

激光选区熔化成型设备风场仿真及优化

张俊昂, 秦文瑾, 李亚朋

上海理工大学机械工程学院, 上海

收稿日期: 2024年12月16日; 录用日期: 2025年1月9日; 发布日期: 2025年1月17日

摘要

激光选区熔化成型设备打印零件过程中产生的黑烟颗粒不仅会对激光镜片造成腐蚀, 而且直接影响加工零件的致密度。因此对成型舱内设计合理、均匀的风场结构, 科学有效地去除打印过程中产生的黑烟颗粒至关重要。本文以一台大型激光选区熔化成型设备为研究对象, 设计进气道结构并通过数值模拟获取该流道下风场特征, 根据风场仿真结果采用整流板、圆形栅格板和蜂窝状栅格板结合的方式对成型舱内风场进行优化。结果表明: 改进流道在成型区上方区域产生的风场分布更加均匀。

关键词

激光选区熔化成型, 风场, 数值模拟

Wind Field Simulation and Optimization of Laser Selective Melting Forming Equipment

Jun'ang Zhang, Wenjin Qin, Yapeng Li

School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Dec. 16th, 2024; accepted: Jan. 9th, 2025; published: Jan. 17th, 2025

Abstract

The black smoke particles produced in the process of printing parts by laser selective melting molding equipment will not only corrode the laser lens, but also directly affect the density of the processed parts. Therefore, it is very important to design a reasonable and uniform wind field structure in the forming cabin and remove the black smoke particles produced in the printing process scientifically and effectively. In this paper, a large laser selective melting molding equipment is taken as the research object. The inlet structure is designed and the wind field characteristics under the flow channel are obtained by numerical simulation. According to the simulation results of the wind field, the wind field in the molding chamber is optimized by combining the rectifier plate, the circular

grid plate and the honeycomb grid plate. The results show that the wind field distribution generated by the improved flow channel in the upper region of the forming area is more uniform.

Keywords

Laser Selective Melting Molding, Wind Field, Numerical Simulation

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

激光选区熔化(Selective Laser Melting, 简称 SLM)是一种新兴的增材制造技术，目前广泛应用于金属合金的增材制造。加工过程中以层层堆叠的方式，通过激光扫描金属粉末熔化再凝固成型完成零件制作[1]。与传统减材方法相比更容易制造复杂结构的零件，在航空航天以及医疗领域具有重要的应用价值[2] [3]。

SLM 成型过程所需激光温度高，熔化金属粉末所耗时间短，因此加工过程往往伴随飞溅现象以及黑烟颗粒的产生。黑烟颗粒的产生过程中伴随一些气体的异常释放，这些气体会在被加工零件内部形成孔隙缺陷。另外，黑烟颗粒飞溅后在粉床上的二次沉积会阻碍材料颗粒之间紧密、有序的排列，从而降低被加工零件的致密度[4]。SLM 设备中的气氛保护系统通过在成型舱内形成由惰性气体流动的风场，可以降低金属在激光融化过程中的氧化作用并有效去除打印过程中产生的黑烟颗粒。

在 SLM 设备开发过程中，气氛保护系统在成型舱内形成风场的均匀性对成形质量的影响日渐引起重视。Ferrar [5]等发现，均匀流动的保护气体能有效提高成型工件的质量。Ladewig [6]等发现副产物对生产过程的影响在很大程度上取决于舱内惰性气体的流动及其局部速度分布。梁平华[7]等人通过仿真和实验表明，成形仓黑烟残留问题是由于成形仓内风场风速分布不均匀造成的。孙宏睿等人[8]提供了对气氛循环系统吹吸风口的栅格设计以及优化方案。付旺琪[8]等人通过优化充气方案，并得出稳定的气流对打印质量有良好的清除效果。

