宽带同轴送粉喷嘴的流场数值模拟及结构优化

赵亮[1]，　王丽芳[2]*，　朱刚贤[1]，　李广琪[1]，　石世宏[1]

（[1]苏州大学机电工程学院，江苏 苏州 215021；　[2]苏州大学工程训练中心，江苏 苏州 215021）

摘要　为了获得一种匹配 3 kW 宽带矩形激光器的同轴送粉喷嘴，采用了 Fluent 软件的离散相模型，对同轴送粉喷嘴粉末通道结构参数开展了四因素四水平的正交仿真试验，研究了结构参数对粉末汇聚浓度与粉斑尺寸的影响。结果表明，宽带同轴送粉喷嘴的粉末浓度在轴向与径向上均服从高斯分布，验证了喷嘴结构的合理性。四因素对粉末浓度的影响效果从大到小为：倾角、垂直高度、收缩角度以及出口间隙。当采用最优结构参数时，喷嘴可以在距离粉末出口 24.6 mm 的平面上形成一个 3.08 mm×3.08 mm 大小、最高质量浓度为 32.29 kg/m^3 的矩形粉斑。最终通过送粉试验验证其合理性，为后续激光增材制造试验的开展提供依据及参考。

关键词　激光增材制造；　宽带同轴送粉喷嘴；　离散相模型；　正交试验

中图分类号：TN294　　**文献标志码**：A　　**doi**：10.14128/j.cnki.al.20214103.643

Numerical Simulation and Structural Optimization of Rectangular Broadband Coaxial Powder Feeding Nozzle

Zhao Liang[1]，　Wang Lifang[2]，　Zhu Gangxian[1]，　Li Guangqi[1]，　Shi Shihong[1]

([1] *School of Mechanical and Electric Engineering, Soochow University, Suzhou, Jiangsu* 215021, *China*;
[2] *Engineering Training Center, Soochow University, Suzhou, Jiangsu* 215021, *China*)

Abstract　In order to obtain a coaxial powder feeding nozzle matching a 3 kW broadband rectangular laser, the discrete phase model of Fluent software was used. Four factors and four levels of orthogonal simulation experiments were carried out to study the influence of the structural parameters on the concentration of the powder and the size of the powder spots. The results show that the powder concentration of the broadband coaxial powder feeding nozzle obeys the Gaussian distribution in the axial and radial directions, which verifies the rationality of the nozzle structure. The effects of the four factors on the powder concentration from large to small are: inclination angle, vertical height, contraction angle and outlet gap; when the optimal structural parameters are used, the nozzle can be formed a rectangular powder spot with a size of 3.08 mm×3.08 mm and a maximum density of 32.29 kg/m^3 on a plane that 24.6 mm away from the powder outlet. In the end, the powder feeding experiment was carried out to verify its rationality, which provided a basis and reference for subsequent laser additive manufacturing experiments.

Key words　laser additive manufacturing;　broadband coaxial powder feeding nozzle;　discrete phase model;　orthogonal experiment

0　引言

激光增材制造技术可以直接制造出全致密且力学性能优良的金属零件[1-2]，其利用高能激光作为能量源将金属材料熔化，冷却凝固，逐点、线、面后得到特殊组织，再逐层堆积形成三维实体零件[3]。同轴送粉喷嘴是激光增材制造装备的关键部件，送粉喷嘴的结构决定了粉末的分布浓度与粉斑尺寸[4]，合理的粉末通道结构在实现光粉精确耦合的同时，可以确保金属粉末均匀、稳定地输送到熔池中[5]。通过对粉末流场的仿真能够预先获得其汇聚特性，为送粉喷嘴的研制及优化提供参考。Zhang 等[6]建立了粉末运输三维数值模型，发现粉末射流呈现钉状汇聚，与高斯光源的几何聚焦特性具有良好的一致性，同时良好的光粉耦合有助于获得高质量的沉积

收稿日期：2020-08-07
基金项目：国家重点研发计划(2016YFB1100300)
作者简介：赵亮(1994－)，男，硕士研究生。研究方向：激光金属增材制造技术。E-mail：1269957916@qq.com
* **通信作者**：王丽芳(1979－)，女，硕士，实验师。研究方向：激光增材制造技术数值模拟。E-mail：lfwang@suda.edu.cn

