考虑比能耗、能量利用率和高宽比的激光定向能量沉积工艺参数优化及性能分析

费 凡[1] 吴剑钊[1,2*] 仲刘洋[1] 张超勇[2] 刘文辉[1] 刘 筱[1]
1.集美大学海洋装备与机械工程学院,厦门,361021
2.华中科技大学机械科学与工程学院,武汉,430074

摘要:针对激光定向能量沉积制备TC4钛合金,以激光功率、扫描速度和粉末进给速度为主要工艺参数,采用$L_{16}(4^3)$正交试验设计,系统研究了各工艺参数对能量利用率、比能耗及沉积层高宽比的影响规律。通过极差分析与方差分析,明确了各参数对能效与形貌指标的影响显著性,并确定了优化的工艺参数组合(激光功率800 W,扫描速度600 mm/min,粉末进给速度6 g/min)。试验验证表明,相较于正交试验组的平均值,该优化参数下比能耗与高宽比偏差分别改善了21.8%与69.5%,且能量利用率提高了22.4%;微观组织分析显示,沉积层主要由细小的针状α′-Ti马氏体组成,其平均晶粒尺寸小于轧制态基板;力学性能测试表明,沉积态TC4硬度、屈服强度与抗拉强度相较于轧制基板提高25.63%、9.94%和9.60%,但延伸率略有下降,断口呈韧-脆混合断裂特征。

关键词:增材制造;激光定向能量沉积;比能耗;工艺优化;力学性能
中图分类号:TG665;TB31
DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2026.10.009 **开放科学(资源服务)标识码(OSID)**:

Optimization of Process Parameters and Performance Analysis of Laser Directed Energy Deposition Considering Specific Energy Consumption, Energy Utilization Rate, and Height-to-width Ratio

FEI Fan[1] WU Jianzhao[1,2*] ZHONG Liuyang[1] ZHANG Chaoyong[2] LIU Wenhui[1] LIU Xiao[1]
1.College of Marine Equipment and Mechanical Engineering, Jimei University, Xiamen, Fujian, 361021
2.School of Mechanical Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, 430074

Abstract: The preparation of TC4 titanium alloy via LDED was investigated. Taking laser power, scanning speed, and powder feed rate as the primary process parameters, an $L_{16}(4^3)$ orthogonal experimental design was employed to systematically investigate the influence of these process parameters on energy utilization rate, specific energy consumption, and the height-to-width ratio of the deposited layer. Through range analysis and variance analysis, the significance of the influence of each parameter on the energy efficiency and morphology indicators was clarified, and the optimized combination of process parameters was determined (laser power: 800 W, scanning speed: 600 mm/min, powder feed rate: 6 g/min). Experimental verification showed that, compared with the average values of the orthogonal test groups, the specific energy consumption and the deviation of the height-to-width ratio were improved by 21.8% and 69.5%, respectively, under the optimized parameters, while the energy utilization rate increased by 22.4%. Microstructural analysis showed that the deposited layer primarily consists of fine acicular α′-Ti martensite, with an average grain size smaller than that of the rolled substrate. Mechanical property tests indicated that the as-deposited TC4 exhibited increases in hardness, yield strength, and tensile strength of 25.63%, 9.94%, and 9.60%, respectively, compared to the rolled substrate, although the elongation slightly decreased. The fracture surface exhibited ductile-brittle mixed fracture characteristics.

Key words: additive manufacturing; laser directed energy deposition (LDED); specific energy consumption; process optimization; mechanical properties

0 引言

激光定向能量沉积(laser directed energy deposition, LDED)是激光增材制造领域的一种典

收稿日期:2025-11-30
基金项目:国家自然科学基金(52505557);福建省中青年教师教育科研项目(科技类)重点项目(JZ230028);厦门市自然科学基金(3502Z202473058)

型工艺。与其他类型的激光增材制造技术(如选择性激光熔化(SLM)[1]相比,LDED采用高能量激光束将粉末材料直接沉积到基板上,具备更快的沉积速率、更广泛的材料选择以及向现有结构添加材料的能力[2],可用于修复和再制造被磨损或损坏的零部件,以及制备耐腐蚀涂层[3]。然而,LDED因能量密度要求高、零件制造时间长、能量吸收效率低而存在高能耗和低能效的缺点。根据YOON等[4]的研究,金属激光增材制造的比能耗比传统成形工艺高100倍左右。GEDDA等[5]对二氧化碳激光熔覆过程中激光能量的吸收和损失研究表明,激光器输入能量的60%因粉末颗粒和熔池表面的反射而损失,30%的能量因热传导而损失,仅10%的能量被吸收用于零件成形。因此,充分了解LDED工艺过程中能量吸收和耗散的情况并对该过程的能源效率进行优化尤为重要。

当前,已有学者进行了增材制造过程中设备能源消耗减少的研究。JIANG等[6]针对激光设备不同部分在增材制造过程中的启停行为建立了能耗模型,并通过优化算法获得了最优的工艺参数。WU等[7]提出了一种基于变邻域搜索基因表达式编程与黑箱代理模型的集成建模方法,结合非支配排序遗传算法(NSGA)形成优化方法体系,显著提高光纤激光焊接设备的能源效率。LI等[8]提出了一种结合代理模型集成与多目标遗传算法的混合优化方法,并通过试验表明该方法能有效提高SLM设备的能源效率。

除此之外,也有部分学者聚焦于激光增材制造工艺过程中的能源效率优化开展研究。GAO等[9]建立了工艺层面的能效量化模型并通过NSGA-Ⅱ算法在几何外观约束下对工艺参数进行优化,该方法在保证沉积层几何形状的前提下,将能量效率提高了6.78%。上述研究表明,通过数据驱动、参数优化等方法可有效提高增材制造的能源效率。

在追求节能优化的同时,高成形质量同样是LDED工艺发展的重要需求。近期研究在成形质量的数字化预测与复杂结构控制方面取得了重要进展,NIU等[10]提出了图像-物理双驱动的机器学习框架,通过实时监测数据显著提高了沉积层截面几何预测的精度;针对大悬垂薄壁件等复杂构件,ZHANG等[11]通过优化环形激光沉积工艺,有效改善了薄壁结构的成形质量与尺寸精度。这些研究表明,精确的几何形貌调控是提高LDED零件服役性能的关键。