以上研究表明，在成型舱内形成风速均匀的风场结构可以有效去除打印过程中产生的黑烟颗粒，从而提高被加工零件的质量。目前大型复杂零件需求日益增加，大型 SLM 设备朝向大型化、智能化发展。由于大型 SLM 设备进气口较长且普遍要求设置上下两路进风[9]，在成型舱内形成下风场风速分布均匀且上下两路进风的风场结构非常不易。因此，如何设计高效可行的气氛保护风场特性，有效去除打印过程中的黑烟颗粒具有重要的意义。本文以某大型选择性激光熔化成型设备为研究对象，结合其特点建模并进行数值模拟计算，得到其流道下成型舱内的风场情况。其次设计改进流道迭代计算后与原模型流道风场仿真结果进行对比，结果表明改进流道能够在成型舱内产生速度分布更加均匀的风场。

2. 激光选区熔化成型系统总成

本文以大型激光选区熔化成型设备为研究对象，结合其特点建立三维结构模型如图 1 所示。结构主要由上下进气道、成型舱、上下排气道组成，采用上下两路进风策略。成型舱是打印的主要工作区域，舱内成型区尺寸为 512 mm × 512 mm。下进气道流入成型舱内的惰性气体流经成型区，带走打印过程中产生的多数黑烟颗粒。上进气道流入成型舱内的惰性气体流经成型舱顶部，目的是防止下风场未带走的少数黑烟颗粒对激光镜片造成腐蚀老化。

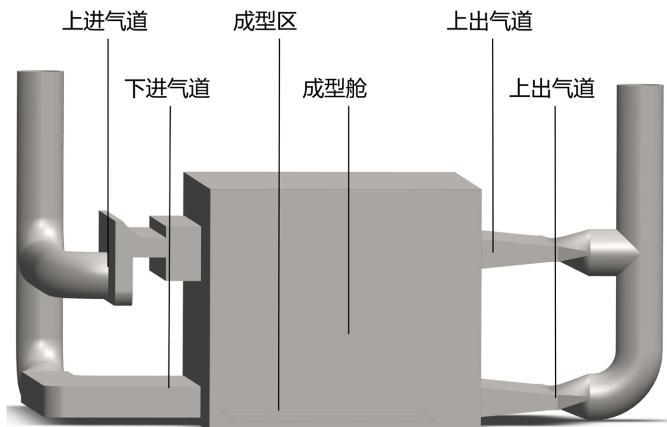


Figure 1. 3D model diagram of laser selective melting forming equipment
图 1. 激光选区熔化成形设备三维模型图

原设计方案采用侧向进气，上下进气道内部结构图如图 2 所示。下进气道采用等距导流板、上进气道出口处采用圆形栅格板来增加舱内风场速度分布的均匀性。另外，上进气道预设阻力环节，目的是增加下进气道支路惰性气体的流量。

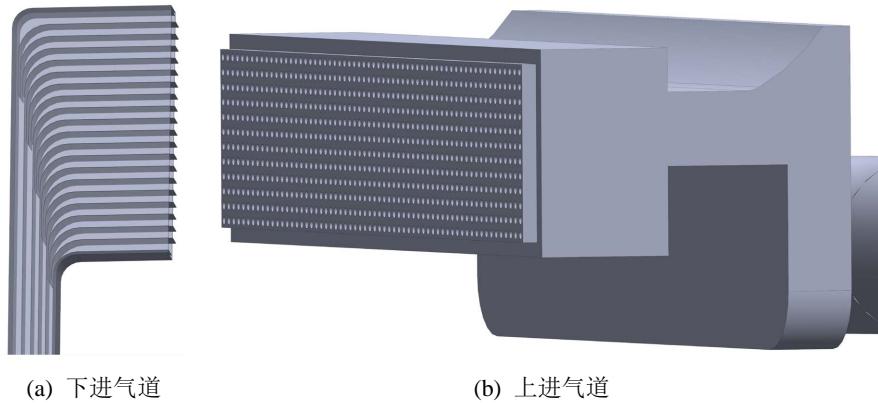


Figure 2. Inlet internal structure diagram
图 2. 进气道内部结构图

3. 数值模拟

3.1. 风场数值模拟理论

数值计算基于 Navier-Stokes 质量守恒方程和动量守恒方程，对成型舱内风场速度分布进行模拟。选择标准 k- ε 湍流模型来刻画成型舱内湍流现象[10] [11]，求解方程如下所示。

