

激光立体成形 Ti-48Al-2Cr-2Nb 合金工艺研究

戴忠顺¹ 王 杰²

(1. 荆州职业技术学院智能制造学院, 荆州 434020; 2. 长江大学机械工程学院, 荆州 434020)

摘 要 采用激光立体成形技术(LSF)技术在 TC4 钛合金基板上制备 Ti-48Al-2Cr-2Nb 合金。通过对激光功率、激光扫描速度以及送粉速度进行正交试验,得到最佳的工艺参数组合,当激光功率为 1 600 W,扫描速度为 8 mm/s,送粉速度为 8 g/min 时,得到最佳的单层沉积层效果,沉积层表面均匀一致。进一步沉积 100 层 TiAl 合金层,制备高度为 40 mm 的沉积层。显微硬度及显微组织测试分析表明,沉积层的最顶端由细小的等轴片层团组成,这种细小的晶粒有利于提高材料的表面硬度。

关键词 激光立体成形;TiAl 合金;工艺参数;微观组织

中图分类号 TG146.23;TG665

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.T20250051

Laser Solid Forming Process of Ti-48Al-2Cr-2Nb Alloy

DAI Zhongshun¹, WANG Jie²

(1. Intelligent Manufacturing School, Jingzhou Institute of Technology, Jingzhou 434020; 2. School of Mechanical Engineering, Yangtze University, Jingzhou 434023)

Abstract: Ti-48Al-2Cr-2Nb alloys were prepared on TC4 titanium alloy substrate by laser solid forming (LSF) technique. Optimized parameter combination was obtained through orthogonal experiments on laser power, laser scanning speed and powder feeding speed, and desirable single-layer deposition effect was achieved with laser power of 1 600 W, scanning speed of 8 mm/s, and powder feeding speed of 8 g/min, the , where the surface of deposition layer presents uniform. Then 100 layers of TiAl alloy were deposited to fabricate depositrf layer with height of 40 mm. Microhardness and microstructure analysis reveals that the top of deposited layer is composed of fine isometric laminates, which is conducive to improving the surface hardness.

Key Words: Laser Solid Forming, TiAl Alloy, Process Parameters, Microstructure

Ti-Al 合金(Ti-48Al-2Cr-2Nb)具有密度低,熔点高和高弹性模量等特点^[1-3],在高温力学性能和抗氧化性方面具有明显优势,在航空航天领域具有非常广阔的应用前景^[4-8]。但是 Ti-Al 合金在非高温情况下(室温及低温)塑性较差,采用常规的制造方法,其加工难度较大,如在锻造、轧制等加工过程中,Ti-Al 合金容易损坏^[9]。因此,亟待解决 Ti-Al 合金材料的加工制造难题。

激光立体成形技术(Laser solid forming, LSF)技术是金属粉末材料经过高能量密度的激光束照射后,快速熔化形成液态,激光离开后,液态金属快速凝固,成形金属零部件^[10-13]。利用 LSF 技术成形的金属零部件综合力学性能优良,密度和精度高,同时 LSF 设备相对简单,成本低廉^[14-16]。由于 LSF 在密闭舱体内部进行加工生产,与外界环境相隔离,对环境污染较小,因此利用 LSF 制造技术可以制造结构复杂的部件。文武璐

等^[17]利用送粉激光增材制造,制备 60 组不同成分的 Ti-Al-Mo 合金试样,结合显微组织观察和图像处理方法,获得不同成分 Ti-Al-Mo 合金的显微组织参数,进而结合 Back Propagation (BP)神经网络模型,获得激光立体成形 Ti-xAl-yMo 合金成分-显微组织特征的定量关系。ZHOU Z H 等^[18]研究了激光增材制造 Ni-Cr 金属过程中的熔池吸热、传热和凝固演变,基于光线追踪理论,分析了金刚石和 Ni-Cr 合金粉末参数对激光能量吸收率的影响,并构建了混合粉末床的温度模型。由于激光立体成形(LSF)加工过程中影响因素较多,需要精确控制加工过程的参数和关键工艺,才能满足加工精度、可靠性和稳定性的要求^[19]。因此对激光立体成形(LSF)技术进行试验工艺参数的优化设计以及材料性能进行研究具有积极意义。

