

激光选区熔化成形TC4锥形管的仿真模拟研究

温钟淳, 关峰, 李明, 毕婧涵, 谢洪志, 王正

沈阳飞机工业集团有限公司 辽宁沈阳 110850

摘要: 使用Simufact Additive软件建立TC4锥形管的有限元模型, 通过工艺仿真进行参数对比试验, 最终选择激光功率310W、扫描速度1000mm/s、层厚0.05mm。通过查看应力场、形变量结果辅助设计环节进行结构优化, 在更换支撑方案后, 建造环节的总形变量降至0.16mm, 降低了71%。在全流程仿真下, 热处理、线切割、支撑打磨阶段使形变量达到1.07mm。对BCC点阵的胞元结构进行优化, 并以迭代前后的杨氏模量为评估指标, 通过均质化有限元法进行预测。结果表明: 加强后胞元的杨氏模量由405.4MPa提升至434.9MPa, 同时由于强化点与零件无接触, 所以未增加后处理难度。

关键词: 工艺仿真; Simufact Additive; 杨氏模量; 超结构点阵; 均质化法

Simulation of laser selective zone melting to form TC4 conical tube

WEN Zhongchun, GUAN Feng, LI Ming, BI Jinghan, XIE Hongzhi, WANG Zheng

Shenyang Aircraft Corporation, Shenyang 110850, Liaoning, China

Abstract: Using Simufact Additive software to establish the finite element model of the TC4 conical tube, the parameter comparison test through process simulation, and finally choose the laser power 310W, scanning speed 1000mm/s, layer thickness 0.05mm. By viewing the stress field and deformation variable results to assist in designing the link for structural optimization, after the replacement of the support scheme, the total deformation variable of the construction link decreased to 0.16mm, a 71% reduction. Under the full process simulation, the heat treatment, wire cutting, and support grinding stages brought the deformation up to 1.07mm. The cellular element structure of the BCC dot matrix was optimized and predicted by the homogenized finite element method using Young's modulus before and after the iteration as an evaluation index. The results show that the Young's modulus of the strengthened cell element is increased from 405.4MPa to 434.9MPa, while the difficulty of post-processing is not increased due to the fact that the strengthened points have no contact with the part.

Keywords: process simulation; Simufact Additive; young's modulus; superstructured dot matrix; homogenization method

1 序言

Simufact Additive是一款应用于激光选区熔化成形工艺 (SLM) 的快速工程化仿真软件, 其能实现增材制造有限元模型建立、材料库识别导入、工艺参数输入等, 并评估加工可行性。根据结果反馈帮

助用户进行设计迭代, 通过多次优化支撑方案与工艺方案, 得到最佳的激光选区熔化成形方案。与此同时, 还可以对热处理、线切割、支撑打磨等步骤进行模拟^[1]。

增材制造过程包含多个工序, 受到多个物理场

复杂的耦合作用^[2]。在设计支撑方案时,往往需要进行大量参数化试验去验证支撑能力。但在这个过程中,不可避免地会投入大量人力、物力,需要付出极高的成本^[3, 4]。因此,增材制造工程化仿真逐渐被应用,其可在短时间内完成零件从成形到打磨处理过程中所有阶段的模拟预测。这一步骤在节省成本的同时,能有效地给设计环节提供方案优化的方向^[4]。在实际生产前,将增材制造的全流程进行仿真,通过对比分析应力场、形变量等结果,在不同设计方案中选择最佳工艺,可以有效提高产品合格率^[5]。

吴代建等^[6]利用Simufact Additive软件仿真分析了涡轮导向器激光选区熔化成形技术的全流程,并利用三维扫描技术检测实际研制零件的尺寸精度。结果表明,实测变形趋势与模拟趋势一致,但数值结果偏差较大。王宏宇等^[7]使用Simufact Welding软件建立了堆焊有限元模型,针对Cu-Al-Fe合金开展了工艺仿真试验。通过对比结果中的温度场,得到了最佳的工艺方案,即输入电流140A和扫描速度0.4m/min。杨李杰等^[8]采用Simufact Forming软件开展了对TC4钛合金管振动成形、挤压等加工仿真试验,结果表明,当凸模进给速度大于临界速度时,零件与模具依然处于接触状态;反之则会出现分离现象。本文基于Simufact Additive软件针对TC4锥形管进行了工艺参数选择,对比不同支撑方案下的等效应力场、形变量,建立了包括成形、热处理、线切割及打磨处理在内的全流程有限元模型,并以力学性能为标准预测了点阵结构的刚性改善,验证了仿真模拟工作在实际生产过程中的必要性、可行性。