尽管数字化手段提高了特定场景下的成形质量,但如何在普适性工艺调控中实现能效与质量的协同提高,并揭示其背后的能量分配机制,仍是当前亟待解决的关键课题。LDED工艺过程涉及复杂的热循环过程[12],激光功率、扫描速度和粉末进给速度这3个工艺参数在很大程度上决定了LDED工艺过程的能量密度,而能量密度则决定了LDED工艺过程中的热行为,能量密度不足会增加熔覆层的孔隙率,但能量密度过高会造成飞溅和能量浪费等问题,能量密度的适当控制不仅可以获得有利的微观组织和机械性能,还能实现较高的能源效率[13]。目前,已有部分学者完成了对SLM工艺成形质量与能源效率的多目标优化。ZHU等[14]通过定量评估SLM制备316L不锈钢过程中能耗与力学性能演变速率间的非线性耦合逻辑,论证了在维持材料综合性能的前提下实现工艺节能的物理可行性。PENG等[15]进一步量化了工艺参数对AlSi10Mg合金成形质量及能效的影响特征,通过多目标参数寻优策略,在满足零件质量约束的同时实现高达27.8%的节能增效。

LDED的能源效率需综合考虑设备能耗和截面形貌之间的耦合关联,而针对能源效率与成形质量协同优化所需考虑的指标繁多,且指标之间关系复杂,目前该领域针对这一方向的研究相对较少。本文聚焦于LDED制备TC4钛合金工艺层面的能源效率与成形质量,采用$L_{16}(4^3)$正交试验设计方法,考察激光功率、扫描速度和粉末进给速度这3个主要工艺参数对LDED过程能源效率和沉积层几何形貌的影响。

1　材料和方法

1.1　试验材料

试验选用Ti-6Al-4V钛合金板作为基板材料。基体尺寸为100 mm×100 mm×20 mm。选用的Ti-6Al-4V钛合金粉末粒径范围为53～105 μm,其化学成分如表1所示。

表1　Ti-6Al-4V的化学成分(质量分数)

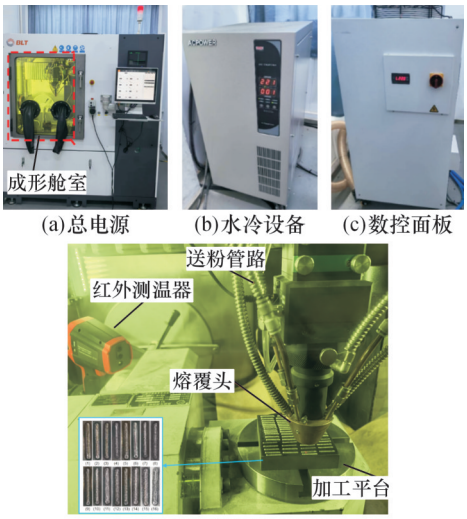
Tab.1　Chemical composition of Ti-6Al-4V(mass friction)

Ti	Al	V	Fe
余量	5.5～6.75	3.5～4.5	≤0.30
C	N	H	O
≤0.08	≤0.05	≤0.008	≤0.20

1.2　试验方法

试验前采用砂纸对基板进行打磨以去除表面氧化膜和杂质,然后使用无水乙醇清洗基板以去除油污,为随后的激光定向能量沉积做准备。为去除粉末中的水分并增强粉末流动性,在试验之前将粉末置于真空干燥箱中在120 ℃下干燥2 h。

试验采用西安铂力特股份有限公司研发的BLT-C400型设备，该设备采用最大功率2 kW、波长1070 nm的激光器，其激光系统示意图见图1。试验中设置激光束光斑直径为2.4 mm、打印长度为18 mm。熔覆头位于基板上方25 mm处。沉积制备的样品均为单道单层。在试验完成后，将制备好的单道试样经电火花线切割加工获取沉积层横截面样本后，采用金相镶嵌法固定试样，使用铝砂纸和金刚石悬浊液对镶嵌好的样品进行磨砂和抛光，之后，采用Kroll试剂对沉积层进行腐蚀。为确保试验数据的准确性与代表性，在每个沉积单道起点终点外的稳定段选取个截面进行取样，采用激光共聚焦显微镜对处理后的样品截面形貌进行观测，并对沉积层的各项参数进行3次重复测量，取其平均值作为试验数据以消除单次制样测量可能带来的随机误差。



(a)总电源 (b)水冷设备 (c)数控面板

(d)成形舱室放大图

图1 LDED试验平台

Fig.1 Experimental platform of LDED

1.3 正交试验设计

根据文献[15]，选定对LDED沉积层成形质量和能量效率影响显著的3个工艺参数作为正交试验的因子，即激光功率(A)、扫描速度(B)、粉末进给速度(C)。每个因子设置4个不同的水平，如表2所示。采用$L_{16}(4^3)$正交试验表，共进行16组试验，具体的工艺参数组合见表3。试验过程中采用高纯氩气作为保护气体，打印过程中载粉气流量为8 L/min，同轴保护气流量为28 L/min。

表2 正交试验因素与水平

Tab.2 Factors and levels of the orthogonal experiment

水平	因素A/W	因素B/(mm·min^{-1})	因素C/(g·min^{-1})
1	650	450	2.4
2	700	500	3.6
3	750	550	4.8
4	800	600	6.0

表3 $L_{16}(4^3)$正交试验方案

Tab.3 $L_{16}(4^3)$ orthogonal experimental array

序号	因素A	因素B	因素C	序号	因素A	因素B	因素C
1	1	1	1	9	3	1	3
2	1	2	2	10	3	2	4
3	1	3	3	11	3	3	1
4	1	4	4	12	3	4	2
5	2	1	2	13	4	1	4
6	2	2	1	14	4	2	3
7	2	3	4	15	4	3	2
8	2	4	3	16	4	4	1

2 结果与分析

2.1 沉积层宏观形貌

16组不同工艺参数下制备的沉积单道均未出现断裂、飞溅或表面裂纹等明显缺陷，这表明该LDED工艺具有良好的稳定性。图2为典型的LDED沉积层截面，并标明了沉积层高度h、宽度w、深度d以及增材面积S_d和重熔面积S_{re}。在LDED过程中，高能激光束不仅将金属粉末熔化，也一定程度上将基板或先前沉积的层熔化，形成重熔区域，重熔区域使新沉积的材料与之前沉积的材料形成牢固的结合，但过大的重熔区域也会造成能源效率降低和加工缺陷的产生[16]。在不同的工艺参数组合下，沉积层的截面几何形貌存在显著差异，具体表现在熔宽w、熔高h以及熔池深度d。显微观察结果表明，沉积层与基板间实现了良好的冶金结合，其界面连续、无尖锐过渡，熔池内也无明显未熔合、热裂纹等缺陷。