物。Kheloufi 等[7]通过仿真研究了粉末汇聚区域宽度的影响，发现经过优化调控粉斑宽度可极大地提高激光增材制造的加工效率。目前，在激光增材制造过程中一般采用小功率的圆形光斑为激光源，较小的光斑不仅限制了增材制造的效率，而且在成形过程中过多的搭接次数也影响了熔覆层的质量[8]。为此，大功率的宽带激光设备应运而生。由于实现同轴宽带送粉功能较为困难，目前对于同轴宽带送粉装置的研制并未深入，对其粉末流场的研究也相对较少，尤其是对于喷嘴结构参数对粉末汇聚特性的影响的研究报道较少。

本文针对 3 kW 宽带矩形半导体激光器，设计了一种与其 3 mm×3 mm 光斑匹配的同轴送粉喷嘴。运用 Fluent 软件对于同轴送粉喷嘴粉末通道的倾角、出口间隙、垂直高度以及收缩角度等影响粉末汇聚效果的结构因素进行了正交模拟计算，结合粉末浓度(质量浓度，下同)与粉斑尺寸得到了最优结构参数。依据优化结构参数设计制造出宽带同轴送粉喷嘴，对其进行汇聚试验，验证了其汇聚浓度和粉斑尺寸与模拟的一致性，证明了同轴送粉喷嘴数值模拟的合理性。

1　同轴送粉喷嘴原理与结构设计

目前，同轴送粉喷嘴一般采用气动输送的方式[9-10]。如图 1 所示，根据气固两相流理论，金属颗粒均匀弥散在载气之中，经过粉末通道约束后形成稳定的粉末流[11]并在聚焦平面形成与激光光斑匹配的粉斑，保证光粉的精准耦合。

基于大功率矩形激光器的应用平台，在同轴送粉喷嘴设计的过程中有两个问题需要解决。首先，在增材制造的过程中大功率激光会发生反射、辐射等现象，导致送粉喷嘴上热积累严重，长时间工作甚至会损坏喷嘴[12]。在同轴送粉喷嘴上设置水冷腔，冷却水不断循环能带走大量热量以有效降低喷嘴温度。此外，采用多道式送粉结构，可以使粉末流汇聚焦点距离喷嘴出口较远，避免了激光近距离反射及辐射对喷嘴的影响[13]。其次，粉斑要匹配矩形光斑，为此对称设置了四道矩形送粉通道，可以有效汇聚成规则的矩形粉斑。同时在送粉通道的外侧设计了与送粉通道平行的四个矩形保护气通道，在对粉末流进行整形的同时形成惰性保护气氛帘，防止熔覆层在增材制造过程中氧化[14]。综合这些措施，设计出的同轴送粉喷嘴主体结构如图 2 所示。

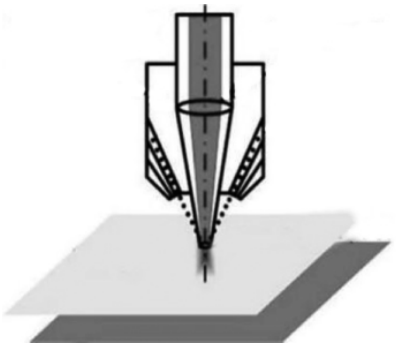


图 1　同轴送粉喷嘴原理图[9]

Fig. 1　Schematic diagram of coaxial powder feeding nozzle[9]

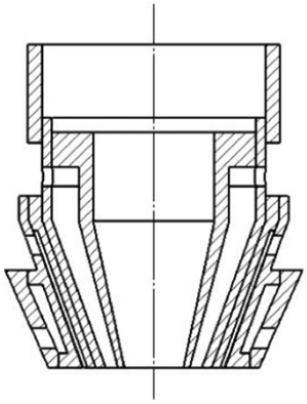


图 2　同轴送粉喷嘴主体结构图

Fig. 2　Main structure diagram of coaxial feeding nozzle

2　仿真模型建立与仿真条件确定

2.1　物理模型的建立及网格划分

同轴送粉喷嘴中对粉末汇聚性产生较大影响的区域为送粉通道，为了简化模型，抽取了同轴送粉喷嘴的粉末流道进行研究分析，图 3 为粉末通道流场模型及划分网格后的相应模型。图中喷嘴下方的圆柱体为模拟的大气流场计算域，其体积相对粉末通道出口尺寸较大，可以忽略其边界对仿真计算的影响[15-16]。

