

超高速激光熔覆头非稳态追踪粉末流场研究

杨卫红^{1,2}, 张雪¹, 孔敏², 罗惜照³

(1. 武昌理工学院 AI 学院电子与信系工程, 湖北 武汉 430074; 2. 文华学院机械与电气工程学院智能制造系, 湖北 武汉 430074;
3. 华中科技大学光学与电子信息学院, 湖北 武汉 430074)

摘要:超高速激光熔覆技术取代电镀铬,可解决电镀铬工艺重金属铬离子(Cr^{6+})重金属污染,被禁止或限制的工业应用问题。金属工件表面镀硬铬,集耐腐蚀性防护、装饰于一体,有着巨大的应用前景。我国超高速激光熔覆技术的研发,主要侧重点在于设备集成与工艺实验研究,缺少熔覆过程仿真模型。本文以超高速激光熔覆环形熔覆头为研究对象,利用 FLUENT 建立了基于非稳态粒子追踪技术的 CFD 仿真模型,开发了一种针对环形熔覆头激光熔覆粉末流场模型。针对超高速激光熔覆工艺进行了实验与分析;建立了该过程的理论模型。通过仿真结果发现超高速激光熔覆环形熔覆头可以形成半径 0.8 mm 的粉斑,熔覆头下方 15~19 mm 空间内粉末浓度最高,并通过实验对比验证了模型的可行性。

关键词:超高速激光熔覆;非稳态追踪;CFD 仿真;流场

中图分类号:TG456.7;TN249 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2021.07.006

Simulation of ultra-high speed laser cladding head powder flow by unsteady tracking

YANG Wei-hong^{1,2}, ZHANG Xue¹, KONG Min², LUO Xi-zhao³

(1. Artificial Intelligence School, Wuchang University of Technology, Wuhan 430074, China;

2. Department of Intelligent Manufacturing, Wenhua College, Wuhan 430074, China;

3. School of Optics and Electronic Information, Huazhong University Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: Ultra-high-speed laser cladding technology replaces chromium plating, which can solve the industrial application problem of heavy metal pollution caused by chromium ion (Cr^{6+}) in chromium plating process. Hard chromium plating on the surface of metal workpiece is a combination of corrosion resistance protection and decoration, which has a great application prospect. The research and development of ultra-high speed laser cladding technology in China mainly focuses on equipment integration and process experiment research, but lacks the simulation model of cladding process. In this paper, the ultra-high speed laser cladding ring cladding head is taken as the research object, and a CFD simulation model based on unsteady particle tracking technology is established by using FLUENT, and a flow field model of laser cladding powder for ring cladding head is developed. The ultra-high speed laser cladding process is tested and analyzed. The theoretical model of the process is established. Through simulation results, it is found that powder spots with a radius of 0.8 mm can be formed by ultra-high speed laser cladding ring cladding head, and the powder concentration is the highest in the space of 15~19 mm below the cladding head. The feasibility of the model is verified by experimental comparison.

Keywords: ultra high speed laser cladding; unsteady tracking; CFD simulation; flow field

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61775067)资助。

作者简介:杨卫红(1974-),女,博士,主要从事激光先进制造技术研究。E-mail:rose7636@163.com

通讯作者:张雪(1978-),女,硕士,副教授,主要从事光学研究。E-mail:2816717914@qq.com

收稿日期:2020-09-30

1 引言

纵观我国超高速激光熔覆技术的发展,尽管有越来越多的公司和科研单位参与超高速激光熔覆技术的研发,但是他们主要的研发侧重点还是在于设备集成与工艺实验研究^[1],缺少了超高速激光熔覆过程仿真模型的开发。

国外在该领域所做工作比国内深入很多^[2-7],2000年 Jehnming Lin^[2]进行过激光熔覆送粉头的粉末气流数值仿真以及 FLUENT 不同喷嘴结构下粉末的流动状态模拟,发现:喷嘴结构和送气量对粉末汇聚的效果有很大的影响;采用同轴送粉头喷嘴,可以使粉末汇聚的质量浓度至少提高 50%。Frank Liou^[3]和 Heng Pan^[4]开发了粉末颗粒形状对粉末流汇聚的影响的模型,该模型分析了颗粒形状与规则球体的偏差以及非球面碰撞等因素引起的粉末流分散现象,并将模拟的粉末流与粉末空间浓度的实验结果进行比较,发现模型在预测非球形粉末颗粒的汇聚情况时结果较好,但是对于球形颗粒的预测,将会导致沿轴向方向的峰值粉末的空间质量浓度偏高,而沿径向方向的浓度宽度变窄。

