

# 激光熔覆成形送粉喷嘴关键参数的探究

王 维<sup>1</sup> 才 磊<sup>1</sup> 杨 光<sup>1</sup> 卞宏友<sup>1</sup> 钦兰云<sup>1</sup> 王 伟<sup>1</sup> 项 坤<sup>1</sup> 佟 明<sup>2</sup> 齐 鹏<sup>1</sup> 魏 强<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 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)

<sup>2</sup> 华晨汽车工程研究院, 辽宁 沈阳 110136

**摘要** 在激光熔覆成形过程中,送粉喷嘴性能的好坏对熔覆成形件的质量具有重要影响。为探究影响送粉喷嘴性能的关键参数,建立了数值计算模型,应用 FLUENT 软件对送粉通道不同收缩角度和送粉口不同直径条件下的粉末流场情况进行了数值模拟,并依据模拟结果确定了送粉喷嘴的关键参数。计算结果表明,在其他参数一定的前提下,选样送粉通道收缩角度  $2.5^\circ$  和送粉口直径  $1.5\text{ mm}$  时,有利于提高送粉喷嘴的粉末汇聚性,改善熔覆成形效果。依据该关键参数制造出送粉喷嘴的实体,进行了粉末汇聚、激光熔覆成形实验,验证了该送粉喷嘴的效果。

**关键词** 激光技术;光学制造;激光熔覆成形;数值模拟;送粉喷嘴;收缩角度;送粉口

中图分类号 TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP50.021402

## Research on the Key Parameters of Powder-Feeding Nozzle for Laser Cladding Forming

Wang Wei<sup>1</sup> Cai Lei<sup>1</sup> Yang Guang<sup>1</sup> Bian Hongyou<sup>1</sup> Qin Lanyun<sup>1</sup> Wang Wei<sup>1</sup>

Xiang Kun<sup>1</sup> Tong Ming<sup>2</sup> Qi Peng<sup>1</sup> Wei Qiang<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> Key Laboratory of Fundamental Science for National Defence of Aeronautical Digital Manufacturing Process, Shenyang Aerospace University, Shenyang, Liaoning 110136, China  
<sup>2</sup> Brilliance Automobile Engineering Research Institute, Shenyang, Liaoning 110136, China)

**Abstract** In the process of laser cladding forming, the performance of the powder-feeding nozzle has an important influence on the quality of cladding molded parts. To explore the key parameters that affect the performance of the powder-feeding nozzle, numerical calculation model is established using FLUENT software. Numerical simulation is performed on powder flow for the powder-feeding channel with different contraction angles and outlet diameters, and the key parameters of the powder-feeding nozzle are determined based on the simulation results. The results show that the contraction angle of powder-feeding channel of  $2.5^\circ$  and the diameter of powder outlet of  $1.5\text{ mm}$  are beneficial to improve the powder convergence of powder-feeding nozzle and the cladding forming effect with other process parameters invariable. A powder-feeding nozzle is fabricated based on the obtained key parameters, and the experiment of powder convergence and laser cladding forming is carried out. The effect of powder-feeding nozzle is validated.

**Key words** laser technique; optical fabrication; laser cladding forming; numerical simulation; powder-feeding nozzle; contraction angle; powder outlet

**OCIS codes** 140.3390; 120.4610; 220.4610

## 1 引言

激光熔覆成形技术是将计算机辅助设计(CAD)、计算机数控(CNC)、激光、精密伺服驱动和新材料等先进技术集成于一体的全新制造技术。该技术基于离散/堆积快速成形原理,采用激光束聚焦来熔化同步供给

收稿日期: 2012-10-11; 收到修改稿日期: 2012-10-20; 网络出版日期: 2013-01-07

基金项目: 中航工业产学研创新工程(CXY2011SH16)、辽宁省自然科学基金(201202173)、辽宁省教育厅科学技术研究项目(L2011026)和辽宁省高校创新团队项目(LT2011004)资助课题。

作者简介: 王 维(1957—),男,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: rpm@sau.edu.cn

的金属粉末,在沉积基板上逐层堆积而形成金属零件,在无需任何硬质模具或模型的情况下,能快速制备出不同材料的复杂形状的金属零件,具有广阔的发展前景<sup>[1]</sup>。而作为激光熔覆成形系统关键部件之一的送粉喷嘴已成为各科研单位的研究热点<sup>[2]</sup>。在激光熔覆成形过程中,激光照射形成熔池,同时粉末粒子通过同轴送粉喷嘴喷射到熔池当中进而熔化完成熔覆制造,而粉末粒子的汇聚效果、焦点位置和反弹强度等因素对熔覆成形件的质量具有重大影响。现有送粉喷嘴大多存在粉末汇聚性差、粉末利用率低和出粉口容易堵塞等缺点<sup>[3~7]</sup>。为解决该问题,本文基于 FLUENT 软件对送粉通道不同收缩角度、不同出口大小条件下的粉末流场进行了数值模拟,确定其最优参数,并依照该参数制造出送粉喷嘴,最终通过实验验证了喷嘴设计的合理性,对于送粉喷嘴的研制具有一定的参考价值。

