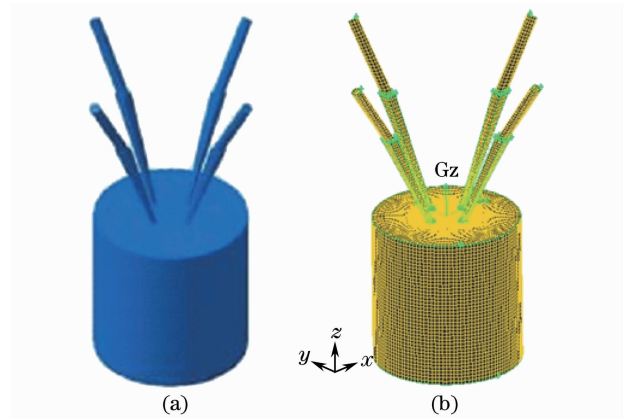


图 4 流场模型计算与网格划分

Fig. 4 Flow field model and meshing

3.1.2 模拟结果分析

图 5 和图 6 分别为计算机模拟的不同出口形状时的粉末流场浓度情况。从图中可以看出粉末流流出粉口后开始逐渐汇聚,浓度逐渐增加,粉末流汇聚

形状近似圆柱状,称之为气柱区,在此区域形成粉末流汇聚焦点。在相同初始条件下,粉末流经过收缩出口后的汇聚浓度远大于平行出口的汇聚浓度,且

气柱区的直径较小,挺度较好,在激光熔覆成形过程中粉末利用率较高。

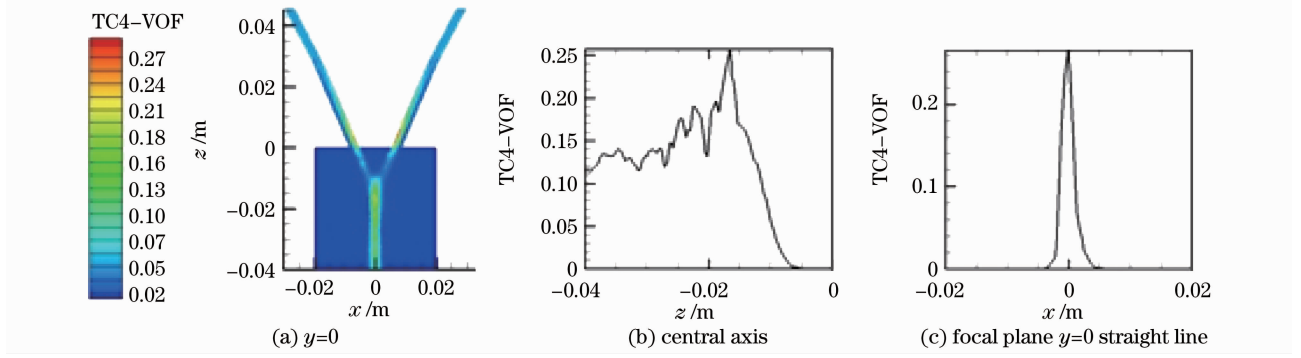


图 5 平行出口粉末流场分布

Fig. 5 Powder flow field distribution of parallel export

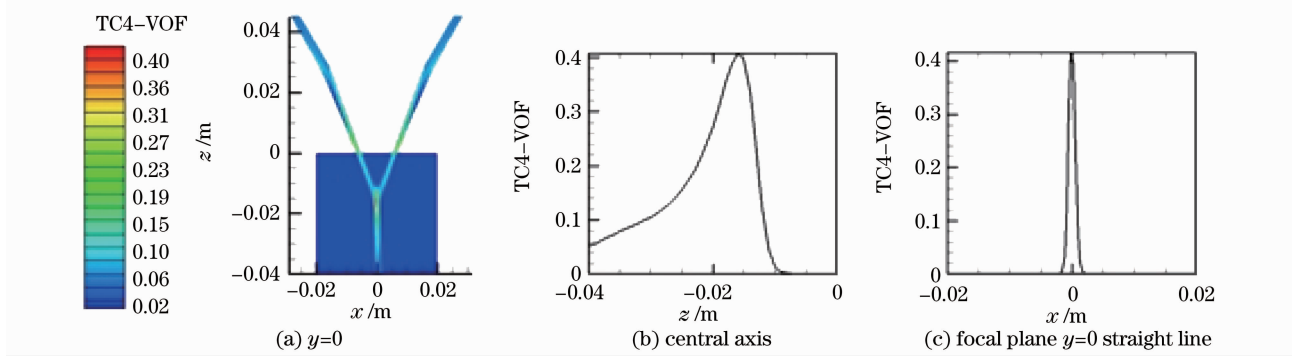


图 6 收缩出口粉末流场分布

Fig. 6 Powder flow field distribution of contractive export