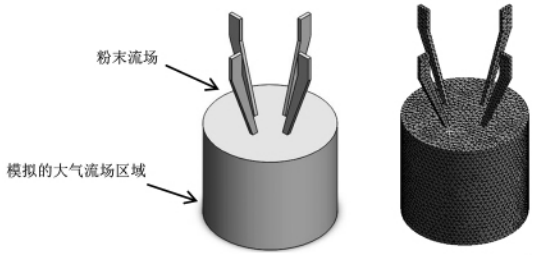


图 3　流场模型及网格划分后的模型

Fig. 3　Model of flow field and the model after grid division

2.2 仿真条件的确定

在 Fluent 仿真过程中，当颗粒相的体积分数小于 0.10%时，可以将颗粒作为离散相处理。而当颗粒体积分数大于等于 0.10%时，颗粒按连续相处理[17]。针对同轴送粉喷嘴粉末流仿真，本文采用的 316L 不锈钢粉末颗粒平均直径为 45 μm，通过计算获得粉末颗粒体积分数小于 0.10%，所以将其作为离散相处理，视为相互分散的小颗粒。为了使离散相模型易于收敛，一般先对连续相(载气)进行计算，再打开离散相模型，加载金属粉末颗粒进行计算[18]。在计算连续气相时，采用标准 K-ε 湍流模型，该模型是基于扩散率及湍流动能的半经验公式，具有计算过程经济、适用范围广等优势，同时对高雷诺数的湍流有较合理的精度[19]。

不同于现实的粉末输送过程，为了简化离散相模型，必须做出如下假设：(1)在进入粉末入口时，粉末与载气流体是均匀的并具有相同的速度；(2)不考虑激光辐射对气粉两相的影响，整个计算过程在冷态下；(3)除载气对颗粒的拖曳力外，在设置离散相物理模型时，考虑重力与惯性力对颗粒运动的影响，忽视附加质量力、Saffman 升力及布朗力等；(4)忽视颗粒间的碰撞与颗粒黏性。

基于以上的假设，粉末入口设置为速度进口，依据载气流量及送粉管直径参数，可获得载气气流速度[20]：

$$v=\frac{Q}{60\ 000\pi d^2\rho} \tag{1}$$

其中：Q 为载气流量，d 为输送管道直径，ρ 为载气密度。

已知 N_2 载气的常用流量为 5 L/min，送粉管的直径为 4 mm，计算可得载气进入粉末入口的速度为 1.46 m/s。根据载气与粉末颗粒具有相同速度的假设，推出此刻粉末颗粒的速度也为 1.46 m/s；常用送粉量为 12 g/min；圆柱体的上下以及侧面设置为压力出口，环境气体压强为 101 325 Pa，因此设置相对压力值为 0 即可；粉末通道壁面设置为标准壁面。在计算离散相过程中，使用的粉末以及载气流体相关参数如表 1 所示。

3 正交试验的建立与分析

3.1 影响因素与试验计划

为了研究同轴送粉喷嘴结构参数对粉末汇聚特性的影响，对送粉通道不同的倾角 α、出口间隙 Δ、垂直高度 H 以及收缩角度 β 进行讨论，如图 4 所示。

表 1 粉末颗粒以及气体参数

Tab.1 Parameters of powder particles and gas

项目	参数
粉末材料	316L 不锈钢
粉末平均直径/μm	45
粉末密度/(kg·m^{-3})	7 980
送粉量/(g·min^{-1})	12
保护气体种类	N_2
气体密度/(kg·m^{-3})	1.138
气体流量/(L·min^{-1})	5

首先，根据已有研究可知，送粉通道的倾角一般大于 60°[21]，因此送粉通道的倾角分别取 60°、65°、70°以及 75°。其次，在不考虑粉末发散情况下，出口间隙设置为 1.5 mm 就可以达到设计要求。但在实际输送情况下，粉末在重力的影响下会偏离载气发生发散，所以一般取较大的出口间隙，故取出口间隙的值为 1.5、2.0、2.5 以及 3.0 mm。再次，送粉通道的垂直高度决定了送粉通道的长度，这直接影响粉末颗粒在通道内的轨迹运动，继而影响颗粒离开喷嘴的运动状态。为了防止激光通道与激光束产生干涉并且使喷嘴尺寸小型化，送粉通道的垂直高度可取值为 30、40、50 以及 60 mm。最后，当粉末通道采用收缩出口时，载气和粉末不断被压缩而加速，使得粉末流在出口处的发散变小并保持良好的挺度[22]，因此喷嘴粉末通道采用收缩出口的设计，收缩角度分别取 2.5°、5.0°、7.5°以及 10.0°。上述关于同轴送粉喷嘴结构参数影响粉末汇聚性的讨论满足四因素四水平的正交试验要求，根据正交试验的法则，针对粉末通道倾角、出口间隙、垂直高度以及收缩角度，选用四因素四水平的正交表，如表 2 所示。根据正交表的分组情况将各组数值模拟试验编为 1～16 号。

