

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2026.05.009

退火和固溶温度对钛合金点式锻压激光成形性能影响

芦博

(鹤壁能源化工职业学院 机电工程系, 河南 鹤壁 458030)

摘要: 为明确退火与固溶温度对点式锻压激光成形 TC17 钛合金力学性能的调控规律, 并为工艺参数优化与高性能构件成形提供依据, 采用点式锻压激光成形设备对 TC17 钛合金进行加工, 并通过拉伸性能试验和硬度分析评估其力学性能。研究表明: 点式锻压激光成形能够显著提高 TC17 钛合金的屈服强度和抗拉强度, 但延伸率低于标准; 通过调整压下量和退火温度, 发现高温退火能提高延伸率但降低强度; 硬度随退火温度升高而降低, 退火和固溶温度对钛合金点式锻压激光成形性能有明显影响。

关键词: 钛合金; 固溶温度; 退火温度; 点式锻压; 激光成形

中图分类号: TQ110; TG15; TP391 **文献标志码:** A

Influence of annealing and solution temperature on performance of titanium alloy by point forging laser forming

LU Bo

(School of Energy and Chemical Industry, Hebi Vocational College, Hebi 458030, China)

Abstract: To clarify the control law of annealing and solution temperature on the mechanical properties of TC17 titanium alloy formed by point forging laser forming, and to provide a basis for optimizing process parameters and forming high-performance components. TC17 titanium alloy was processed by using point-forging laser forming equipment. The mechanical properties were evaluated through hardness analysis and tensile performance testing. The results show that point forging laser forming greatly increases the yield strength and tensile strength of TC17 titanium alloy, though its elongation falls below the standard. High-temperature annealing can increase elongation but reduce strength with varying the pressing force and annealing temperature. Hardness is reduced with the increased annealing temperature, the performance of titanium alloy point forging laser forming is significantly influenced by annealing and solution temperature.

Keywords: titanium alloy; solid solution temperature; annealing temperature; point forging; laser forming

钛具有强度高以及质量轻等特点, 密度为 4.51 g/cm^3 , 比钢和镍基合金轻, 但强度却与这些金属相当甚至更高。熔点为 $1678 \text{ }^\circ\text{C}$, 在高温下仍能保持强度和稳定性。钛合金具有高强度、低密度、优良的耐腐蚀性能以及良好的高温性能, 使其成为制

造轻量化、高强度结构件的理想材料^[1-2], 在多个高技术领域得到了广泛应用, 尤其在航空航天、海洋工程和化工设备等领域具有重要地位。尽管钛合金具有众多优点, 但其高熔点、高反应活性和较低的导热性, 使得传统加工方法难以在保证精度和性能

收稿日期: 2025-05-07 修回日期: 2025-08-13

通信作者: 芦博(1984—), 女, 本科, 讲师, 研究方向为机械设计制造及其自动化, e-mail: huhu5212021@163.com

引用信息: 芦博. 退火和固溶温度对钛合金点式锻压激光成形性能影响[J]. 电镀与精饰, 2026, 48(5): 59-64.

LU Bo. Influence of annealing and solution temperature on performance of titanium alloy by point forging laser forming[J]. Plating and Finishing, 2026, 48(5): 59-64.

的前提下对其有效加工。特别是在成形和热处理过程中，钛合金对温度和应力的敏感性较高，稍有不慎便可能导致材料性能的劣化或产生不可修复的缺陷^[3-4]。近年来，点式锻压激光成形技术作为一种结合激光加热与锻压的新型制造工艺，逐渐在复杂形状和高精度金属零件制造中展现出独特优势^[5]。该技术利用高能激光束对钛合金进行局部加热，使其表面迅速达到锻压温度，同时在激光加热区施加锻压力，实现材料的局部塑性变形^[6]。这种方法不仅可以显著提高成形效率，还能够通过精确控制激光功率和锻压参数，获得高精度和复杂形状的零件，克服了传统加工方法的诸多局限^[7-8]。

TC17属于典型的 $\alpha+\beta$ 两相钛合金，兼具高强度、耐腐蚀性和优良的高温性能，广泛应用于航空发动机的关键部件和高性能化工设备中^[9-12]。选择TC17作为点式锻压激光成形材料，不仅能够满足高温、高强度服役需求，同时其对热处理及锻压工艺敏感的