通过以上分析可以看出收缩出口的粉末汇聚性要远远好于平行出口。因此送粉通道采用收缩出口形式。

3.2 送粉通道倾角的选择

送粉通道与基体表面之间的夹角称之为倾角,根据实践经验,送粉通道的倾角不宜小于 60° ,因而分别选取 $\alpha = 63^\circ, 70^\circ, 73^\circ$ 3 个倾角和收缩出口形式,进行数值模拟。

3.2.1 浓度场数值模拟结果分析

图 7 为 3 种不同倾角条件下,粉末流沿 $y=0$ 剖面的浓度对比。由图 7 可以看出,随送粉通道倾角的增加,粉末流气柱区逐渐下移,远离出粉口下端面。在焦点下方,汇聚的粉末流开始逐渐分散,气柱区的直径变大,倾角越小,气柱区的浓度降得越快,当倾角为 63° 时,在流场区域的气柱区下方出现了柱状分散区。

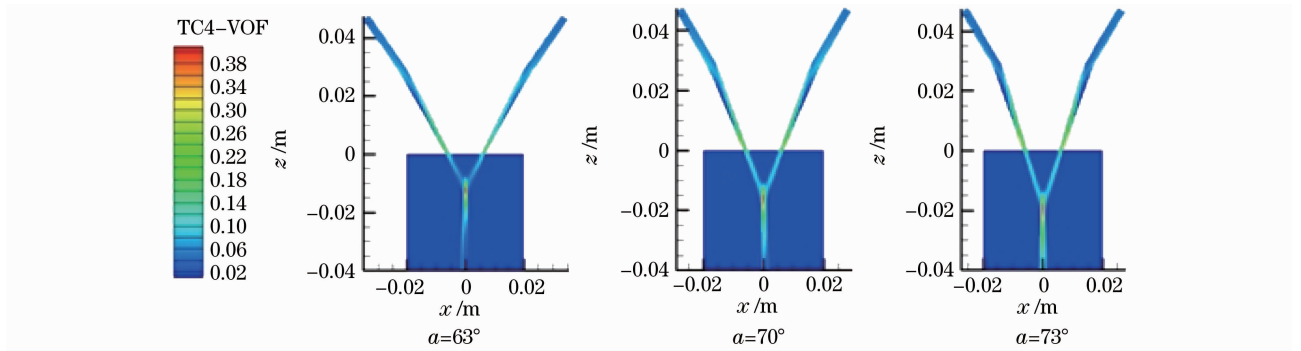


图 7 不同倾角条件下沿 $y=0$ 剖面粉末流浓度分布

Fig. 7 Powder stream concentration distribution under the condition of different angles along $y=0$ section

