

热处理工艺对 Ti650 合金板材组织演变及性能的影响研究

侯红苗, 王 晓, 杨海瑛, 赵圣泽, 周 伟, 闫 康, 钱融涛, 辛社伟

(西北有色金属研究院, 陕西 西安 710016)

摘要: 研究了不同热处理工艺对 Ti650 合金板材组织演变及性能的影响。结果表明: Ti650 合金板材对固溶温度的变化较为敏感, 随着固溶温度的升高, 加剧了初生 α 相的溶解, 次生 α 相尺寸更加细小, 且交错排列, 增加了位错运动的阻力, 板材强度升高, 塑性降低。提高时效温度, 次生 α 相由细针状长大粗化成为长片层状或短片层状, 交错排列成不同取向的集束, 板材塑性大幅升高, 强度略有降低。在时效温度 700 °C、时效时间 2.5~6 h 条件下, 时效时间对板材组织与性能的影响较小。固溶冷却速率会影响次生 α 相的形核、析出和长大, 降低冷却速率, 次生 α 相由弥散的细针状长大成为短棒状, 细晶强化作用减弱, 板材室温强度降低, 塑性提高。

关键词: Ti650 合金; 板材; 固溶时效; 组织演变; 断口形貌

中图分类号: TG166.5; TG146.23

文献标识码: A

文章编号: 1009-9964(2024)02-006-05

Effect of Heat Treatment on Microstructure Evolution and Properties of Ti650 Alloy Plate

Hou Hongmiao, Wang Xiao, Yang Haiying, Zhao Shengze, Zhou Wei, Yan Kang, Qian Rongtao, Xin Shewei

(Northwest Institute for Nonferrous Metal Research, Xi'an 710016, China)

Abstract: The effects of different heat treatment processes on the microstructure evolution and properties of Ti650 alloy plate were studied. The results show that Ti650 alloy plate is sensitive to the change of solution temperature. The primary α phase dissolution occurs with the increase of solution temperature, and the secondary α phase is smaller in size and staggered, which increases the resistance of dislocation movement, increases the strength and decreases the plasticity of the plate. Increasing aging temperature, secondary α phase changes from fine needle like to long or short layered, arranged in staggered bundles with different orientations, resulting in a significant increase in the plasticity and an appropriate decrease in strength. Under the condition of aging temperature of 700 °C and aging time of 2.5~6 hours, the effect of aging time on the microstructure and properties of the plate is relatively small. The nucleation, precipitation and growth of secondary α phase are affected by different solution cooling rates. Reducing cooling rate, the secondary α phase grows from dispersed fine needle to short rod, and the strengthening effect of fine grains weakens, resulting in the decrease of room temperature strength, and the increase of plasticity.

Keywords: Ti650 alloy; plate; solution aging; organizational evolution; fracture morphology

高温钛合金是航空飞行器的关键材料之一, 具有优异的高温强度、高耐热性、高蠕变抗力、高疲劳强度等优点, 被广泛用于制作航空结构件^[1-3]。高温钛合金的热强性和热稳定性决定其使用温度^[4], 热强性可以保证在高温环境下不因强度失效而发生事故, 热稳定性可以保证在高温条件下保持自身组织的稳定。目前已成功应用的可在 600 °C 环境中使用的高温钛合金有美国的 Ti-1100

合金、英国的 IMI834 合金、俄罗斯的 BT18Y 和 BT36 合金, 以及我国开发的具有自主知识产权的 Ti60 和 Ti600 合金^[5-6]。其中, Ti600 是西北有色金属研究院研制的一种抗蠕变性能优异的高温钛合金^[7]。然而, 随着现代航空制造业的发展, 各种飞行器关键部件的使用温度越来越高, 对其材料的高温性能也提出了更高的要求。