特性，为研究成形参数与热处理对力学性能影响提供了理想对象^[13-14]。本文选用高性能钛合金TC17作为研究对象，通过点式锻压激光成形工艺，优化钛合金的力学性能。创新点在于将点式锻压与激光成形工艺相结合，系统探讨了工艺参数对TC17钛合金力学性能的影响，并通过实验验证其可行性，为高性能钛合金材料的制造提供了新的思路和技术支持。

1 实验

1.1 实验材料

点式锻压激光成形实验所用材料为TC17钛合金粉末，基体采用TA15钛合金板材，其化学成分如表1所示。由表1可知，组成TC17和TA15的成分主要是Ti，TC17中含有较高比例的Al、Sn和Zr，这些元素能够显著影响合金的物理和化学性质。TA15则含有较高比例的V和Si，赋予合金不同的强度、耐热性和耐腐蚀性能。

表 1 TC17 和 TA15 的化学成分

Tab.1 Chemical composition of TC17 and TA15

TC17 化学成分	元素	Al	Sn	Zr	Mo	Cr	Fe	C	N	H	O	Ti
	含量/(wt.%)	5.07	2.05	1.98	4.31	3.32	0.11	0.02	0.01	0.01	0.02	余量
TA15 化学成分	元素	Al	V	Fe	Mo	Zr	Si	C	O	N	H	Ti
	含量/(wt.%)	6.17	2.01	0.24	1.21	2.11	0.13	0.11	0.12	0.04	0.01	余量

1.2 实验设备

点式锻压激光成形工艺是一种结合了激光加热与锻压技术的先进制造工艺，用于制造复杂形状和高精度的金属零件^[15-16]。首先激光束精确地加热金属材料表面，使其局部温度迅速升高，达到塑性变形的温度范围。激光加热的同时，采用机械锤头或冲压工具对加热区进行锻压，从而在局部区域实现材料的塑性变形。

点式锻压激光成形设备的结构如图1所示。系统的核心组件包括光纤激光器、水冷机组、在线氧分析仪、三路同轴送粉头、工件平台、惰性气体保护箱、数控压力机和数控平台。水冷机组负责冷却激光器以保证其正常运行，在线氧分析仪实时监测加工环境中的氧气含量，确保加工过程的质量^[17-18]。激光器通过光纤传输激光束到三路同轴送粉头，粉头可以将粉末材料均匀地送到加工区域。工件平台是一个可移动的工作台，用于放置待加工的工件。为了防止加工过程中工件氧化，系统配置了惰性气体保护箱。数控压力机用于控制加工过程

中施加在工件上的压力，以保证加工精度和质量。同轴送粉器负责将粉末材料输送到三路同轴送粉头，整个加工过程由数控平台精确控制。

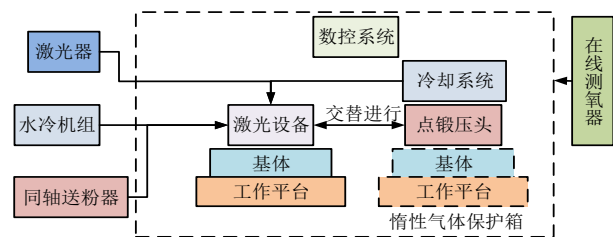


图 1 点式锻压激光成形系统

Fig.1 Forming system of pointed forging laser

1.3 点式锻压激光成形方法

钛合金化学性质较活泼，需在惰性气体环境下试验。首先将TA15钛合金基体表面清洗干净，然后用卡钳将其固定在惰性气体保护箱中，将保护箱密封处理后通入惰性气体，通过在线氧含量检测器监测保护箱内的氧含量，保证其氧含量小于 $80 \mu\text{L}/\text{m}^3$ 。成形工艺主要分为激光成形和点式锻压2步。