质量守恒方程：

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

式中， ρ 为流体微元体密度； τ 为时间； u, v, w 是流体流速在 x, y, z 方向上对应的分量； F_x, F_y, F_z 是作用在 x, y, z 方向上的体积力。

动量守恒方程：

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial \tau} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = F_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \eta \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (2)$$

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial \tau} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = F_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \eta \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (3)$$

$$\rho \left(\frac{\partial w}{\partial \tau} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = F_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \eta \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (4)$$

式中, η 为流体粘性系数; p 为作用于微元体上的压力; F_x, F_y, F_z 是作用在 x, y, z 方向上的体积力。

湍流方程(标准 $k-\varepsilon$ 模型):

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial \tau} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(u + \frac{u_i}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon \quad (5)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial \tau} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(u + \frac{u_i}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (6)$$

式中, $u + \frac{u_i}{\sigma_\varepsilon}$ 是扩散系数; k 是湍动能; G_k 表示湍流能的生成项; ε 是湍动能耗散率; $C_{1\varepsilon}$ 和 $C_{2\varepsilon}$ 为经验常数。

3.2. 风场数值模拟设置

为了探究成型舱内风场具体分布情况, 并根据仿真结果对进气道优化改进, 将建立好的结构模型进行数值仿真计算。首先采用多面体网格策略对该结构进行网格划分, 出于兼顾计算精度和计算效率考虑, 分别设置最小、最大网格尺寸为 1 mm 和 10 mm。网格划分如图 3 所示, 网格数量 400 多万。将设备实际工作条件作为数值模拟计算条件进行设定, 如表 1 所示。

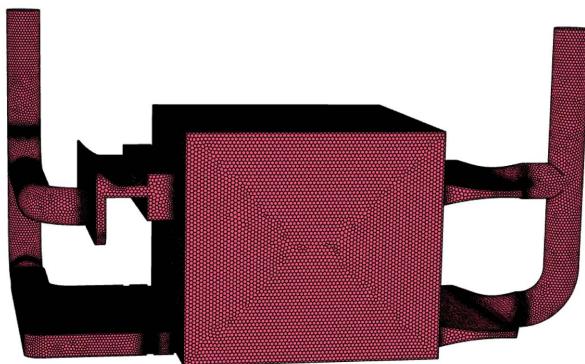


Figure 3. Grid diagram of air duct system of SLM forming cabin
图 3. SLM 成型舱风路系统网格图

Table 1. Basic parameters of numerical simulation
表 1. 数值模拟基本参数

参数	数值	类别	参数
风量	180 m ³ /h	保护气	氩气
保护气密度	1.6228 kg/m ³	排气口	压力零梯度出口
舱内表压	1380 pa	进气口	质量流量入口

4. 原风场计算结果及分析

为了探究成形舱内成型区上方产生风场的速度分布情况,为后续循环保护气流道结构优化提供依据,在计算流体力学软件中建立了整体风场计算模型。基于上述边界条件,仿真迭代计算得到成型舱内流线图,见图4。迹线图可以形象的反映出舱内氩气的流动轨迹情况。图4所示惰性气体通过左侧进气道自动分流进入成型舱形成结构稳定的上下两个风场,但由于下进气道栅格板间缺少流动补偿环节,导致下风场速度分布不均匀。

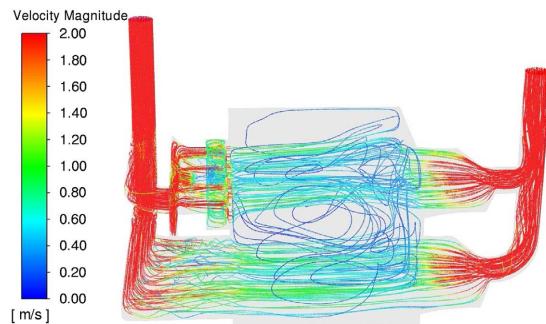


Figure 4. Flow chart in the cabin

图4. 舱内流线图

理想的风场需要尽可能的保证成型区上方风速的均匀性,才能有效的去除激光扫描金属粉末产生的黑烟颗粒。为进一步观察成型舱内风场分布情况,为后续优化提供依据。如图5(a)所示位置建立平面,并得出该截面上速度云图,见图5(b)、图5(c)、图5(d)。