## 2 同轴送粉喷嘴关键参数的数值分析

### 2.1 模型建立与网格划分

现有送粉喷嘴的结构多种多样<sup>[8~13]</sup>,但关键参数的选择却是影响送粉质量好坏的重点。送粉通道倾角选用  $70^\circ$  的收缩出口时会取得较好的效果<sup>[2]</sup>。本文主要对送粉通道的内部结构——收缩角度和送粉口的大小进行研究。

该设计基于孔式送粉方式,4 个送粉通道带有一定收缩角度,其下端为与之相连的柱形区域,用来模拟分析气粉混合体经送粉口喷出后形成的流场区域。图 1 为数值计算模型与网格划分。

### 2.2 送粉口大小的模拟分析

送粉通道出粉口处的形状近似于圆形,直径为  $d$ 。出粉口直径较小时,经送粉口喷出的粉末粒子流的汇聚性较好,发散现象较弱,具有良好的挺度,进而能保证其具有较高的粉末利用率,这一点在实际生产过程中尤为重要;但出粉口过小时,激光加工过程中产生的大量热和半熔粒子的反弹,容易造成送粉通道堵塞,导致整个实验的停止。同样,送粉通道直径较大时,虽不容易堵粉,实验或生产的整体效率较高,但因其粉末流的汇聚性较差,分散严重,导致粉末利用率较低,对于薄壁或较小零件的熔覆具有一定难度。

现选取  $d=1\text{ mm}$ 、 $d=1.5\text{ mm}$ 、 $d=2\text{ mm}$  3 种直径大小进行数值模拟。

图 2 为 3 种不同直径下,粉末流沿  $X=0$  剖面的浓度分布。从图中可以看出,在送粉通道倾角和收缩角度一定的情况下,随着出粉口直径的增大,各支路粉末流的挺度降低,进而使得汇聚形成的粉末粒子束的焦点逐渐下移,远离出粉口下端。不同送粉口直径条件下焦点位置分别为出粉口下端约 20、23、25 mm 处,同

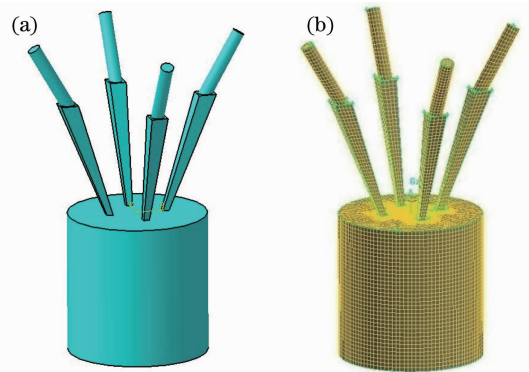


图 1 数值计算模型与网格划分

Fig. 1 Numerical calculation model and meshing

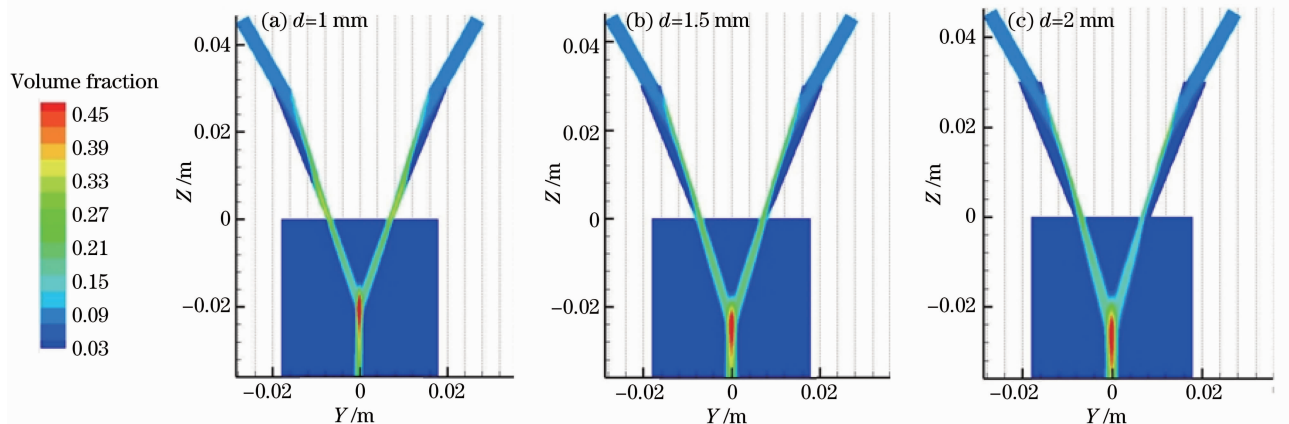


图 2 不同送粉口直径条件下沿  $X=0$  剖面粉末流浓度分布

Fig. 2 Powder stream concentration distribution under the condition of different diameters of powder outlet along  $X=0$  section

