

文章编号: 2095-6134(2019)05-0614-06

宽带激光熔覆送粉喷嘴的结构设计与 粉末流场研究*

陈茹虞钢[†] 何秀丽 张越 李少霞

(中国科学院力学研究所, 北京 100190; 中国科学院大学工程科学学院, 北京 100049)

(2018 年 3 月 12 日收稿; 2018 年 6 月 11 日收修改稿)

Chen R, Yu G, He X L, et al. Structure design of power feeding nozzle for wide-band laser cladding and investigation of powder flow [J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2019, 36(5): 614-619.

摘要 设计一种新型的送粉喷嘴结构, 适用于宽带激光熔覆和增材制造。该结构使用多通道出口有效降低粉末流在扫描方向的发散角, 通过添加内部整流圆柱调整粉末流在垂直扫描方向上的浓度分布。采用离散相模型, 研究该喷嘴结构输出的粉末流场。优化分流圆柱的尺寸, 使该送粉喷嘴能够输出浓度分布均匀的宽带粉末流, 并沉积出厚度均匀的宽带涂层。

关键词 宽带激光熔覆; 粉末流; 喷嘴; 结构设计; 数值模拟

中图分类号: V261.8; TH122 文献标志码: A doi: 10.7523/j.issn.2095-6134.2019.05.006

Structure design of power feeding nozzle for wide-band laser cladding and investigation of powder flow

CHEN Ru, YU Gang, HE Xiuli, ZHANG Yue, LI Shaoxia

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

School of Engineering Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract In this work, we designed a new structure of powder feeding nozzle for wide-band laser cladding and effectively solved the problem of excessive divergence angle in the scanning direction by using multi-channel exits. The powder flow concentration in the vertical scanning direction was adjusted by adding an internal cylinder. Discrete phase model was built for investigation of the particle mass concentration. The cylinder diameter was optimized to obtain wide-band powder flow with uniform concentration distribution and wide-band coating with uniform thickness.

Keywords wide-band laser cladding; powder flow; nozzle; structural design; numerical simulation

送粉式激光增材制造是增材制造领域的研究热点, 在航空航天、海洋船舶、汽车、医疗、机械制造等领域得到广泛应用^[1-2]。激光熔覆是送粉式激光增材制造的技术基础, 激光束辐射基体表面

形成熔池, 同时, 由送粉喷嘴输出的粉末颗粒到达熔池表面, 完成质量的添加^[3-4]。送粉喷嘴的结构决定了粉末颗粒对熔池质量添加的分布形式, 合理的送粉喷嘴结构对于成形的尺寸和精度具有重

* 国家自然科学基金(11272316, 11272317, 11672304 和 11502269)资助

[†] 通信作者, E-mail: gyu@imech.ac.cn

要影响^[5-6]。

随着光束转化技术的发展和功率半导体激光器的普及,宽带激光熔覆和成形已经在很多领域中得到应用^[7-8]。为了得到提高成形精度和质量,粉末流的浓度分布应与激光束的能量密度分布相匹配^[9],但针对宽带激光熔覆的粉末喷嘴结构和粉末流的研究还很少见。对于高斯光斑的激光熔覆,送粉喷嘴多为同轴的环形或多路孔结构^[10-11],但输出的粉末流不适用于宽带熔池。一种基于细长矩形通道的结构被用于宽带送粉喷嘴,但粉末流发散情况较为严重^[12]。采用多通道出口结构可实现粉末流在垂直扫描方向的宽带要求,但粉末流在该方向的浓度分布不均匀^[13]。

针对上述问题,本文设计一种针对宽带激光熔覆和增材制造用的侧向送粉喷嘴结构,采用并排的多通道出口降低粉末流发散角过大的问题,通过添加喷嘴内部分流圆柱,实现粉末流在垂直扫描方向的浓度均匀性的调节,并通过数值模拟方法对喷嘴结构进行优化。进行激光熔覆实验,制备宽带涂层,涂层厚度均匀、表面平整,验证了该喷嘴结构的合理性。

1 实验设备和数值模型

1.1 实验设备和材料

本研究采用DPSF-2型双料筒刮板式送粉器,采用氩气作为载粉气体,粉末经过烘干处理,颗粒的粒径分布为45~125 μm,密度为8 750 kg/m³。送粉参数为气流量2 L/min,送粉率6 g/min,入口处气压0.3 MPa。粉末颗粒在载粉气体的作用下由送粉器输出,经过送粉管输送到送粉喷嘴中,射出后形成粉末流场。