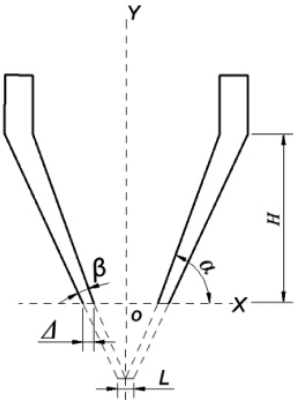


图 4 同轴送粉喷嘴结构参数示意图

Fig.4 Schematic diagram of the structure parameters of the coaxial powder feeding nozzle

表 2　四因素对 y 轴最大浓度与 x 轴有效浓度范围影响正交表

Tab. 2　Orthogonal table of the influence of four factors on the maximum concentration of y-axis and the effective concentration range of x-axis

编号	垂直高度/mm	收缩角度/(°)	倾角/(°)	出口间隙/mm	y 轴最大浓度/(kg·m^{-3})	x 轴有效浓度范围/mm
1	30	2.5	60	1.5	20.75	3.54
2	30	5.0	65	2.0	16.79	4.57
3	30	7.5	70	2.5	27.70	3.45
4	30	10.0	75	3.0	16.76	3.96
5	40	2.5	65	2.5	13.15	5.38
6	40	5.0	60	3.0	23.22	3.14
7	40	7.5	75	1.5	17.27	3.34
8	40	10.0	70	2.0	16.07	3.85
9	50	2.5	70	3.0	21.88	3.24
10	50	5.0	75	2.5	18.61	3.34
11	50	7.5	60	2.0	17.13	3.45
12	50	10.0	65	1.5	13.19	2.99
13	60	2.5	75	2.0	18.18	3.75
14	60	5.0	70	1.5	17.03	3.55
15	60	7.5	65	3.0	11.46	3.65
16	60	10.0	60	2.5	11.08	3.24

3.2 分析与讨论

在仿真过程中，最直观体现同轴送粉喷嘴粉末汇聚特性就是喷嘴轴向(y 轴)上的最大浓度。在 y 轴最大浓度处取相应的径向平面，可将此处径向平面视为粉末流汇聚平面。在粉末汇聚平面上，将最大浓度值的 $1/e^2$ 作为粉末的有效浓度值并根据该值测量出有效浓度范围，可视其为粉斑直径大小[23]。同时，由于四个粉末通道对称设置，可通过径向(x 轴)所在平面中的有效粉末范围来判断粉斑大小。因此粉末浓度及粉斑大小同为正交试验的判定指标，应该在保证浓度前提下尽量满足粉斑尺寸的要求。为了进一步了解粉末流场的特性并验证仿真模型的准确性，先进行 1 号试验，如图 5 所示为仿真得到的流场云图。从速度云图中，可以看出 x 轴截面的速度云图呈现“钉状”汇聚，粉末离开喷嘴后发散并不是十分严重，最终汇聚成一道流体并可在 x 轴截面形成规则的矩形高流速区域，这证明了采用该结构的同轴送粉喷嘴形成矩形粉斑的可行性。从浓度云图中，可以看出无论是 x 还是 y 截面上，在粉末汇聚区域，粉末的浓度分布均为中心处高且沿截面方向向两侧逐渐降低，由此可以推断出粉末浓度在 x 轴及 y 轴方向上都符合高斯分布，验证了仿真模型的准确性。按编号顺序依次进行粉末流场的数值模拟，获得的各流场中颗粒浓度及汇聚范围，如表 2 所示。同时对 y 轴最大浓度和 x 轴有效浓度宽度进行直观分析，结果分别如图 6 和图 7 所示。