时焦点处粉末粒子束的直径也随之逐渐增大。

图3为不同直径条件下速度矢量场 $Y$ 方向分量分布。由图中可以看到:在送粉通道内,粉末粒子的大小和方向基本相同,喷出之后,各支路粉末流逐渐汇聚,在粉末粒子之间的碰撞、载气和重力的共同作用下,大部分粉末粒子的轨迹为竖直向下,粒子速度在 $Y$ 方向的分量逐渐降低,在焦点及其下方趋近于零。随着出粉口直径的增加,粉末粒子速度在 $Y$ 方向的分量逐渐降低,当 $d=2\text{ mm}$ 时, $Y$ 方向分量最小,表明绝大部分粒子的运动轨迹为竖直向下。

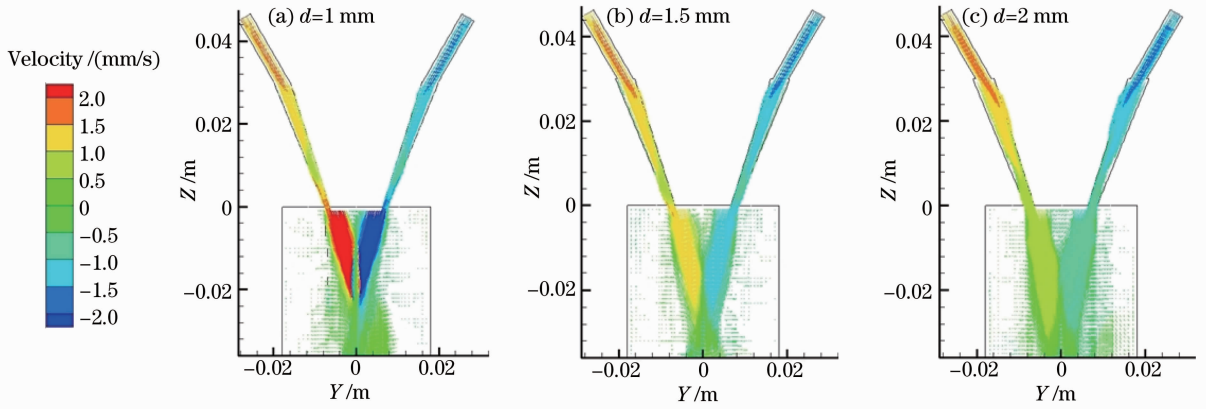


图3 不同送粉口直径条件下速度矢量场 $Y$ 方向分量分布

Fig. 3  $Y$ -direction component distribution of vector field under the condition of different diameters of powder outlet

图4为不同直径条件下速度矢量场 $Z$ 方向分量分布。可以看到:粉末粒子喷出后,速度在 $Z$ 方向的分量随着送粉口直径的增大而逐渐减小,当 $Z$ 方向分量较小时,表明其竖直方向速度较小,有利于降低反弹粒子的反弹高度,减少反弹粒子粘连到送粉口的概率。

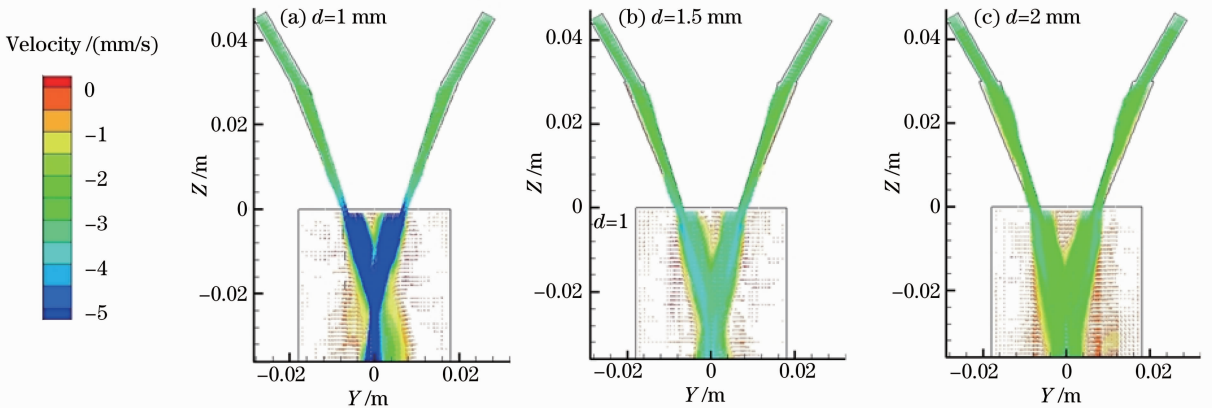


图4 不同送粉口直径条件下速度矢量场 $Z$ 方向分量分布

Fig. 4  $Z$ -direction component distribution of velocity vector field under the condition of different diameter of powder outlet

