

热处理工艺 对TC18钛合金板材性能和组织的影响

周雪红, 贾云云, 李伟基, 王瑞苗

新疆湘润新材料科技有限公司 新疆哈密 839000

摘要: 研究了普通退火和简单双重退火两种热处理工艺对TC18钛合金板材性能和组织的影响, 旨在寻找可替代GJB 3763A—2004推荐的复杂双重退火(含中间缓冷工艺)的简化方案。普通退火工艺设定在795~875℃保温2h后空冷(AC); 简单双重退火采用两阶段热处理制度: 第一阶段795~875℃保温2h后空冷(AC), 第二阶段550~650℃保温4h后炉冷(FC)。热处理后对板材进行了室温拉伸试验和显微组织分析。结果表明: 经普通退火处理的板材强度较低且塑性较差, 不具备替代价值; 而经简单双重退火处理后, 筛选出3组工艺参数(795℃×2h/AC+600℃×4h/FC、795℃×2h/AC+650℃×4h/FC、835℃×2h/AC+650℃×4h/FC), 其强度和塑性综合性能与GJB 3763A—2004推荐的复杂双重退火工艺相当。

关键词: TC18钛合金; 普通退火; 双重退火; 强塑积; 显微组织

Effects of heat treatment processes on mechanical properties and microstructure of TC18 titanium alloy plate

ZHOU Xuehong, JIA Yunyun, LI Weiji, WANG Ruimiao

Xinjiang Xiangrun New Materials Technology Co., Ltd., Hami 839000, Xinjiang, China

Abstract: This study primarily investigates the effects of two heat treatment processes, common annealing and simple double annealing, on the properties and microstructure of TC18 titanium alloy plate. The aim is to find a simplified alternative to the complex double annealing process (including intermediate slow cooling) recommended by GJB 3763A-2024. The common annealing process involved holding within the temperature range of 795~875℃ for 2 hours followed by air cooling (AC). The simple double annealing employed a two-stage heat treatment: the first stage involved holding at 795~875℃ for 2h followed by AC, and the second stage involved holding at 550~650℃ for 4h followed by furnace cooling (FC). After heat treatment, room temperature tensile tests and microstructural analysis were performed on the plate. The results indicate that the plate treated with common annealing exhibited lower strength and poorer plasticity, rendering it unsuitable as a replacement. However, after simple double annealing treatment, three sets of process parameters were identified (795℃×2h/AC+600℃×4h/FC, 795℃×2h/AC+650℃×4h/FC, 835℃×2h/AC+650℃×4h/FC) whose comprehensive strength-plasticity properties were equivalent to those achieved with the complex double annealing process recommended by GJB 3763A.

Keywords: TC18 titanium alloy; conventional annealing; double annealing; strength-ductility product; microstructure

基金项目: 新疆维吾尔自治区重点研发任务专项(2022B01029)。

1 序言

TC18钛合金（俄标BT22）作为第三代高强韧 β 型钛合金的典型代表，由俄罗斯全俄航空材料研究院（VIAM）于20世纪60年代基于航空结构轻量化需求率先开发^[1]。其名义成分Ti-5Al-5Mo-5V-1Cr-1Fe（质量分数）通过多元 β 稳定元素协同作用，展现出优异的淬透性与热处理响应特性^[2]，已成功替代TC4合金及部分高强钢应用于飞机起落架、机翼接头等关键承力构件^[3]，成为航空装备减重增效的核心材料之一。

相较于传统钛合金，TC18的核心优势在于其灵活的热处理调控能力。研究表明^[2-5]，通过固溶时效（STA）、复杂双重退火（CDA）、普通退火（FA）及去应力退火（SRA）等工艺组合，可在600~1250MPa范围内梯度调控其力学性能。其中，复杂双重退火因能实现强度、塑性、韧性的最佳平衡，被航空标准GJB 3763A—2004《钛及钛合金热处理》列为推荐工艺：第一阶段高温退火（820~850）℃×2h炉冷至740~760℃并保温1~3h，随后空冷至室温；第二阶段时效处理（500~650）℃×（2~6）h进一步稳定组织。该工艺通过精准控制中间缓冷阶段的相变动力学，既可抑制 β 相→ α' 相马氏体转变导致的脆性，又能促进初生 α 相的均匀析出，为后续时效过程中纳米级次生 α 相的弥散分布提供形核基底^[6]。然而，多阶段控温需求导致该工艺存在生产周期长、能耗高、设备依赖性强的局限性，严重制约了航空航海用大尺寸构件的批产效率。