本研究采用同轴送粉系统,在 TC4 基材上,通过

收稿日期:2025-02-10;修订日期:2025-05-21

基金项目:高等教育科学研究规划课题资助项目(22GDZY0408);湖北教育科学规划课题资助项目(2023GB196)

第一作者:戴忠顺,男,1985 年出生,实验师,E-mail: 286417039@qq.com

引用格式:戴忠顺,王杰. 激光立体成形 Ti-48Al-2Cr-2Nb 合金工艺研究[J]. 特种铸造及有色合金,2026,46(6):904-908.

DAI Z S, WANG J. Laser solid forming process of Ti-48Al-2Cr-2Nb alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2026, 46(6):904-908.

LSF 技术制备 Ti-48Al-2Cr-2Nb 合金,基于工艺参数优化,进行多层激光立体成形,分析激光立体成形零件的硬度以及微观组织,旨在为实际生产提供参考。

1 试验材料及设备

1.1 试验材料

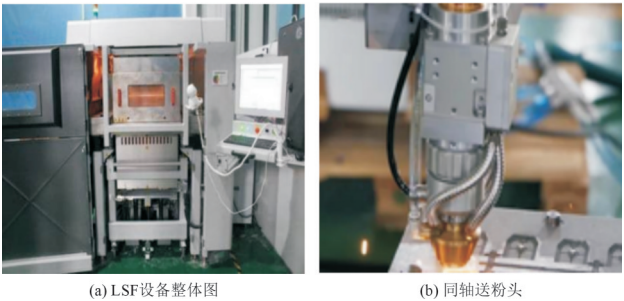
基板材料为 Ti-6Al-4V (TC4), 其尺寸为 $\phi 100\text{ mm}\times 100\text{ mm}\times 10\text{ mm}$, 粉末材料为 TiAl 粉末合金 (Ti-48Al-2Cr-2Nb), 粒度范围均为 $50\sim 150\text{ }\mu\text{m}$, 化学成分见表 1。利用打磨机对其表面进行打磨处理,将表面的氧化层处理干净,使用丙酮溶液擦拭表面去除油污等杂质,吹干、放置以备用。TiAl 合金粉末在烘干箱内于 $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 保温 2 h, 去除合金粉末表面的水蒸气,同时改善合金粉末在制造过程中的流动性以及减少沉积层中气孔的生成。

表 1 TC4 钛合金与 TiAl 粉末合金的化学成分

Tab.1 Chemical composition of TC4 titanium alloy and TiAl powder alloy		%						
材料	w_B							Ti
	Al	V	Si	Cr	O	Fe	Nb	
TC4	5.9	4.2	0.026	—	0.15	0.2	—	余量
TiAl 粉末合金	31.5~33.5	—	—	2.3~3.3	—	—	4.3~5.3	余量

1.2 激光立体成形系统

图 1 为激光立体成形 (LSF) 系统图。其主要由光纤激光器、水冷机、激光同轴送粉头、送粉器、密闭惰性气舱室、三轴数控工作台等组成,其中激光器的最大功率为 $3\text{ }000\text{ W}$, 光纤芯径为 $400\text{ }\mu\text{m}$, 激光同轴送粉头为 4 路送粉头, 即 4 路粉末同时送粉。送粉速度由送粉器控制, 4 路送粉组成环形, 激光从环的中心透过, 见图 1b。TC4 基材底部安装加热板, 在激光立体成形 Ti-48Al-2Cr-2Nb 合金前, 将 TC4 基材预热到 $(380\pm 20)\text{ }^{\circ}\text{C}$ 并在激光立体成形过程中保持, 以防止 Ti-48Al-2Cr-2Nb 合金与 TC4 基材发生开裂。试验前, 往密闭舱室内部充入高纯度的氩气 (体积分数为 99.99%), 并且在激光立体成形过程中持续充入。