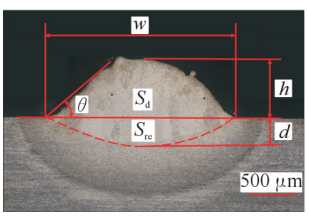


图2 典型的LDED沉积层截面

Fig.2 Cross-sectional morphology of a representative LDED deposit deposited layer

2.2 过程能量表征

在LDED过程中，激光系统输入的总能量可分为粉末流相互作用能量和传输能量两部分。激光与粉末流相互作用能量包括粉末颗粒反射的能量、飞溅物吸收的能量、粉末颗粒加热及相变所吸收的能量[5]。传输能量由熔池反射的能量和熔池吸收的能量所组成，熔池吸收的能量部分用于熔池的加热和相变所需的焓变，剩余的能量则以热对流、热辐射、热传导的方式散失到基板上。这种能量分配机制如图3所示，它直接影响激光输入能量的利用效率和成形过程的能量消耗。

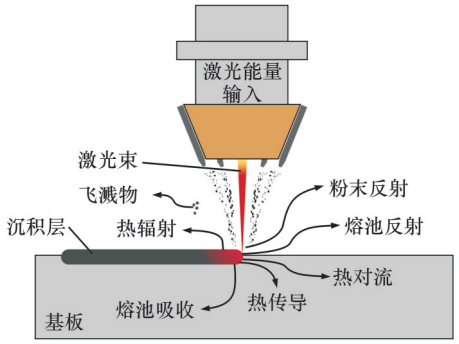


图3　LDED过程能量分配

Fig.3　Energy distribution in the LDED process

在LDED过程中，总能量输入$E_{tot}=pt$是激光器输入的能量，受激光功率P和激光使能持续时间t的影响。总能量输入由有效能量E_c和能量损失E_l组成，$E_{tot}=E_c+E_l$，其中有效能量E_c定义为将金属粉末和基板上位于熔池部分的金属从初始环境温度加热至熔池峰值温度所需吸收的热能。假设金属粉末和基板为同一种材料，基于材料热力学焓变理论，E_c的计算式为

$$E_c=\rho S v_s t\left(\int_{T_a}^{T_m} c(T)\mathrm{d}T+\Delta H\right) \tag{1}$$

式中：ρ为基板材料和粉末材料的密度；S为熔池总面积，$S=S_d+S_{re}$；v_s为扫描速度；$c(T)$为材料质量热容；T_m为熔池峰值温度；T_a为环境温度；ΔH为熔化潜热。

能量损失E_l由熔池反射的能量E_A、金属粉末反射的能量E_B、热辐射损失的能量E_D、热对流损失的能量E_E、热传导损失的能量E_F、飞溅物所吸收的能量E_G所组成，即

$$E_l=E_A+E_B+E_D+E_E+E_F+E_G \tag{2}$$

为评估工艺参数对LDED过程能源效率的影响，本文将能量利用率R_{EU}、比能耗E_S、高宽比α作为评估LDED过程能效和沉积层几何形貌的指标，熔池的各项参数都将被用作表征这些指标的关键因素。

2.2.1　能量利用率

能量利用率R_{EU}指LDED工艺过程中有效能量E_c占总能量输入的百分比，表示为

$$R_{EU}=E_c/E_{tot} \tag{3}$$

R_{EU}主要表征的是形成熔池和加热沉积层占总能量输入的比例，它无法直观反映总能量输入中有多少能量被直接用于驱动粉末熔化从而完成材料的逐层累加。增材制造技术的最终目标是消耗更少的能量获得更多更好的增材制造产品，在考虑能量效率的前提下，期望将更多的能量用于熔化金属粉末并避免在基板上形成过大的熔池，因此，引入比能耗E_S作为一种额外的过程能效指标，以更合理地评估LDED过程的能源效率。

2.2.2　比能耗

比能耗E_S指LDED过程中沉积单位质量的金属所消耗的能量，表达式为

$$E_S=\frac{E_c+E_l}{\rho S_d v_s t} \tag{4}$$

由式(4)可知，在总能量输入不变的情况下，增材面积S_d越大，重熔面积S_{re}越小，则E_S值就越小，即增材制造单位质量金属所需的能量就越少。

2.2.3　高宽比

高宽比定义为沉积层高度与宽度的比值，表达式为

$$\alpha=h/w \tag{5}$$

然而，在实际沉积过程中，实测高宽比与理想高宽比之间会存在差异，需采用高宽比偏差进行衡量，表达式为

$$\Delta\alpha=|\alpha-25\%| \tag{6}$$

高宽比不仅是评估沉积层几何形貌的重要指标，更直接关联着LDED过程的能量效率与成形质量。当高宽比较低时，金属粉末在高度方向的沉积速度受限，完成特定高度的样件需要更多扫描层数，会导致能量与粉末消耗显著增加；反之，过高的高宽比则可能引发层间结合强度下降及未熔合等缺陷。根据试验经验，将沉积层的高宽比控制在20%～30%是一个合理的范围。

2.3　正交试验结果

本文采用前述测量方法对16组单道沉积层试样的稳态区域进行多截面取样表征。统计结果表明，所有横截面几何形貌测量数据的平均误差均小于3%，有效排除了随机误差对规律分析的干扰。根据沉积层几何形貌的测量数据计算得到能量利用率R_{EU}、比能耗E_S和高宽比α，结果如图4所示。图5展示了各项能效指标与LDED工艺参数之间的关系。如图5a所示，当粉末进给速度为定值时，减小扫描速度并选择适中的激光功率能有效降低E_S；如图5b所示，当扫描速度为定值时，同时增大激光功率和粉末进给速度能提高R_{EU}；如图5c所示，当激光功率为定值时，减小粉末进给速度并增大扫描速度能减小高宽比，从而提高沉积层的成形质量。

