

热处理对 Ti_2AlNb 合金显微组织与力学性能的影响

牟义强^{1,2}, 徐 瑞¹, 程 超^{3*}, 于 帅^{2,4}, 刘玉敬³, 徐勤思¹, 赵子博^{3,5}

(1. 沈阳航空航天大学民用航空学院, 辽宁 沈阳 110136; 2. 中国科学院金属研究所, 辽宁 沈阳 110016; 3. 宝鸡西工钛合金制品有限公司显华先进材料研究院, 陕西 宝鸡 721300; 4. 中国科学技术大学材料科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110016; 5. 秦创原(宝鸡)产业创新研究院有限公司, 陕西 宝鸡 721000)

摘 要:提出一种双重固溶+时效的热处理工艺:通过控制一重固溶温度来调控 α_2 相的体积分数,并抑制局部再结晶;二重固溶促使粗板条 O 相沿亚晶界析出,以改善合金的塑性变形能力;随后通过时效以获得大量的细针状 O 相来提升合金的强度。试验结果表明:合金经该热处理工艺获得由等轴 α_2 +双尺寸板条 O 相组成的三态组织,室温塑性可达 7.5%,且 750 °C 抗拉强度达到 837 MPa,实现了合金强塑性的协同提升。

关键词:热处理; Ti_2AlNb 合金; 显微组织; 力学性能

中图分类号:TF044

文献标志码:A

文章编号:1004-7638(2026)04-0043-08

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2026.04.005

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



听
语
音
与
作
者
互
动
聊
科
研

Effect of heat treatment on the microstructure and mechanical properties of Ti_2AlNb alloys

MU Yiqiang^{1,2}, XU Rui¹, CHENG Chao^{3*}, YU shuai^{2,4}, LIU yujing³, XU Qinsi¹, ZHAO Zibo^{3,5}

(1. Civil Aviation College, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, Liaoning, China; 2. Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, Liaoning, China; 3. Yuhua Institute of Advanced Materials, Baoji Xigong Ti Alloy Products Co., Ltd., Baoji 721300, Shaanxi, China; 4. University of Science and Technology of China, School of Materials Science and Engineering, Shenyang 110016, Liaoning, China; 5. Qinchuangyuan (Baoji) Institute of Industrial Innovation Co., Ltd., Baoji 721000, Shaanxi China)

Abstract: This study proposed a duplex solution and aging heat treatment strategy. The volume fraction of the α_2 phase was tailored by controlling the primary solution-treatment temperature, while localized recrystallization was simultaneously suppressed. The secondary solution treatment promoted the precipitation of coarse lamellar O phase along subgrain boundaries, thereby improving the plastic deformability of the alloy. Subsequent aging induced a high density of fine acicular O-phase precipitates, which further enhanced the alloy strength. Through this heat-treatment route, a trimodal microstructure consisting of equiaxed α_2 grains and dual-scale lamellar O phases was obtained. The treated alloy exhibited a room-temperature elongation of 7.5% and a tensile strength of 837 MPa at 750 °C, demonstrating a synergistic improvement in strength and ductility.

Key words: Ti_2AlNb alloy; heat treatment; microstructure; mechanical properties

收稿日期:2026-01-29; 修回日期:2026-02-26; 接受日期:2026-03-09

作者简介:牟义强, 1985 年出生, 男, 辽宁丹东人, 博士, 讲师, 主要从事钛合金方面的基础研究工作, E-mail: myq@sau.edu.cn; *通信作者:程超, 1991 年出生, 男, 湖南岳阳人, 博士, 主要从事钛合金热加工研究工作, E-mail: 15524389485@163.com。

0 引言

Ti_2AlNb 合金是一类基于 Ti_3Al 基合金体系发展而来的新型轻质高温结构材料,属于有序金属间化合物,该合金具有高比强度、优异抗蠕变、良好抗氧化性以及相对较高的损伤容陷^[1-4]。 Ti_2AlNb 合金的综合性能并非由单一相决定,而主要取决于多相组织在变形与损伤过程中的协同作用^[5]。该类合金由富 Nb 的有序 B2 相、富 Al 的 α_2 - Ti_3Al 相以及化学计量比接近 Ti_2AlNb 的 O 相共同构成,其相平衡关系复杂、组织可设计性强^[6-7]。