图 8 为 3 种倾角的同轴送粉喷嘴沿中心轴线粉末流浓度曲线对比,可以看出随倾角的增加,粉末流汇聚焦点下移;倾角越大粉末流汇聚后分散得越慢,

汇聚效果越好。3 种倾角条件下,沿中心轴线粉末流浓度最高值分别出现在出粉口平面下端约为 12, 15, 19 mm 处。

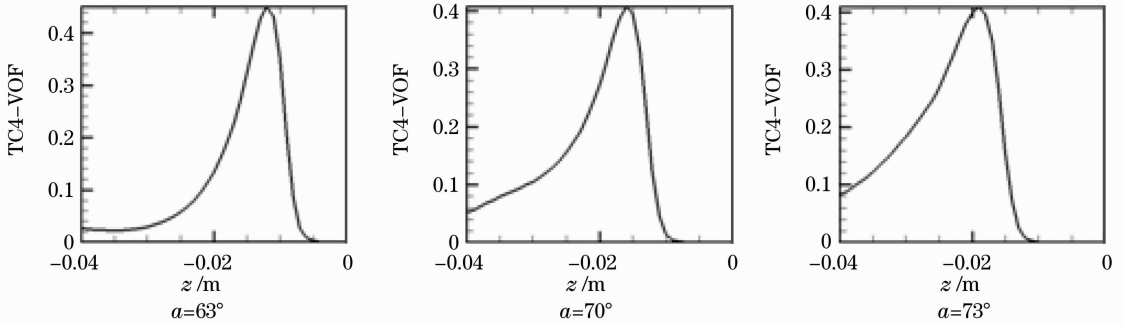


图 8 不同倾角条件下沿中心轴线粉末流浓度曲线

Fig. 8 Powder stream concentration curve under the condition of different angles along the central axis

3.2.2 速度场数值模拟结果分析

图 9 与图 10 分别为不同倾角条件下粉末流沿 $y=0$ 剖面的速度矢量对比和粉末粒子流线对比(粒子速度大小及体积分数可以分别参考图片左侧颜色的深浅及对应的数字)。通过分析可知,粉末流在喷嘴出口下方逐渐汇聚形成气柱区,在气柱区汇聚的

粉末流大部分粉末粒子发生碰撞,在重力和载流气体的推力共同作用下,粉末流以层流状态向下喷射,在气柱区下方粉末流呈现一定的发散,出现柱状分散区。在喷嘴下方靠近流体计算区域边界,由于环境气体阻力的影响,粉末粒子的速率略有下降,并且出现个别粒子反弹现象,倾角越大,反弹现象越明显。

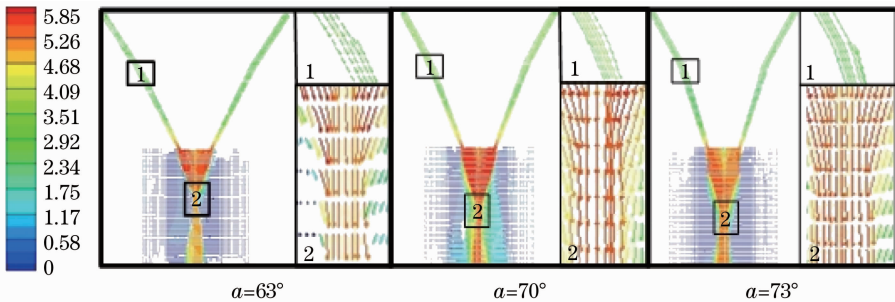


图 9 不同倾角条件下沿 $y=0$ 剖面的速度矢量场分布

Fig. 9 Vector field of velocity distribution under the condition of different angles along $y=0$ section

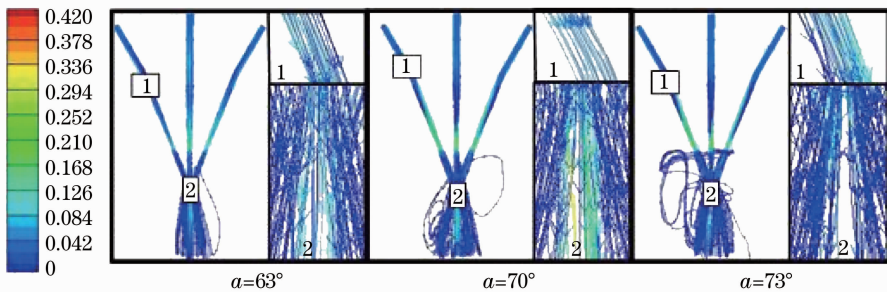


图 10 不同倾角条件下粉末粒子流线图

Fig. 10 Powder particle streamline chart under the condition of different angles

通过以上分析可以看出:

1) 倾角较大,粉末流汇聚焦点距离出粉口下端面较远,粉末流的汇聚性较好但反弹现象明显。倾角较小粉末流汇聚焦点距离出粉口下端面较近,在激光加工过程中,受熔池反溅以及激光反射的影响

较大,喷嘴容易受热变形,对冷却结构要求较高,易出现送粉通道出口堵塞现象。

2) 喷嘴倾角对焦点处粉末流汇聚浓度和焦点半径略有影响,但不明显。

综合考虑以上分析结果,本文选择同轴送粉喷

嘴送粉通道倾角为 70° 。

4 实验研究

根据以上模拟分析,采用收缩出口和 70° 送粉通道倾角来设计制造送粉喷嘴。图 11 为该送粉喷嘴实物图。粉末流在激光加工过程中的汇聚性和粉末利用率是衡量送粉喷嘴工作性能好坏的重要标准,同时也是影响熔覆成形效果的重要因素^[10~15],因此对该送粉喷嘴在这两方面的性能进行了实验研究,同时为保证设计的合理性,对于不同倾角下的粒子反弹程度也进行了实验探究。



图 11 送粉喷嘴实物图

Fig. 11 Picture of powder feeding nozzle

4.1 粉末汇聚性实验

将送粉喷嘴与分粉器、混粉器、送粉器作为连接,采用高纯氩进行载气,粉末材质选用 TA15,粒度为 $-100 \sim +200$ 目 ($74 \sim 149 \mu\text{m}$),送粉量 M 为 3.3125 g/min ,载气流量 Q 为 3.5 L/min 。粉末汇聚效果如图 12 所示。

从图 12 中可以看到:粉末流在喷嘴下端由 4 个

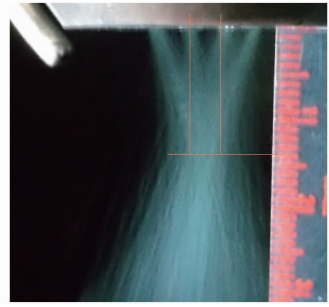


图 12 粉末汇聚效果

Fig. 12 Effect of powder together

送粉通道送出并汇聚,随着粉末的下移逐渐形成气柱区,粉末流焦点出现在喷嘴下方约 14 mm 处,在此位置粉末流浓度最大。在焦点处绝大部分粉末汇聚在直径为 4 mm 的圆内,粉末的汇聚性较好,并且后续实验所用激光器产生的激光光斑直径为 5 mm 左右,这样在光束与送粉喷嘴中心重合的前提下绝大多数的粉末都会处于激光束的照射当中,从而减少了粒子的反弹。

4.2 粉末粒子反弹实验

不同倾角条件下,粉末粒子反弹程度不同。实验采用单个送粉通道送粉,用送粉管代替送粉通道,将其安装到可改变角度的夹持装置上,改变其倾角,用高分辨率摄像机拍摄在没有激光照射情况下的反弹效果,该情况下粒子反弹效果在一定程度上能够反映、验证倾角与粉末粒子反弹之间的关系。实验时送粉量 M 选为 2 号送粉, $M = 3.3125 \text{ g/min}$,图 13 为不同倾角条件下的粒子反弹程度。