近年来，简化热处理流程成为TC18工程应用的重要研究方向。本文聚焦于普通退火与简单双重退火（SDA）两种短周期工艺的对比研究，系统揭示其与复杂双重退火的微观组织差异及性能演变规律。

2 试验材料及方法

2.1 试验材料与制备

试验选用15mm厚TC18钛合金热轧板材作为研究对象，其 β 相转变温度经金相法测定为857℃，具体化学成分符合GB/T 3620.1—2016《钛及钛合金牌号要求和化学成分》要求（见表1）。板材经两火切宽轧制，成品火次通过65%变形量的控温轧制获得目标厚度。

表1 TC18钛合金热轧板材化学成分（质量分数）（%）

Ti	Al	V	Mo	Cr	Zr	Fe	O
余量	5.2	5.1	5.08	1.02	0.1	1.2	0.10

2.2 热处理工艺设计

参照GJB 3763A—2004设立复杂双重退火对照组（编号：00[#]，热处理制度：835℃×2h/FC→750℃×2h/AC+600℃×4h/AC），其试验结果作为评判基准。基于表2所设计的热处理制度，研究以下3类工艺。

表2 TC18钛合金热轧板材热处理制度

试样编号	工艺名称	热处理制度
1 [#]	普通退火	795℃×2h/AC
2 [#]	普通退火	835℃×2h/AC
3 [#]	普通退火	875℃×2h/AC
4 [#]	简单双重退火	795℃×2h/AC+550℃×4h/FC
5 [#]	简单双重退火	835℃×2h/AC+550℃×4h/FC
6 [#]	简单双重退火	875℃×2h/AC+550℃×4h/FC
7 [#]	简单双重退火	795℃×2h/AC+600℃×4h/FC
8 [#]	简单双重退火	835℃×2h/AC+600℃×4h/FC
9 [#]	简单双重退火	875℃×2h/AC+600℃×4h/FC
10 [#]	简单双重退火	795℃×2h/AC+650℃×4h/FC
11 [#]	简单双重退火	835℃×2h/AC+650℃×4h/FC
12 [#]	简单双重退火	875℃×2h/AC+650℃×4h/FC

2.3 表征与检测方法

采用Instron5982电子万能试验机进行室温准静态拉伸试验，依据GB/T 228.1—2021《金属材料拉伸试验 第1部分：室温试验方法》加工试样。显微组织分析通过Olympus GX71光学显微镜完成。

3 复杂双重热处理试验结果与分析

3.1 室温拉伸性能对比

通过对比热轧态（0[#]试样）与复杂双重退火态（00[#]试样）的室温拉伸性能（见表3），发现热处理显著改变了材料的强塑性匹配关系，抗拉强度从1536MPa降至1249MPa，降幅达18.7%；屈服强度（ $R_{p0.2}$ ）由1406MPa下降至1164MPa，降幅达17.2%；但断后伸长率（ A ）则从2.5%大幅提升至12.5%，增幅达400%；断面收缩率（ Z ）则从5%大幅提升至26%，增幅420%。上述变化表明，复杂双

重退火工艺有效实现了“牺牲强度换取塑性”的调控目标，为航空结构件的抗冲击设计提供了性能优化空间。

表3 室温拉伸性能

试样编号	R_m /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	A (%)	Z (%)
0 [#]	1536	1406	2.5	5
00 [#]	1249	1164	12.5	26

3.2 显微组织演化分析

经复杂双重退火处理后，组织重构为典型“三态混合”结构：等轴初生 α 相 + 层状次生 α 相 + β 相转变基体（见图1）。复杂双重退火通过调控相比例及组织形貌，使TC18钛合金的强塑积从3840MPa%提升至15612.5MPa%，验证了该工艺在兼顾材料损伤容限与承载能力方面的工程价值。

3.3 组织与性能关联机制

（1）强度下降主因 等轴初生 α 相比例增加削弱了原始 β 相晶界强化作用，同时层状次生 α 相降低了位错运动阻力。

（2）塑性提升机理^[7, 8] 等轴 α 相协调变形能力优于带状组织，延缓局部应力集中； β 相转变基体中纳米次生 α 相通过Orowan机制抑制微裂纹扩展；多尺度 α 相（微米级初生 α 相 + 亚微米级次生 α 相）形成分级滑移带，提高了应变均匀性。