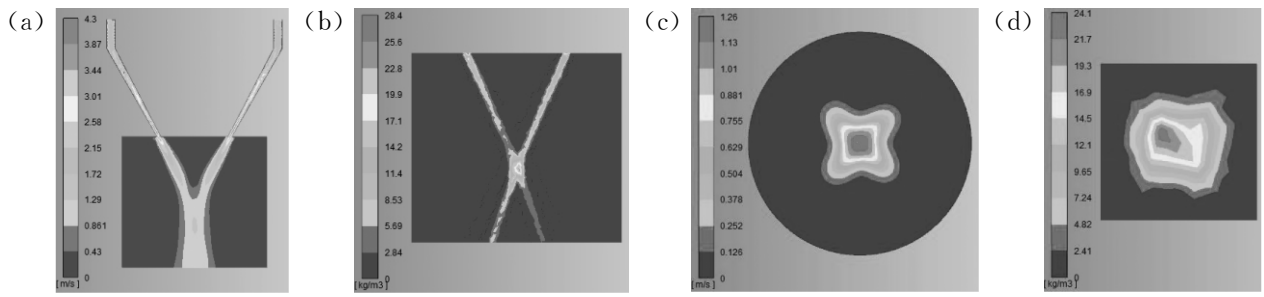


图 5　x、y 截面速度及颗粒浓度云图(截面大小为 6 mm×6 mm)

(a)y 轴截面速度云图　(b)y 轴截面颗粒浓度云图　(c)x 轴截面速度云图　(d)x 轴截面颗粒浓度云图

Fig. 5　Cloud charts of x, y cross section velocity and particle concentration

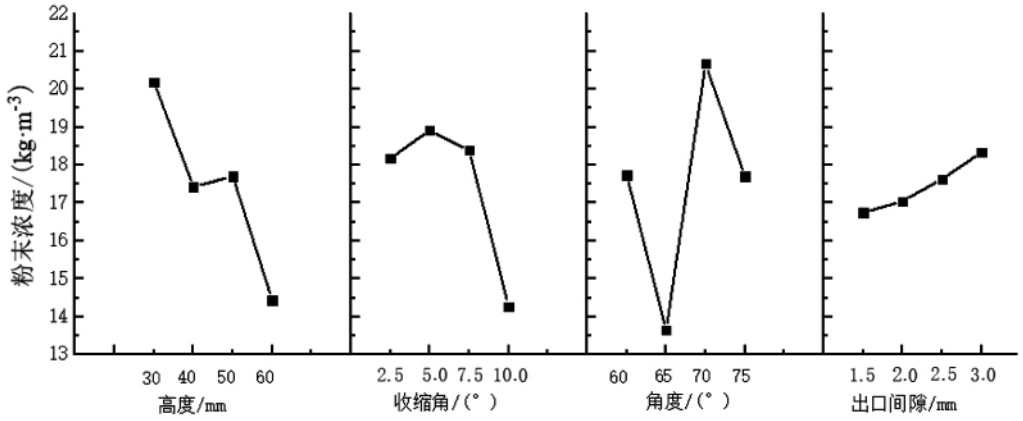


图 6　y 轴最大浓度与因素水平的关系图

Fig. 6　Relationship diagram of the maximum concentration of y-axis and factor level

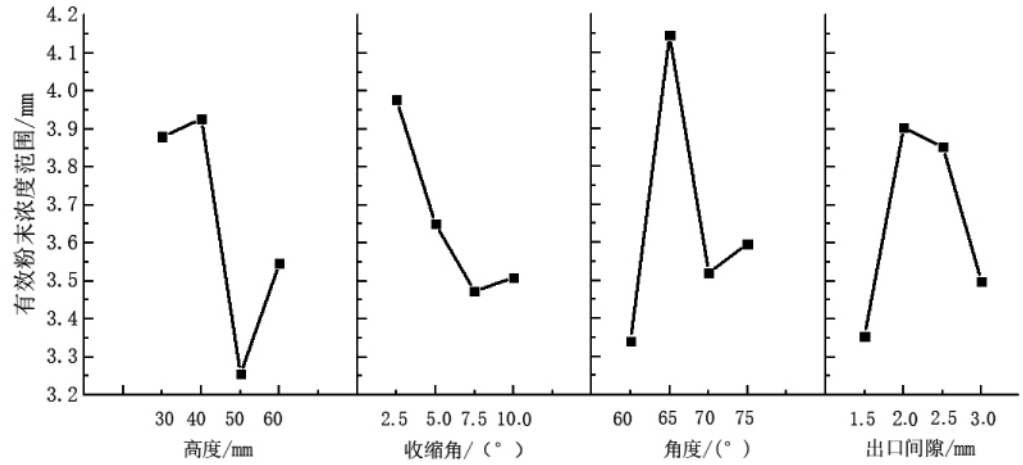


图 7　x 轴有效浓度宽度与因素水平的关系图

Fig. 7　Relationship diagram of the effective concentration range of x-axis and factor level