热变形后的热处理工艺是调控相组成、形貌与界面状态,进而优化力学响应的关键环节,其中固溶与时效的温度对于调节各相的组织形貌、晶粒尺寸有着重要的影响^[8-10]。B2 相通常被视为合金的主要塑性承载相,同时也作为合金的基体相。通过固溶、时效处理合理调控 B2 相的体积分数是提升合金延伸率以及整体变形稳定性的关键^[11]。O 相是 Ti_2AlNb 基合金中最重要的强化相之一,通常在 α_2 +B2+O 三相区、B2+O 两相区进行时效获得,常以片层或板条形态自 B2 基体析出。已有研究表明,不同尺寸的板条 O 相在变形过程中承担不同的作用,尺寸粗大的板条 O 相可明显提升合金的延伸率,尺寸较小的细针状 O 相因其本身在高温下的稳定性以及通过引入大量的 O/B2 界面,显著提高位错运动阻力,是合金强度提升的关键来源^[12]。 α_2 相作为合金的又一强化相, α_2 +B2 两相区及以下较为稳定,不易溶解,可阻碍 B2 相的变形,来提升合金强度的同时也对 B2 晶粒的长大具有一定钉扎作用,形貌多为等轴或片层,需要严格控制温度,避免晶界连续析出对合金性能产生严重破坏^[13-14]。目前仍缺乏关于固溶时效处理对 Ti_2AlNb 合金微观组织与性能的系统研究,尤其是采取多重热处理获得特定组织的相关设计思路,这在一定程度上限制了该类合金性能的进一步提升与稳定化。

针对上述问题,笔者以 Ti_2AlNb 合金棒材为研究对象,提出了一种双重固溶+时效的热处理工艺,结合固溶、时效温度对合金组织与性能的影响,获得了一种室温塑性良好、高温性能优异的 α_2 +B2+双尺寸 O 相的三态组织。通过揭示 Ti_2AlNb 合金中微观组织与性能的内在联系,为后续合金的组织设计提供理论依据,从而进一步提高合金的服役安全性与性能可靠性。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

所用材料为国内某厂生产的直径 Φ 为 300 mm

的 Ti_2AlNb 合金棒材,主要化学成分如表 1 所示。通过金相法测定合金的 α_2 +B2/B2 的相转变温度为 1 070 $^{\circ}\text{C}$ 。

表 1 Ti_2AlNb 合金的实测化学分析与气体分析
Table 1 Chemical and gas analysis of the studied alloy %

	Al	Nb	Mo	O	N	H
Nominal	22	24	0.5			
Actual	21.7	23.7	0.52	0.071	0.007 0	0.000 8

1.2 试验方法

在 Ti_2AlNb 合金棒材 R/2 位置沿弦向切取若干试样,尺寸为 75 mm $\times$ 30 mm $\times$ 25 mm。采用 KSL-1200X 箱式电阻炉(控温精度 $\pm 2^{\circ}\text{C}$)按既定热处理制度(见图 1)对试样进行热处理,冷却方式均为空冷(AC)。热处理后试样经线切割与机械加工制备为标准拉伸试样,棒状拉伸试样的标距锻直径为 5 mm,长度为 30 mm,螺纹端直径为 10 mm,试样总长度为 64 mm。拉伸性能测试在 EUT4503 力学试验机上进行,依据 GB/T 228.1-2021 标准,测试温度分别为室温与 750 $^{\circ}\text{C}$,加载速率在屈服前为 0.005 mm/min,屈服后为 2 mm/min。为确保数据的准确性,每组测试设置不少于 3 个平行试样。

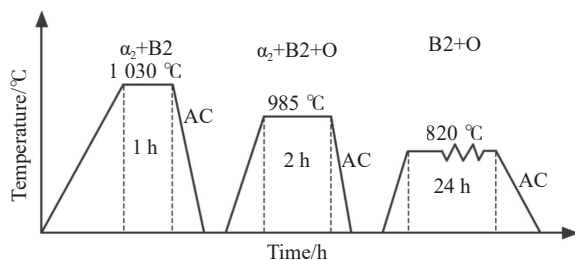


图 1 Ti_2AlNb 合金热处理流程

Fig. 1 Heat treatment process for Ti_2AlNb alloy

不同热处理状态试样经线切割取样后,采用机械研磨,并根据需要进行腐蚀或振动抛光,利用氢氟酸、硝酸、双氧水体积比 1:3:5 配制的溶液进行腐蚀,振动抛光参数选用频率 175 Hz,振动频率 10 r/min,时间为 5 h,抛光液选用二氧化硅抛光液,以开展显微组织分析。显微组织与拉伸断口形貌分别采用光学显微镜(CX40M)及扫描电子显微镜(Thermo Fisher Apreo 2C,配备 BSE 探测器与 Oxford EBSD 探头)进行表征。各相平均晶粒尺寸与体积分数采用 MIPAR 软件进行统计;硬度采用 HV-1000Z+CCD 数显显微硬度计进行测试,测试载荷为 5 N,保载时间为 15 s。