通过激光成形工艺将钛合金粉末沉积在试件表面。然后锻压头逐点施加压力,从单个点逐渐扩展到一条线,再从线扩展到整个面。锻压完成后,基板重新回到激光成形区,开始新一轮钛合金粉末的沉积。沉积与锻压的交替过程不断重复,每次循环都增加材料的高度和密度。达到预定的高度后,精确调整锻压的压下量,继续进行成形,直至整个试样完全成形并满足设计要求。完成后通一段时间氩气,待试样完全冷却后再取出,防止TC17继续与空气发生氧化反应。通过该工艺修复后的试件,表面为有光亮的银白色。

1.4 热处理方法

采用的热处理方法包括退火处理和固溶处理。

退火处理工艺:将TC17钛合金样品加热至退火温度,保持一定时间后缓慢冷却至室温,以消除内应力并改善塑性。固溶处理工艺:将样品加热至固溶温度后,保持一定时间,使溶质完全溶解于基体中,快速冷却至室温,形成过饱和固溶体,接着进行时效处理,以进一步提高合金的强度和硬度。

1.5 拉伸性能

通过万能拉伸试验机测试拉伸性能。完成加工后,采用砂纸将其打磨光滑,防止拉伸时出现应力集中。热处理后在拉伸试样的两侧打磨掉0.4 mm,确保拉伸处无氧化。应力集中量如式(1)所示。

$$\tau = n\tau_0 \quad (1)$$

式中: τ 表示应力集中量; n 表示位错塞积数目; τ_0 表示单个位错塞积的应力。位错塞积越多,集中应力也就越大,发生变形的可能性就越大,其屈服强度也就越低。

由于各个晶粒之间的错位差异,为了协调材料的形变,各个晶粒在塑性形变的过程中会发生滑动变形,因此会位错相交。细晶强化可以用霍尔-佩奇公式来描述,其表达式如式(2)所示。

$$\sigma_s = \sigma_0 + Kd^{-\frac{1}{2}} \quad (2)$$

式中: σ_s 表示材料屈服强度,MPa; σ_0 为材料单晶体的屈服强度,MPa; K 为常数,表示晶界对强度性能的作用; d 表示金属材料多晶体中晶粒的平均直径。

2 结果与讨论

2.1 不同沉积高度和压下量 TC17 钛合金拉伸性能

选用抗拉强度、屈服强度以及延伸率作为评价指

标,对进行了点式锻压激光成形的钛合金进行评价,结果如图2所示。图中试样1为非稳定区0.15 mm压下量,试样2为稳定区0.15 mm压下量,试样3为稳定区0.25 mm压下量。锻件标准中,屈服强度需要大于1 030 MPa,抗拉强度需要大于1 120 MPa,延伸率需要大于7%。由图2可知,试样的屈服强度和抗拉强度均大于标准要求,但延伸率普遍低于标准。随着压下量的增加,屈服强度和抗拉强度逐渐提高,而延伸率则有所波动。点式锻压激光成形过程中产生的晶粒细化和相变是性能提升的主要原因。晶粒尺寸减小使材料屈服强度和硬度提高,因为屈服强度与晶粒尺寸成反比,更多的晶界能够有效阻碍位错运动,从而增强抗变形能力。细化晶粒还可改善材料内部的应力分布,降低局部应力集中,进而提升抗裂性和韧性。同时,裂纹在细小晶粒中扩展时需穿越更多晶界,裂纹路径被改变并伴随更高能量耗散,使材料表现出更强的抗裂纹扩展能力。由此,晶粒细化实现了强度与塑性的协同提升,显著改善了钛合金的综合力学性能^[19]。