(a) LSF 设备整体图 (b) 同轴送粉头

图 1 LSF 试验设备图

Fig.1 Illustration of LSF equipment

1.3 试验检测设备

采用奥林巴斯 BX51M 光学显微镜观察沉积层表面形貌。用线切割机沿着增材制造试样的垂直方向进行切割, 随后对试样进行镶嵌, 然后依次用 600、1 000 和 2 500 目的 SiC 砂纸进行打磨, 随后采用 Kroll 试剂 (HF 、 HNO_3 、 H_2O 溶液的体积比为 $2:3:10$) 腐蚀试样, 试样的微观组织形貌利用日立 S-3400N 扫描电镜 (SEM) 进行观察, 用附带的 EDS 对试样的元素成分进行测试分析。采用 Mitutoyo HM-113 维氏显微硬度计进行显微硬度测试分析, 载荷设置为 2 N , 保持 5 s , 每次步距为 1.0 mm , 在每个点周围测试 3 个硬度值, 并取平均值。

2 试验结果及讨论

2.1 激光立体成形预试验

影响激光立体成形的工艺参数主要有激光功率、激光扫描速度以及送粉速度。在预试验中发现, 当激光功率小于 $1\text{ }400\text{ W}$ 时, 沉积层有裂纹出现, 这是因为功率较低时, 沉积层的冷却速度较快, 容易产生裂纹。随着激光功率增加, 沉积层的裂纹消失, 这是因为沉积层的冷却速度较慢, 沉积层的裂纹敏感度逐渐降低; 同时随着激光功率增加, 热输入量也增加, 粉末熔化量增大, 导致沉积层的熔化高度与熔化宽度也增加, 但是当激光功率达到 $1\text{ }800\text{ W}$ 时, 沉积层的熔化高度有降低的趋势、熔化宽度继续增加, 这是因为继续增加功率, 基材温度以及沉积层温度继续增加, 熔池的流动性提高, 导致熔化宽度持续增加, 但是送粉速度没有变化, 因此熔化高度有所降低。

对激光扫描速度进行预试验, 并对激光沉积层进行外观形貌分析, 发现当扫描速度为 6 mm/s 时, 沉积层的高度及宽度最高, 这是因为扫描速度越低, 粉末及基板的加热时间越长, 粉末的利用率越高^[20], 但是过多的材料堆积容易导致沉积层表面不平整。随着扫描速度增加, 沉积层单位面积上的热输入量减少, 沉积层的高度及宽度都逐渐减小, 且材料利用率逐渐降低, 当扫描速度达到 10 mm/s 时, 存在部分粉末没有完全熔化的现象, 导致沉积层外观形貌有不均匀的情况发生。

对送粉速度进行预试验, 发现当送粉速度超过 8 g/min 时, 沉积层表面有凹凸不平的情况, 这是因为送粉速度过低, 导致部分粉末熔化量不足。随着送粉速度增加, 沉积层的宽度几乎没有变化, 这是因为激光功率及扫描速度保持不变, 单位时间内作用在基材上的激光能量保持稳定, 加热面积几乎没有变化, 因此熔化宽度基

本保持不变;随着送粉速度增加,粉末熔化量增加,导致沉积层的高度逐渐增加,当送粉速度超过 8 g/min 时,沉积层表面有凹凸不平的情况,这是因为送粉速度过大,导致部分粉末熔化不充分。

根据以上预试验,设计了 3 因素 3 水平试验,见表 2。

表 2 因素水平表
Tab.2 Factor and level table

水平	因素		
	激光功率(A)/ W	扫描速度(B)/ (mm·s ⁻¹)	送粉速度(C)/ (g·min ⁻¹)
1	1 400	6	4
2	1 600	8	6
3	1 800	10	8

2.2 激光立体成形正交试验

为了得到优化的工艺参数组合,对激光功率、扫描速度、送粉速度进行 3 因素 3 水平正交试验,得到激光立体成形的理想效果以及对应的优化工艺参数组合,采取 L₉(3³)组合,见表 3,以沉积层表面形貌平整程度为标准。结果表明,当激光功率为 1 600 W,扫描速度为 8 mm/s,送粉速度 8 g/min 时,沉积层表面形貌呈连续、平整度均匀一致的效果,为优化工艺参数组合。