在光粉相互作用的仿真方面国外也有相关报道,S. Y. Wen 等人^[5]提出了一种复杂的二维激光熔覆数值模型。通过追踪拉格朗日坐标系下的颗粒运动研究粉末的流动状态。模型中考虑了非规则球形粉末颗粒对粉末流动的影响,并可以计算喷嘴下方粉末经过激光辐射后的空间粉末温度分布。但是,由于模型研究低送粉量的情况,粉末对激光造成的衰减问题在此模型中没有考虑。因此仿真结果与实验获得的粉末温度略有差异。

英国曼切斯特大学 Juansethi Ibarra - Medina^[6]和 Andrew J Pinkerton^[7]在 2010 年通过商用 CFD 软件 FLUENT 研究粉末流、激光束和基材三者的关系。模型中首次考虑到熔池漫反射对粉末粒子加热的影响,并对比了有无基材的情况下粉末流的浓度变化与空间温度分布,并计算出喷嘴下方激光能量衰减的空间分布情况。

基于国内缺少超高速激光熔覆过程仿真模型的开发的较少。本文以计算机数值计算为基础,开发一种的超高速激光熔覆粉末流的计算机仿真模型,利用 FLUENT 建立了基于非稳态粒子追踪技术的 CFD 仿真模型,并能计算不同激光功率、光束质量、

送粉量、送气量等工艺条件下粉末的空间流场分布。

2 原理

根据流体力学知识,非化学反应的单向流动现象可以用连续性方程和 Navier-Stokes 方程来描述。以此二方程为基础,本文分析激光熔覆粉末流动与加热的过程涉及的基本理论,并对通过计算机仿真技术,分析超高速激光熔覆环形熔覆头粉末汇聚特点。

本文建模采用 FLUENT 软件内部非稳态粒子追踪技术。因为稳态粒子追踪,模型在向流场释放粒子时就会开始跟踪,直到粒子束从计算域中逸出为止。在这一过程中,粒子束在流场的运动状态是随着流场的迭代过程而整体迭代的,在模型仿真中无法单独描述颗粒在流场中的独立运动过程。对于非稳态粒子追踪,用户可以通过设置流场的时间步长,从而实现定时定量地向计算域注入颗粒,所有注入的颗粒都可以在流场迭代过程中单独计算颗粒的运动过程,它们是相互独立存在又相互影响的,尤其在粒子与壁面存在碰撞的模型中,非稳态粒子追踪的技术更能反映每一颗离散相粒子的运动。

因此,在讨论激光熔覆粉末流场的模型中,采用非稳态粒子追踪更能反映每一颗金属粉末在熔覆过程中的运动状态。图 1 为非稳态粒子追踪(图 1(a))与稳态粒子(图 1(b))追踪技术仿真的结果对比。

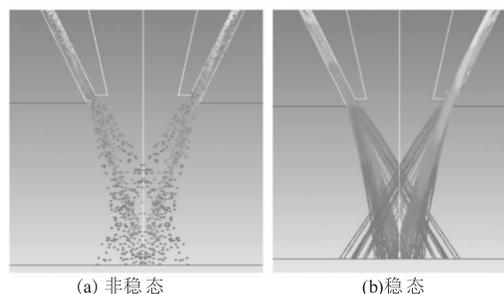


图 1 粒子追踪技术的对比

Fig. 1 Comparison of Particle Tracking Technologies

3 建模

3.1 前处理

以武钢华工超高速激光熔覆环形熔覆头为实验对象,通过的流道尺寸测量,同时结合熔覆头下方一定空间,便可以得到相应的粉末流场的计算域。由所分析模型均为轴对称结构,沿对称轴选择四分之一计算域进行建模。武钢华工超高速激光熔覆环形熔覆头的实物图及计算域模型如图 2 所示。