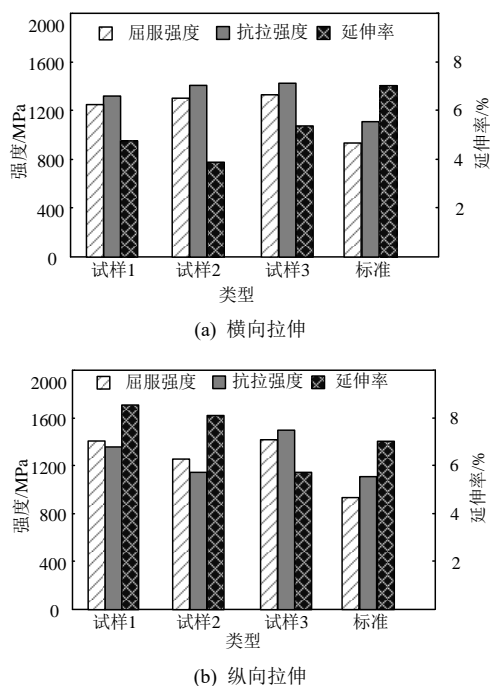
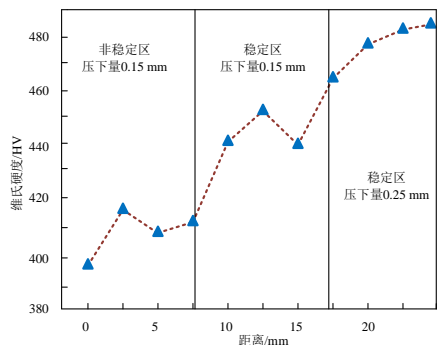


图2 不同沉积高度和压下量 TC17 钛合金的拉伸性能
Fig.2 Tensile properties of TC17 titanium alloy with different deposition height and reduction amount

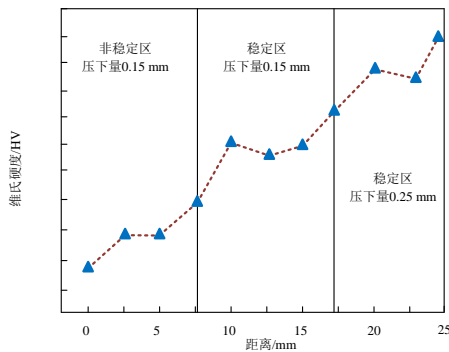
2.2 点式锻压激光成形钛合金硬度分析

为了更好地反映点式锻压激光成形钛合金的性能,对其硬度进行检测,结果如图3所示。由图3可知,在非稳定区0.15 mm压下量中,其纯熔层硬度

为397 HV；在稳定区0.15 mm压下量中，其硬度值范围为421~457 HV；在稳定区0.25 mm压下量中，其硬度值范围为467~489 HV。TC17钛合金在相同压下量条件下的硬度普遍高于TA15。这种差异主要源于两者的合金成分不同。TC17属于高强度 $\alpha+\beta$ 型钛合金，含有较多强化元素如Mo、Cr、Zr等，易形成细小的析出相，强化机制主要包括固溶强化与位错强化。而TA15中含有较多的V和Si，虽然也具有一定的强化作用，但其综合强化能力较弱。相比之下，TA15基体材料在同样条件下的微观组织相对粗大，热影响区强化效果有限，导致硬度偏低。



(a) TC17 钛合金



(b) TC15 钛合金

图3 点式锻压激光成形钛合金硬度

Fig.3 Hardness of titanium alloy formed by point forging laser

2.3 退火温度对钛合金拉伸性能分析

在不同退火温度影响下，对钛合金的拉伸性能进行分析对比。测试了不同工艺条件下的主要性能指标，包括压下量(CA)、延伸率(ER)、屈服强度(YS)、抗拉强度(TS)和弹性模量(EM)，结果如表2所示。由表2可知，退火处理温度和压下量对钛合金力学性能影响显著，整体呈现“低温强度高、塑性低，高温强度降、塑性升”规律。随着退火温度从700 °C 升至770 °C，延伸率明显提高，其中0.15 mm压下量

由5.7%增至14.6%，提升超过150%；0.25 mm压下量由9.2%增至16.2%，提高约76%，同时屈服强度和抗拉强度仅轻微下降(约7%~12%)。当退火温度升至840 °C时，延伸率继续小幅增加，但屈服强度与抗拉强度大幅下降，分别较700 °C降低25%~30%，低于锻件标准。主要原因是高温退火促进了晶粒长大与残余应力释放，提高了塑性，但伴随强化相溶解及位错密度降低，强度明显下降。压下量增大可改善延伸率，但对强度影响有限。高温退火显著提高了延伸率，但强度大幅降低，不满足锻件标准。退火温度越高，晶粒越易长大，材料的延伸率越高，但强度显著下降。较大压下量会导致材料内部应力更多地释放，延伸率显著提高，但强度相应下降。