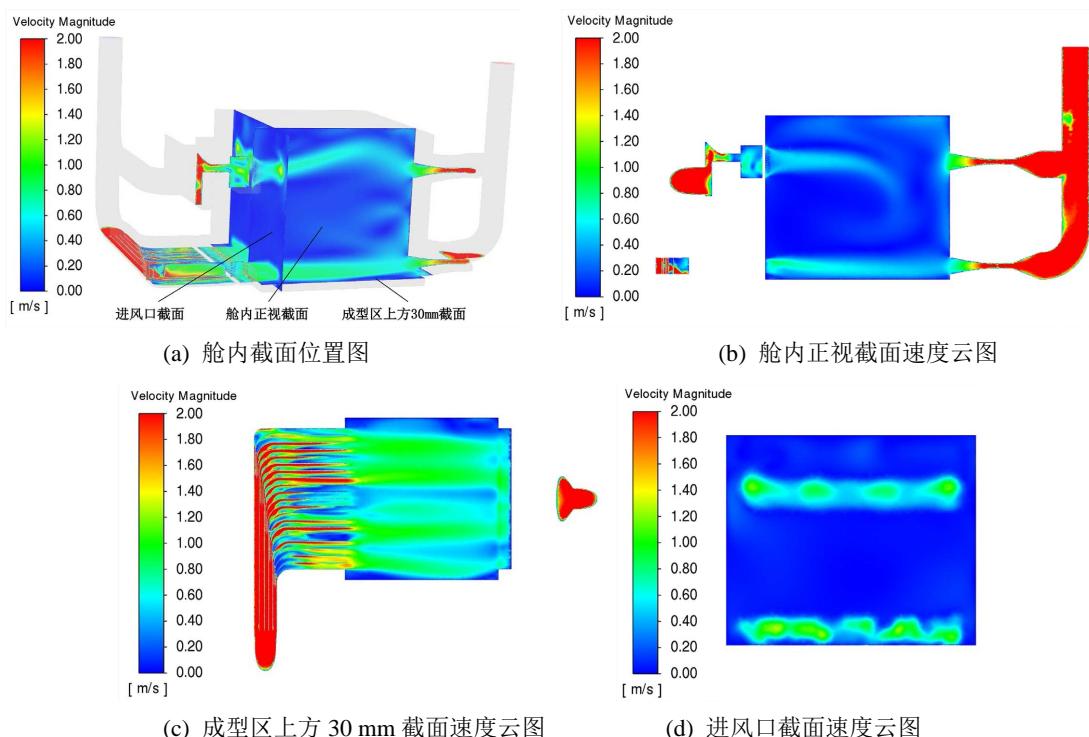


Figure 5. Sectional velocity cloud of wind field in molding cabin
图5. 成型舱内风场截面速度云图

从图 5 三个截面速度云图可以明显看出原进气道在成型舱内形成风场主要存在两个问题：(1) 从上进气道进入的部分惰性气体并未及时从上出气道排出，有在成型舱内形成乱流的隐患；(2) 成型区上方 30 mm 截面风场速度分布不均匀，局部风速小的区域可能无法及时带走打印过程产生的黑烟颗粒。针对问题(1)，发生此现象的原因是上风场风量小以至于惰性气体不能及时从上出气道排出；问题(2)则是流道本身造成的影响。本文通过改变下进气道结构使下风场速度分布的均匀性得到改善，与此同时保证上进气道流量增大，进而在成型舱产生合理的风场效果。

5. 下进气道的改进

5.1. 下进气道改进策略

基于上述仿真结果分析，利用导流板对舱内风场速度分布均匀化处理时，会得到线条状的风场结构。其原因是该布置方式虽然很大程度上让惰性气体分布均匀，但与此同时限制了各个栅格间流体的流量补偿，导致惰性气体流入成型舱内沿进口长度方向速度分布不均匀。多数学者通过调整栅格间隔比例对风场进行优化，但并不能从根本上打破其线条状的风场结构。