从图 6 的直观分析中，可以看出喷嘴结构参数对 y 轴最大浓度的影响效果从大到小为：倾角＞垂直高度＞收缩角度＞出口间隙。下面对四因素分别分析：(1)垂直高度在 30～60 mm 范围内增大时，粉末最大浓度基本呈现不断降低的趋势。随着粉末通道垂直高度不断增大，粉末通道的长度不断增加，颗粒与壁面的碰撞、反弹次数增加，造成了颗粒更多的动能损失，当颗粒离开喷嘴时更容易偏离载气而发散，进而导致浓度降低。(2)收缩角度在 2.5°～10.0°范围内增大时，最大浓度呈现先增大再减小的趋势。这是因为当采用收缩出口时，载气和颗粒被压缩而不断加速，载气的曳力变大缓解粉末的发散。当收缩角度过小，会导致粉末流出出口不畅导致堵塞；当收缩角度过大时，粉末及载气的压缩效果不明显，粉末发散增加。因此，当收缩角过大或过小时，粉末浓度都相对较低。(3)粉末通道倾角在 60°～75°范围内逐渐增大时，最大浓度呈现先减小再增大的趋势。但随着倾角的增大，粉末流汇聚点(轴向最大浓度点)的焦距逐渐增大并且均在 23～27 mm 范围内，较大的焦距使得喷嘴出口远离熔池，这缓解了激光反射、辐射对喷嘴的影响，同时也减少了粉末飞溅堵塞喷嘴出口的可能性。同时倾角过大，粉末聚焦直径变大，粉末浓度降低。(4)出口间隙在 1.5～3 mm 范围内增大时，最大浓度值缓慢呈线性增长的趋势，由于间隙增大，颗粒与壁面的碰撞、反弹次数减少，不易偏离载气流而发散，进而浓度增加。但相较于其他结构参数，出口间隙的变化对于 y 轴最大浓度的影响较小。

从图 7 可以看出，喷嘴结构参数对 x 轴有效浓度宽度的影响效果从大到小为：倾角＞垂直高度＞出口间隙＞收缩角度。其中出口间隙与收缩角度的极差值近乎相同，因此可以将出口间隙及收缩角度

对 x 轴有效浓度宽度的影响效果视为相似。所以，综合先满足 y 轴最大浓度、再满足粉末聚焦直径尽可能小的条件下，获得喷嘴结构参数对 x 轴有效浓度宽度及 y 轴最大浓度的影响效果，从大到小排列同为：倾角＞垂直高度＞收缩角度＞出口间隙。

结合以上分析获得最优解：垂直高度为30 mm，收缩角度为 5°，倾角为 70°以及出口间隙为 3 mm。当满足 y 轴最大浓度条件后，再考虑粉斑尺寸。粉斑大小要尽量匹配矩形光斑，达到 3 mm×3 mm 的矩形大小。经过计算得到在采用上述最优解时，粉斑直径为 3.48 mm，略大于激光光斑。在增材制造过程中，粉斑大于光斑会造成光斑边缘未熔粉末粘连在熔覆层表面，造成熔覆层表面质量较差[24]。为了减小粉斑尺寸，结合图 7 的直观分析结果，可以将粉末出口的间隙调整为 1.5 mm。同时相较于其他结构参数，由于出口间隙的变化对 y 轴最大浓度的影响最小，所以当出口间隙为 1.5 mm 时，对粉末浓度的影响不大。这样就达到了在保留浓度最优参数的同时，兼顾粉斑尺寸大小，最大程度满足设计要求，具体的同轴送粉喷嘴结构参数如表 3 所示。

表 3　优化后的同轴送粉喷嘴结构参数

Tab. 3　Optimized structural parameters of coaxial powder feeding nozzle

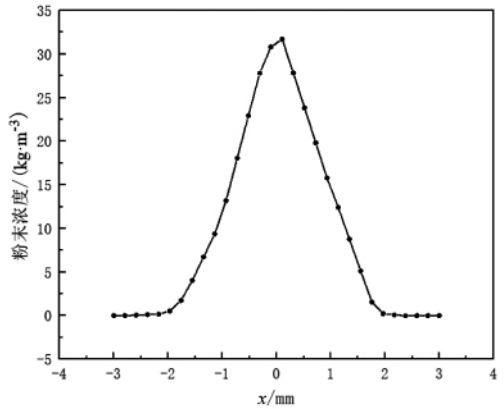
参数	优化结果
垂直高度/mm	30
收缩角度/(°)	5
倾角/(°)	70
出口间隙/mm	1.5