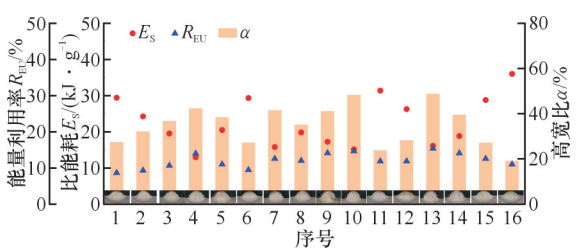
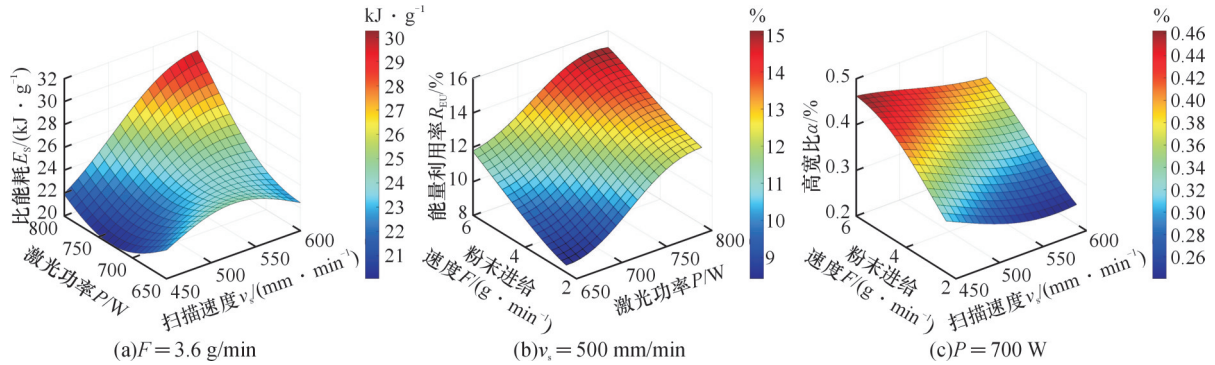


图4　正交试验测量计算结果

Fig.4　Outcomes from the orthogonal experimental tests



(a)F=3.6 g/min (b)v_s=500 mm/min (c)P=700 W

图5 能效指标与LDED工艺参数的关系

Fig.5 Relationship between energy efficiency indicators and LDED process parameters

2.4 极差分析与方差分析

为探究工艺参数对沉积层能源效率的影响程度，对图4中能量利用率R_{EU}、比能耗E_S和高宽比α进行极差分析与方差分析，以揭示各因素对各相应变量的影响显著性与主次顺序，并确定优化工艺参数组合。

极差分析通过量化各因素对响应变量的影响程度，以确定主次关系。各因素极差分析结果如表4所示。其中，K_i定义为某一因素在第i水平下的各试验响应值的总和，各试验响应值的平均值记为k_i。极差R定义为该因素在所有水平下平均响应值k_i的最大值与最小值之差，它的大小反映了该因素对响应变量的敏感程度，R值越大，表明该因素的水平变化对响应指标的影响越显著[16]。

表4 极差分析结果

Tab.4 Range analysis results

统计量	能量利用率			比能耗			高宽比		
	因素A	因素B	因素C	因素A	因素B	因素C	因素A	因素B	因素C
K_1	42.64	49.19	41.01	86 120.21	83 241.71	126 004.43	138.51	155.54	97.54
K_2	45.11	47.52	44.80	85 382.96	87 494.52	99 726.82	142.06	146.97	125.74
K_3	52.52	47.71	50.91	89 966.55	95 421.67	75 399.90	141.34	129.14	152.35
K_4	53.08	48.92	56.63	99 691.26	95 003.08	60 029.83	134.51	124.77	180.79
k_1	10.66	12.30	10.25	21 530.05	20 810.43	31 501.11	34.63	38.88	24.39
k_2	11.28	11.88	11.20	21 345.74	21 873.63	24 931.71	35.51	36.74	31.44
k_3	13.13	11.93	12.73	22 491.64	23 855.42	18 849.97	35.34	32.29	38.09
k_4	13.27	12.23	14.16	24 922.81	23 750.77	15 007.46	33.63	31.19	45.20
R	2.61	0.42	3.91	−3577.07	−3044.99	−16493.65	−1.89	−7.69	−20.81
因素主次顺序	C>A>B			C>A>B			C>B>A		
因素最佳水平	4	1	4	2	1	4	4	4	1

方差分析则是在给定显著性水平(通常取α_0=0.05)下，用于统计判定各因素对响应变量的影响是否具有统计学显著性的数学方法。各因素方差分析结果如表5所示。其中，平方和Sj用于衡量由不同因素所引起的响应数据变异的大小；自由度df为每个变异来源相关联的独立信息的数量，对于具有k水平的因素，其自由度df=k−1；均方MS为平方和与其自由度之比，反映了平均变异量；F^*值为某因素的均方与误差均方之比，是判断该因素效应是否显著的统计量，F^*值越大，说明该因素所造成的变异远高于随机误差，其影响越显著；P^*值表示在零假设(即该因素对响应变量无显著影响)成立的条件下观察到当前F^*值或更极端情况的概率，P^*值小于或等于显著性水平α_0时，则拒绝零假设，认为该因素对响应变量具有显著影响，反之，则认为该因素对响应变量的影响不具有统计学显著性[17]。

2.4.1 能量利用率

由能量利用率的极差分析结果(表4)可知，粉末进给速度(因素C)的极差值R为3.91，高于其他因素，这说明粉末进给速度是影响能量利用率的主要因素。由方差分析结果(表5)可知，激光功率(因素A)和粉末进给速度的F^*值分别为10.712和18.298，对应P^*值均小于显著性水平0.05，说明上述因素对能量利用率的影响具有统计学显著性，剩余因素的P^*值大于0.05，该因素效应不显著。图6直观展示了各因素平均水平对能量利用率的影响。

表5　方差分析结果

Tab.5　ANOVA results

方差来源		平方和 Sj	自由度 df	均方 MS	F^*	P^*	显著性(α_0=0.05)
能量利用率	因素A	20.720	3	6.907	10.712	0.008	显著
	因素B	0.529	3	0.176	0.274	0.843	不显著
	因素C	35.393	3	11.798	18.298	0.002	显著
比能耗	因素A	32 488 603.690	3	10 829 534.563	3.808	0.077	不显著
	因素B	26 510 073.075	3	8 836 691.025	3.107	0.110	不显著
	因素C	625 491 795.136	3	208 497 265.045	73.310	<0.001	显著
高宽比	因素A	8.804	3	2.935	0.903	0.493	不显著
	因素B	159.185	3	53.062	16.335	0.003	显著
	因素C	954.656	3	318.219	97.961	<0.001	显著