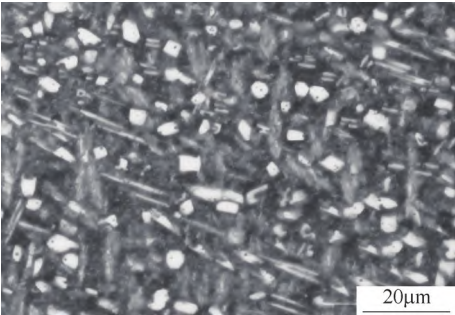


图1 复杂双重退火后金相组织

4 普通退火试验结果与分析

4.1 室温拉伸性能分析

根据表2中的热处理制度，对1[#]、2[#]、3[#]试样进行普通退火，其室温拉伸性能见表4。试验结果表明，2[#]试样（835℃ × 2h/AC）：抗拉强度（ R_m ）下降至1139MPa，塑性显著劣化，断后伸长率（ A ）仅为4.0%，断面收缩率（ Z ）降至19%，呈现典型的

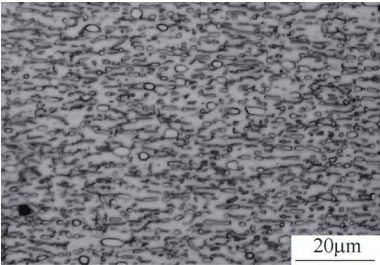
高强度、低塑性特征；3[#]试样（875℃ × 2h/AC）：抗拉强度（ R_m ）下降至822MPa，屈服强度（ $R_{p0.2}$ ）下降至722MPa，而断后伸长率（ A ）和断面收缩率（ Z ）分别提升至15.0%与41%，实现强度、塑性逆转；1[#]试样（795℃ × 2h/AC）：性能介于二者之间，体现出退火温度对性能的梯度调控能力。

表4 室温拉伸性能

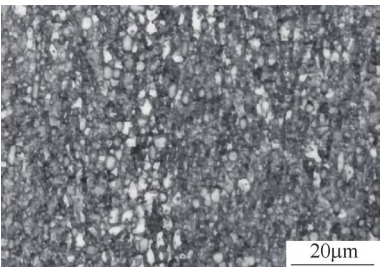
试样编号	R_m /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	A (%)	Z (%)
1 [#]	1066	1030	6.0	30
2 [#]	1139	1106	4.0	19
3 [#]	823	722	15.0	41

4.2 显微组织演化规律

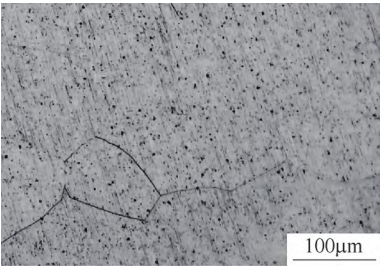
普通退火后金相组织如图2所示。从图2a、b可知，1[#]、2[#]试样金相组织为等轴初生 α 相 + β 相转变基体，随着普通退火温度升高，初生 α 相含量减少， β 相转变基体含量增加。从图2c可知，当温度高于相转变温度后，初生 α 相完全转变为 β 相。



a) 1[#]试样



b) 2[#]试样



c) 3[#]试样

图2 普通退火后金相组织

4.3 组织与性能关联机制

(1) 强度变化主因 2#试样高强度源于等轴 α 相的弥散强化与 β 相基体中高位错密度; 3#试样强度骤降归因于魏氏组织的弱界面结合效应及 α 相片层间 β 相的连续分布。

(2) 塑性提升机理 魏氏组织中针状 α 相的多取向分布促进位错交滑移, 延缓颈缩; 高温退火消除残余应力, β 相比比例增加可提升应变协调能力。

4.4 相变临界温度验证

当初生 α 相体积分数趋近于零时(3#试样), 可判定退火温度(875℃)已超过TC18的 β 相转变温度(T_β), 与金相法检测结果一致。 T_β 以下热处理材料强度由 α 相含量主导, 塑性受 β 相连续性控制; T_β 以上热处理, 组织粗化与织构弱化成为性能劣化主因。此温度阈值对工艺设计具有决定性意义。

5 简单双重退火试验结果与分析

5.1 热处理工艺参数与性能响应关联性

基于表2热处理制度对4#~12#试样进行简单双重退火, 其室温拉伸性能见表5。试验结果表明。

表5 室温拉伸性能

试样编号	R_m /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	A (%)	Z (%)
4#	1558	1477	8.0	17
5#	1699	1590	4.0	13
6#	1483	—	0.5	3
7#	1337	1284	11.0	24
8#	1404	1351	7.0	15
9#	1393	1367	1.0	7
10#	1232	1166	14.0	38
11#	1347	1258	10.0	26
12#	1297	1231	1.5	11