图5为不同送粉口直径情况下的粉末粒子流线图。可以看到,随着送粉口直径的增加,粉末粒子流线越加发散与不规则,在 $d=2\text{ mm}$ 时出现了一定程度的紊流。

图6为不同送粉口直径情况下沿中心轴线的粉末流浓度曲线。由图中可以看出:随着送粉口直径的逐渐增大,粉末粒子束的焦点逐渐下移,不同条件下焦点位置分别出现在出粉口下端约20、24、26 mm处;送粉口直径越大,粉末流的汇聚性越差,在焦点处粉末粒子的浓度越小。当 $d=1\text{ mm}$ 时,粉末流的汇聚性最好,焦点处的体积分数最高,达到53%左右,而 $d=2\text{ mm}$ 时焦点处的体积分数仅为48%左右。

通过以上分析可以看出:

1) 送粉口直径的大小对于送粉喷嘴的性能具有较为明显的影响;

2) 送粉口直径较小时,粉末流的汇聚性较好,焦点处粉末粒子的体积分数较高,且绝大部分粒子的轨迹都是规则的,但其粉末粒子束的焦点距出粉口的距离较近且直径较小,在激光熔覆过程中容易发生堵塞,同

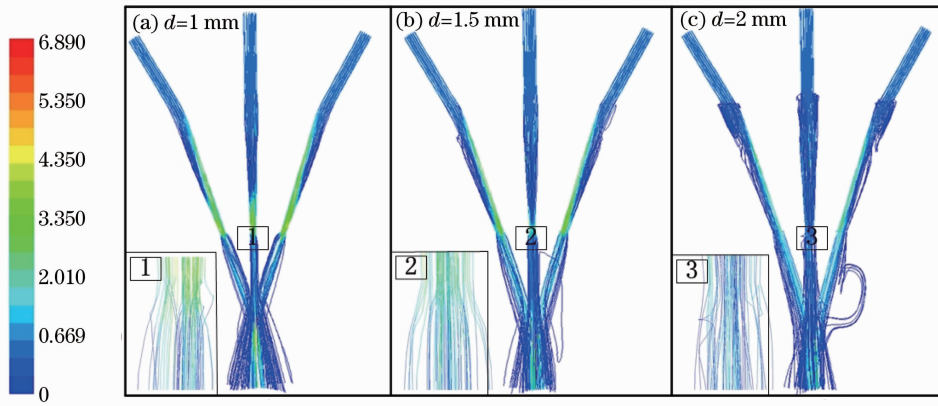


图 5 不同送粉口直径情况下的粉末粒子流线图

Fig. 5 Powder particle streamline chart under the condition of different diameters of powder outlet