Ti650 合金是西北有色金属研究院在 Ti600 合金基础上, 自主研制的可在 650 °C 环境中使用的近 α 型高温钛合金。该合金是 Ti-Al-Sn-Zr-Mo-Si-Nb-Ta-C 系合金,

收稿日期: 2023-12-18

通信作者: 侯红苗 (1987—), 女, 高级工程师。

采用多元合金元素进行固溶强化^[8]。由于采用 Ti650 合金制成的结构件将面临在 650 °C 环境中长时间服役的考验，为了确保其产品在高温使用时具有良好的高温性能及热稳定性，系统研究了不同热处理工艺对 Ti650 合金板材组织演变规律及性能特征的影响，以期为该合金制品的推广应用提供参考。

1 实验

1.1 实验材料

实验材料为经熔炼、锻造、轧制得到的 60 mm 厚 Ti650 合金板材，其轧态组织如图 1 所示。由图 1 可见，初生等轴 α 相弥散分布于 β 转变组织中，初生 α 相尺寸较小，约 15~20 μm ，组织均匀。

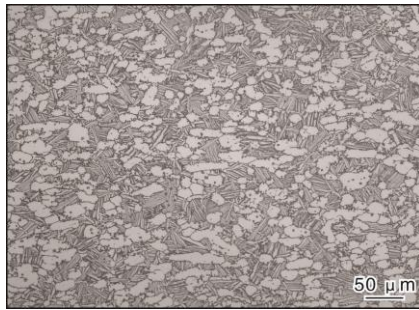


图 1 Ti650 合金板材轧态显微组织

Fig.1 Microstructure of Ti650 alloy plate as rolled

1.2 实验方法

在平行于板材轧制方向上切取试样，加工成 $\phi 10\text{ mm} \times 70\text{ mm}$ 的拉伸试样、 $\phi 13\text{ mm} \times 140\text{ mm}$ 的蠕变试样、 $10\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ 的金相试样。对试样进行不同工艺的固溶时效热处理，具体热处理制度见表 1。

采用 Instron 1185 电子万能材料试验机进行室温拉

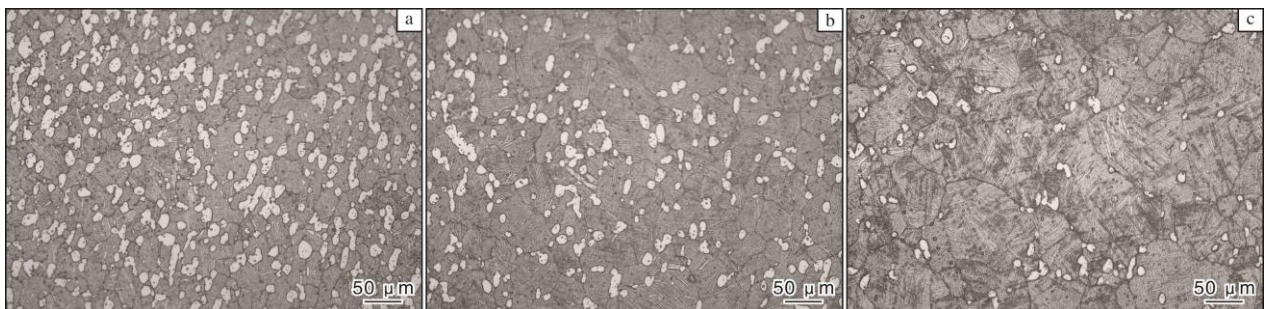


图 2 不同固溶温度下 Ti650 合金板材的显微组织

Fig.2 Microstructures of Ti650 alloy plate treated at different solution temperatures: (a) HT1; (b) HT2; (c) HT3

表 2 为不同固溶温度下 Ti650 合金板材的室温力学性能。由表 2 可知，固溶温度对 Ti650 合金板材强度的影响不大，强度均在 1100 MPa 左右，而塑性普遍较低，固溶温度为 990、1000 °C 时延伸率仅为 5.5%，表现为中