4　优化结果验证

4.1 优化组仿真验证

根据以上正交试验优化后的结构参数进行建模，再利用 Fluent 软件采用上述相同的仿真条件进行计算，结果如图 8 所示。

(a)



(b)

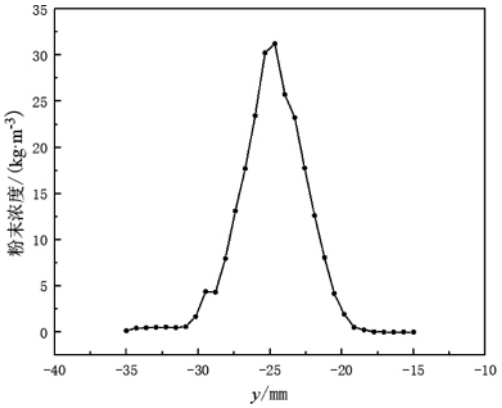


图 8　x、y 轴最优解浓度图

(a)x 轴　(b)y 轴

Fig. 8　Optimal solution concentration diagram of x, y-axis

由数值分析结果可知，采用最优参数设计的同轴送粉喷嘴在 x 轴与 y 轴方向上的浓度分布均满足高斯分布。在距离喷嘴出口 24.6 mm 处，得到轴向最高浓度为 32.29 kg/m^3，可将此处径向平面视为粉末流汇聚平面。计算得有效浓度为 4.36 kg/m^3，在 x 轴截面得粉斑直径为 3.08 mm。由此，可以看出优化后的同轴送粉喷嘴在距离粉末出口 24.6 mm 处形成一个 3.08 mm×3.08 mm 大小、最高浓度为 32.29 kg/m^3 的矩形粉斑，兼顾了粉末浓度与粉斑尺寸，满足了设计的要求。

4.2 送粉试验验证

根据上述正交试验，采用所得的最优结构参数设计制作出同轴送粉喷嘴。在熔覆过程中，考虑到热辐射、反射的影响，送粉喷嘴的前端采用黄铜制作来改善散热效果，而喷嘴的连接部分则使用不锈钢材料制作。实物图如图 9 所示。

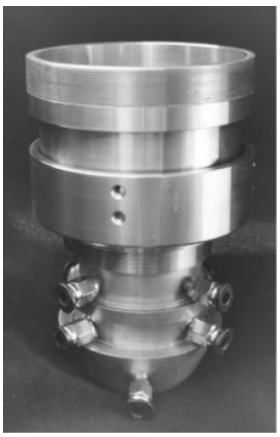


图 9　同轴送粉喷嘴实物图

Fig. 9　Physical diagram of coaxial powder

为验证同轴送粉喷嘴聚焦特性，采用与模拟一致的工艺参数进行试验。用流量为5 L/min的高纯氮气作为载气，送粉量为12 g/min，粉末采用316L不锈钢金属粉末。利用摄像机拍摄粉末聚焦效果，如图10所示。从图10中可以看出，四道对称粉末流在离开喷嘴后，在喷嘴下方汇聚一起，汇聚焦点距离 f 为25 mm，粉斑总体宽度为5 mm左右(其中最大浓度区域宽度大概为3 mm)，与模拟结果几乎一致。后期加上保护气塑形后，粉斑的尺寸进一步趋近于3 mm×3 mm，达到了预期的要求，同时验证了数值模拟的合理性。

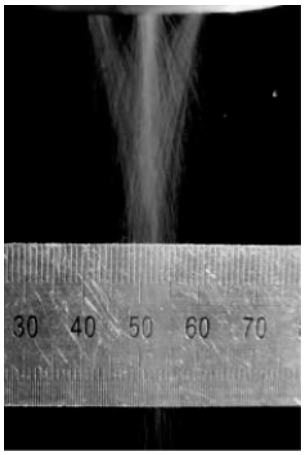


图10　粉末流分布图

Fig. 10　Distribution diagram of feeding nozzle powder flow

5　结论

针对激光增材制造用宽带激光光源的特点和设计要求，设计出了符合要求的宽带同轴送粉喷嘴。开展了垂直高度、伸缩角度、倾角以及出口间隙这四因素的正交模拟试验，在模拟过程中应用Fluent软件中的离散相模型计算粉末流场浓度分布规律及粉末的汇聚特性，得出如下结论：