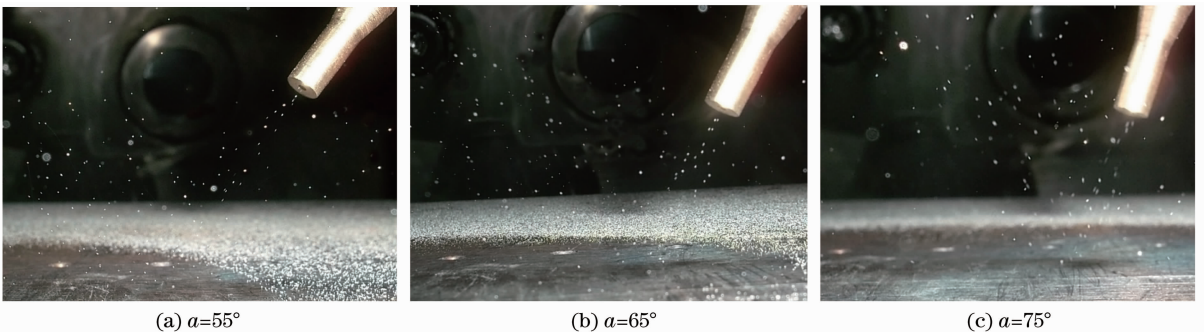


图 13 不同倾角条件下的粒子反弹程度

Fig. 13 Extent of particle bounce under different angles

由图可以看到随着送粉通道倾角的增大,粒子的反弹程度越加剧烈,且当倾角为 75° 时,粒子反弹的高度较高,这在实际熔覆过程中就容易出现因反弹粒子过高粘连到送粉口而将其堵塞的现象。

4.3 粉末利用率实验

粉末利用率可以用熔覆体的质量与送粉系统输

出的成形材料质量之比来表示。基体的质量设为 m_1 ,熔覆成形后总质量为 m_2 ,则熔覆层质量 $m_a = m_2 - m_1$,成型材料质量 m_b 等于送粉量 M 乘以送粉时间 t 。选用激光功率 $P = 2000 \text{ W}$,送粉量 M 为 3 号送粉,此时 $M = 4.9695 \text{ g/min}$,扫描速度 $V = 3 \text{ mm/s}$ 作为实验参数,边长为 18 mm 的正方形两

层作为成形路径,则 $t = \frac{18 \times 4 \times 2}{3} = 8 \text{ s}$, 粉末利用

图 14 为其粉末利用率分布图。

率 $\alpha = \frac{m_2 - m_1}{M \times t} \times 100\%$ 。实验数据如表 1 所示,

表 1 实验数据
Table 1 Experimental data

	1	2	3	4	5	6	7	8
m_1/g	32.1856	34.0662	28.8986	29.4447	29.7973	28.8589	27.6889	31.3307
m_2/g	33.8800	35.8893	30.6878	31.2628	31.6479	30.8154	29.5188	33.0426
$M/(\text{g}/\text{min})$	4.9695	4.9695	4.9695	4.9695	4.9695	4.9695	4.9695	4.9695
t/s	48	48	48	48	48	48	48	48
$\alpha/\%$	42.62	45.86	45.00	45.73	46.54	49.21	46.03	43.06

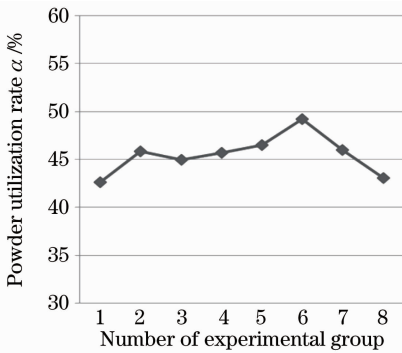


图 14 粉末利用率分布图

Fig. 14 Distribution of powder utilization rate

从实验数据及利用率分布图可以看出,在本实验中该送粉喷嘴粉末利用率为45.5%左右,上下出

现轻微波动,表明粉末输送处于一个相对比较稳定的状态,因而该送粉喷嘴能较好地保证在熔覆成形过程中对粉末输送稳定性、连续性的要求。研究资料表明^[16],在激光熔覆成形过程中粉末利用率远远达不到100%,理想状态下能达到30%左右,杨晓宇^[17]选用Ni60A粉末进行了熔覆实验,在激光功率和送粉速率一定,改变扫描速度的前提下粉末利用率最高可达到42%,由此可见该送粉喷嘴在粉末利用率方面具有良好的性能。