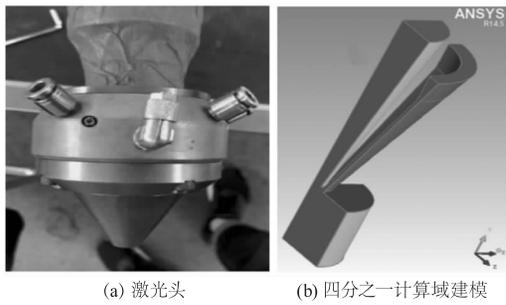


图2 激光头和四分之一计算域建模

Fig. 2 Modeling of laser head and quarter computing domain

在 ICEM 中建立送粉头的计算域模型后划分网格。为保证足够的求解精度与节约计算资源,网格划分通常要占到 CFD 总体模型与参数设置时间的 40% 以上^[8]。并利用 ICEM 进行结构化网格划分,步骤包括:建立拓扑—划分 block—网格优化—网格生成。激光熔覆环形送粉头的网格划分策略如图 3 所示,划分中对粉末会聚区域进行加密,网格数量在 30 万,网格质量在 0.7 以上。

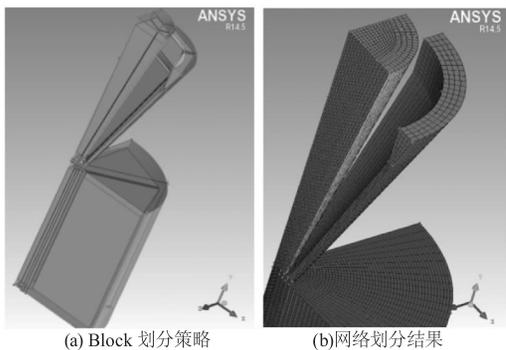


图3 超高速激光熔覆环形熔覆的网格划分

Fig. 3 Grid division of annular cladding by ultra-high speed laser cladding

3.2 边界条件设置与求解

流场模型求解前的假设:

(1) 假设保护气和混有金属粉末流以恒定初速度垂直计算域入口面流入的,进入计算域前粉末颗粒初速度与载气相同;

(2) 仿真前提为送粉、送气量工艺参数恒定,因此模型主要分析稳态情况,采用压力差值的分离求解器;

(3) 离散相模型中,颗粒的力平衡仅考虑曳力、惯性力和重力,粒子占气体总体积不高于 10%,忽略粒子间碰撞对轨迹的影响;颗粒的质量和浓度较低,忽略颗粒对流场的影响;

(4) 虽然模型利用 Rosin-Rammler 分布和形状

因子进行粉末颗粒建模,但是,出于对本文研究内容以及降低计算成本的考虑,模型中粉末假定为大小相同的球形颗粒;

仿真中采用氩气(Ar)作为保护气与载气,其密度为 $\rho_{\text{argon}} = 1.6228 \text{ kg/m}^3$,粘度为 $\mu_{\text{argon}} = 2.125 \times 10^{-5} \text{ kg/m} \cdot \text{s}$,根据式(1)可以计算出气-粉流的雷诺数,以确保标准 k- ϵ 模型适用于此模型。式中, ρ_{mix} 为气固两相流的密度, v_{inlet} 为流入流场的初速度, D 为水力直径。

$$Re_{\text{DH}} = \frac{\rho_{\text{mix}} v_{\text{inlet}} D}{\mu} \quad (1)$$

对于超高速激光熔覆环形送粉头,进粉管直径 6 mm,载气送气量为 12 L/min,送粉量为 24 g/min 时,计算得出粉末进入送粉头时雷诺数为 4200 以上,同样属于湍流范畴。为了在仿真中真实反映湍流对粉末流动的影响,采用非稳态粒子追踪 DPM 模型。

实验采用铁基粉末,平均颗粒直径约为 30 μm ,模型中离散相材料参数见表 1。

表1 模型中使用的材料参数表

Tab. 1 Material parameter table used in the model

Material properties	Value	Unit
Normal temperature density ρ_p	7950	$\text{kg} \cdot \text{m}^3$
Specific heat capacity c_p	470	$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
Thermal conductivity k	13.4	$\text{W} \cdot \text{mK}^{-1}$
Latent heat of phase change L_f	2.6×10^5	$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$
Melting point T_{liq}	1723.0	K
Laser absorptivity ξ	0.5	-
Wall rebound coefficient	0.9	-