表 3 正交试验及结果
Tab.3 Results of orthogonal experiment

编号	激光功率(A)/W	扫描速度(B)/ (mm·s ⁻¹)	送粉速度(C)/(g·min ⁻¹)	沉积层表面形貌	综合评分
1	1 400	6	4	不连续,平整度一般	5
2	1 400	8	6	不连续,平整度较差	4
3	1 400	10	8	不连续,平整度一般	5
4	1 600	6	6	不连续,平整度较差	8
5	1 600	8	8	连续,平整度均匀	10
6	1 600	10	4	连续,平整度较差	8
7	1 800	6	8	连续,平整度一般	6
8	1 800	8	4	连续,平整度较差	6
9	1 800	10	6	连续,平整度较差	5

通过对正交试验结果进行极差分析,结果见表 4,可见对沉积层外观形貌的影响程度依次为激光功率、送粉速度、扫描速度,优化的工艺参数方案为 A₂B₂C₃,

即激光功率为 1 600 W,扫描速度为 8 mm/s,送丝速度为 8 g/min。

表 4 正交试验极差分析
Tab.4 Range analysis of orthogonal test

编号	激光功率(A)/W	扫描速度(B)/ (mm·s ⁻¹)	送粉速度(C)/ (g·min ⁻¹)
K ₁	14	19	19
K ₂	26	20	17
K ₃	17	18	21
k ₁	4.7	6.3	6.3
k ₂	8.7	6.7	5.7
k ₃	5.7	6.0	7.0
极差结果	4.0	0.7	1.3
优化方案	A ₂ B ₂ C ₃		

2.3 显微组织分析

利用优化工艺参数进行 100 层沉积(每层高度设置为 0.4 mm)制备了尺寸为 40 mm×4.5 mm×40 mm 的试样,在沉积过程中确保底部基材的温度加热到(800±20)℃。制备出的试样表面形貌连续一致,均匀性好。为了进一步观察沉积样件内部显微组织结构,对 100 层沉积的试样进行横截面微观组织分析,见图 2。可以看出,沉积层内部无裂纹、无气孔等缺陷。B 区为靠近基材部分,显微组织主要由块状组织构成,这是因为受到 TC4 基材的影响,前面几层的沉积层中 Al 元素向基材方向偏析,导致沉积中的 Al 含量降低,使凝固路径改变,形成块状组织形貌。C 区为连续沉积区,以下层的 B 区沉积层表面作为基材进行沉积,每层沉积层之间的温度梯度较小,低温度梯度导致形核困难,形成片层组织,且为较大的柱状晶形貌,这可能会降低材料的硬度,提高抗拉强度。D 区同样为连续沉积区,因此形成了片层组织,且为较大的柱状晶形貌。E 区为沉积层的最顶端部分,显微组织相对其他区域非常细小,且几乎全部由等轴的片层团构成,这是因为在沉积区的最顶端,沉积区与外界环境直接接触,沉积层的温度首先急剧上升,然后激光离开后急剧下降,造成了细小的等轴片层团的形成,这种细化的晶粒有利于提高材料的硬度。