表2 退火温度对钛合金拉伸性能的影响

Tab.2 Influence of annealing temperature on tensile properties of titanium alloys

温度/°C	CA/mm	ER/%	YS/MPa	TS/MPa	EM/GPa
700	0.15	5.7	1 197	1 298	119
	0.25	9.2	1 256	1 377	115
770	0.15	14.6	1 124	1 238	117
	0.25	16.2	1 107	1 212	109
840	0.15	15.6	925	1 018	111
	0.25	17.4	899	977	113
锻件标准	-	>7	>1 030	>1 120	>105

2.4 不同压下量及退火温度的 TC17 钛合金硬度

不同压下量各退火温度TC17钛合金硬度如图4所示。由图4可知，随着激光成形温度的增加，材料的硬度整体呈现下降趋势，700 °C 下的硬度最高，其次是770 °C，最低的是840 °C。在距离为0~10 mm

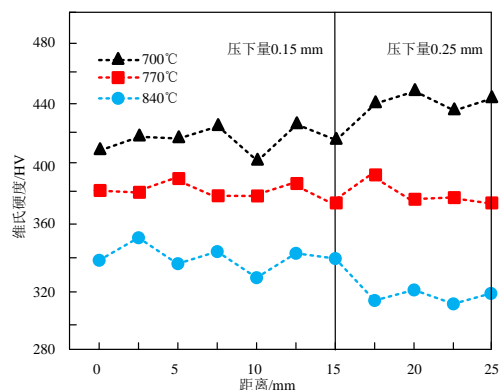


图4 不同压下量各退火温度 TC17 钛合金硬度

Fig.4 Hardness of titanium alloy TC17 with different pressing quantities at different annealing temperatures

的范围内,3种温度下的硬度值相对稳定,但700 °C下硬度值明显高于770和840 °C;在距离为10~25 mm的范围内,硬度值继续保持稳定,依旧是700 °C下的硬度最高,其次是770 °C,840 °C的硬度最低。高温处理会导致材料的晶粒长大,从而降低硬度。此外,高温下强化相会溶解,导致硬度进一步降低^[20]。点式锻压激光成形过程中,激光的局部加热使得热影响区的温度分布不均匀,导致材料在不同区域的硬度变化。而锻压过程则可能对材料的微观结构产生影响,使得不同区域的硬度有所差异。

2.5 固溶温度对不同压下量 TC17 钛合金拉伸性能的影响

固溶温度是指在热处理过程中,将金属或合金加热到其内部的第二相或溶质元素完全溶解到基体中所需的温度,这个过程称为固溶处理。固溶处理后,材料会被迅速冷却,使得溶质元素在基体中形成过饱和固溶体,进一步的时效处理可以使这些溶质元素析出,形成析出强化相,从而提高材料的强度和硬度。不同固溶温度下,对不同压下量TC17钛合金的拉伸性能进行分析,结果见表3。

表3 固溶温度对不同压下量 TC17 钛合金拉伸性能的影响

Tab.3 Effects of solid solution temperature on tensile properties of TC17 titanium alloy with different reduction

固溶温度/°C	退火处理/°C	CA/mm	ER/%	YS/MPa	TS/MPa	EM/GPa
790	630	0.15	11.0	1 169	1 271	109
		0.25	13.5	1 137	1 256	121
810	630	0.15	11.5	1 209	1 318	115
		0.25	14.7	1 193	1 298	118
830	630	0.15	8.3	1 249	1 358	118
		0.25	10.1	1 223	1 325	114
850	630	0.15	2.3	1 207	1 309	111
		0.25	3.5	1 226	1 334	116
锻件标准	-	-	≥7	≥1 030	≥1 120	≥105

由表3可知,固溶处理温度和压下量对材料的力学性能有显著影响。随着固溶处理温度的升高,TC17钛合金的屈服强度和抗拉强度总体呈上升趋势。这一现象不仅源于较高温促进溶质原子在晶格中的扩散,从而增强固溶强化效应,还与其显微组织中 α 相与 β 相的比例变化密切相关。TC17为典型的 $\alpha+\beta$ 两相钛合金,其中 α 相为六方密排结构,具备