模型采用 k- ϵ 模型,除了确定流体初速度 v_{inlet} 和流动初始方向之外,还要给出入口流场的湍流强度 I 与湍流长度 l ^[9],计算公式为:

$$L = \begin{cases} \frac{4\pi R^2}{2\pi R} = 2R = D & \text{当流体入口为圆形} \\ \frac{4\pi(r_1^2 - r_2^2)}{2\pi(r_1 + r_2)} & \text{当流体入口为环形} \end{cases} \quad (2)$$

$$l = 0.07L \quad (3)$$

$$I = \frac{\mu'}{v} \approx 0.16 (Re_{\text{DH}})^{-1/8} \quad (4)$$

式中, L 为特征长度或水力直径; R 为圆形进粉口半径; r_2, r_1 为环形进粉口时的圆环内外半径。在计算

域的边界条件设置中,设置流体入口均为速度入口(velocity-inlet),设置离散相在入口处为逸出(escape);流体出口为压力出口(pressure-outlet),离散相在出口处也为逸出(escape);粉末流道设置为壁面(wall)。最后,FLUENT 解算器采用 SIMPLE 算法保证计算效率。

4 流场仿真结果对比与验证

4.1 流场稳定性

为了更好地说明环形送粉头的性能,仿真结果与同参数下同轴环形送粉头模拟仿真进行了比较,图4(a)为同轴四路送粉管在保护气、载气的送气量均为 3 L/min 时,求解收敛获得的流线图。如图所示,同轴四路送粉管管径只有 2 mm,载气在送粉管内流速最可达 22 m/min,当载气流出送粉管,四路载气流会在熔覆头下方一定距离处相遇形成湍流,湍流会产生向上的气流向喷嘴内部的光学元件处流动。若在激光熔覆过程中,由于反向气流可能会携带高温金属颗粒或金属蒸汽,损坏熔覆头内部以及光学元件。熔覆头中心通道的保护气可以对这种上升气流起到阻挡作用。

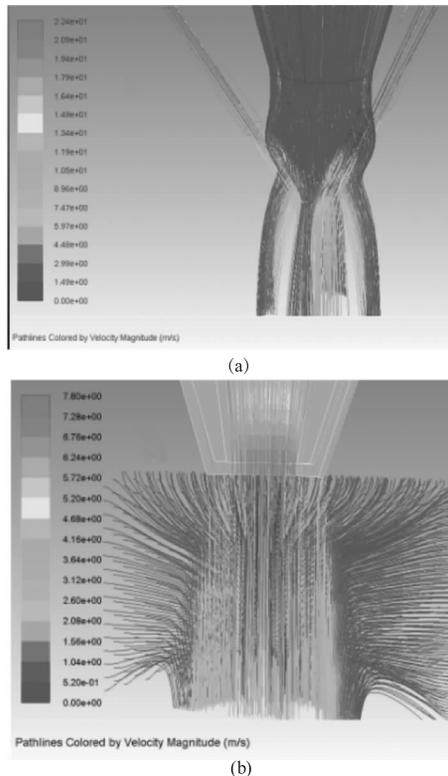


图4 熔覆头速度流线图

Fig. 4 Velocity streamline diagram of cladding head

图4(b)为超高速激光熔覆环形熔覆头的流场速度流线图,比较图4(a),环形送粉头的气流场更

稳定,载气通道出口与保护气相互作用,大大降低了熔覆头下方的气体流场波动性,虽然载气可以引起四周空气低速的涡旋,但对中心流场影响较小。载气与保护气形成了一个惰性气体保护区,阻止了高温金属颗粒接触外部空气而氧化。