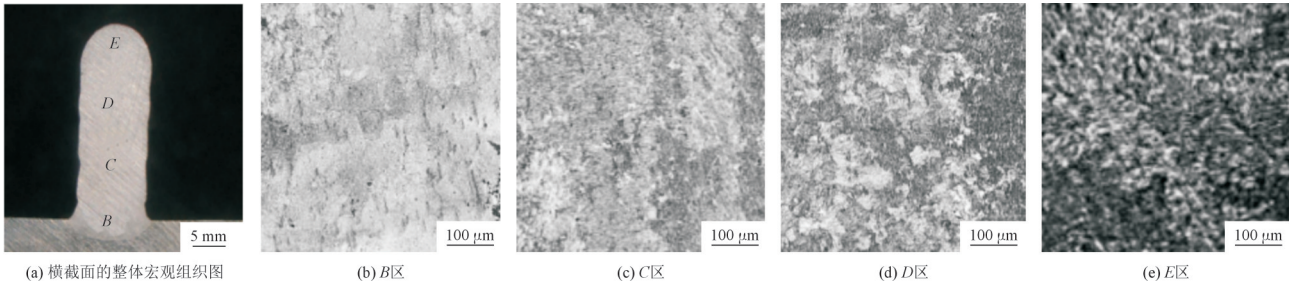


图 2 横截面的整体宏观组织与局部微观组织形貌

Fig.2 Overall macrostructure and local microstructure of cross section

2.4 XRD 分析结果

图 3 为沉积态 Ti-48Al-2Cr-2Nb 试样的不同区域的 XRD 分析结果。可以看出,沉积态 Ti-48Al-2Cr-2Nb 合金的组织由 α_2 和 γ 相构成。由图 3a 可以看到,在 37°附近出现了 α_2 相衍射峰,表明靠近基体区域的 α_2 相

含量高于其他区域,这是因为 TC4 钛合金基板材料对 Ti-48Al-2Cr-2Nb 合金沉积层的稀释作用,导致 Al 含量相对降低。从图 3b 和图 3c 可以看到,在 37°附近 α_2 相衍射峰减弱至消失,这是因为 TC4 钛合金基板材料对沉积层的稀释作用减弱至消失。由于 α_2 相的硬度要高于 γ 相^[21],因此 α_2 相衍射峰的减弱降低了沉积层的硬度值。

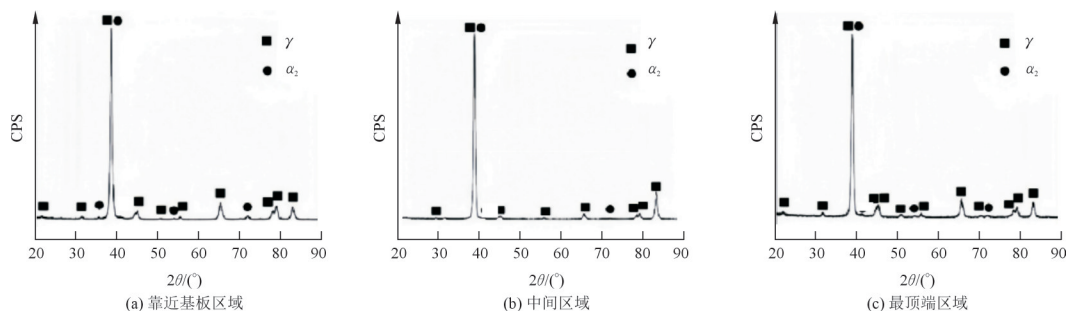


图 3 沉积态合金试样不同区域 XRD 分析结果

Fig.3 XRD patterns of as-deposited alloy specimens in different regions

2.5 显微硬度分析

沉积态合金试样不同位置的硬度值见图 4。可以看出,沉积层前 5 层的硬度值(HV)在 400~450 之间,由于前 5 层沉积层受到 TC4 钛合金基板材料的影响,导致沉积层冷却速率较快(TC4 基材热导率较高,将产生的热量及时导出),合金元素不能及时扩散形成马氏体组织,硬度值较大^[22]。当沉积层在第 5~37 层时,沉积层的硬度值(HV)在 360~410 之间,这是因为当沉积层超过 5 层时,TC4 钛合金基板材料对沉积层的稀释作用消失,最终沉积层的硬度相对于前面 5 层沉积层有轻微的降低。当沉积层在第 38 层到第 40 层时,沉积层的硬度值有所增大,沉积层的最顶端由细小的等轴片层团组成,这种细小的晶粒有利于提高材料的表面硬度^[23]。