1) 5#试样(高强度工艺)抗拉强度(R_m)达1699MPa, 但断后伸长率(A)仅为4.0%, 呈现典型脆性断裂特征。

2) 10#试样抗拉强度(R_m)1232MPa, 断后伸长率(A)为14.0%, 与复杂双重退火态(00#试样)性能接近, 且塑性提升12%, 证明简化工艺可实现等效性能调控。

3) 第一重退火温度上升时, 抗拉强度(R_m)

呈抛物线变化(峰值835℃), 断后伸长率(A)呈非线性单调下降(见图3a)。

4) 第二重退火温度上升时, 抗拉强度(R_m)呈非线性单调下降, 断后伸长率(A)呈非线性单调上升(见图3b)。

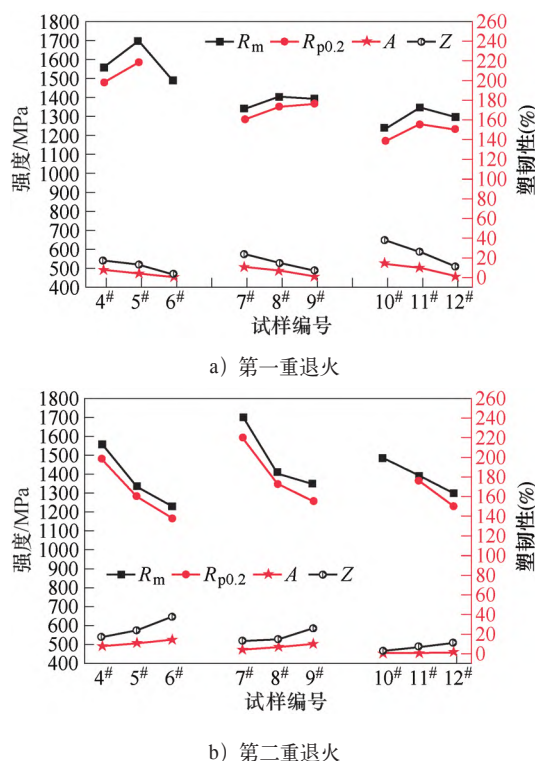


图3 热处理制度对室温拉伸性能的影响

5.2 显微组织演化分析

试验表明, 简单双重退火后组织呈现温度依赖性分异。

1) 低温时效态: 4#、7#、10#试样金相组织为初生 α 相+细小次生 α 相+ β 相转变基体(见图4)。

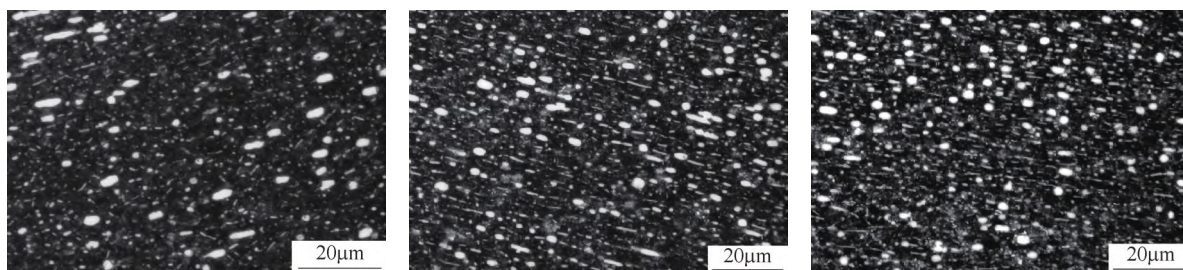
2) 次生 α 相随第二重温度升高而粗化, 导致强度下降, 从微观维度佐证了强度的变化趋势(见图3b)。

3) 亚稳 β 相保留态: 5#、8#、11#试样金相组织为初生 α 相+连续 β 相基体(见图5), 500倍OM下未见次生 α 相, 空冷速率超过 β 亚稳相分解临界速率, 抑制时效 α 相析出。