表 1 Ti650 合金板材热处理制度
Table 1 Heat treatments of Ti650 alloy plate

No.	Heat treatment
HT1	980 °C/2 h/AC+660 °C/2.5 h/AC
HT2	990 °C/2 h/AC+660 °C/2.5 h/AC
HT3	1000 °C/2 h/AC+660 °C/2.5 h/AC
HT4	990 °C/2 h/AC+700 °C/2.5 h/AC
HT5	990 °C/2 h/AC+800 °C/2.5 h/AC
HT6	990 °C/2 h/AC+700 °C/4 h/AC
HT7	990 °C/2 h/AC+700 °C/6 h/AC
HT8	990 °C/2 h/FC+700 °C/2.5 h/AC
HT9	990 °C/2 h/WQ+700 °C/2.5 h/AC

伸性能、高温拉伸性能及蠕变性能测试。采用 OLYMPUS PMG3 光学显微镜和 JSM-6460 扫描电子显微镜进行显微组织和室温拉伸断口形貌观察。金相试样腐蚀试剂由 HF、HNO₃、H₂O 按体积比 1:3:7 混合而成。

2 结果与讨论

2.1 固溶温度对组织演变及性能的影响

图 2 为不同固溶温度下 Ti650 合金板材的显微组织。从图 2 可以看出，Ti650 合金板材对固溶温度较为敏感，初生 α 相随着固溶温度的升高发生溶解，含量减少，由 980 °C 时的 30% 减少到 1000 °C 时的 5% 左右， α 相尺寸也由 20 μm 减小至 10 μm ， β 转变基体中的部分次生 α 相由溶解的初生 α 相转变而来，次生 α 相含量随之增多，尺寸更为细小。同时可观察到，随着固溶温度的升高，初生 α 相多聚集于 β 晶界及其附近区域，这种组织会降低合金的塑性。

高强度、低塑性的特点。在 980~1000 °C 的固溶温度下，次生 α 相尺寸较细，且交错排列，相界面大幅增加，在 660 °C 时效时残余 β 相进一步析出尺寸更加细小的次生 α 相，界面强化作用增大，增加了位错运动的阻力，晶

粒的协调变形能力变低, 导致塑性变形困难, 最终合金表现为强度升高、塑性降低。

表 2 不同固溶温度下 Ti650 合金板材的室温力学性能

Table 2 Room temperature mechanical properties of Ti650 alloy plate treated at different solution temperatures

Heat treatment	R_m /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	A /%	Z /%
HT1	1094	986	6.5	11
HT2	1100	970	5.5	11
HT3	1103	974	5.5	10

2.2 时效温度对组织演变及性能的影响

Ti650 合金板材显微组织对固溶温度较为敏感, 考

虑到合金室温及高温综合性能的匹配性, 在固溶温度为 990 °C 时显微组织各相分布比例 (初生 α 相含量约为 15%~20%) 较为合理, 故选择固溶温度为 990 °C 进行合金性能研究。在 660 °C 时效温度下, Ti650 合金板材表现为低塑性, 为了提高其塑性, 进行了不同温度的时效处理研究。图 3 为不同时效温度下 Ti650 合金板材的显微组织。从图 3 可以看出, 显微组织由初生 α 相和 β 转变基体组成, β 转变基体内存在次生 α 相和残余 β 相。提高时效温度, 初生 α 相含量及尺寸基本未发生变化, 次生 α 相由细针状 (图 3a) 长大粗化为长片层状 (图 3c), 有的呈短片层状, 交错排列成不同取向的集束。图 3b 组织状态为介于图 3a 与图 3c 之间的过渡状态。