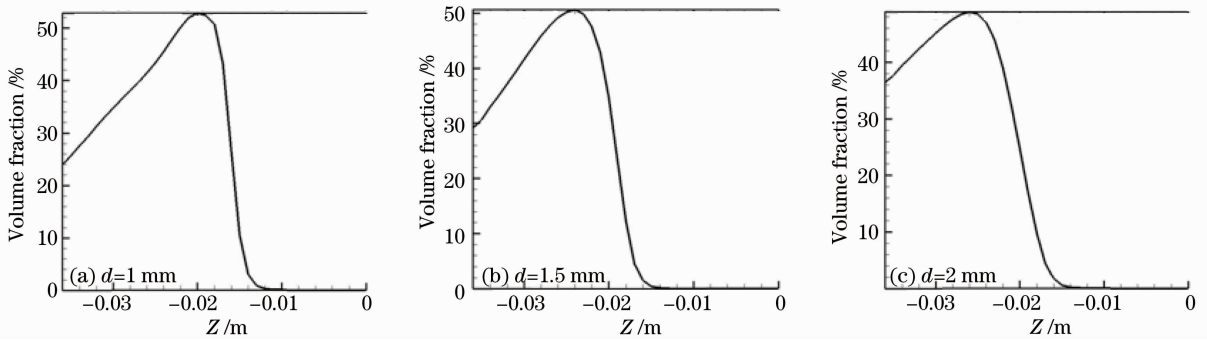


图 6 不同送粉口直径情况下沿中心轴线的粉末流浓度曲线

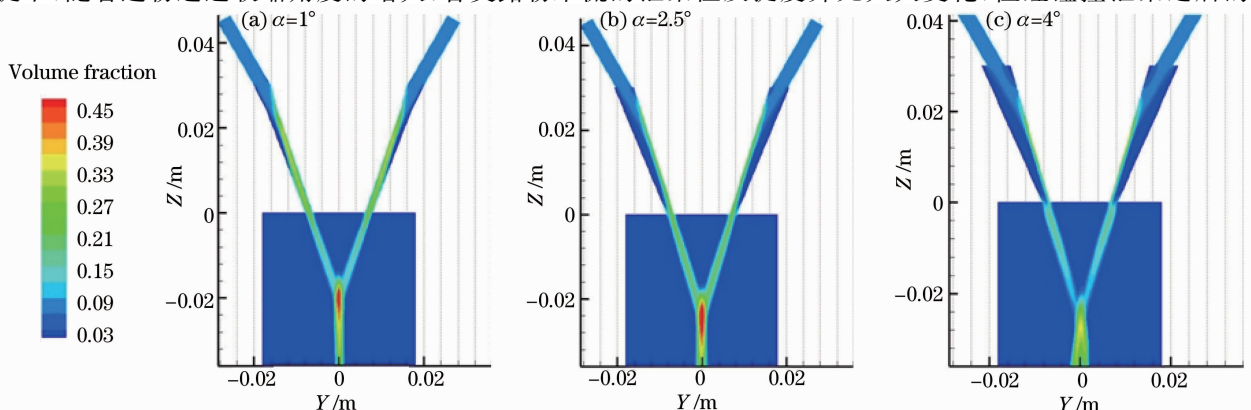
Fig. 6 Powder stream concentration curve along the central axis under the condition of different diameters of powder outlet 时  $Y$  方向速度分量较大,使得粉末粒子束主体区域以外的周边区域的发散较为明显,而  $Z$  方向速度较大,必然导致粉末粒子反弹现象严重。

综合考虑,送粉口的直径大小选为  $d=1.5$  mm。

### 3.3 送粉通道收缩角度的模拟分析

送粉通道采用收缩式出口有利于提高粉末流的汇聚性,但收缩角度  $\alpha$  的大小对汇聚性也有不同的影响。在送粉口直径为 1.5 mm 的情况下选取  $1^\circ$ 、 $2.5^\circ$ 、 $4^\circ$  3 种收缩角度进行数值模拟。

图 7 为不同收缩角度条件下粉末流沿  $X=0$  剖面的浓度分布。从图中可以看到在送粉口直径一定的前提下,随着送粉通道收缩角度的增大,各支路粉末流的汇聚性及挺度并无太大变化,但经碰撞汇聚之后的粒

图 7 不同收缩角度条件下粉末流沿  $X=0$  剖面的浓度分布Fig. 7 Powder stream concentration distribution under the condition of different contraction angles along  $X=0$  section



子束直径逐渐变大,焦点逐渐下移,远离出粉口下端,不同收缩角度条件下的焦点位置分别为出粉口下端约20、23、25 mm处。当 $\alpha=2.5^\circ$ 时,焦点处粉末粒子的浓度最高, $\alpha=4^\circ$ 时焦点处浓度最低,且汇聚之后呈现明显的发散趋势。

图8和图9分别为不同收缩角度条件下速度矢量场Y、Z方向分量分布。由图8和图9可以看到,各支路粉末流经碰撞之后,其Y方向的速度分量逐渐减弱,在焦点下端绝大部分粒子的运动轨迹为竖直向下,而在Z方向粒子速度的大小基本相同,并无明显区别。当 $\alpha=4^\circ$ 时,在汇聚粒子束的主体区域之外仍存在部分粒子具有Y方向速度分量,当 $\alpha=1^\circ$ 时,在汇聚粒子束的主体区域之外仍存在部分粒子具有Z方向速度分量,表明在汇聚粒子束周边仍有一定程度的发散粒子存在。

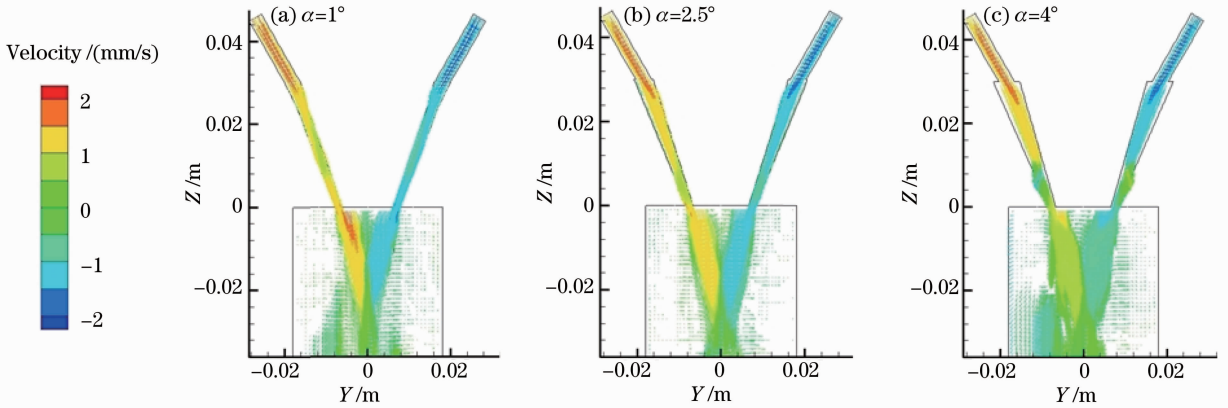


图8 不同收缩角度条件下速度矢量场Y方向分量分布

Fig. 8 Y-direction component distribution of velocity vector field under the condition of different contraction angles