2 激光选区熔化成形有限元模型

2.1 有限元模型

锥形管模型的胞络尺寸为30mm×30mm×260mm,如图1所示。基板尺寸为500mm×500mm×30mm,零件、支撑与基板材料均为TC4钛合金。本文采用3种不同的激光选区熔化成形工艺参数,见表1。Simufact Additive软件采用固有应变法进行计算,在建造模块里分别输入表1中的3种工艺参数,使用计算器自动对默认固有应变值进行校正。使用Simufact Additive软件内置的网格划分模块,自动

生成锥形管及支撑的像素网格。对网格微元体进行限制,使其全部为相同尺寸的正方体。将每个像素体内包含零件模型的最小体积分数设为5%,以保证网格总数适当,同时兼顾了计算速度与稳定性。最终得到网格尺寸为1mm×1mm×1mm、像素数量为169956个、层数为39层的锥形管与支撑的有限元模型,如图2所示。在增材制造过程中,网格单元产生的应力超过材料极限强度时会发生塑性变形,软件将对其赋予固有应变值,层层叠加形成三维实体。

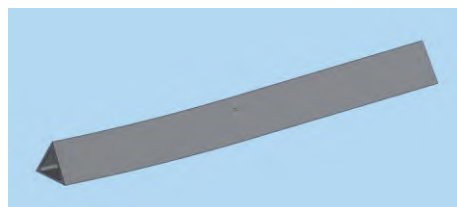


图1 TC4锥形管模型

表1 激光选区熔化成形工艺参数

参数组别	功率/W	速度/(mm/s)	层厚/mm
P1	340	1100	0.06
P2	310	1000	0.05
P3	340	1000	0.06

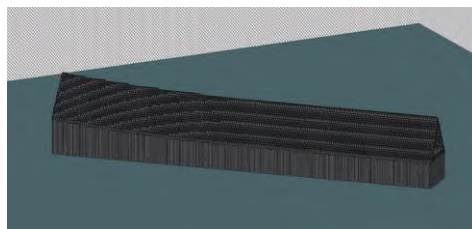


图2 有限元网格模型

2.2 TC4钛合金材料参数

使用软件材料库中的内置参数,其中包括化学成分、热物性能、流变曲线、各向异性等信息^[9]。针对某些非常见或新研制的材料,可以使用JMatPro进行合金预测,获得的数据可以导入Simufact Additive中作为计算依据。本文使用TC4钛合金作为成形基材,其化学成分见表2。在JMatpro软件中,输入合金成分、热处理温度及预测相,计算在不同温度下发生变形所需要力的大小。将计算数据导出,得到应变速率为0.1m/s时,不同温度下的应力-应变曲线(见图3),以此作为仿真全流程中,热处理部分软件的计算依据。

表2 TC4钛合金化学成分 (质量分数) (%)

C	O	N	H	Fe	Al	V	Ti
0.0068	0.01	0.014	0.0038	0.072	6.13	4.04	余量

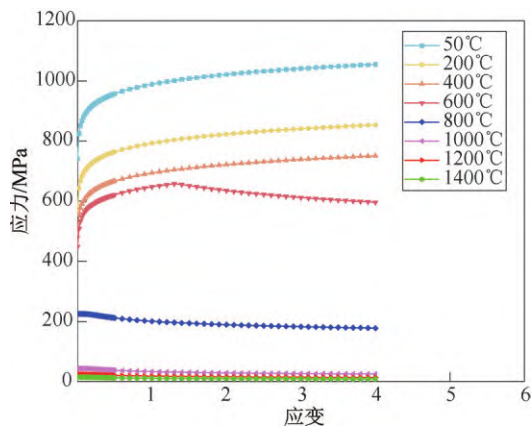


图3 TC4钛合金应力-应变曲线

2.3 求解器设置

为了保证计算过程的收敛性,将近17万的像素网格分成6个计算域,每个域内的网格数量适中。既不会降低计算速度,也不会影响计算的稳定性。检查所有网格,保证不存在大面积的低质量区域。将建造每一层的时间设置为1步长,使用Iterative Sparse求解器,其优势是在迭代过程中对收敛性的要求不会过于严苛,保证计算时不会报错停止。