为得到更加均匀的风场结构，本文通过减短下进气道导流板长度并在进气道末端加入圆形栅格板和蜂窝状栅格板对成型舱内风场进行优化，其结构图如图 6 所示。

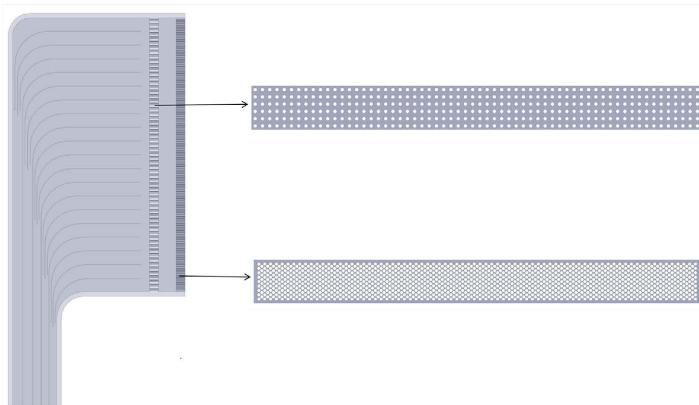


Figure 6. Improved flow channel and grid
图 6. 改进流道及栅格

结构栅格采用整流板、圆形栅格板和蜂窝状栅格板结合的方式对惰性气体进行整流。惰性气体首先进入整流板得到分布相对均匀的线条状流场，之后通过依次孔隙率较小的圆形栅格和孔隙率较大的蜂窝形栅格进行二次整流，得到均匀的流场结构。

5.2. 改进风场计算结果分析

基于原模型边界条件进行求解，得到计算结果与原风场计算结果进行对比，对比结果如图 7 所示。

经过流道结构的改进，成型舱内风场结构得到显著改善。对比图 7(a)速度云图可以发现改进流道在成型舱内产生的上风场可以到达上出气道并及时从上出气道排出，可以有效隔断下风场未带走的黑烟颗粒对激光镜片的腐蚀老化。其原因是下进气道加入圆形栅格板和蜂窝状栅格板整流的同时加大了下进气道阻力，导致流入上进气道的惰性气体流量增加，使其有足够的速度进入上出气道并排出。图 7(b)和图 7(c)可以明显看出改进流道在成型舱内产生的下风场均匀的覆盖了整个成型区，其下进口截面风速分布的均匀性也得到明显改善。