最后采用DL-HL-T5000B型5 kW横流CO₂激光器和实验室自主设计的卧式真空箱、送粉器、送粉喷嘴组成的激光加工系统进行激光熔覆实验。图15为激光熔覆成形件实物图。

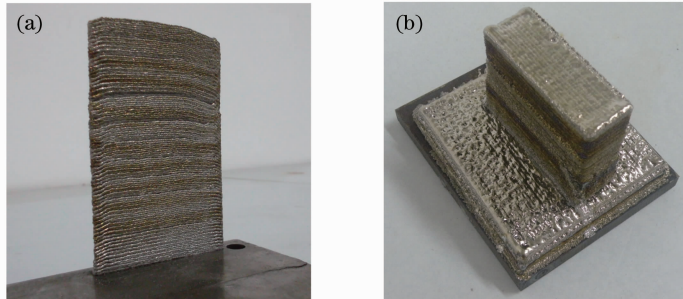


图 15 激光熔覆成形件实物图。(a)薄壁件长宽高分别约为50,5,85 mm;(b)堆积件长宽高分别约为90,90,60 mm

Fig. 15 Physical map of laser cladding forming parts. (a) Thin-walled parts with length, width and height about 50, 5, 85 mm; (b) cumulate parts with length, width and height about 90, 90, 60 mm

5 结 论

从固气两相流的基础理论出发,设计了一种应用于激光熔覆成形系统的送粉喷嘴,并对设计的送粉喷嘴进行了有限元分析和实验验证。

1) 送粉通道选用收缩出口方式能提高粉末流的汇聚性且在出粉口及汇聚点处粉末流浓度较大,粉末流具有较好的挺度。

2) 经数值模拟分析可知送粉通道倾角较大,粉

末流的汇聚性较好且浓度较高,但反弹现象较为明显,半融状态的粉末颗粒反弹后容易粘连在送粉口,从而堵塞送粉通道;倾角较小,粉末汇聚性差,出粉口距离基体较近,受熔池辐射、激光反射等因素影响较大。经过分析得出选用70°倾角会获得较好的送粉效果。通过粒子反弹实验可知在一定范围内粉末粒子反弹程度随倾角增大而越加剧烈。

3) 选用最佳参数制造出的送粉喷嘴其汇聚焦

点在出粉口下端约 14 mm 处,在焦点处,绝大部分粉末汇聚在直径为 4 mm 的圆内,粉末的汇聚性较好。

4) 实验中该送粉喷嘴的粉末利用率约为 45.5%,且波动较小,表明该送粉喷嘴具有良好的粉末利用率性能。

参 考 文 献

- 1 Yang Sen, Zhong Minlin, Zhang Qingmao *et al.*. New technique to rapidly manufacture metal parts with laser [J]. *Laser Technique*, 2001, **25**(4): 254~257
杨 森, 钟敏霖, 张庆茂等. 激光快速成型金属零件的新方法[J]. *激光技术*, 2001, **25**(4): 254~257
- 2 Song Jianli, Li Yongtang, Deng Qilin *et al.*. Research progress of laser cladding forming technology [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2010, **46**(14): 29~39
宋建丽, 李永堂, 邓琦林等. 激光熔覆成形技术的研究进展[J]. *机械工程学报*, 2010, **46**(14): 29~39
- 3 Tong Ming. The Study on Laser Rapid Prototyping Powder Feeding System's Key Technology [D]. Shenyang: Shenyang Aerospace University, 2011. 25~26
佟 明. 激光快速成形粉料输送系统关键技术研究[D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2011. 25~26
- 4 Lu Qiaopan, Zhang Anfeng, Li Dichen *et al.*. Numerical simulation and experimental research on gas-carrier coaxial powder nozzle[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(12): 3162~3167
路桥潘, 张安峰, 李涤尘等. 载气式同轴送粉喷嘴的数值模拟及实验研究[J]. *中国激光*, 2010, **37**(12): 3162~3167
- 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 Jehnming Lin. Numerical simulation of the focused powder streams in coaxial laser cladding [J]. *J. Mater. Process. Technol.*, 2000, **105**(1-2): 17~23
- 7 Zhang Hongjun, Zhong Minlin, Liu Wenjin *et al.*. Develop of high convergent coaxial feeding nozzle with temperature display for laser rapid manufacturing[J]. *Applied Laser*, 2004, **24**(6): 380~382
张红军, 钟敏霖, 刘文今等. 高汇聚温度显示激光快速制造同轴送粉喷嘴的研制[J]. *应用激光*, 2004, **24**(6): 380~382