3.2 粉末浓度分布

图5为四路送粉管熔覆头的粉末空间浓度分布图,送粉量为 24 g/min,如图所示,粉末从送粉管出口飞出后粉末流发散,浓度下降,熔覆头下方一定距离内($-16 \text{ mm} < y < -14 \text{ mm}$),四路粉末流会聚,粉末浓度达到峰值,之后浓度便开始快速降低。图6为超高速激光熔覆环形熔覆头的粉末空间浓度分布,送粉量同为为 24 g/min,由图示,环形送粉头的结构特性及更稳定的流场,相同送粉量下,超高速激光熔覆环形送粉头粉末汇聚能力更强,粉末在熔覆头下方($y < -14 \text{ mm}$)汇聚后,可以维持高粉末浓度的区域比同轴管式送粉高浓度区域更大($-20 \text{ mm} < y < -15 \text{ mm}$)。

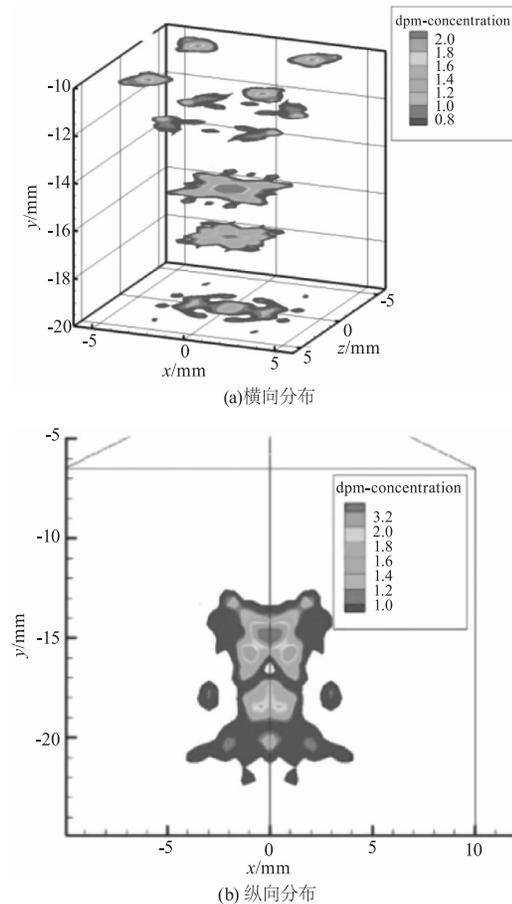


图5 四路送粉管熔覆头粉末空间浓度分布

Fig. 5 Spatial concentration distribution of powder in cladding head of four-hole powder feeding

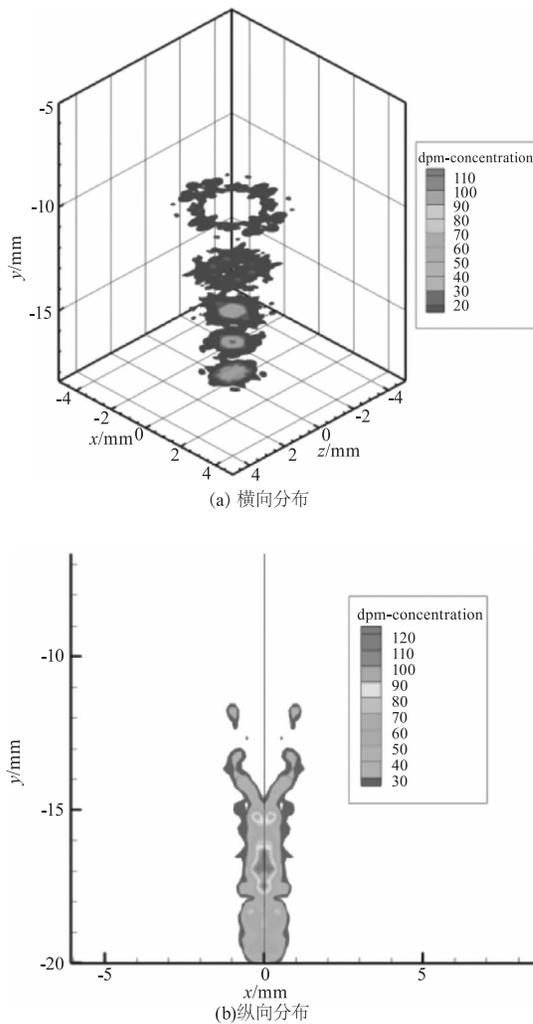


图6 超高速激光熔覆环形熔覆头粉末空间浓度分布
Fig.6 Spatial concentration distribution of powder in ultra-high speed laser cladding ring cladding head