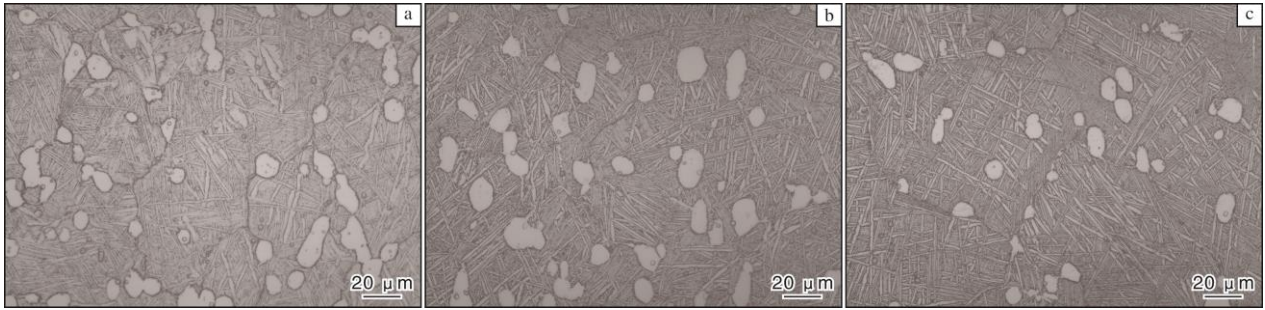


图 3 不同时效温度下 Ti650 合金板材的显微组织

Fig.3 Microstructures of Ti650 alloy plate treated at different aging temperatures: (a) HT2; (b) HT4; (c) HT5

不同时效温度下 Ti650 合金板材的室温力学性能如表 3 所示。时效温度提高, 板材的塑性得到明显改善, 延伸率由 5.5% 增大至 12.5%, 提高幅度约 127%, 断面收缩率也提高了约一倍, 但强度有所降低。在较低时效温度 (660 °C) 下, 次生 α 相呈细针状, 弥散强化和细晶强化占主导作用^[9], 位错运动阻力增大, 滑移变形困难, 故合金强度高、塑性低。当时效温度升高至 800 °C 时, 次生 α 相长大粗化, 弥散强化及细晶强化作用减弱, 并且残余 β 相的尺寸也增大, 滑移系增多有利于位错运动, 表现为强度适当的降低, 但塑性大幅升高。

表 3 不同时效温度下 Ti650 合金板材的室温力学性能

Table 3 Room temperature mechanical properties of Ti650 alloy plate treated at different aging temperatures

Heat treatment	R_m /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	A /%	Z /%
HT2	1100	970	5.5	11
HT4	1078	951	11.0	19
HT5	1040	920	12.5	24

2.3 时效时间对组织演变及性能的影响

Ti650 合金板材经 990 °C/2 h/AC 固溶处理后, 再在 700 °C 进行不同时间的时效处理, 获得的显微组织如图 4

所示。在不同时效时间下合金的显微组织中初生 α 相含量及尺寸、次生 α 相含量及尺寸无明显差别。表 4 为经不同时间时效后 Ti650 合金板材的室温及高温力学性能。从表 4 可以看出, 合金室温及高温力学性能变化幅度较小, 说明时效时间对其力学性能影响较小。在时效温度为 700 °C, 时效时间 2.5~6 h 范围内, 合金显微组织无明显差异, 次生 α 相形核析出, 尺寸未发生明显变化, 合金性能也在此范围内保持稳定。

2.4 固溶冷却速率对组织及性能的影响

韧性材料室温拉伸断口一般由边缘部位的剪切唇区、中间部位的放射区及中心部位的纤维区组成。图 5 为不同固溶冷却速率下 Ti650 合金板材的室温拉伸断口形貌及微观组织。由图 5a~5c 可以看出, 在不同冷却速率下断口表面均呈纤维状, 粗糙不平, 断口主要由边缘剪切唇区和中部纤维区组成, 没有明显的放射区。同时可以观察到, 与空冷和炉冷后的断口形貌相比, 水冷后的断口更加崎岖不平。图 5d~5f 为断口中部纤维区的微观形貌。炉冷方式下, 断口中可观察到大量韧窝 (图 5d)。在空冷、水冷方式下, 断口中除了韧窝, 还可观察到解理面 (图 5e、5f)。由此说明, 随着冷却速率提高, 材料的断裂方式由一种模式变为多种混合模式。解理面的存在会降低材料的塑性。