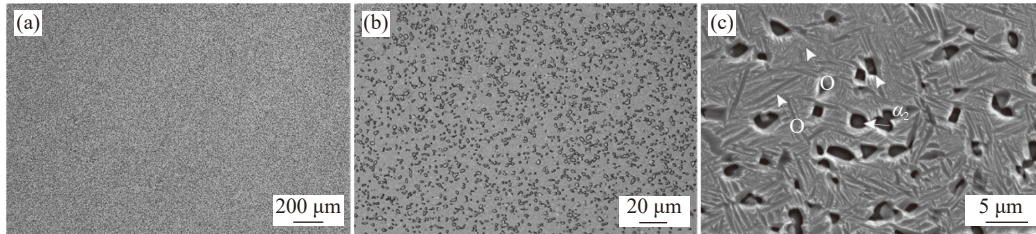
2 试验结果与分析

2.1 锻态组织形貌与性能

经三次真空自耗电弧熔炼并结合后续多火次锻造成形,获得 Φ 300 mm 的 Ti_2AlNb 合金棒材,

其显微组织如图2所示。由图2可知,该合金主要由近似等轴的 α_2 相、B2 基体相以及两种尺度的板条状 O 相组成;整体组织分布较为均匀,未见明显宏观偏析特征。经定量统计,等轴 α_2 相体积分数约为 14.5%, B2 基体相约为 32.1%, 粗板条 O 相约为 22.9%, 长度约为 4.5 μm , 针状板条 O 相约为

30.1%, 长度约为 0.42 μm 。对上述锻态棒材进行力学性能测试,结果如图3所示,其中 σ_b 为抗拉强度, MPa; $\sigma_{0.2}$ 为屈服强度, MPa; δ 为伸长率, %; ψ 为断面收缩率, %。大量的相界面以及 O 相集束易使变形过程中裂纹萌生与扩展加速,从而致使合金塑性较差^[15]。



(a)(b) 金相; (c) SEM

图2 Ti₂AlNb 合金棒材锻态组织形貌

Fig. 2 Microstructure of the forged Ti₂AlNb alloy bar

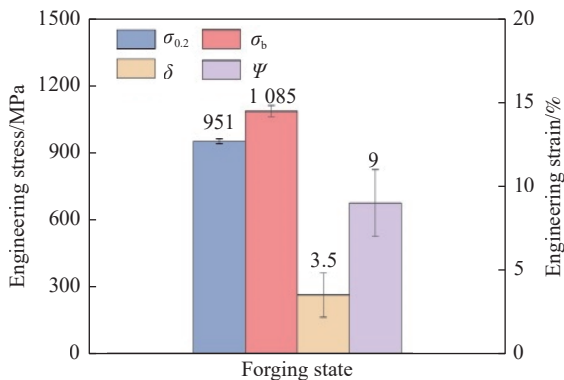


图3 Ti₂AlNb 合金棒材锻态性能

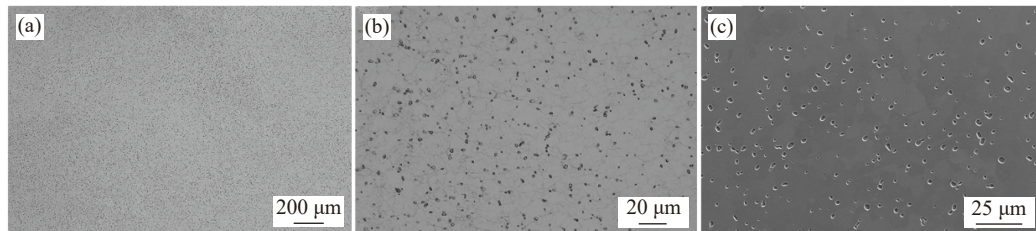
Fig. 3 Mechanical properties of the forged Ti₂AlNb alloy bar

2.2 一重固溶后合金的组织形貌与性能

固溶处理是调控 Ti₂AlNb 合金组织与性能的重要环节。通过选取合适的固溶温度,可在一定程度上“重置”合金的相组成与缺陷状态,为后续组织演

化及力学性能优化提供统一的初始条件^[16]。第一阶段固溶温度选在 α_2 +B2 两相区上部进行,一方面保留部分 α_2 相以发挥对 B2 晶粒长大的钉扎作用,另一方面通过降低 α_2 相体积分数,为后续组织中 O 相的形成与占比提升创造条件。

图4为合金在 1030 $^{\circ}\text{C}$ 固溶 1 h 后空冷(AC)的显微组织。结果表明,固溶后合金中 O 相已完全溶解,此时合金由 α_2 +B2 相组成; α_2 相在该固溶制度下未完全溶解,仍有残留,其体积分数由锻态的 14.5% 降至 5.3%。在高温固溶保温过程中,材料发生静态回复,位错通过重排与湮灭逐渐趋于有序,并形成清晰的低角度晶界(亚晶界),该亚晶结构的形成过程可归因于多边化^[17]。此外, Ti₂AlNb 合金中各相具有长程有序特征,与传统钛合金相比,其形变储能与回复/多边化过程的动力学特征存在差异,从而在高温回复过程中更易形成密度更高、尺度更细的亚晶结构^[18]。