3 激光选区熔化成形有限元模拟

3.1 不同参数下的等效应力场

图4所示为锥形管在P1、P2、P3的3种不同工艺参数下的等效应力场^[10],可以看到管口均出现应力集中,这种现象由截面突变引起,不利于控制零件尺寸。应力峰值从1015MPa降低至977MPa,变化率极小。当使用P1工艺时,可以看到图4a中管口尖端几乎完全被黄色区域占据,与图4b、c中的绿色区域相比,产生的应力更大。从能量密度的角度分析,说明在打印过程使用P1工艺会使零件整体存在更大的温度梯度,导致热应力更大。

3.2 不同参数下的形变量

图5所示为P1、P2、P3的3种不同工艺下的形变结果。由图5可看到,最大变形位置均出现在管口,这与应力场中的结果相同。三者的零件变形量普遍在0.43mm以下,峰值位置均未在零件上出现,说明峰值位于支撑部位。支撑的变形量要大于零

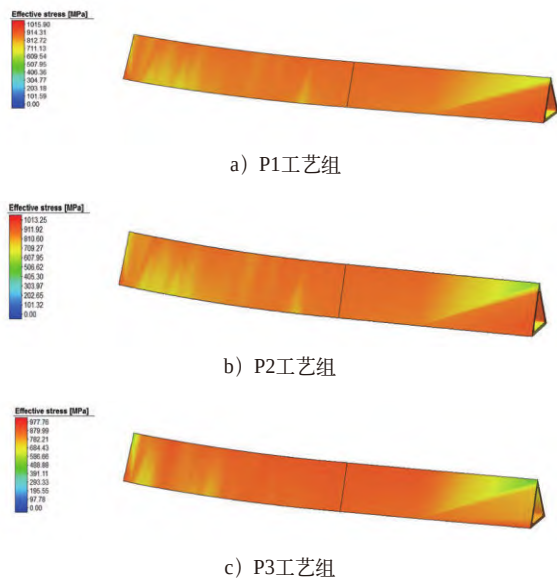


图4 不同工艺参数下的等效应力场

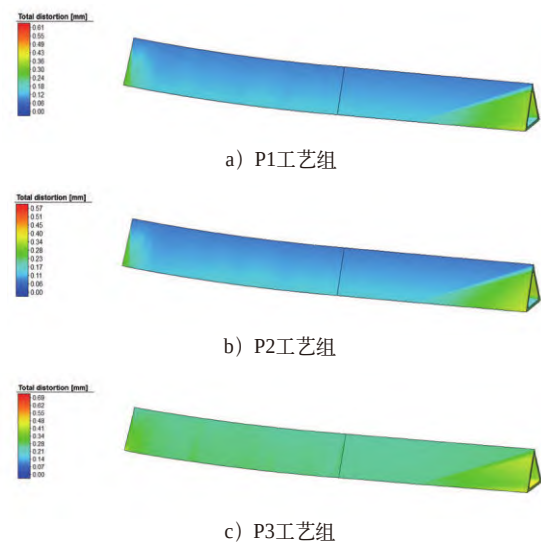


图5 不同工艺参数下的形变量

件,这是由于支撑方案中使用了近似于非实体的块状支撑,其本身强度较差。从整体变形趋势上可以看出,P3工艺的零件形变量大于P1与P2工艺,而P1工艺的峰值略大于P2。P2工艺下的结果中表明其支撑与零件的形变量为0.57mm,是3种方案中的最佳工艺,所以本文选择其进行后续研究。

4 支撑方案迭代的全流程仿真

4.1 支撑优化

在工艺选择过程中,发现横向摆放锥形管时,打印时出现截面突变的问题很难避免。在优化迭代时,更换其摆放方式,使管身垂直于平台,并制作

基底与基板连接。将零件镜像成组，中间使用超结构（BCC）单元连接^[11]，其优势是强度高于非实体支撑的同时兼顾了可去除性，如图6所示。成组打印的方案具备更好的稳定性，由于力的对称性，部分应力在打印过程中会互相抵消，因此更有利于控制尺寸^[12]。与单独打印相比，也能大幅提高成形效率^[13]。图7所示为迭代后的形变量结果。由图7可看到，最大变形量降至0.16mm，与横向摆放的方案相比降低了71%。超结构支撑几乎未发生位移，相比非实体支撑，刚性提高较大。