4.3 粉斑

粉末汇聚后粉斑的大小是衡量熔覆头对粉末汇聚能力的重要指标之一,粉末的空间浓度分布符合高斯分布^[10],根据激光光学基模高斯光束光斑定义,从图7中可以看出超高速激光熔覆环形熔覆头的粉斑半径在0.8 mm左右,而同轴四路送粉管激光熔覆头的粉斑半径达到2.3 mm;两组曲线都证实汇聚区粉末的空间浓度具有高斯分布的特征,但是超高速激光熔覆环形熔覆头在粉末汇聚区的粉末峰值浓度是同轴送粉管式熔覆头的30倍。说明环形送粉方式比管形送分方式的粉末流场更稳定,对粉末流动的约束能力与粉末的汇聚能力更强。

利用高速相机可以对粉末流动的计算结果进行验证。图8为高速相机获得的同轴四路送粉管激光

熔覆头的粉末流动状态与仿真获得的粉末流动状态的比较。由图8(b)中可以看出,在实际流动过程中,当粉末束飞出送粉管之后会开始发散,在熔覆头下方约13 mm左右,粉末开始汇聚并在13~22 mm的范围内形成一处浓度较高的汇聚区,随后粉末开始剧烈发散。对比图8(a)的仿真结果,可以看出仿真与实验较为吻合,佐证了模型流场仿真结果可靠性。

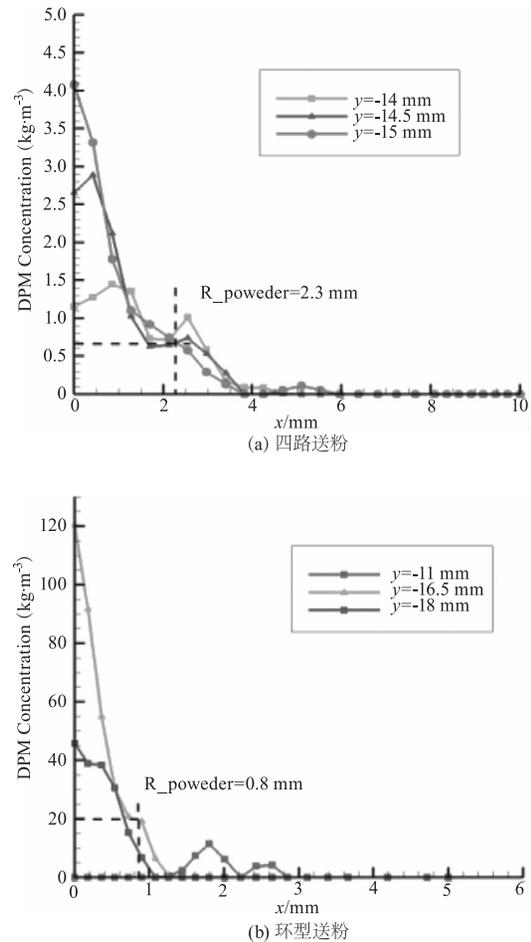
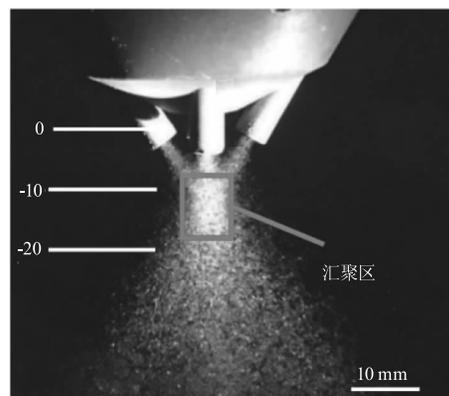