使用相机拍摄粉末运输情况,为达到更好的拍摄效果,设计制作含透光狭缝的暗箱。送粉喷嘴通过特定通道在暗箱内进行送粉,强光源通过狭缝射入,照射在粉末颗粒上,在粉末表面发生反射,位于另一方向的拍摄设备通过拍摄孔对粉末流场进行拍摄。

1.2 数值模型

激光熔覆粉末流是一个气固两相流模型,气体视为连续介质,其中粉末颗粒所占的体积比远小于10%,可采用离散相模型描述颗粒行为。通过建立颗粒轨道模型、求解颗粒运动学方程可获得粉末流的分布。

对于连续介质,可由质量和动量守恒方程描

述。质量守恒方程写为

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0, \quad (1)$$

式中: ρ 为气体密度, x_i 和 u_i 分别代表位置分量和速度分量。

惯性坐标系中的动量守恒方程

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i + S_i, \quad (2)$$

式中: P 为静压, g_i 为重力, S_i 为源项, τ_{ij} 为应力张量的分量,由下式给出:

$$\tau_{ij} = \left[(\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{2}{3} \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \delta_{ij}, \quad (3)$$

式中: μ 为气体的动力黏度, δ_{ij} 为狄拉克算子,当 $i=j$ 时 $\delta_{ij}=1$,当 $i \neq j$ 时 $\delta_{ij}=0$ 。

离散相颗粒轨迹的拉氏坐标系下的受力平衡微分方程为

$$\frac{d u_{pi}}{dt} = F_D(u_i - u_{pi}) + \frac{g_i(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + F_i, \quad (4)$$

式中: $1/F_D$ 表示颗粒的松弛时间 droplet or particle relaxation time, $F_D(u_i - u_{pi})$ 为颗粒的单位质量拽力, $1/F_D$ 表示颗粒的松弛时间,可表示为

$$F_D = \frac{18\mu}{\rho_p d_p^2} \frac{C_D Re}{24}, \quad (5)$$

式中: u_{pi} 为颗粒速度, F_i 为附加力, u 为流体项速度, d_p 为颗粒直径, ρ_p 为颗粒密度(也称为骨架密度), Re 为相对雷诺数(颗粒雷诺数),其定义为

$$Re = \frac{\rho d_p |u_p - u|}{\mu}. \quad (6)$$

拽力系数 C_D 采用如下的表达式

$$C_D = a_1 + \frac{a_2}{Re} + \frac{a_3}{Re^2}, \quad (7)$$

式中: a_1, a_2, a_3 为常数。

2 送粉喷嘴结构设计和优化

为了实现宽带激光熔覆,需设计送粉喷嘴结构,使粉末流在工作面上形成浓度均匀的宽带分布。为描述方便,本文中假定竖直方向为 z 方向,在扫描平面内,沿扫描方向为 x 方向,垂直扫描方向为 y 方向。本研究中采用的激光光斑在长4.6 mm,宽0.12 mm的细长矩形范围内能量密度均匀分布,因此粉末流在 y 方向的分布范围应大于4.6 mm,且粉末流浓度分布均匀。理论上粉末

流在 x 方向的尺寸分布则越小越好,考虑粉末颗粒的粒径分布、送粉管道对粉末颗粒的运输能力,以及送粉喷嘴定位精度问题,建议该尺寸为 1 mm 左右。

圆形管道容易实现连接和密封,具有最小的流动阻力系数,被广泛应用于气体和流体的运输,也是粉末颗粒的输运管道形式。采用最简单的圆管作为送粉喷嘴,输出的粉末流如图 1 所示,可以看到圆形出口送粉喷嘴输出的粉末流发散角较小 ($<5^\circ$),但由于其中心对称的结构特征,无法满足宽带激光熔覆对沉积宽度和均匀性的要求。

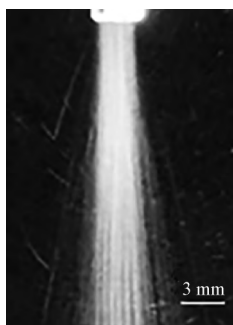


图 1 圆形出口喷嘴产生的粉末流

Fig.1 Powder flow formed by nozzle with circle outlet

为了与宽带激光束的形状进行匹配,采用矩形出口结构。喷嘴的入口要与送粉管连接,采用内径 3 mm 的圆形结构,逐渐过渡为 1 mm \times 5 mm 的矩形结构,并保证足够的矩形通道长度,如图 2 (a) 所示。由于喷嘴几何结构的不对称性,粉末