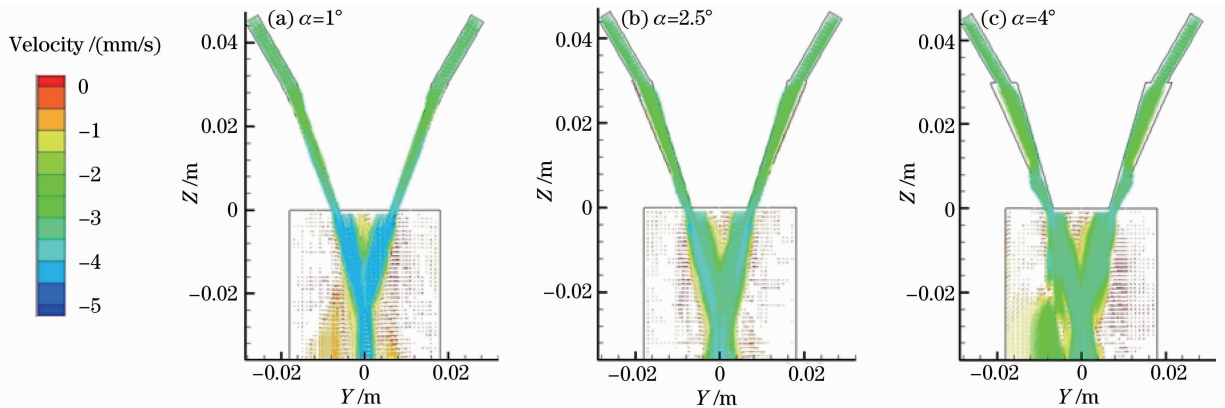


图9 不同收缩角度条件下速度矢量场Z方向分量分布

Fig. 9 Z-direction component distribution of velocity vector field under the condition of different contraction angles

图10为不同收缩角度情况下的粉末粒子流线图。从图中可以明显看到粉末粒子从送粉口喷出之后出现了不同程度的发散,绝大部分粒子的运动轨迹较为规则。当 $\alpha=1^\circ$ 和 $\alpha=4^\circ$ 时均出现了比较明显的粒子流线混乱状态,尤其在 $\alpha=4^\circ$ 时,在送粉通道内部出现了比较明显的涡流,严重降低了喷射出去之后粉末流的汇聚性。

图11为不同收缩角度情况下沿中心轴线的粉末流浓度曲线对比。由图11可以看到:不同条件下粉末粒子束焦点位置分别为出粉口下端约19、24、27 mm处。当 $\alpha=2.5^\circ$ 时,在焦点处粉末粒子的浓度约为50.5%,而其他两种角度情况下焦点处的粉末粒子浓度明显偏低,且在各自曲线达到最高浓度时, $\alpha=2.5^\circ$ 情况下曲线下降较缓慢,表明汇聚粒子束经过焦点之后发散现象较弱,绝大部分粒子处于粒子束的中心主体区域。

通过以上分析可以看出:

- 1) 收缩角度对于送粉喷嘴的性能具有较为重要的影响,对于改善粉末汇聚性的作用尤为明显;
- 2) 当收缩角度为 $2.5^\circ$ 时粉末流的汇聚性较好,其焦点处的浓度较高,而且粉末粒子的轨迹比较规则,不