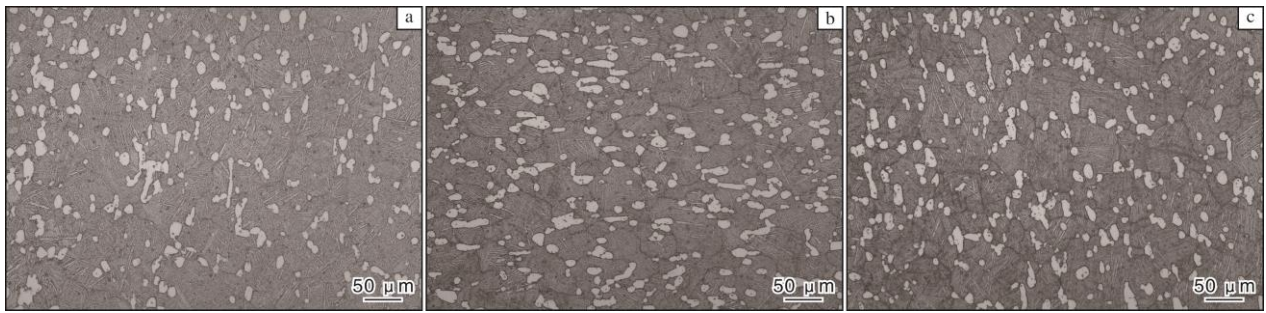


图 4 经不同时间时效后 Ti650 合金板材的显微组织

Fig.4 Microstructures of Ti650 alloy plate treated at different aging time: (a) HT2; (b) HT6; (c) HT7

表 4 经不同时间时效后 Ti650 合金板材的室温及高温力学性能

Table 4 Mechanical properties at room temperature and high temperature of Ti650 alloy plate treated at different aging time

Heat treatment	Temperature/°C	R_m /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	A /%	Z /%
HT4	RT	1078	951	11.0	19
	650	662	490	26.5	71
HT6	RT	1077	955	12.0	20
	650	651	478	23.5	70
HT7	RT	1080	958	12.0	23
	650	654	489	29.5	73