流的浓度分布在长宽方向上的差异性较大,粉末流拍摄实验的结果如图 2 (b) 和图 2 (c) 所示。矩形出口送粉喷嘴产生的粉末流在 y 方向的有限范围内分布均匀,发散角度很小,但在 x 方向的发散角却很大,不仅会极大地降低粉末利用率,也会影响涂层的沉积质量。

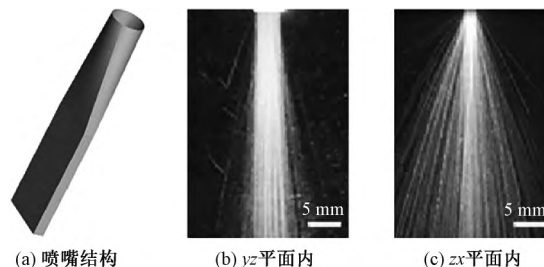


图 2 矩形出口喷嘴产生的粉末流

Fig.2 Powder flow formed by nozzle with rectangular outlet

图 3 为粉末颗粒轨迹的数值模拟结果,颜色表示粉末颗粒的运动速度。与实验结果一样,粉末颗粒在 x 和 y 方向上的运动差异较大。这是由于粉末流从喷嘴出口射出后,会与周围的空气质点相互碰撞,由于氩气和粉末颗粒的速度较高,会夹带着周围的空气质点一起向前运动,即对周围的空气产生“卷吸”作用。随着射流流程的增加,周围的空气不断被卷入,射流断面逐渐增加,粉末流进行发散。由矩形出口输出的粉末流与周围空气质点的碰撞主要发生在 yz 平面内,因此粉末颗粒在 x 方向上发散角较大。

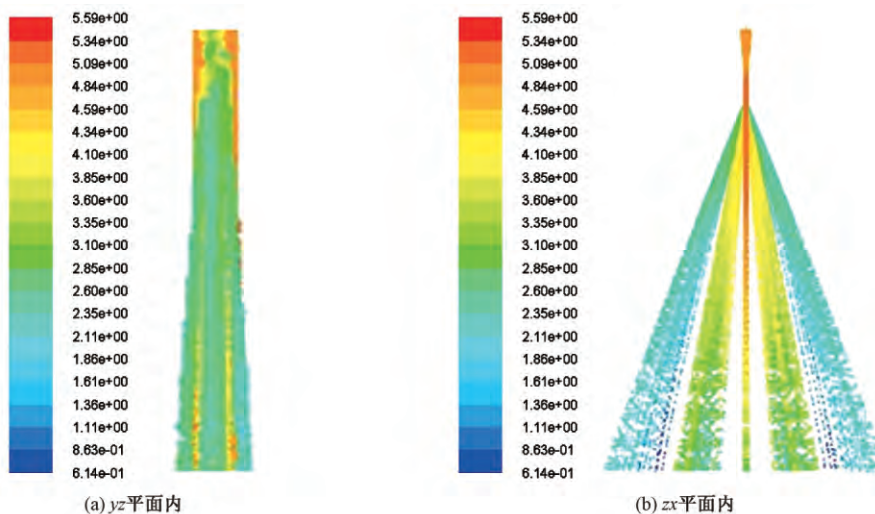


图 3 矩形出口下粉末颗粒轨迹的模拟结果

Fig.3 Simulation results of particle trajectory transported by nozzle with rectangular outlet

在避免在 x 方向上过度发散的情况下,为保证粉末流在 y 方向上有足够宽的尺寸,喷嘴采用

单通道圆形入口,多通道并排圆形出口的结构,如图 4 (a) 所示,喷嘴入口仍采用内径为 3 mm 的圆

形结构, 并排的圆形出口内径为 1 mm。粉末颗粒进入喷嘴中, 初速度多垂直于入口, 由于载粉气体在喷嘴腔内部无法形成对流, 粉末颗粒受到的气体扰动较小, 颗粒运动轨迹多沿着入口处的速度和方向发展, 一般情况下中间两个通道的粉末浓度分布高, 而两侧通道内的粉末浓度分布低, 如图 5 所示。但中间通道的粉末流浓度过高, 粉末颗粒堆积在送粉管道内, 可导致中间两个送粉通道的堵塞, 此时, 粉末颗粒只从边缘的送粉通道输出, 如图 4 (b) 所示。