较高的强度但塑性较差; β 相为体心立方结构,塑性优良但强度相对较低。随着固溶温度的提高, β 相含量逐渐增加,材料的整体可变形能力增强,有助于位错运动与应力释放,从而在一定温度范围内提升强度和延伸率。然而,当温度过高时,过量 β 相生成会降低晶界强化效应,同时诱发晶粒粗化,导致强度下降、延伸率波动,表现出典型的强-塑折中现象^[21]。不同压下量下,延伸率普遍随着压下量的增加而提高,表明更大的压下量有助于增加材料的塑性变形。然而,较大的压下量也可能导致材料内部应力增大,略微降低屈服强度和抗拉强度。综合来看,在固溶处理温度较低时,材料的延伸率、屈服强度和抗拉强度表现出较为均衡的性能;而在较高温度下,虽然强度提高,但延伸率下降,材料变脆。

2.6 固溶温度对不同压下量 TC17 钛合金硬度的影响

对不同固溶温度下、不同压下量TC17钛合金的硬度如图5所示。由图5可知,固溶处理温度越高,材料的维氏硬度值越高,850 °C下硬度最高,这与较高温促进溶质原子扩散和固溶强化效应有关。压下量为0.25 mm时,材料的硬度值略高于压下量为0.15 mm时,表明较大的压下量会增加变形强化效应,提高硬度。随着距离表面深度的增加,硬度值变化较小,说明表面处理的硬化效果在整个样品内部均匀分布。不同深度下,硬度值的波动幅度不大,尤其是在较高固溶处理温度下,硬度值更为稳定。此外,不同压下量下的硬度波动也有区别。较大压下量下的硬度波动较小,较为稳定,而较小压下量下的硬度波动较大。通过调整固溶处理温度和压下量,可以显著改善材料的硬度,优化其力学性能。

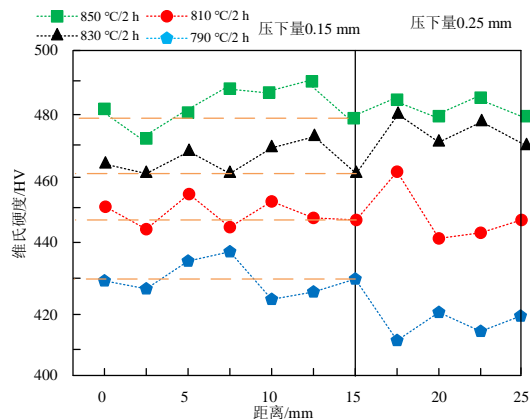


图5 固溶温度对不同压下量 TC17 钛合金硬度的影响

Fig.5 Effects of solid solution temperature on the hardness of TC17 titanium alloy with different reduction volumes

从微观来看, 压下量的增加不仅导致塑性应变增强、位错密度上升, 也可能引发钛合金变形机制的转变。在 $\alpha+\beta$ 钛合金中, 当应变水平达到一定阈值时, 主导变形机制可能从常规位错滑移切换至孪生变形, 特别是在 α 相中更易形成孪晶结构。这一机制转变将对材料的强化方式与硬度产生显著影响。因此, 压下量从0.15 mm增加至0.25 mm时, 除位错强化外, 孪生诱导的应力滞留与晶界阻碍效应亦可能成为额外的强化源。

3 结论

采用点式锻压激光成形对TC17钛合金进行加工, 通过拉伸性能试验和硬度分析评估其力学性能。

(1) 适当的压下量能显著提高材料的强度, 但延伸率较低, 表现出强度与塑性之间的不均衡。

(2) 退火处理能够改善材料的塑性, 在770°C退火条件下, 延伸率明显提高, 但在840°C时, 强度显著下降, 无法满足工程服役要求。随着固溶温度的升高, 材料的强度逐步提高, 延伸率保持在可接受范围内。然而, 固溶温度过高时, 材料显著脆化。

(3) 高温热处理导致晶粒长大, 强化相溶解, 硬度逐渐下降。较大压下量可能引发变形机制由位错滑移转变为孪生变形。点式锻压激光成形工艺能够提高TC17钛合金力学性能, 通过优化压下量和退火温度, 可以在一定程度上提高合金的综合性能。