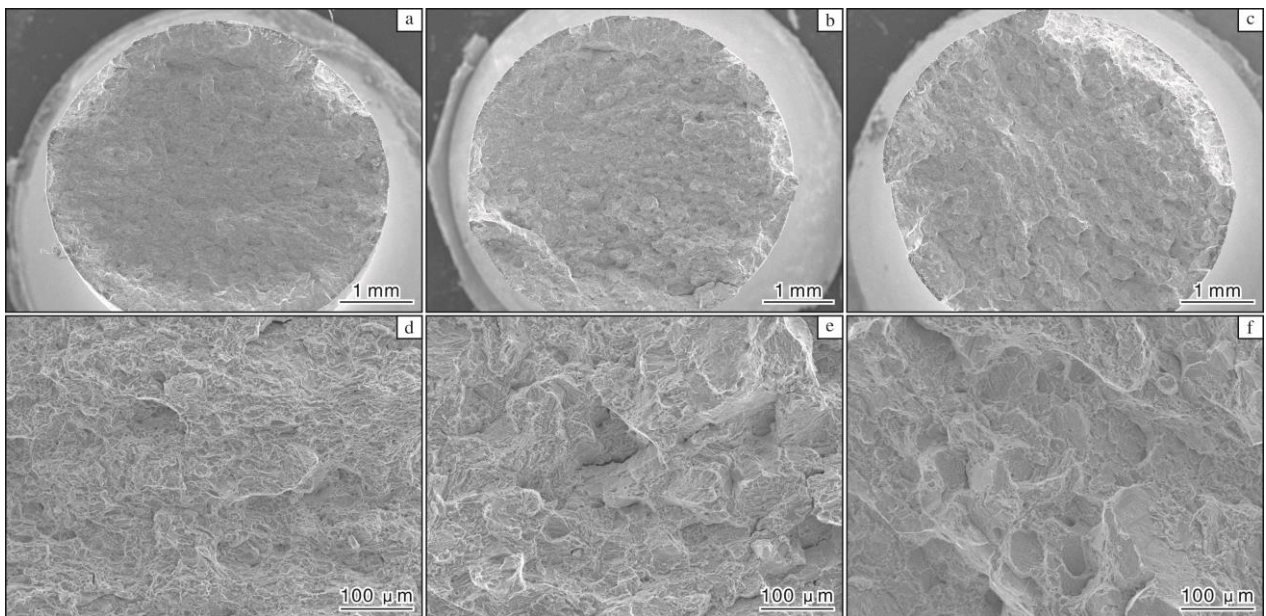


图 5 不同固溶冷却速率下 Ti650 合金板材的拉伸断口形貌及微观组织

Fig.5 Tensile fracture morphologies and microstructures of Ti650 alloy plate at different solution cooling rates: (a, d) HT8; (b, e) HT4; (c, f) HT9

图 6 为不同冷却速率下 Ti650 合金板材的 SEM 照片。从图 6 可以看出，冷却速率对显微组织的影响较大，次生 α 相的形态及尺寸变化尤为明显。冷却速率较快(水冷)时，次生 α 相为细针状，尺寸短小，弥散分布。细晶弥散强化作用增加了位错运动阻力，晶粒变形困难导

致塑性降低；降低冷却速率(空冷)时，次生 α 相粗化，呈现为板条状，尺寸增大；冷却速率极慢(炉冷)时，次生 α 相进一步长大成为短棒状，此时细晶强化作用减弱，有利于位错运动，合金塑性提高。冷却速率主要影响次生 α 相的形核、析出和长大。

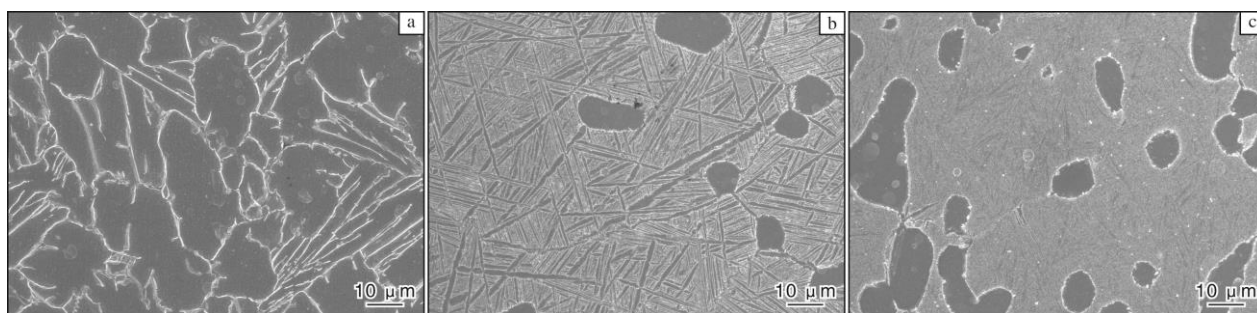


图6 不同固溶冷却速率下 Ti650 合金板材的 SEM 照片

Fig.6 SEM images of Ti650 alloy plate treated at different solution cooling rates: (a) HT8; (b) HT4; (c) HT9