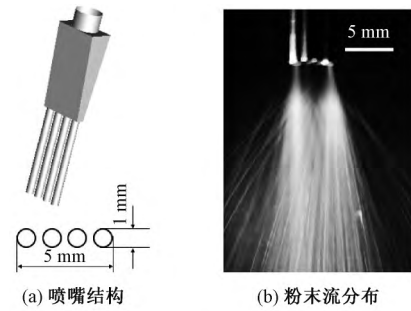


图 4 多通道出口送粉喷嘴结构与粉末流
Fig.4 Nozzle with multi-outlets and the corresponding powder flow

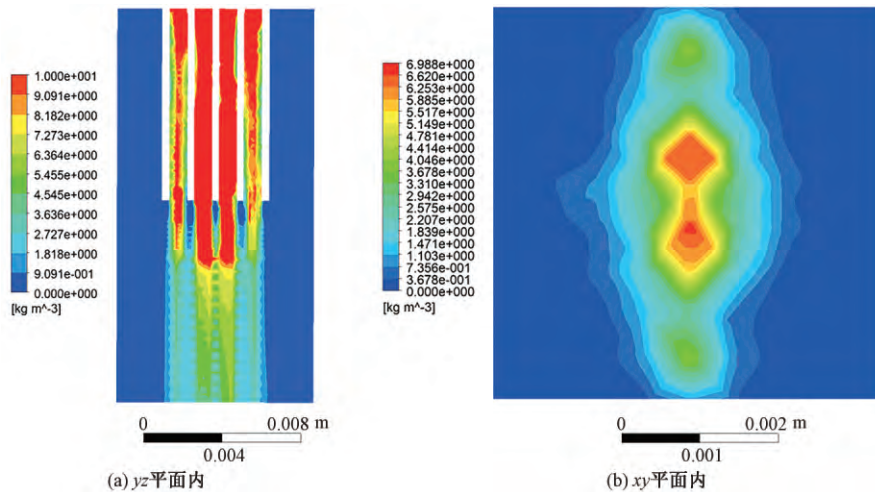


图 5 多通道出口喷嘴对应的粉末流模拟结果
Fig.5 Simulation results of powder flow concentration for nozzle with multi-outlets

3 送粉喷嘴结构优化

为解决粉末流浓度在 y 方向上分布的均匀性问题, 借助圆柱绕流原理, 设计含内部圆柱构件的多通道出口结构的送粉喷嘴, 喷嘴结构和主要尺寸如图 6 所示。氩气从入口进入喷嘴内部, 由于圆柱的阻碍作用, 气体压力逐渐升高, 在圆柱前缘, 从自由流动压力升高到一个最大值, 称为停滞压力。在高压的作用下, 圆柱表面正在形成的气体边界层沿圆柱表面扩展, 发生流动分离现象。粉末颗粒在氩气的拖拽力作用下, 运动轨迹也会由中心向两侧偏移, 从而调整 4 个圆柱通道内的粉末流浓度。

圆柱尺寸对气体的流场分布具有重要的影响, 进而影响粉末流浓度分布。建立离散相模型, 研究圆柱尺寸对粉末流浓度分布的影响。图 7 为不同圆柱直径作用下, 粉末流在喷嘴内部的浓度分布模拟结果。可以看到, 圆柱直径为 0.5 mm

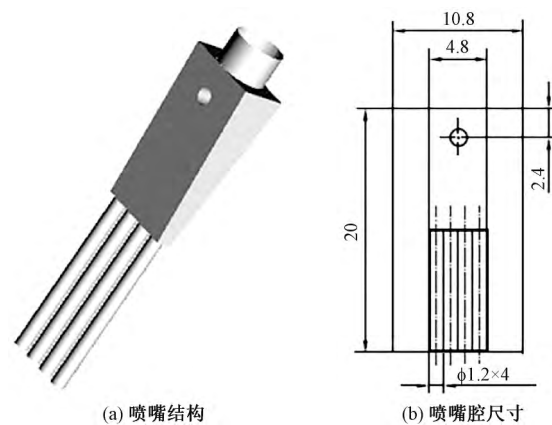


图 6 含圆柱整流部件的送粉喷嘴
Fig.6 Powder feeding nozzle with inner cylinder

时, 粉末流在中间通道的浓度高于两侧通道的浓度; 当圆柱直径为 1.5 和 2 mm 时, 粉末流在中间通道的浓度低于两侧通道的浓度。这是由于气体发生绕流时, 圆柱直径越大, 气体向两侧的速度分量越大, 所形成的扰动范围越广, 粉末颗粒流向两