- 8 Heng Pan, Frank Liou. Numerical simulation of metallic powder flow in a coaxial nozzle for the laser aided deposition process[J]. *J. Mater. Process. Technol.*, 2005, **168**(2): 230~244
- 9 Yang Guang, Liu Weijun, Wang Wei *et al.*. Research on process of titanium alloy laser rapid prototyping [J]. *Manufacturing Technology & Machine Tool*, 2010, (6): 50~53
杨 光, 刘伟军, 王 维等. 钛合金激光快速成形工艺研究[J]. *制造技术与机床*, 2010, (6): 50~53
- 10 Nan Yang. Concentration model based on movement model of powder flow in coaxial laser cladding [J]. *Opt. & Laser Technol.*, 2009, **41**(1): 94~98
- 11 Zhang Xingquan, Wang Yunshan, Yang Xichen *et al.*. Three-dimensional laser beam coaxial powder feeding system for laser remanufacturing technology [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(s1): 350~353
张兴泉, 王云山, 杨洗陈等. 激光再制造三维运动光束头[J]. *中国激光*, 2007, **34**(s1): 350~353
- 12 S. Y. Wen, Y. C. Shin, J. Y. Murthy *et al.*. Modeling of coaxial powder flow for the laser direct deposition process[J]. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2009, **52**(25-26): 5867~5877
- 13 Wang Huaming, Zhang Shuquan, Wang Xiangming. Progress and challenges of laser direct manufacturing of large titanium structural components[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(12): 3204~3209
王华明, 张述泉, 王向明. 大型钛合金结构件激光直接制造的进展与挑战[J]. *中国激光*, 2009, **36**(12): 3204~3209
- 14 A. V. Gusarov, I. Smurov. Direct laser manufacturing with coaxial powder injection; Modelling of structure of deposited layers[J]. *Appl. Surf. Sci.*, 2007, **253**(19): 8316~8321
- 15 Yi Dexian, Hu Fangyou, Zhao Weiyi *et al.*. Research on shielding gas impacting jet flow field on laser coaxial powder feeder nozzle[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(8): 2098~2103
易德先, 胡芳友, 赵维义等. 激光同轴送粉喷嘴保护气体冲击射流场研究[J]. *中国激光*, 2010, **37**(8): 2098~2103
- 16 Shi Gaolian, Shi Shihong, Wu Shaohua *et al.*. Research on effective utilization rate of power in inside-laser coaxial powder feeding laser cladding and rapid prototyping process [J]. *Hot Working Technology*, 2010, **39**(7): 152~154
石皋莲, 石世宏, 吴少华等. 光内送粉激光熔覆快速成形粉末利用率实验研究[J]. *热加工工艺*, 2010, **39**(7): 152~154
- 17 Yang Xiaoyu, Yang Xiaoyu. The development of gas power feeder used for laser-cladding directed shaping [D]. Shenyang: Shenyang Ligong University, 2007. 58~59
杨晓宇. 用于激光熔覆直接成形的载气式送粉器研制[D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2007. 58~59

栏目编辑: 宋梅梅