参考文献

- [1] 王占栋, 王世彬, 吴二柯, 等. 水下定向能量沉积修复钛合金电化学腐蚀特性研究[J]. 中国激光, 2022, 49(14): 311-341.
- [2] 高双胜, 靳文颖, 曹霞, 等. TC4钛合金薄壁件电子束熔丝增材修复熔覆组织及性能研究[J]. 热加工工艺, 2022, 51(12): 71-73.
- [3] 赵萍, 刘鹏, 王建阳, 等. 热处理对SLM制备钛合金散热结构组织性能的影响[J]. 电焊机, 2023, 53(5): 54-58.
- [4] 张骞, 张成竹, 林波, 等. 重熔摆动激光焊修复TC4钛合金焊接接头组织和性能[J]. 焊接, 2023, 32(1): 55-59.
- [5] 张成阳, 何思逸, 杨威, 等. Y_2O_3 弥散强化TC4钛合金粉末及其激光熔覆组织性能研究[J]. 钢铁钒钛, 2023, 44(1): 64-71.
- [6] 刘军军, 姜昊, 雷振坤, 等. 基于轮廓法测量钛合金激光熔覆中的残余应力[J]. 实验力学, 2023, 38(3): 285-295.
- [7] 郑超, 胡生双, 张颖, 等. 激光修复TC18钛合金组织及性能特征[J]. 铸造, 2022, 71(1): 44-47.
- [8] 刘颖鑫. 探究钛金属材料在工艺美术中的应用[J]. 中国锰业, 2017, 35(4): 101-106.
- [9] 蒋圣威, 周红霞, 李雪婷, 等. 基体表面粗糙度对冷喷涂Ti6Al4V界面结合的数值模拟[J]. 中国表面工程, 2022, 35(3): 262-272.
- [10] 孙倩, 孙向阳, 宋燕利, 等. 电磁冲击对TC11钛合金叶片疲劳性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2023, 33(3): 752-766.
- [11] WANG L, LUO S, KAINANL, et al. Effect of laser additive repair on high cycle fatigue properties of TC17 titanium alloy. *International Journal of Fatigue*, 2024, 178(1): 108026.
- [12] 李明星, 岳彩旭, 刘献礼, 等. 钛合金框架类零件铣削用立铣刀设计与应用研究进展[J]. 机械工程学报, 2023, 59(23): 283-309.
- [13] ZHOU S, AN J H, WANG X, et al. Study on fatigue crack propagation behavior of TA15 titanium alloy repaired by laser deposition repair[J]. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 2022, 45(12): 3692-3700.
- [14] 肖蒲庐, 陈观华, 陈宇, 等. 飞秒激光织构钛合金表面形貌及润湿性研究[J]. 中国激光, 2023, 50(16): 167-177.
- [15] 李嘉伟, 渠佳慧, 谈振华, 等. 外加压应力对Ti-35421合金钝化膜损伤修复影响的原位电化学研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2023, 52(4): 1419-1425.
- [16] 周丹, 王鹏程, 张腾飞, 等. ZL101A合金TIG修复色差及组织性能间的相关性研究[J]. 机械工程学报, 2023, 59(7): 398-406.
- [17] 卢楠楠, 郭以沫, 杨树林, 等. 激光增材修复单晶高温合金的热裂纹形成机制[J]. 金属学报, 2023, 59(9): 1243-1252.
- [18] 徐荣, 王文军, 祝弘滨, 等. 激光定向能量沉积Al-Mg-Sc-Zr修复5083-H112铝合金的组织性能[J]. 材料工程, 2024, 52(2): 40-49.
- [19] 程颖, 洪涛, 易浩, 等. TiB₂粒子尺寸分布对Al-5Ti-1B晶粒细化效果的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2024, 44(4): 527-531.
- [20] 张艳, 黄光杰, 何杰, 等. EA4T钢的高温动态软化模型及晶粒演化研究[J]. 钢铁研究学报, 2024, 36(5): 650-659.
- [21] 张文玉, 刘先兰, 伍杰, 等. 固溶温度对Ti-Ta合金微观结构及阻尼性能的影响[J]. 金属热处理, 2024, 49(1): 166-171.