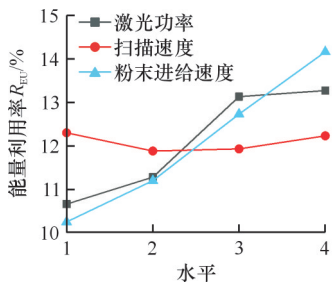


图6　各因素平均水平对能量利用率的影响

Fig.6　Main effects plot of process parameters on R_{EU}

2.4.2　比能耗

由比能耗的极差分析结果(表4)可知，由于比能耗的定义为增材制造每单位质量金属所消耗的能量，因此比能耗的值越小越好。其中，粉末进给速度的极差值 R 为－16493.65，高于其他因素，这说明粉末进给速度是影响比能耗的主要因素。从表5的方差分析结果中可以看出，粉末进给速度的 F^* 值达到73.310，其对应 P^* 值远小于显著性水平0.05，说明粉末进给速度因素对比能耗具有显著影响，其余因素对应 P^* 值均大于0.05，无显著影响。图7直观展示了各因素平均水平对比能耗的影响。

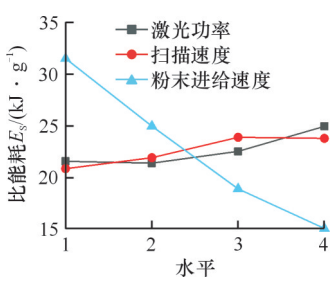


图7　各因素平均水平对比能耗的影响

Fig.7　Main effects plot of process parameters on E_S

2.4.3　高宽比

据前文所述，高宽比为20%到30%的沉积单道可以在获得较好的能源效率的同时提高成形质量，而正交试验中绝大部分试验的高宽比均大于20%，为实现更优的沉积层质量，仍需进一步降低高宽比，因此设定高宽比越小越好。表4高宽比的极差分析结果显示 R(C)>R(B)>R(A)，表明粉末进给速度对高宽比的影响最大。结合表5的方差分析来看，扫描速度(因素B)和粉末进给速度的 F^* 值均较大，对应 P^* 值均小于显著性水平0.05，说明上述因素对高宽比的影响具有统计学显著性。图8直观展示了各因素平均水平对高宽比的影响。

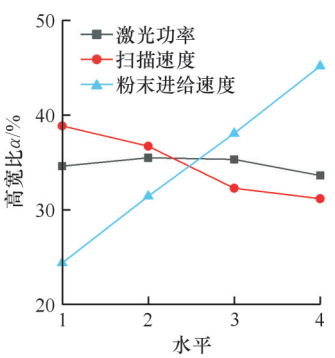


图8　各因素平均水平对高宽比的影响

Fig.8　Main effects plot of process parameters on α

2.4.4　优化工艺参数组合决策

由于能量利用率、比能耗与高宽比的最优工艺水平存在冲突，故确定最终的优化组合需进行多目标权衡。本文的优化原则是：在确保沉积层冶金结合质量的前提下优先提高能源效率，同时将高宽比控制在合理的工程窗口即20%～30%内。分析表明，粉末进给速度(C)对 R_{EU}、E_S 具有极为显著的影响。C4水平能同时最大化 R_{EU} 和最小化 E_S，虽导致单道高宽比增加，但该形貌偏差可通过调整其余工艺参数予以补偿。对于激光功率(A)，A4水平对提高 R_{EU} 最为有利。对于扫描速度(B)，B4水平在可接受的 E_S 范围内，能最有效地降低高宽比并提高制造效率。因此，权衡上述因素，确定优化工艺参数组合为A4B4C4，即激光功率800 W、扫描速度600 mm/min、粉末进给速度6 g/min。

3 优化工艺参数组合试验验证与组织性能分析

3.1 试验验证

对正交试验结果分析所得到的优化工艺参数组合进行试验，所得沉积层横截面形貌如图9所示，表现出较为良好的截面形貌，未发现明显孔隙、未熔合等缺陷。对横截面进行测量得到该沉积层宽度 w=2202.2 μm、高度 h=616.1 μm、深度 d=371.6 μm、增材面积 S_d=1 023 276.7 μm²、重熔面积 S_{re}=496 263.2 μm²。根据上述数据计算得到各评价指标分别为：E_S=17 648 J/g、R_{EU}=14.78%、$\Delta\alpha$=2.98%。与之前的正交试验组相比，E_S 与 $\Delta\alpha$ 较正交试验组平均值降低了21.8%与69.5%，而 R_{EU} 则比正交试验组的平均值提高了22.4%，有效验证了优化工艺参数组合的效果。

为进一步剖析LDED过程的能量分配机制与组织演变规律，引入具有较高线能量密度的对照试验组A4B1C1，即激光功率800 W、扫描速度450 mm/min、粉末进给速度2.4 g/min。试验测得该对照组的沉积层 w=2327.2 μm、h=331.3 μm、d=523.9 μm、S_d=513 458.2 μm²、S_{re}=967 353.6 μm²，计算得出该对照组的 E_S=46 894 J/g，R_{EU}=12.37%，$\Delta\alpha$=10.76%。图9展示了优化工艺参数、对照试验组工艺参数、正交试验组平均值的能效与质量数值。

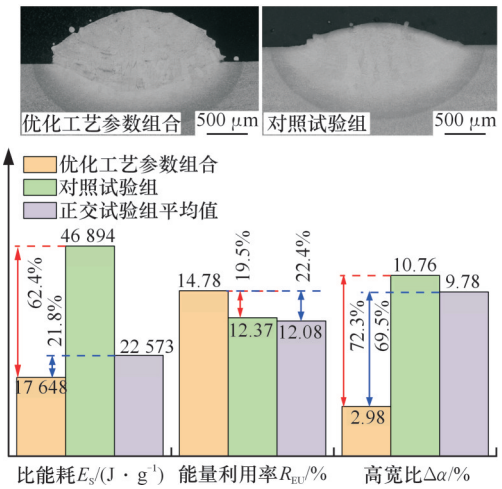


图9 优化工艺参数组合下沉积层横截面形貌及评价指标对比

Fig.9 Cross-sectional morphology and evaluation metrics

对比分析发现，优化工艺参数组合展现出了显著的能效优势。在A4B1C1组合下，由于扫描速度较低且粉末进给不足，激光能量在抵达基材前缺乏足够的粉末颗粒对激光能量进行吸收，导致过剩的能量直接作用于基板，造成重熔面积 S_{re} 与比能耗 E_S 的显著升高。相比之下，优化工艺参数组合采用较大的粉末进给速度，使激光能量更多地用于加热入射的粉末；同时，较高的激光功率将促使更多粉末熔化并进入熔池，进而扩大熔池尺寸，相较于熔化因热传导而能耗较高的基板，熔化射入熔池的金属粉末可实现更为高效的能量利用[18]。优化工艺参数组合中 R_{EU} 的提高则可用文献[16]中焊接过程半经验模型来解释，该模型如下：

$$R_{EU}=\eta_{tra}0.5\exp\left(\frac{-175}{\eta_{tra}Pv_s/(\Delta H_{tot}\beta\nu)}\right) \tag{7}$$