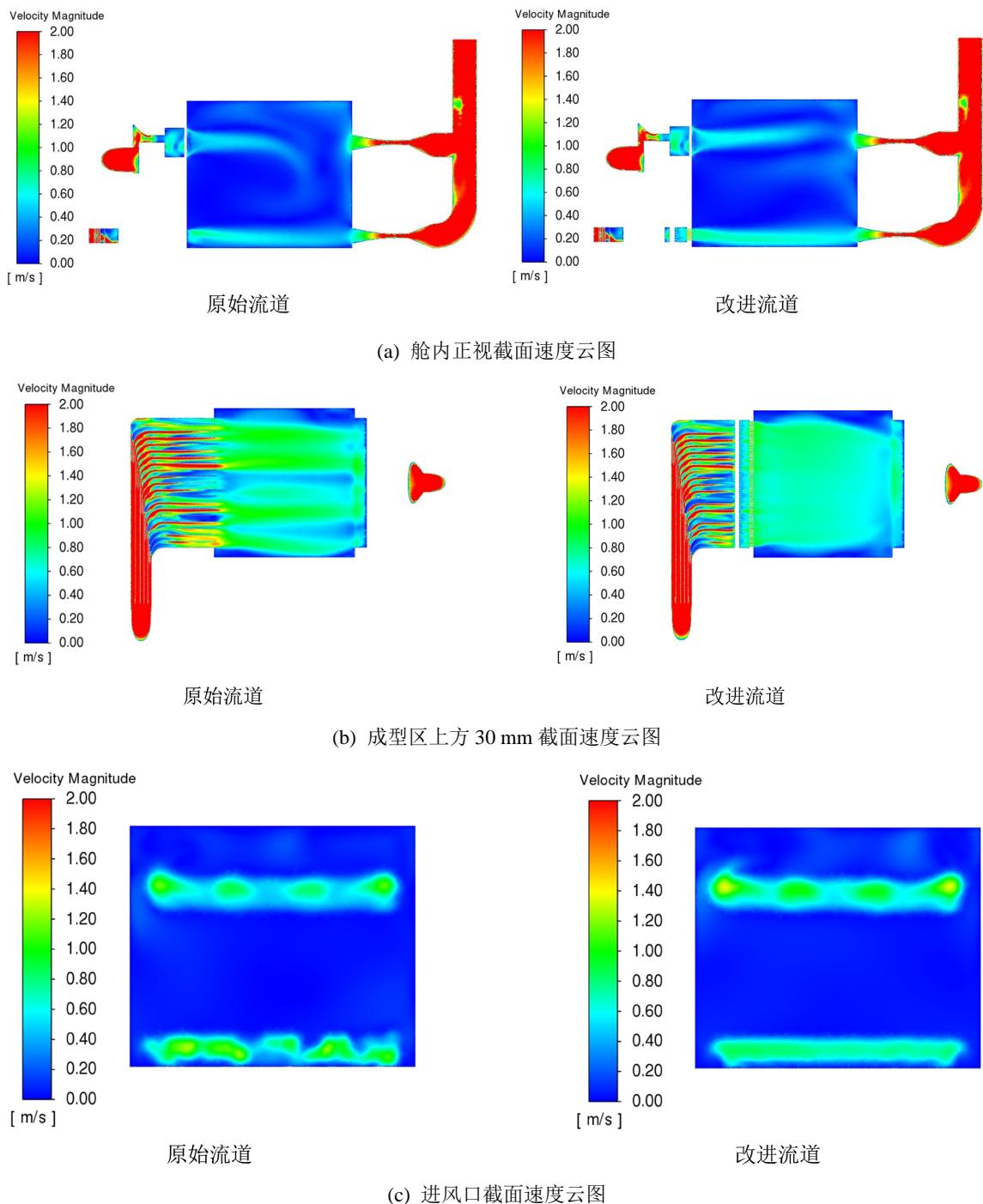


Figure 7. Wind field cross-section velocity cloud before and after improvement
图 7. 改进前后风场截面速度云图

为进一步对比原风场与改进风场在成型区上方 30 mm 风场风速分布的均匀性，现将成型区上方 30 mm 截面进行离散化处理。如图 8 所示为原风场在成型区上方 30 mm 截面离散化处理示意图。将成型区上方 30 mm 截面沿 X、Y 方向离散为 4×4 的小平面，计算每个平面风速加权平均值作为该截面对应位置风速值。