表5为Ti650合金板材在不同固溶冷却速率下的室温及高温力学性能。对比表5中数据可知,提高冷却速率,板材的室温强度随之增大,水冷时抗拉强度相比炉冷提高251 MPa,屈服强度提高225 MPa,增幅达25%,但塑性随之变差,断面收缩率降幅达48%,水冷时延伸率仅为7.5%。这是由于短棒状的次生 α 相可以提高板材的室温塑性,但强度较低;细针状的次生 α 相使板材拥有较高强度,但塑性较差,故板材呈现出上述室温力学性能变化。与室温力学性能相比,板材高温力学性能呈现不同的变化趋势,其抗拉强度随着冷却速率增大而提高,塑性也提高,但屈服强度先提高后降低,在空冷时屈服强度最高。高温蠕变性能也呈现出相同的变化趋势,在空冷时蠕变残余伸长率仅为0.213%,低于炉冷及水冷时的残余伸长率。板材高温性能主要受合金中硅化物析出的影响,有待进一步深入研究分析。

表5 不同固溶冷却速率下 Ti650 合金板材的室温及高温力学性能
Table 5 Mechanical properties at room temperature and high temperature of Ti650 alloy plate treated at different solution cooling rate

Heat treatment	Temperature/ °C	R_m /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	A/%	Z/%	Creep/%
HT8	RT	973	887	13.5	27	—
	650	572	431	18.0	34	0.271
HT4	RT	1078	951	11.0	19	—
	650	662	490	26.5	71	0.213
HT9	RT	1224	1112	7.5	14	—
	650	682	437	34.5	90	0.440

3 结 论

(1) Ti650 合金板材对固溶温度比较敏感,随着固溶温度的升高,加剧了初生 α 相的溶解,次生 α 相尺寸更加细小,且交错排列,塑性变形困难,合金表现为强度

升高,塑性降低。

(2) 提高时效温度,次生 α 相长大粗化,交错排列成不同取向的集束,强化作用减弱,有利于位错运动,合金表现为强度略有降低,塑性大幅升高。

(3) 在时效温度700 °C、时效时间2.5~6 h条件下,合金次生 α 相形核析出,尺寸未发生明显变化,时效时间对合金组织与性能的影响较小。

(4) 固溶冷却速率会影响次生 α 相的形核、析出和长大。降低冷却速率,次生 α 相由弥散的细针状长大成为短棒状,细晶强化作用减弱,板材室温强度降低,塑性得到提高。

参考文献 References

- [1] 郭举乐, 田永武. 600 °C高温钛合金的研究进展[J]. 铸造技术, 2020, 41(9): 894-896.
- [2] 樊智贤, 谢洪志, 张晓巍, 等. 不同状态的 Ti65 钛合金板材各向异性的研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2022, 51(12): 4783-4787.
- [3] 刘艳明, 赵兴兴, 汪欣, 等. BT25Y 钛合金在 600~800 °C的高温氧化行为[J]. 稀有金属材料与工程, 2022, 51(4): 1332-1340.
- [4] 朱培亮, 辛社伟, 毛小南, 等. 高温钛合金的热稳定性研究进展[J]. 钛工业进展, 2023, 40(1): 42-48.
- [5] 冯秋元, 郭佳林, 杨军, 等. Ti60 高温钛合金的热变形行为 I: 本构方程[J]. 塑性工程学报, 2021, 28(11): 158-166.
- [6] 李雅迪, 弭光宝, 李培杰, 等. 增材制造 600 °C高温钛合金组织特征及力学性能[J]. 稀有金属材料与工程, 2022, 51(7): 2507-2518.
- [7] 辛社伟, 洪权, 卢亚锋, 等. Ti600 高温钛合金 600 °C下表面稳定性研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2011, 40(8): 1422-1425.
- [8] 张菁丽, 辛社伟, 张永强, 等. 热处理对 Ti650 钛合金电子束焊接组织和力学性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2021, 50(1): 299-303.
- [9] 李明兵, 王新南, 商国强, 等. TC32 钛合金不同热处理工艺下的组织性能及断裂机制[J]. 金属热处理, 2021, 46(4): 112-117.