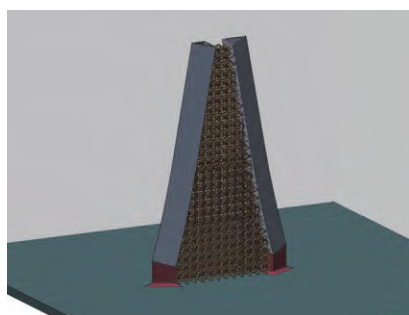


图6 支撑方案优化迭代

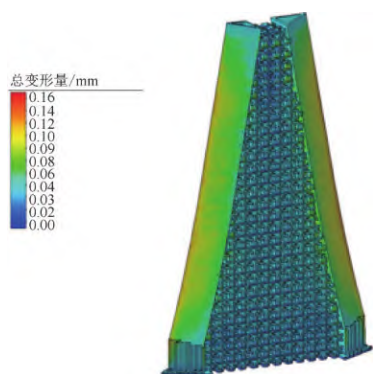


图7 迭代后形变量结果

4.2 热处理

增材制造成形的零件通常需要经过热处理调控组织，以保证力学性能^[14]。TC4钛合金利用激光选区熔化成形时，由于能量密度较低，冷却速度较快，组织中会存在大量马氏体，因此需进行退火处理，使马氏体分解成 $\alpha + \beta$ 。退火工艺如图8所示。在经历800℃保温2h冷却后，总形变量结果如图9所示。在升温过程中，残余应力逐渐释放。又由于流体特性，变形所需的力越来越小，导致零件部分区域存在位移。在零件顶部，由于只有超结构相连，而超结构的刚度明显低于实体基座，因此应力更多于薄弱处释放，管口形变量为0.32mm。

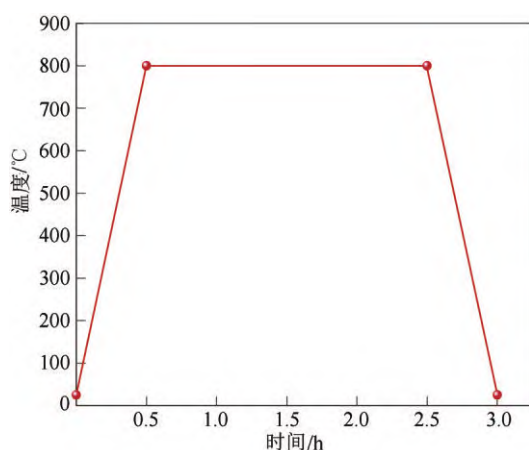


图8 退火工艺

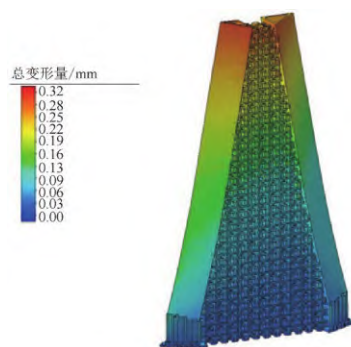


图9 退火后形变量结果

4.3 线切割、打磨处理

在零件完成热处理后，需要利用线切割工艺将其与基板分离。在这个过程中，残余应力再次释放，造成二次变形^[15]。将锥形管沿X方向从基板上去除，切割高度为2.5mm。线切割后变形量结果如图10所示。从图10可看到，最大变形量达到0.71mm，锥形管身大幅度变形。工艺仿真结果表明，这一阶段的形变量比热处理阶段更大，且后切

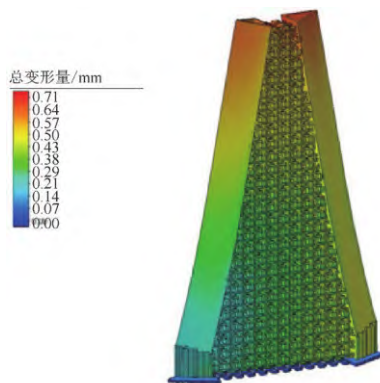


图10 线切割后形变量结果

除区域变形大于先切除区域。这是由于在仿真过程中，不同于热处理工艺中固有应变值的加载，线切割工艺将零件分离的过程涉及像素网格的刚体运动，运动过程中受影响的网格数量更多。线切割后，需要打磨多余支撑，由于大部分支撑都会与零件接触，因此在后处理时不可避免地会使零件再次变形。图11所示为打磨后的形变量结果。由图11可看到，其变形位置不再存在规律，最大值为1.07mm。