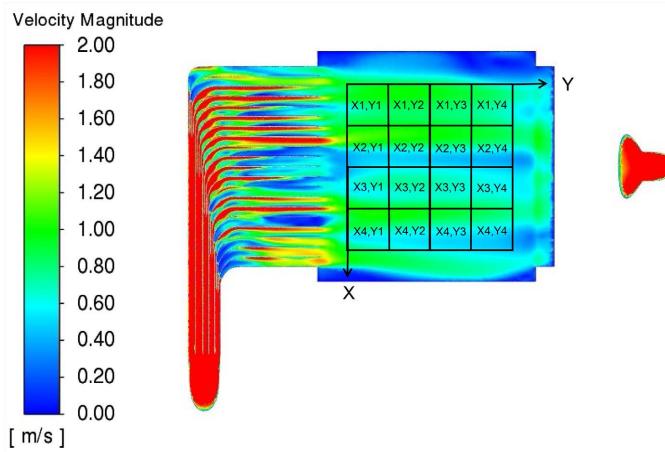


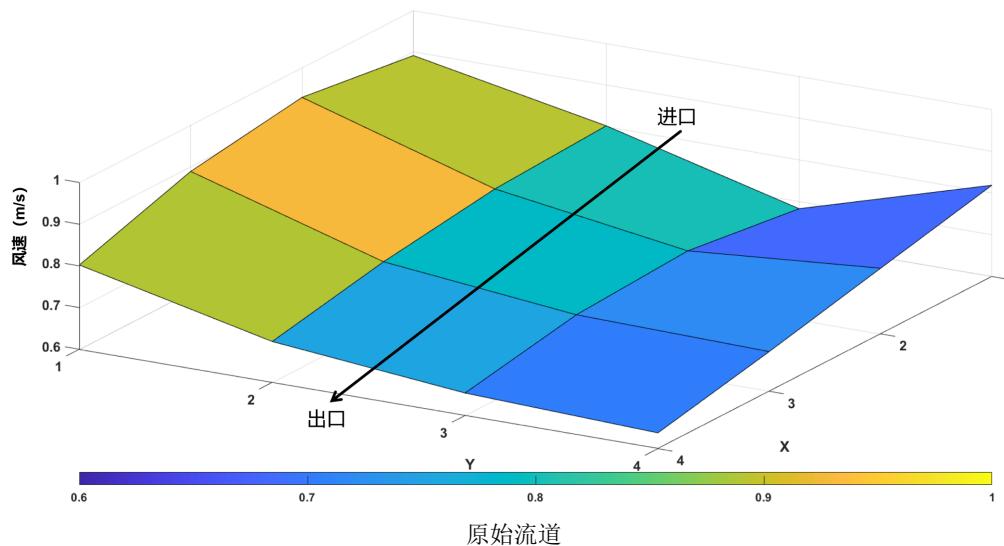
Figure 8. The schematic diagram of discretization treatment of 30 mm area above the forming area

图 8. 成型区上方 30 mm 区域离散化处理示意图

将改进后风场按照同样方式离散化处理并计算每个平面风速加权平均值，与原风场风速数据汇总，如表 2 所示。

Table 2. Wind speed comparison of 30 mm cross section above the forming area
表 2. 成型区上方 30 mm 截面风速对比

	原始风场风速(m/s)				改进风场风速(m/s)			
	Y1	Y2	Y3	Y4	Y1	Y2	Y3	Y4
X1	0.8916	0.9289	0.8890	0.8022	0.7891	0.7908	0.7495	0.6754
X2	0.8026	0.7888	0.7517	0.6981	0.7251	0.7326	0.7014	0.6435
X3	0.6833	0.7197	0.7040	0.6540	0.6962	0.6993	0.6693	0.6191
X4	0.8916	0.9289	0.8890	0.8022	0.7130	0.7095	0.6712	0.6149
每列标准差	0.0748	0.0790	0.0775	0.0641	0.0352	0.0354	0.0324	0.0241
总标准差			0.0848			0.05		



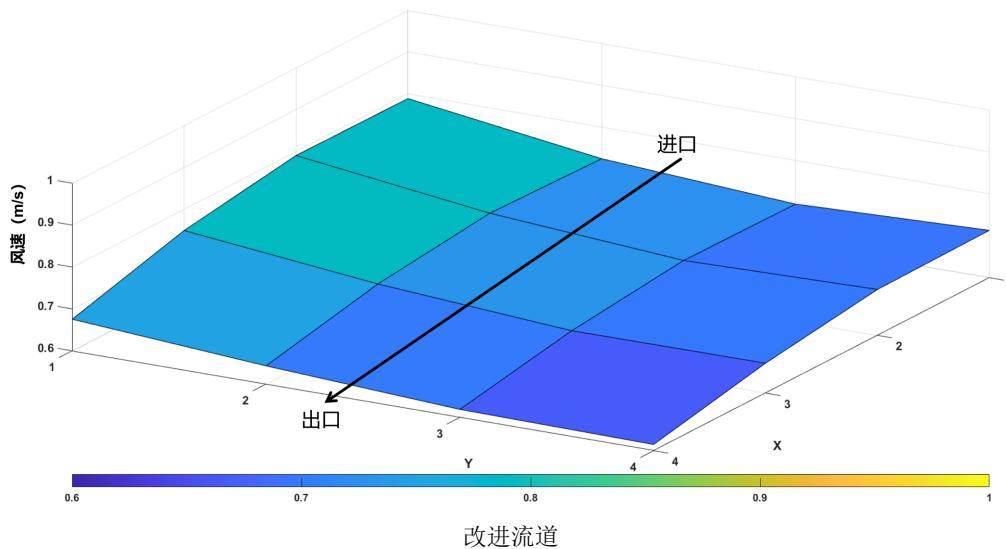


Figure 9. The velocity distribution map of 30 mm above the forming zone
图 9. 成型区上方 30 mm 速度分布图