式中，η_{tra} 为激光能量传递效率；ΔH_{tot} 为熔化所引起的总焓变，J/g；β 为热扩散系数，m²/s；ν 为熔点处的运动黏度，m²/s。

由式(7)可知，在设定的工艺窗口内，当激光功率或扫描速度增大或二者同时增大时，R_{EU} 也随之提高，但扫描速度对 R_{EU} 的增益存在物理上限，R_{EU} 无法随扫描速度的无限增大而持续提高，因为这种情况将导致激光能量传递到基板或先前沉积的层上的时间不足[16]。而实现更低的 $\Delta\alpha$ 则归因于较高的扫描速度。扫描速度的增大有效限制了熔池的横向铺展，从而有助于形成形貌更为稳定、尺寸更可控的沉积层[19]。因此，在本文的工艺窗口内，选择较高的激光功率、扫描速度及粉末流速有助于提高激光加工过程中的能源效率。

沉积态TC4钛合金块体的打印策略如图10所示，其工艺参数采用优化工艺参数组合A4B4C4和对照试验组A4B1C1，相邻两道扫描路径的间距为0.5w，层厚为沉积单道高度，相邻两层之间扫描方向旋转顺时针45°，根据该策略打印出长50 mm、宽20 mm、高10 mm的沉积态TC4钛合金块体。拉伸试样的样品从该块体上沿垂直于打印方向采用电火花线切割制取，试样尺寸为45 mm×15 mm×2.5 mm。

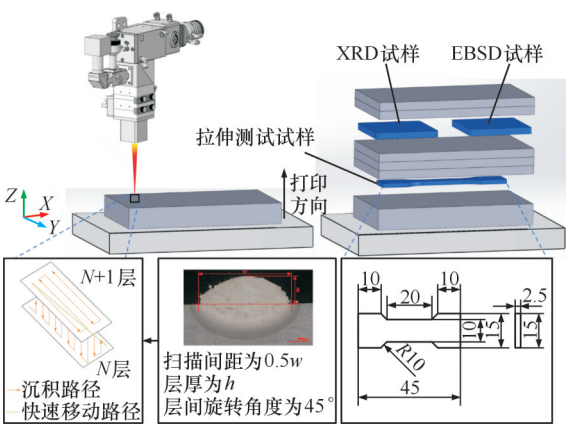


图10 块体打印策略

Fig.10 The bulk deposition strategy

3.2　沉积层的组织性能分析

3.2.1　微观组织分析

对于增材制造零件的组织分析与性能评价，将沉积零件与同材质的基板进行对比在相关研究中较为常见[20]。图11所示为TC4钛合金基板和TC4钛合金沉积件的X射线衍射(XRD)图谱。沉积层与基体的主要衍射峰均对应于TC4钛合金中的α-Ti相。沉积态TC4合金的相组成以α-Ti为主，这是由于LDED过程的冷却速率远超过形成平衡β相的临界冷却速率，导致β相的形成和稳定化所需的时间不足，而这种快速冷却条件有利于α相的形成并以过饱和固溶体α′-Ti马氏体形式存在[21]。虽然快速冷却抑制了β相的大规模转变，但图谱中仍检测到微弱的β衍射峰，说明沉积组织中仍保留了少量β相。

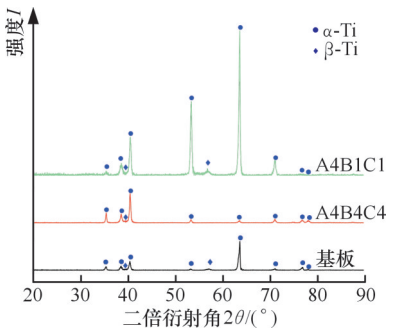


图11　沉积层与基板的XRD图谱

Fig.11　Comparative XRD patterns of the deposited layer and the substrate

图12所示为优化工艺参数组合、对照试验组所对应的沉积层与基板(图中从左到右排列)的电子背散射衍射(EBSD)测试结果。图12a展示了沉积层与基板上的TC4钛合金晶粒形貌。在优化工艺参数组合下，沉积层呈现出细化且分布均匀的微观组织，其特征为高度致密的针状α′-Ti马