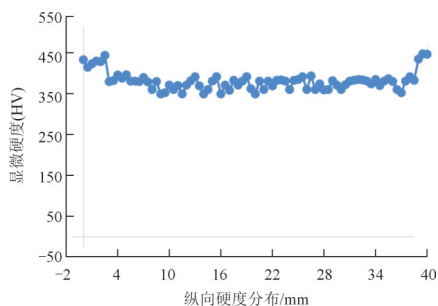


图 4 沉积态合金试样不同部位的显微硬度

Fig.4 Microhardness of as-deposited alloy specimens in different positions

3 结 论

(1)采用同轴送粉系统在 TC4 基材上激光立体成形 Ti-48Al-2Cr-2Nb 合金沉积层,通过正交试验,得到

优化的工艺参数,并对正交试验结果进行极差分析。结果表明,对沉积层外观形貌的影响程度依次为激光功率、送粉速度、扫描速度。

(2)采用优化工艺参数连续沉积 100 层 Ti-48Al-2Cr-2Nb 合金沉积层,通过对沉积层横截面的测试分析,发现制备出的试样表面形貌连续一致、均匀性好,且沉积层内部无裂纹、无气孔等缺陷,有利于提高材料的力学性能。

(3)硬度值测试结果表明,在沉积层中间部位的硬度值较低,沉积层的最顶端由细小的等轴片层团组成,这种细小的晶粒有利于提高材料的表面硬度。

参 考 文 献

- [1] TODAI M, NAKANO T, LIU T, et al. Effect of building direction on the microstructure and tensile properties of Ti-48Al-2Cr-2Nb alloy additively manufactured by electron beam melting[J]. Additive Manufacturing, 2017, 13: 61-70.
- [2] LIU Y W, HU R, ZHANG T B. Microstructure stability of Ti₂Aln/Ti-48Al-2Cr-2Nb composite at 900 °C[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2016, 26(2): 423-430.
- [3] 包春玲, 谢华生, 赵军, 等. 热等静压处理对铸造 Ti-48Al-2Cr-2Nb 合金组织和力学性能的影响[J]. 铸造, 2017, 66(1): 64-66.
- [4] CHO K, KOBAYASHI R, OH J Y, et al. Influence of unique layered microstructure on fatigue properties of Ti-48Al-2Cr-2Nb alloys fabricated by electron beam melting[J]. Intermetallics, 2018, 95: 1-10.
- [5] KEN C, SAKATA M, YASUDA H Y, et al. Effect of scan speed on microstructure and tensile properties of Ti-48Al-2Cr-2Nb alloys fabricated via additive manufacturing: Special issue on cheation of materials by superthermal frold[J]. Materials Transactions, 2023, 64(6): 1 112-1 118.
- [6] 唐洪奎, 杨超, 卓君, 等. 热处理对热等静压 Ti-48Al-2Cr-2Nb 合金组织和力学性能的影响[J]. 热加工工艺, 2022, 51(10):