4) 魏氏组织态: 6#、9#、12#试样金相组织为第一重温度超过 T_β 后 α 相逐渐分解, 形成粗大魏氏组织(见图6)。

5.3 工艺分析与优化

(1) 00#试样与8#试样对比 00#试样炉冷阶段

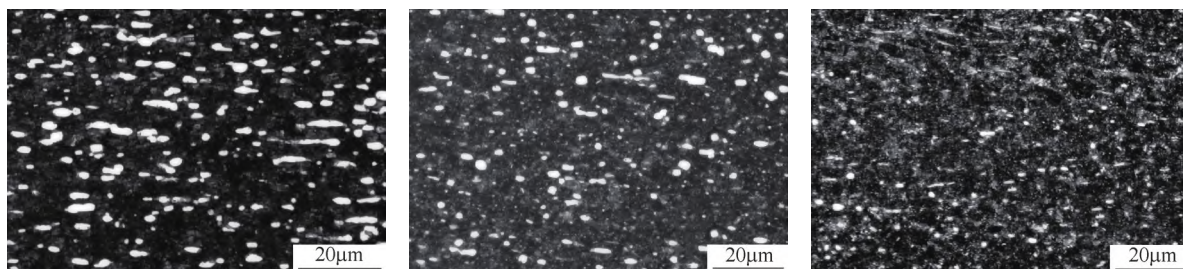


a) 4#试样

b) 7#试样

c) 10#试样

图4 795°C × 2h/AC + 第二重处理金相组织

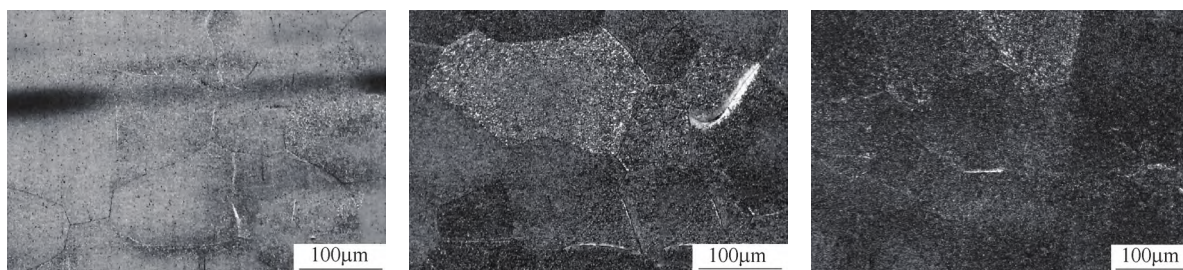


a) 5#试样

b) 8#试样

c) 11#试样

图5 835°C × 2h/AC + 第二重处理金相组织



a) 6#试样

b) 9#试样

c) 12#试样

图6 875°C × 2h/AC第二重处理金相组织

(835→750°C) 触发 β 相→ α 相转变, 形成清晰的层状次生 α 相; 00#试样通过层状 α 相协调变形, A 提升至12.5%, 强塑积达15612.5MPa%。8#试样直接空冷, β 相亚稳相在二次时效中未充分分解^[9, 10], 导致 β 相基体占比升高; 因此8#试样虽获得高强度($R_m=1404\text{MPa}$), 但断后伸长率(A)仅7.0%, 强塑积仅为9828MPa%。由此证明炉冷阶段的重要性。

(2) 00#试样与7#、10#、11#试样对比 简单双重退火(7#、10#、11#试样)性能与复杂双重退火00#试样匹配度较高($\Delta R_m < 5\%$, $\Delta A < 2.5\%$)。证明简单双重退火可通过精准控温替代复杂缓冷步骤, 获得与复杂双重退火相当的强塑积(10#试样对比00#)。

6 结束语

1) 复杂双重退火通过炉冷(835°C→750°C)工艺触发 β 相→ α 相变动力学窗口, 形成层状次生 α 相, 而简单双重退火因空冷速率过快抑制时效析出, 导致 β 相转变基体占比升高。二者组织差异源于中间缓冷阶段的相变触发效应。

2) 第一重退火温度梯度效应: 在795~875°C区间, 抗拉强度 R_m 呈抛物线变化(峰值835°C), 塑性指标随温度升高单调下降, 降幅达86%($\Delta A=14.0\% \rightarrow 1.0\%$); 第二重时效温度调控效应: 次生 α 相粗化速率与温度正相关, 验证了“高温时效换塑性”的可行性。

(下转第123页)