侧的趋势越显著。当圆柱直径为 1 mm 时 4 个通道内的粉末流浓度分布均匀,可送出在扫描宽度

方向上分布均匀的粉末流。根据优化后的尺寸,定制送粉喷嘴,进行粉末拍摄实验,如图 8 所示。

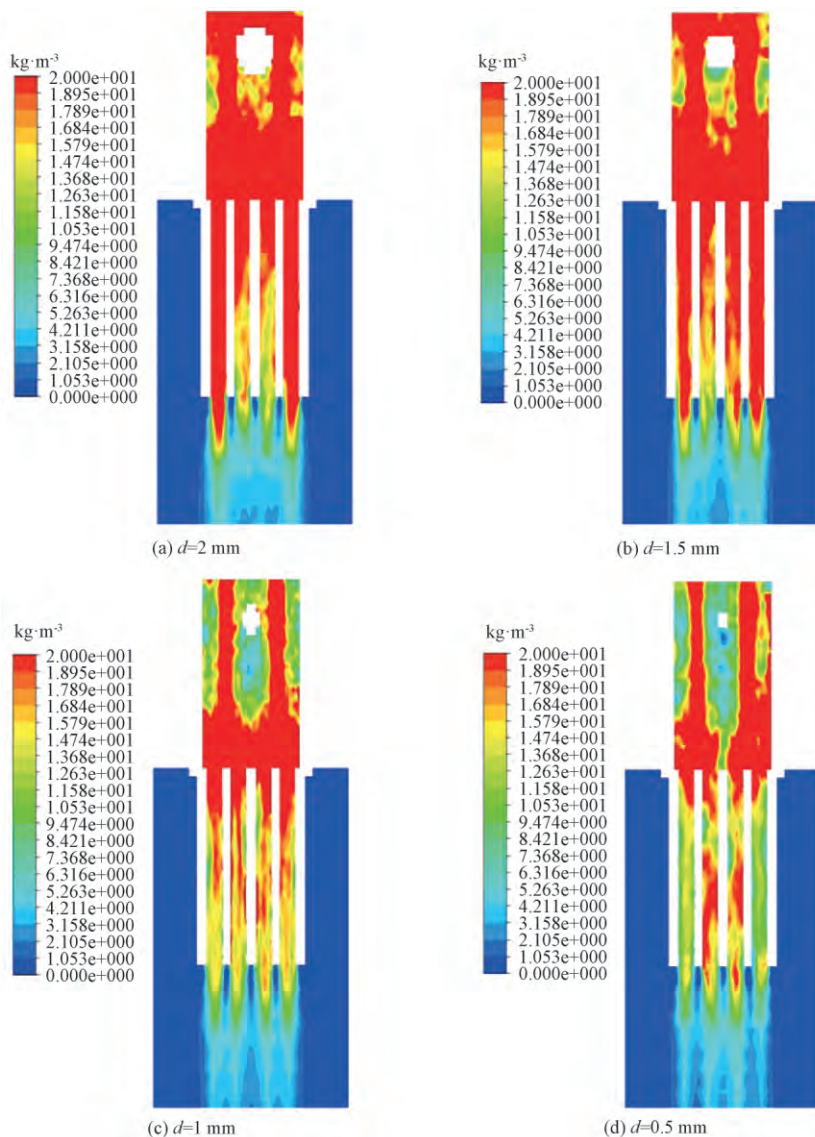


图 7 不同圆柱直径 d 下的粉末流浓度分布

Fig.7 Powder flow concentration distributions for nozzles with different cylindrical diameter values



图 8 优化后喷嘴输出的粉末流分布

Fig.8 Powder flow formed by optimized nozzle

采用 1Cr13 不锈钢材料作为基体,熔覆粉末材料为 Ni45,在 4.6 mm×0.12 mm 的线光斑激光

扫描作用下,进行熔覆实验。采用图 6 中的含内部整流圆柱的多通道送粉喷嘴进行同步送粉,可沉积出宽带熔覆层。激光功率为 600 W,扫描速度为 2 mm/s 时,宽带涂层如图 9 所示。图 9(a)为单道宽带熔覆层的表面形貌,图 9(b)为单道涂层的横截面形貌,可以看到,涂层表面光洁,无裂纹和夹杂,在扫描宽度方向上非常的平整,厚度均匀,约为 50 μm 。