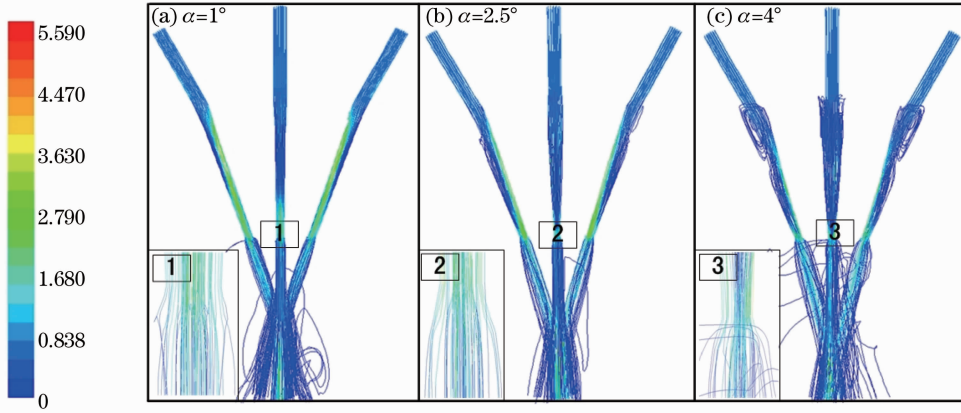


图 10 不同收缩角度情况下的粉末粒子流线图

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

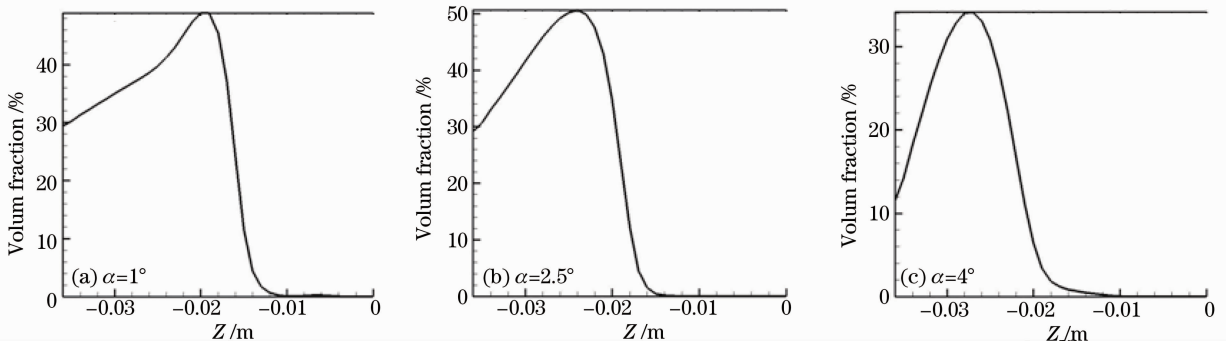


图 11 不同收缩角度情况下沿中心轴线的粉末流浓度曲线对比

Fig. 11 Powder stream concentration curve along the central axis under the condition of different contraction angle

容易产生大的不规则的紊流；

3) 在一定范围内,收缩角度对喷出后粉末粒子竖直方向速度大小的影响不是很明显。

综合考虑,送粉通道的收缩角度选为  $2.5^\circ$ 。

## 4 实验研究

选定送粉喷嘴的关键参数:采用收缩式送粉通道,送粉通道的倾角为  $70^\circ$ <sup>[2]</sup>,收缩角度  $\alpha=2.5^\circ$ ,送粉口的直径  $d=1.5\text{ mm}$ 。

在激光熔覆的过程中,送粉喷嘴距离激光及熔池较近,喷嘴在激光反射、热积累以及熔池辐射和溅射的作用下<sup>[14,15]</sup>升温较快,严重时可能烧坏送粉喷嘴,堵塞粉末通道。为了达到良好的冷却效果,保证送粉喷嘴能够安全稳定地工作,设计采用内腔冷却层和外腔冷却层的双层冷却结构,同时选择导热性能良好的紫铜作为制造材质。图 12 为送粉喷嘴的实物图。

通过输送软管将送粉喷嘴与混粉器、送粉器和分粉器相连接,并用高纯氩进行载气,载气流量  $Q=3.5\text{ L/min}$ ,送粉量  $M=3.3125\text{ g/min}$ ,粉末粒子选用 TA15,粒度为  $74\sim 149\ \mu\text{m}$ 。粉末流的汇聚效果如图 13 所示。

从图 13 中可以看到:各支路粉末流在喷嘴下方由四个送粉通道送出,在载气、粒子之间碰撞和重力的共同作用下,逐渐汇聚形成粉末粒子束,在焦点处粉末粒子的浓度最大,汇聚之后绝大多数粒子的运动方向为竖直向下,但由于原有粒子的速度较大,仍有部分粒子的速度在水平方向有分量,表现为过焦点之后粉末粒子束有一定的发散趋势,这与数值模拟结果相符。