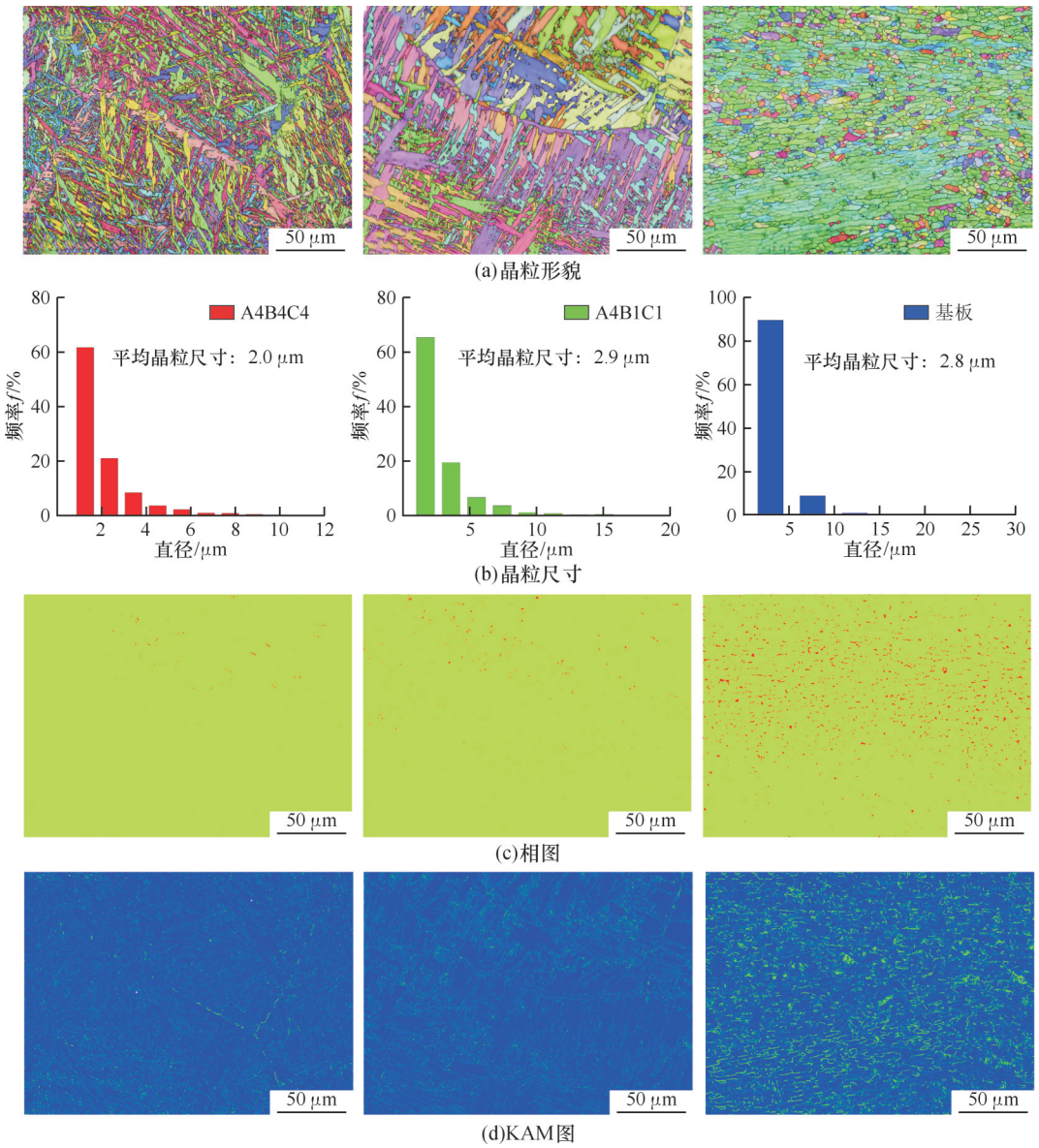


图12　优化工艺参数沉积层、对照试验组沉积层、基板的EBSD测试结果

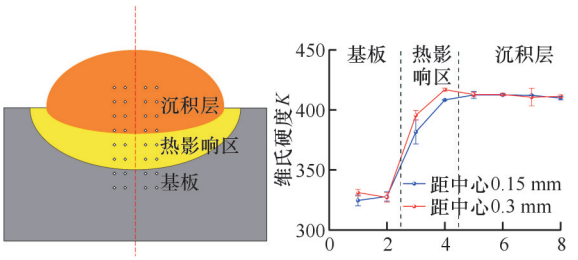
Fig.12　EBSD analysis of deposited layers under optimized versus control parameters, and the substrate

氏体，晶粒尺寸主要分布在1～4 μm区间，平均尺寸约为2.0 μm。相比之下，对照组由于较低的扫描速度导致线能量密度较高，熔池热积累显著，使得凝固过程中的冷却速率降低，进而诱导针状α′-Ti马氏体发生明显的粗化，其平均晶粒尺寸增至2.9 μm左右。这说明优化工艺参数组合通过选择合理的热输入与粉末进给，维持了较高的冷却速率，从而有效抑制了晶粒的生长。此外，轧制态基板则呈现出沿轧制方向伸长的晶粒结构，平均晶粒尺寸约为2.8 μm。所选用的优化工艺参数组合中较高的冷却速率有助于形成更细小的晶粒，而这些细小晶粒在随后的冷却过程中没有充分的时间长大从而能保持较小尺寸。图12c展示了沉积层与基板的相分布，其结果与XRD测试的结果相符合。从图中可看出沉积态TC4钛合金内部的针状α′-Ti马氏体边界上出现了纳米级别的β-Ti析出相[22]，而对于轧制态TC4钛合金基板，β相含量相对于沉积态TC4钛合金显著增加，这是由于塑性变形和位错积累，部分β相得以保留。图12d所示为沉积层与基板的局部取向差（KAM）分布。沉积态TC4钛合金的KAM值均为0.38°，低于轧制态基板的0.50°，说明沉积态TC4钛合金内部的局部取向梯度、位错密度及微观残余应变均显著低于轧制态基板，这归因于LDED工艺过程快速加热至相变后迅速冷却的冶金过程，其初始形成的α′-Ti相虽然内部存在晶体学切变引起的缺陷，但相较于经历了强烈塑性变形的轧制态基板，其位错密度显然更低。

3.2.2 力学性能分析

显微硬度是反映沉积态TC4钛合金力学性能的重要指标[16]。本文采用INNOVATEST公司的Falcon511维氏硬度计在载荷500 g、压痕时间10 s下测试沉积样品的维氏显微硬度。在沉积层截面上进行显微硬度测试，由基体沿直线通过热影响区至沉积层方向选取8个点，每两个点的垂直方向距离为0.2 mm，水平方向为距离沉积层宽度中心0.15 mm和0.3 mm处，分别对称地选取2个点，选点位置示意图见图13a。

测试结果如图13b所示，硬度分布曲线表现为从基体向沉积层逐渐过渡的梯度特征。沉积层区域平均硬度为411.71HV，相较于轧制态基板的327.71HV，其硬度提高了25.63%，这是由于LDED工艺的快速冷却过程中形成了大量针状α′-Ti马氏体，其固有的切变特性显著增加了位错滑移的阻力，从而产生了显著的相变强化。此外，沉积态TC4钛合金的晶粒尺寸远小于轧制态基板，由Hall-patch公式可知，材料的硬度随晶粒尺寸的减小而增加。这两种强化机制共同作用最终使得沉积态TC4的硬度远大于轧制态基板。位于基板和沉积层中间的热影响区的平均硬度为400.49HV，是因为它在激光能量作用下快速提高至α＋β/β相变温度附近并由于基材和沉积层极高的热容提供了极高的冷却速率实现快速冷却，完成了类似固溶处理的工艺过程从而实现了该区域的强化[23]。



(a)选点示意图　(b)测试结果图

图13　硬度测试

Fig.13　Hardness tests

对制备好的试样进行室温拉伸测试，获得的工程应力-应变曲线见图14，可以看出，沉积态TC4钛合金展现出优异的强度，其屈服强度与抗拉强度分别达到871.8 MPa和1137.6 MPa，相较于传统轧制工艺制备的基板（屈服强度793.0 MPa、抗拉强度1038 MPa）提高了9.94%和9.60%。然而，在塑性方面，沉积态合金的延伸率为8.09%，略低于轧制态基板的12.40%，表明其在断裂韧性方面存在一定程度的降低。