4 结论

本文提出一种适用于宽带激光直接沉积的新型送粉喷嘴结构,能够输出浓度分布均匀的宽带

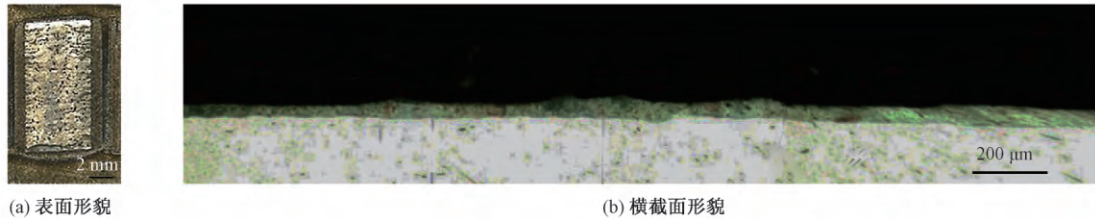


图9 宽带涂层的表面形貌和横截面形貌

Fig.9 Surface morphology and cross-sectional morphology of wide-band coating

粉末流,沉积出表面平整、厚度均匀的宽带涂层。

1) 相比于普通的矩形出口喷嘴,该喷嘴采用多通道出口结构,实现对扫描方向上粉末流的发散角控制。

2) 在喷嘴内部添加分流圆柱,可改变喷嘴内部的气压和流场分布,使气体和粉末颗粒的运动轨迹发生改变,从而避免中间通道粉末流浓度过高和通道堵塞问题;使用数值模拟方法对分流圆柱的尺寸进行优化,可实现对粉末流浓度分布均匀性的调整。

参考文献

- [1] Gu D D, Meiners W, Wissenbach K, et al. Laser additive manufacturing of metallic components: materials, processes and mechanisms[J]. *International Materials Reviews*, 2013, 57(3): 133-164.
- [2] 虞钢,何秀丽,李少霞. 激光先进制造技术及其应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2016.
- [3] Choi J, Chang Y. Characteristics of laser aided direct metal/material deposition process for tool steel [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2005, 45(4/5): 597-607.
- [4] Zhang K, Liu W, Shang X. Research on the processing experiments of laser metal deposition shaping [J]. *Optics & Laser Technology*, 2007, 39(3): 549-557.
- [5] Liu H, He X, Yu G, et al. Numerical simulation of powder transport behavior in laser cladding with coaxial powder feeding [J]. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2015, 58(10): 104 701.
- [6] Balu P, Leggett P, Kovacevic R. Parametric study on a coaxial multi-material powder flow in laser-based powder deposition process [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2012, 212(7): 1 598-1 610.
- [7] Ma Q S, Li Y J, Wang J, et al. Investigation on cored-eutectic structure in Ni60/WC composite coatings fabricated by wide-band laser cladding [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2015, 645: 151-157.
- [8] 张庆茂,刘喜明,孙宁,等. 送粉式宽带激光搭接熔覆 F305 粉组织和性能的研究 [J]. *金属热处理*, 2001(4): 13-18.
- [9] Yan J, Battiato I, Fadel G. Design of injection nozzle in direct metal deposition (DMD) manufacturing of thin-walled structures based on 3D models [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, 91(1-4): 605-616.
- [10] Kovalev O B, Kovaleva I O, Smurov I Y. Numerical investigation of gas-disperse jet flows created by coaxial nozzles during the laser direct material deposition [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2017, 249: 118-127.
- [11] 靳绍巍,何秀丽,武扬,等. 同轴送粉激光熔覆中粉末流对光束能量的衰减作用 [J]. *中国激光*, 2011, 38(9): 67-72.
- [12] 胡晓冬,祝立强,姚建华. 激光宽带熔覆侧向送粉喷嘴设计 [J]. *轻工机械*, 2014, 32(3): 10-12.
- [13] Liu S, Zhang Y, Kovacevic R. Numerical simulation and experimental study of powder flow distribution in high power direct Diode laser cladding process [J]. *Lasers in Manufacturing and Materials Processing*, 2015, 2(4): 199-218.