(1)粉末流场沿喷嘴径向(x 轴)及轴向(y 轴)的截面速度云图分别呈现为矩形与钉状汇聚，粉末浓度在 y 轴及 x 轴上均满足高斯分布，证明了喷嘴结构形成矩形粉斑的可行性。

(2)同轴送粉喷嘴结构参数对轴线浓度的影响效果从大到小为：倾角＞垂直高度＞收缩角度＞出口间隙。随着粉末通道倾角的增长，粉末焦距不断增大；当垂直高度增大时，粉末浓度呈不断下降趋势；粉末浓度随着收缩角度的增长先增再降；随出口间隙增加，粉末浓度呈缓慢增加趋势。

(3)根据正交结果，综合粉末浓度与粉斑直径，得到了同轴送粉喷嘴的最优结构参数：垂直高度为30 mm、收缩角度为5°、倾角为70°以及出口间隙为1.5 mm。通过计算，喷嘴在距离粉末出口24.6 mm的平面上形成了3.08 mm×3.08 mm大小、最高浓度为32.29 kg/m^3 的矩形粉斑，与同轴送粉喷嘴送粉汇聚性试验结果一致，证明了同轴送粉喷嘴满足了预期设计的要求。

参考文献

[1] 关振中. 激光加工工艺手册[M]. 北京：中国计量出版社，1998：254-258.

[2] 王华明. 高性能金属构件增材制造技术 开启国防制造新篇章[J]. 国防制造技术，2013(3)：5-7.

[3] 李晓薇，张春华，张松，等. 激光熔覆技术的研究进展[J]. 激光杂志，2007，28(2)：1-2.

[4] LIU H，HE X L，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)：1-10.

[5] 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)：1598-1610.

[6] ZHANG J，YANG L，ZHANG W，et al. Numerical simulation and experimental study for aerodynamic characteristics and powder transport behavior of novel nozzle[J]. Optics and Lasers in Engineering，2020，126：105873.

[7] KHELOUFI K，AMARA E H. Numerical modelling of gas/particles diphasic jet in laser cladding by coaxial nozzle[J]. Physics Procedia，2010，5：347-352.

[8] 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.

[9] 肖军艳. 环形激光光内送粉熔池特征与熔层性能[D]. 苏州：苏州大学，2009：53-63.

[10] 黄卫东，林鑫，陈静. 激光立体成形：高性能致密金属零件的快速自由成形[M]. 西安：西北工业大学出版社，2007：36-42.

[11] 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.

[12] 薛菲，王耀民，刘双宇. 激光熔覆同轴送粉喷嘴研究[J]. 光电技术应用，2014，29(2)：13-16.

[13] GOVEKAR E，JEROMEN A，KUZNETSOV A，et al. Study of an annular laser beam based axially-fed powder cladding process[J]. CIRP Annals，2018，67

(1)：241-244.
[14] 胡晓冬，马磊，罗铖. 激光熔覆同步送粉器的研究现状[J]. 航空制造技术，2011，54(9)：46-49.
[15] 郭翔宇，倪茂，刘华明，等. 宽带激光熔覆同轴送粉喷嘴的设计与数值模拟[J]. 激光技术，2018，42(3)：362-368.
[16] ZHU G X，LI D C，ZHANG A F，et al. Numerical simulation of metallic powder flow in a coaxial nozzle in laser direct metal deposition[J]. Optics & Laser Technology，2011，43(1)：106-113.
[17] 张云杰. FLUENT 18.0 案例分析视频精讲[M]. 北京：电子工业出版社，2018.
[18] 邓力铭. ANSYS Fluent 15.0 流体计算从入门到精通[M]. 北京：电子工业出版社，2015.
[19] 李文华，苏明军. 常用湍流模型及其在 FLUENT 软件中的应用[J]. 水泵技术，2006(4)：39-40.
[20] 张振江. 激光熔覆同轴送粉喷嘴优化设计及试验研究[D]. 大连：大连海事大学，2017：10-16.
[21] 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.
[22] 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.
[23] LIU J C，LI L J. Study on cross-section clad profile in coaxial single-pass cladding with a low-power laser[J]. Optics & Laser Technology，2005，37(6)：478-482.
[24] 刘小冬. 激光三维成形光内送粉变粉斑试验及交叉熔道堆积研究[D]. 苏州：苏州大学，2011：38-42.