图7 径向粉末浓度分布曲线

Fig.7 Radial powder concentration distribution curve



(a)实拍图

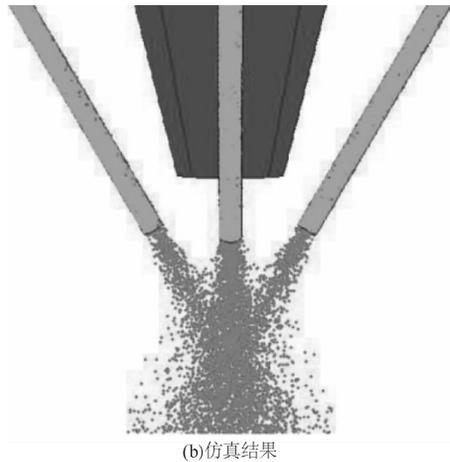


图 8 高速相机拍摄与仿真结果对比

Fig. 8 Comparison of high-speed camera shooting and simulation results

5 结 论

本文基于 FLUENT 仿真软件,建立超高速激光熔覆熔覆头的有限体积模型,利用非稳态粒子追踪手段仿真获得了熔覆头的粉末流场。模拟了熔覆头模型的流场状态和粉末会聚状态,获得了熔覆头的空间粉末浓度分布图与汇聚区的粉末浓度曲线。主要结论如下:

(1) 仿真结果显示超高速激光熔覆环形熔覆头可以形成半径 0.8 mm 的粉斑,熔覆头下方 16 ~ 19 mm 空间内出现粉末浓度最高区;多孔送粉熔覆头能形成半径 2.4 mm 的粉斑,熔覆头下方 13 ~ 15 mm 空间内出现粉末浓度最高区。通过模拟结果说明环形熔覆头在控制粉末流动速度、粉末汇聚能力等方面优于多孔送粉熔覆头;仿真结果与实验结果对比佐证了模型流场仿真结果可靠性。

(2) 超高速激光熔覆技术取代电镀硬铬,可解决电镀铬工艺重金属铬离子(Cr^{6+})重金属污染,被禁止或限制的国民经济重大应用问题。超高速激光熔覆温度场模拟仿真模型的开发,填补国内该方向研究侧重点在于设备集成与工艺实验的空白,为国内超高速激光熔覆科技研发提供理论支持。

参考文献:

- [1] Shen yandi. Basic research on laser cladding process [D]. Shanghai: Shanghai Maritime University, 2006: 12 - 17. (in Chinese)
沈燕娣. 激光熔覆工艺基础研究[D]. 上海: 上海海事大学, 2006: 12 - 17.
- [2] Lin J. Numerical simulation of the focused powder streams in coaxial laser cladding[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2000, 105(1 - 2): 17 - 23.
- [3] Pan H, Liou F. Numerical simulation of metallic powder flow in a coaxial nozzle for the laser aided deposition process[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 168(2): 230 - 244.
- [4] Wen S Y, Shin Y C, Murthy J Y, et al. Modeling of coaxial powder flow for the laser direct deposition process[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2009, 52(25): 5867 - 5877.
- [5] Taberero I, Lamikiz A, Ukar E, et al. Numerical simulation and experimental validation of powder flux distribution in coaxial laser cladding [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2010, 210(15): 2125 - 2134.
- [6] Ibarra-Medina I, Pinkerton A J. Numerical investigation of powder heating in coaxial laser metal deposition[J]. Surface Engineering, 2011, 27: 754 - 761.
- [7] Ibarra-Medina J, Pinkerton A J. A CFD model of the laser, coaxial powder stream and substrate interaction in laser cladding [J]. Physics Procedia, 2010, 5(B): 337 - 346.
- [8] Li pengfei, Xu minyi, Wang feifei. Proficient in CFD-engineering simulation and case practice[M]. Beijing: People's Posts and Telecommunications Press, 2017. (in Chinese)
李鹏飞, 徐敏义, 王飞飞. 精通 CFD-工程仿真与案例实战[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2017.
- [9] Li jitao. Mechanism research and device design of coaxial powder feeding in laser cladding[D]. Beijing: China University of Petroleum, 2011: 21 - 30. (Chinese)
李继涛. 激光熔覆同轴送粉机理研究及装置设计[D]. 北京: 中国石油大学, 2011: 21 - 30.
- [10] Huang Y L, Liu J, Ma N H, et al. Three-dimensional analytical model on laser-powder interaction during laser cladding[J]. Journal of Laser Application, 2006, 18(1): 42 - 46.