最后将该送粉系统与其他实验设备相连接构成一个完整的激光熔覆成形系统,进行熔覆成形实验。图 14 为激光熔覆成形件实物图。

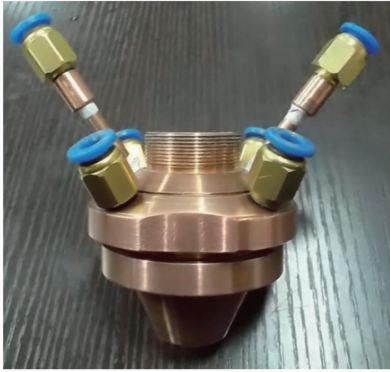


图 12 送粉喷嘴实物图

Fig. 12 Real-object picture of powder-feeding nozzle

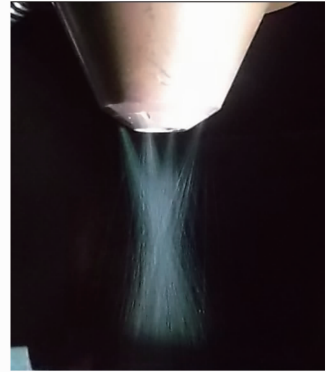
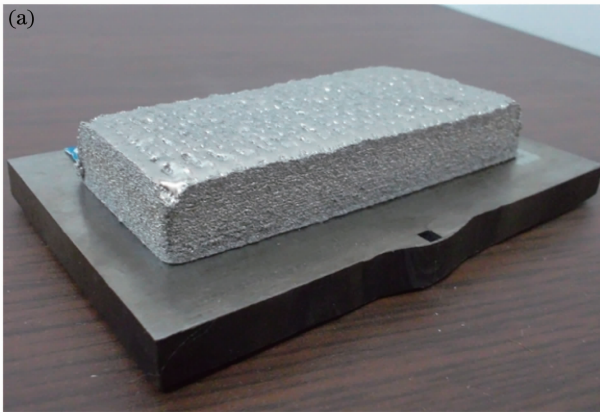


图 13 粉末汇聚效果图

Fig. 13 Convergence of powder



(a)



(b)

图 14 激光熔覆成形件实物图。(a)堆积件,尺寸约为  $85\text{ mm}\times 35\text{ mm}\times 15\text{ mm}$ ; (b)薄壁件,尺寸约为  $50\text{ mm}\times 5\text{ mm}\times 85\text{ mm}$

Fig. 14 Real-object pictures of laser cladding forming parts. (a) Cumulate parts with dimension of about  $85\text{ mm}\times 35\text{ mm}\times 15\text{ mm}$ ; (b) thin-walled parts with dimension of about  $50\text{ mm}\times 5\text{ mm}\times 85\text{ mm}$

## 5 结 论

以气固两相流为理论基础,应用 FLUENT 软件对送粉喷嘴关键参数进行了数值模拟,并参照模拟结果确定了关键参数的数值,进而制造出送粉喷嘴实物并以此进行了实验验证。研究得出以下结论:

- 1) 送粉通道收缩角度的选择和送粉口的大小对于改善送粉喷嘴性能具有十分明显的影响;
- 2) 由数值模拟可知,送粉口直径较小时,粉末粒子束的汇聚性较好,焦点处粉末粒子束主体区域的直径较小,浓度较高,但其焦点距出粉口距离较近,竖直向下方向的速度较大,容易因激光辐射、粒子反弹等原因造成送粉通道堵塞。送粉口直径较大时,虽不容易堵粉,但送粉的整体性能有所下降,综合考虑,送粉口直径选为  $1.5\text{ mm}$  为宜,此时焦点距出粉口距离为  $24\text{ mm}$ ;
- 3) 送粉通道的收缩角度选为  $2.5^\circ$ ,此时粉末粒子束焦点处的浓度较高,焦点距出粉口的距离为  $24\text{ mm}$  且粉末粒子的流束比较稳定,运动轨迹比较规则,汇聚之后的粉末粒子束竖直方向的速度较小,粒子反弹较弱;
- 4) 从粉末汇聚效果图和熔覆成形件可以看到,该送粉喷嘴具有较好的送粉性能。

## 参 考 文 献

- 1 Lu Zhenfeng, Li Zhengjia. Application of laser cladding in aviation industry[J]. *Aviation Precision Manufacturing Technology*, 2007, **43**(1): 37~40
- 刘珍峰, 李正佳. 激光熔覆技术在航空工业中的应用 [J]. *航空精密制造技术*, 2007, **43**(1): 37~40
- 2 Wang Wei, Cai Lei, Yang Guang *et al.*. Research on the coaxial powder feeding nozzle for laser cladding[J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(4): 0403003

- 王维, 才磊, 杨光等. 激光熔覆同轴送粉喷嘴研制[J]. 中国激光, 2012, **39**(4): 0403003
- 3 Jin Xiaoshu, Yang Xichen, Wang Yunshan *et al.*. Research on the coaxial powder feeder nozzle in 3D direct manufacturing and remanufacturing[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
- 4 Jehming Lin. Numerical simulation of the focused powder streams in coaxial laser cladding [J]. *J. Mater. Process. Technol.*, 2000, **105**(1-2): 17~23
- 5 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
- 6 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
- 7 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
- 8 Zhang Hongjun, Zhong Minlin, Liu Wenjin *et al.*. Development 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
- 9 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
- 10 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
- 11 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
- 12 S. Y. Wen, Y. C. Shin, J. Y. Murthy *et al.*. Modeling of coaxial powder flow for the laser direct deposition process[J]. *International J. Heat and Mass Transfer*, 2009, **52**(25-26): 5867~5877
- 13 Shi Gaolian, Shi Shihong, Wu Shaohua *et al.*. Research on effective utilization rate of powder 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
- 14 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
- 15 Nan Yang. Concentration model based on movement model of powder flow in coaxial laser cladding [J]. *Opt. Laser Technol.*, 2009, **41**(1): 94~98