- 148-156.
- [7] YUE H Y, LIANG Z Q, ZHANG F, et al. Effect of heat treatment on the microstructure and creep properties of Ti-48Al-2Cr-2Nb alloy produced by selective electron beam melting[J]. Materials Science & Engineering, 2022, A859: 144-224.
- [8] 王昊, 谢广明, 贾焱, 等. Ti-48Al-2Cr-2Nb-(Ni, TiB₂)合金凝固组织演变规律及力学性能研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2022, 51(6): 2 316-2 322.
- [9] CHEN G Q, ZHANG G, YIN Q X, et al. Microstructure evolution of electron beam welded joints of Ti-43Al-9V-0.3Y and Ti-6Al-4V alloys[J]. Materials Letters, 2018, 233: 336-339.
- [10] 刘业胜, 韩品连, 胡寿丰, 等. 金属材料激光增材制造技术及在航空发动机上的应用[J]. 航空制造技术, 2014, 10: 62-67.
- [11] 高永康, 陈洪胜, 聂慧慧, 等. 激光增材制造镍基复合材料界面连接机制与断裂行为[J]. 复合材料学报, 2023, 40(3): 1 797-1 806.
- [12] 王霄, 王东生, 高雪松, 等. 轻合金构件激光增材制造研究现状及其发展[J]. 应用激光, 2016, 36(4): 478-483.
- [13] GASSER A, BACKES G, KELBASSA I, et al. Laser additive manufacturing: Laser metal deposition (LMD) and selective laser melting (SLM) in turbo-engine applications[J]. Laser Technik Journal, 2010, 7(2): 58-63.
- [14] KISTLER N A. Effect of processing conditions on the microstructure, porosity, and mechanical properties of Ti-6Al-4V repair fabricated by directed energy deposition[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2019, 264: 172-181.
- [15] 陈智君, 丁玉明, 董刚, 等. 9%Cr钢表面激光熔覆制备低Cr合金改性层组织及Cr含量分析[J]. 表面技术, 2020, 49(2): 281-287.
- [16] YU Y Q, MA T, WANG S L, et al. Simulation analysis of stress field of walnut shell composite powder in laser additive manufacturing forming[J]. Journal of Renewable Materials, 2023, 11(1): 333-347.
- [17] 武文璐, 李静, 赵可馨, 等. 激光立体成形 Ti-Al-Mo 合金成分-组织相关性研究[J]. 稀有金属, 2023, 47(5): 714-724.
- [18] ZHOU Z H, LI S C, GAO X D. Numerical modeling of thermal behavior of melt pool in laser additive manufacturing of Ni-based diamond tools[J]. Ceramics International, 2022, 48(10): 14 876-14 890.
- [19] LIU Y H, ZHU L J, ZHOU L, et al. Microstructure and mechanical properties of reinforced polyamide 12 composites prepared by laser additive manufacturing[J]. Rapid Prototyping Journal, 2019, 25(6): 1 127-1 134.
- [20] 张霜银, 林鑫, 陈静, 等. 工艺参数对激光快速成形 TC4 钛合金组织及成形质量的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2007, 36(10): 1 839-1 843.
- [21] 朱冬冬, 董多, 周兆忠, 等. 冷却速度对快速凝固 Ti-48Al-4Cr 合金组织转变规律及力学性能[J]. 稀有金属材料与工程, 2016, 45(7): 1 745-1 748.
- [22] 王悔改, 冷文才, 李双晓, 等. 热处理工艺对 TC4 钛合金组织和性能的影响[J]. 热加工工艺, 2011, 40(10): 181-183.
- [23] 鲍学淳, 程礼, 陈焯, 等. 热处理工艺对 TC4 钛合金组织和力学性能的影响[J]. 金属热处理, 2019, 44(6): 137-140.

(编辑:张正贺)

《特种铸造及有色合金》征订启事

《特种铸造及有色合金》杂志是中国科学技术协会主管、中国机械工程学会铸造分会和武汉机械工艺研究所共同主办的全国性科技期刊,是对国内外公开发行的中文核心期刊,中国科技论文统计与分析用刊,INSPEC、CA、MA、AJ、JST、Scopus等国内外权威数据库及检索系统收录期刊,并获得全国优秀科技期刊一等奖、国家期刊奖、新中国60年有影响力的期刊、湖北省十大有影响力的自然学术期刊等。

本刊主要报道各种(黑色和有色合金)特种铸造方法、各种有色合金及复合材料成形的理论、工艺、设备、材料、测试与控制、计算机应用等方面的科技成果、生产技术和现场经验,并报道各相关学科和交叉学科,如挤压铸造(液态模锻)、半固态加工、电子封装、高熵合金、非晶合金(金属玻璃)、焊接、粉末冶金、合金化、热处理、表面处理等方面的学术研究和最新技术信息以及上述内容的国内外发展动向、行业活动、学术会议、消息动态等。

本刊诚征国内外广告,业务范围:铸造及有色合金材料、辅助材料、铸造及相关设备、铸造生产线、测控与控制设备、仪器仪表、计算机应用软件、铸造展会等。

本刊为月刊,标准(大)16开,邮发代号38-109。邮发订价每期20元,全年240元。全国各地邮局均可订阅,也可直接向本刊编辑部邮购,本刊还提供过刊、压铸宝典和年会专刊邮购服务。

特种铸造及有色合金杂志社(武汉)有限公司

地址:武汉市江岸区建设大道融玺1001大厦11楼

邮编:430019

电话:027-85358206,85486024,85358127

投稿网址:www.special-cast.com

邮箱:tzzz@special-cast.com