- 艺, 2025 (16) : 44-49, 55.
- [42] OU L, LI L Y, FAN C H, et al. Enhancement of strength and ductility in 6061Al alloy processed by cross accumulative roll bonding[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2023, 33 (7) : 2001-2013.
- [43] 赵明伟, 陈兴旺, 梁忠, 等. 不同工艺制备的 5083-O 铝合金板材的组织 and 性能[J]. 轻金属, 2020 (3) : 36-39.
- [44] GODEC M, ZAEFFERER S, KRANER J, et al. Influence of symmetric and asymmetric rolling on texture evolution of work-hardened AA 5xxx aluminium alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2025, 35 (1) : 30-44.
- [45] KAZEMI-NAVAEE A, JAMAATI R, JAMSHIDI AVAL H. Effect of single roll drive rolling on microstructure, texture, and mechanical property anisotropy of Al-5.6Zn-2.5Mg-1.4Cu aluminum alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2023, 33 (11) : 3266-3281.
- [46] 张小惠, 彭文飞, 傅邦杰, 等. 6063/7072 铝合金复合板异温异步轧制界面结合强度多因素影响分析[J]. 塑性工程学报, 2025, 32 (5) : 15-22.
- [47] 张会强, 张丁丁, 刘志敏, 等. 余温轧制压下率对 1070A/2024 铝合金铸轧复合板材组织性能影响研究[J]. 有色金属加工, 2025, 54 (3) : 9-14, 31.
- [48] 唐超兰, 周钰波, 翁浩, 等. 等厚 4343/4A60 铝合金板轧制复合变形规律及其界面结合行为[J]. 轻合金加工技术, 2016, 44 (7) : 26-31.
- [49] 傅邦杰, 彭文飞, 林龙飞, 等. 差温轧制 6063/7072 铝合金复合板有限元模拟及翘曲影响因素[J]. 材料导报, 2024, 38 (15) : 66-73.
- [50] 路光明. 累积叠轧 6061/7075 铝合金层状复合板界面结构及性能研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2022.
- [51] 田少杰, 刘雪峰, 王文静, 等. 超声振动系统的研究现状及其在塑性成形领域的应用进展[J]. 机械工程学报, 2023, 59 (20) : 198-214.
- [52] 黄冠. 2219 铝合金超声凝固组织在热轧中的演变及其对性能的影响[D]. 郑州: 郑州大学, 2023.
- (收稿日期: 20250513)

(上接第115页)

3) 筛选出3组高性能简单双重退火制度: 7[#]试样强塑积 14707 MPa%、10[#]试样强塑积 17248 MPa%、11[#]试样强塑积 13470 MPa%。实现与复杂双重退火 (00[#]试样强塑积 15612.5 MPa%) 等效的强塑性匹配 ($\Delta R_m < 5\%$, $\Delta A < 2.5\%$)。

参考文献:

- [1] HUANG B Y, LI C G, SHI L K, et al. Chinese material engineering dictionary[M]. Beijing: China Materials Engineering Canon, 2005.
- [2] HUANG X, ZHU Z S, WANG H H, et al. Advanced Aeronautical titanium alloys and applications[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2012.
- [3] 陈军, 赵永庆, 常辉. 中国船用钛合金的研究和发展[J]. 材料导报, 2005 (6) : 67-70.
- [4] 中国工程院化工、冶金与材料工程学部与中国材料研究学会. 中国新材料产业发展报告[M]. 北京: 化学工业出版社, 2022.
- [5] 李斌. 航空用钛合金 TC18 板材轧制工艺研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2019.
- [6] CHEN Y, WANG K, REN Z. Interaction between phase transformation and static recrystallization during annealing of rolled TC18 titanium alloy[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2024, 202: 1-15.
- [7] 翟欣姣, 张明玉, 宋一新, 等. 热处理温度对 TC18 钛合金微观组织与冲击性能的影响[J]. 稀有金属与硬质合金, 2024, 52 (5) : 62-67.
- [8] 于兰兰, 毛小南, 赵永庆, 等. 热变形行为与 BT22 钛合金的组织演变[J]. 稀有金属材料与工程, 2007 (3) : 505-508.
- [9] 汤育玺, 王进, 崔明磊, 等. 双重退火工艺对准 β 锻 TC18 合金锻件组织和性能的影响[J]. 金属热处理, 2024, 49 (11) : 262-266.
- [10] 王晓燕, 郭鸿镇, 姚泽坤, 等. 双重退火对 TC18 钛合金等温锻件组织性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2009, 30 (1) : 100-103.
- (收稿日期: 20250414)