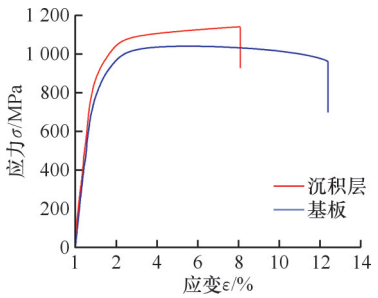


图14　应力-应变曲线

Fig.14　Stress-strain curve

图15a～图15c为基板拉伸断口的微观形貌。由图15c可以看出，轧制态TC4钛合金的断口表面分布有大尺寸、深腔状的韧窝，同时可见均匀分布的微孔，整体表现为典型的韧性断裂特征。该断裂模式通常归因于均匀分布的等轴α-Ti晶粒组织以及在成形过程中相对缓慢的冷却速率，有利于在受力下产生塑性变形。图15d～图15f为沉积层拉伸断口的微观形貌。从图15e中可以观察到，沉积态TC4钛合金断口表面随机分布有数十微米大小的球形孔隙，部分孔隙内残留有未完

全熔化的钛粉。此类未熔合缺陷被认为是导致沉积态TC4钛合金在硬度较轧制态基材高出约80HV的同时，抗拉强度未能实现同步显著提高的主要原因。进一步对比图15c与图15f可见，沉积态TC4钛合金断口处的韧窝在尺寸和深度上均小于轧制样品，反映出其局部塑性变形能力下降。综合其断口特征，可判定沉积态TC4钛合金的断裂机制为脆性和韧性的混合断裂。

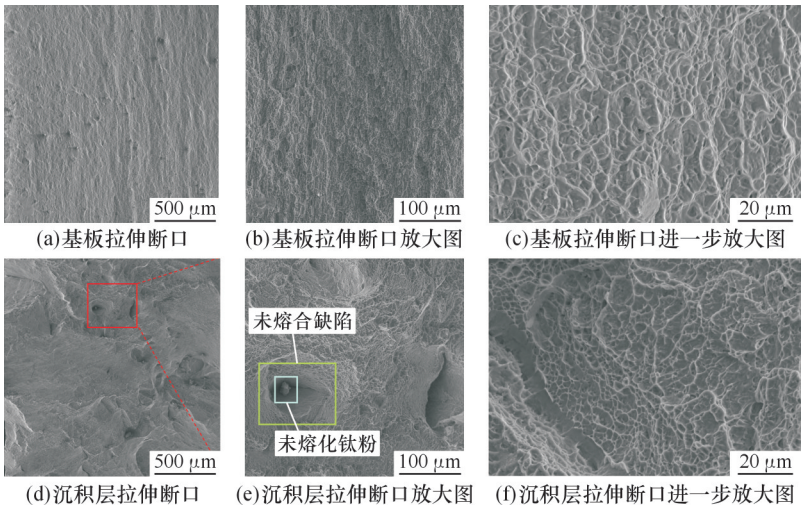


图15　拉伸断口微观形貌图

Fig.15　Micrograph of the tensile fracture surface

4　结论

1)粉末进给速度是决定能量利用率和比能耗的首要因素，沉积层高宽比则受粉末进给速度与扫描速度的共同显著影响。

2)确定优化参数组合为激光功率800 W，扫描速度600 mm/min，粉末进给速度6 g/min。在此条件下，比能耗与高宽比偏差较试验组均值改善了21.8%与69.5%，且能量利用率提高了22.4%，有效实现了能效与成形质量的协同调控。

3)沉积层内部组织由致密的细小针状α′-Ti马氏体组成，其晶粒尺寸显著优于轧制态基板。沉积态合金的显微硬度(411.71HV)相较于轧制态基板提高了25.63%，屈服强度与抗拉强度与分别较基板提高了约9.94%和9.60%，断裂机制表现为脆性和韧性的混合断裂。

参考文献：

[1] SEO G, AHSAN M R, LEE Y, et al. A Functional Modeling Approach for Quality Assurance in Metal Additive Manufacturing[J]. Rapid Prototyping Journal, 2021, 27(2): 288-303.

[2] SU Y, WANG C, XU X, et al. Pore Defects and Corrosion Behavior of AISI 316L Stainless Steel Fabricated by Laser Directed Energy Deposition under Closed-loop Control[J]. Surface and Coatings Technology, 2023, 463: 129527.

[3] SUN J, LU H, LIANG Y, et al. Integrated Manufacturing Method for Compressor Blisks: LDED Ti65 on Sheet Ti-6Al-4V[J]. Materials Science and Engineering: A, 2025, 932: 148266.

[4] YOON H S, LEE J Y, KIM H S, et al. A Comparison of Energy Consumption in Bulk Forming, Subtractive, and Additive Processes: Review and Case Study[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology, 2014, 1(3): 261-279.

[5] GEDDA H, POWELL J, WAHLSTRÖM G, et al. Energy Redistribution during CO2 Laser Cladding[J]. Journal of Laser Applications, 2002, 14(2): 78-82.

[6] JIANG X, TIAN Z, LIU W, et al. An Energy-efficient Method of Laser Remanufacturing Process[J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2022, 52: 102201.

[7] WU J, LIAN K, DENG Y, et al. Multi-objective Parameter Optimization of Fiber Laser Welding Considering Energy Consumption and Bead Geometry[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2022, 19(4): 3561-3574.

[8] LI J, HU J, ZHOU Q, et al. Transfer Learning-based Quality Monitoring of Laser Powder Bed Fusion across Materials[J]. Expert Systems with Applications, 2024, 252: 124150.

[9] GAO B, PENG S, LI T, et al. Integration of Improved Meta-heuristic and Machine Learning for Optimizing Energy Efficiency in Additive Manufacturing Process[J]. Energy, 2024, 306: 132518.

[10] NIU J, LI Y, QI X, et al. An Image-physics Dual-driven Machine Learning Framework for Cross-sectional Geometry Prediction in Laser Direct Energy Deposition[J]. Optics & Laser Technology, 2025, 192: 114150.

[11] ZHANG R, WEI C, SHI T, et al. Study on Process Method and Forming Quality of Large-overhang Thin-walled Curved Tubes Fabricated by Annular Laser Metal Deposition[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2025, 344: 119011.

[12] OLIVEIRA J P, SANTOS T G, MIRANDA R M. Revisiting Fundamental Welding Concepts to Improve Additive Manufacturing: From Theory to Practice[J]. Progress in Materials Science, 2020, 107: 100590.

(下转第2483页)