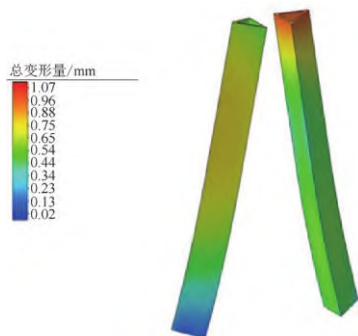


图11 打磨处理后形变量结果

5 点阵性能仿真优化

从前文中工艺仿真的全流程中可知，零件在经历多个工序时会存在多次变形，因此为了保证刚性，从设计方面优化出更有利于控制尺寸精度的结构便成了关键^[16]。以迭代后使用的BCC点阵为例，对其进行结构优化，并使用均质化法有限元的研究手段来评估其刚性改善程度，这种方法的优势是通过单胞进行取样，从而快速求解。先仿真预测杆径为0.5mm的BCC点阵杨氏模量，图12表明其杨氏模量为405.4MPa。由于点阵在实际加工时，连杆的连接处与零件无接触，因此选择在该位置加强可避免增加去除难度。如图13所示，使用半径为1mm的球形连接点与BCC胞元进行布尔合并，合并处设计R0.5mm的倒圆角。优化设计完成后再次预测杨氏模量，优化后的杨氏模量达到434.9MPa，点阵结构的刚性得到改善。加强后的BCC点阵不仅能在控形能力上得到提高，同时并未增加后处理的难度，全面呈现出良性变化。对优化前后的点阵进行参数化研究，分析预测壁厚0.5~1mm之间胞元的弹性模量。如图14所示，加强后BCC胞元的杨氏模量随壁厚增加而变大，当壁厚为1mm时，杨氏模量达到1700.6GPa。

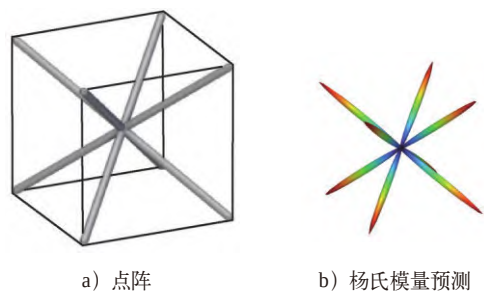


图12 BCC点阵杨氏模量预测

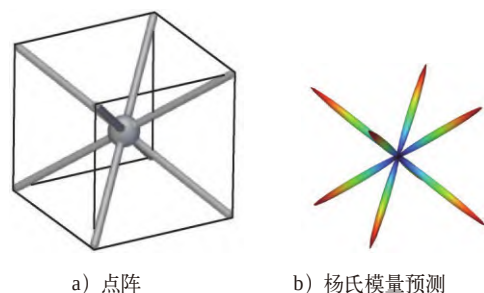


图13 优化后的BCC点阵晶胞元

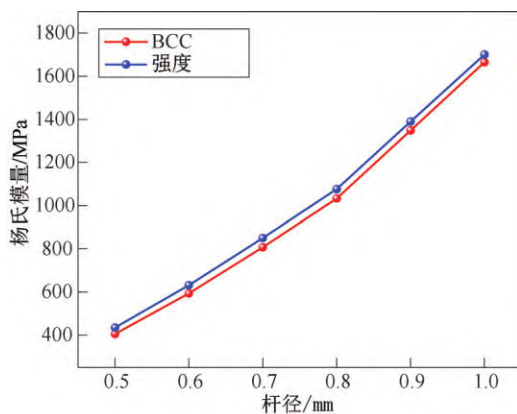


图14 不同壁厚点阵胞元的杨氏模量

6 结束语

1) 通过工艺仿真，比较3种不同激光选区熔化成形参数，发现当激光功率为310W、扫描速度为1000mm/s、层厚为0.05mm时，总变形量最小，打印锥形管时选用该参数。

2) 锥形管在横向摆放时，打印过程中截面突变问题无法避免。在更换为纵向摆放并使用超结构点阵辅助后，总变形量降低了71%。变形趋势由集中于管口变成均匀分散到管身。在后续热处理、线切割、支撑打磨阶段，变形量进一步增大至1.07mm，其中线切割对尺寸精度的影响最大。

3) 通过预测点阵胞元的杨氏模量来评估刚度，发现在使用球形连接点加强后，BCC胞元的杨氏模

量由405.4MPa提升至434.9MPa,同时未增加后处理打磨的难度。

参考文献:

- [1] 李亮亮, 槐艳艳, 王晓峰. 激光增材制造仿真过程分析[J]. 制造技术与机床, 2019 (6) : 69-74.
- [2] 姜旭, 周六如, 毕凤阳, 等. 激光选区熔化成形半圆孔悬垂结构变形及残余应力研究[J]. 制造技术与机床, 2023 (8) : 27-31.
- [3] 卢楚文, 牛犇, 王凯, 等. 电弧增材制造封闭路径控制策略研究[J]. 金属加工 (热加工), 2023 (8) : 104-109.
- [4] 樊永霞, 林彦, 敖庆波, 等. 增材制造Ti-6Al-4V点阵材料的研究进展[J]. 稀有金属材料与工程, 2023, 52 (10) : 3630-3639.
- [5] 靳逸飞, 丁永春, 温家浩. 立体光固化增材制造技术应用现状及展望[J]. 金属加工 (热加工), 2023 (3) : 18-23.
- [6] 吴代建, 权国政, 白晶斐, 等. 涡轮导向器激光选区熔化成形过程数值模拟分析[J]. 大型铸锻件, 2023 (4) : 6-9, 19.
- [7] 王宏宇, 黄金雷, 陈胜, 等. 基于Cu-Al-Fe合金的粉芯丝材增材制造理论及其温度场分析[J]. 焊接学报, 2023, 44 (4) : 111-119.
- [8] 杨李杰, 陈兴, 孙宝寿. TC4钛合金管振动辅助成形规律的仿真分析[J]. 热加工工艺, 2023, 52 (5) : 102-107.
- [9] 任丽丽, 刘金平, 冯英超. 金属部件送丝增材制

造工艺研究现状[J]. 金属加工 (热加工), 2017 (12) : 64-68.

- [10] 刘伟, 李素丽, 寇丹阳, 等. 不同扫描速度下金属熔丝增材制造应力应变场分析[J]. 焊接技术, 2023, 52 (7) : 1-5.
- [11] 王晓阳, 孙辽, 胡全栋, 等. 打印方向对SLM增材制造点阵结构力学性能的影响分析[J]. 航空制造技术, 2023, 66 (10) : 66-71.
- [12] 安晓龙, 吕云卓, 覃作祥, 等. 同轴送粉金属激光3D打印熔池流动、成分分布以及组织生长数值模拟的研究进展[J]. 材料导报, 2018, 32 (21) : 3743-3753.
- [13] 徐娜, 许路路, 何方成. 各向异性增材制造构件的超声阵列全聚焦成像[J]. 北京航空航天大学学报, 2023, 49 (5) : 1063-1070.
- [14] 马剑雄, 夏张文, 周伟民. 金属增材制造技术的发展与展望[J]. 金属加工 (热加工), 2022 (3) : 22-27.
- [15] LIU G, SU Y G, XIN S W, et al. Enhanced wear resistance of Ti reinforced Inconel 718 superalloy manufactured by laser directed energy deposition[J]. Materials Characterization, 2024, 209: 113736.
- [16] LIU G, SU Y G, PI X Y, et al. Achieving high strength 316L stainless steel by laser directed energy deposition-ultrasonic rolling hybrid process[J]. Materials Science & Engineering: A, 2024, 903: 46665.

MW 20241224

(上接第27页)

光增材修复关键工艺优化[J]. 焊接学报, 2024, 45 (6) : 30-38.

- [30] KAIMING W, ZHENLIN Z, DINGDING X, et al. Research and progress of laser cladding: Process, materials and applications[J]. Coatings, 2022, 12 (10) : 1382-1382.
- [31] TAMANNA N, CROUCH R, NAHER S. Progress in numerical simulation of the laser cladding process[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2019, 122: 151-163.
- [32] ZHU L D, XUE P S, LAN Q, et al. Recent research and development status of laser cladding: A review[J]. Optics and Laser Technology, 2021,

138: 106915.

- [33] ULLAH Z A, YASIR M K, EHTSHAM R U, et al. A review on laser cladding of high-entropy alloys, their recent trends and potential applications[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 68: 225-273.
- [34] LIANG W X, YANG Y, QI K, et al. Quality evaluation of multipath laser cladding coatings based on integrated fuzzy comprehensive evaluation and improved analytical hierarchy process method[J]. Surface & Coatings Technology, 2021, 427: 127816-127826.

MW 20241123