从表 2 可以看出原风场与改进风场在成型区上方 30 mm 截面的速度分布情况。对比原风场与改进风场 Y1-Y4 每列标准差发现，改进后风场每列标准差约降低至原风场的 0.5 倍，整体标准差约降低至原风场的 0.6 倍。图 9 的平整度可以清晰的传达出成型区上方 30 mm 风速分布的均匀程度，对比发现改进流道在成型区上方 30 mm 风速分布的均匀程度得到显著改善。

6. 结论

本文以大型激光选区熔化成型设备为例，建立原始流道模型并对其进行数值模拟计算。通过整流板、圆形栅格板和蜂窝状栅格板结合的方式对风场进行优化，得出以下结论：

- (1) 原始流道利用导流板对惰性气体整流的同时限制了各个导流板间流体的流动补偿，各个栅格内流量分配不等的惰性气体直接流入成型腔，导致下风场结构呈线条状分布。
- (2) 通过对下进气道的改进使下风场更加均匀化。仿真表明：在导流板末端加入圆形栅格板和蜂窝状栅格板整流，促进了惰性气体在进气道内的流动补偿，得到风速分布更加均匀的风场。改进后风场在成型区上方 30 mm 截面风速每列标准差约降低至原风场的 0.5 倍，整体标准差约降低至原风场的 0.6 倍。
- (3) 从上进气道进入成型腔的惰性气体能否及时从上出气道排除取决于上下进气道的流量分配比例。仿真表明：对下进气道的改进使上下进气道间进气流量比值达到更为适配的流量分配状态，改善了成型腔内上风场流动分布。

参考文献

- [1] 陈忠旭, 姚锡禹, 郭亮, 等. 基于激光的金属增材制造技术评述与展望[J]. 机电工程技术, 2017, 46(1): 7.
- [2] Niu, X., Singh, S., Garg, A., Singh, H., Panda, B., Peng, X., et al. (2018) Review of Materials Used in Laser-Aided Additive Manufacturing Processes to Produce Metallic Products. *Frontiers of Mechanical Engineering*, **14**, 282-298. <https://doi.org/10.1007/s11465-019-0526-1>
- [3] 刘伟, 李能, 周标, 等. 复杂结构与高性能材料增材制造技术进展[J]. 机械工程学报, 2019, 55(20): 128-151, 159.
- [4] 杜胶义. GH4169 镍基合金粉末选区激光熔化基础工艺研究[D]: [硕士学位论文]. 太原: 中北大学, 2014.
- [5] Ferrar, B., Mullen, L., Jones, E., Stamp, R. and Sutcliffe, C.J. (2012) Gas Flow Effects on Selective Laser Melting (SLM) Manufacturing Performance. *Journal of Materials Processing Technology*, **212**, 355-364.

<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2011.09.020>

- [6] Ladewig, A., Schlick, G., Fisser, M., Schulze, V. and Glatzel, U. (2016) Influence of the Shielding Gas Flow on the Removal of Process By-Products in the Selective Laser Melting Process. *Additive Manufacturing*, **10**, 1-9.
<https://doi.org/10.1016/j.addma.2016.01.004>
- [7] 梁平华, 唐倩, 余志强, 等. 激光选区熔化的风场仿真与流道结构优化[J]. 中国机械工程, 2019, 30(7): 858-863.
- [8] 付旺琪, 李腾飞, 钱波, 等. 基于 FLUENT 的小型激光选区熔化设备气氛保护系统优化设计[J]. 电焊机, 2019, 49(9): 78-83.
- [9] 王勇, 周雪峰. 激光增材制造研究前沿与发展趋势[J]. 激光技术, 2021, 45(4): 475-484.
- [10] 王福军. 计算流体动力学分析——CFD 软件原理与应用[J]. 热能动力工程, 2005, 20(5): 1.
- [11] 翟建华. 计算流体力学(CFD)的通用软件[J]. 河北科技大学学报, 2005, 26(2): 160-165.