(a)(b) 金相; (c) SEM

图4 Ti₂AlNb 合金棒材 1030 $^{\circ}\text{C}$ 热处理态组织形貌

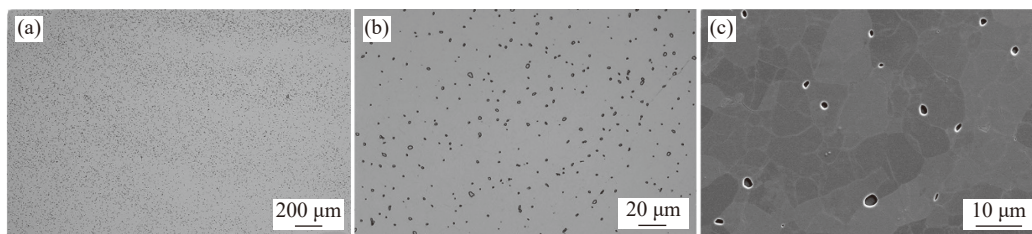
Fig. 4 Microstructure of the Ti₂AlNb alloy bar after heat treatment at 1030 $^{\circ}\text{C}$

图5展示了合金在 1040 $^{\circ}\text{C}$ 固溶 1 h 后空冷(AC)的显微组织。随着固溶温度升高, α_2 相体积分数进一步降低至 2.1%; 同时,合金局部区域出现了静态再结晶特征,如图5(c)所示。为进一

步对比两种固溶温度下的组织演化与再结晶行为,对固溶态试样进行了 EBSD 分析(图6)。图6(a1)~(a3)分别给出了 1030 $^{\circ}\text{C}$ 固溶试样的反极图(IPF)、局部取向差(KAM)分布及其平均值,

并结合几何必需位错(GND)密度结果进行表征。结果表明,1 030 ℃ 固溶后试样未见明显静态再结晶晶粒,组织演化以静态回复/多边化为主;其位于

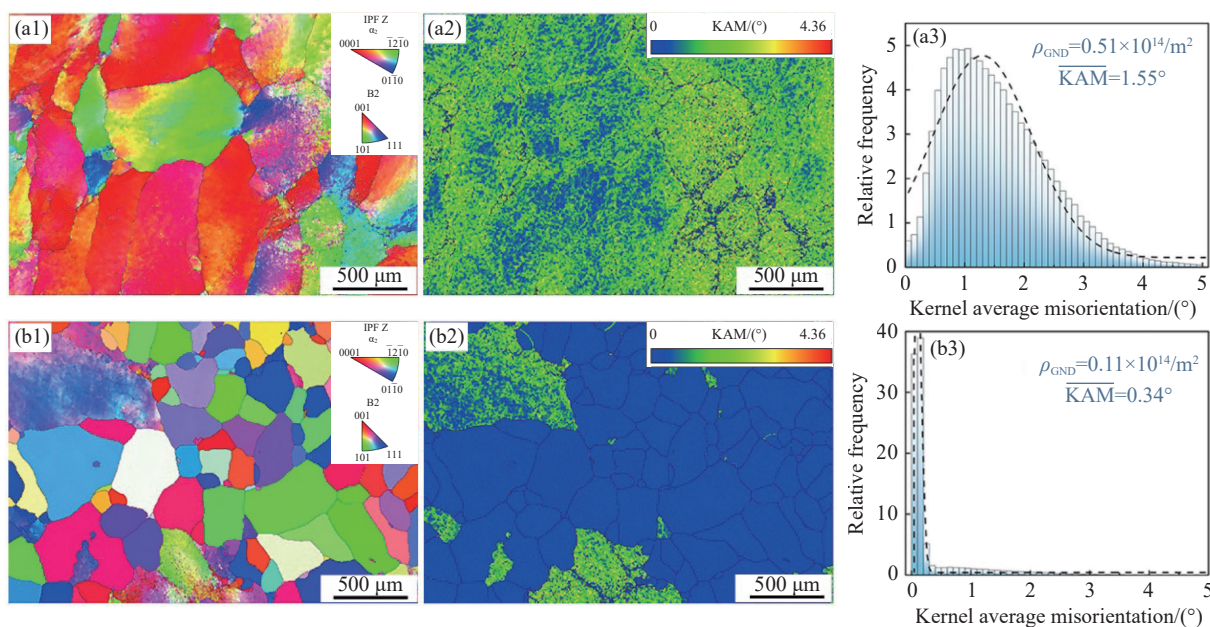
B2 亚晶界以及晶界处的 KAM 值仍处于较高水平,平均 KAM 值为 1.55°,说明晶内取向梯度与变形储能尚未充分消除。



(a)(b) 金相; (c) SEM

图 5 Ti_2AlNb 合金棒材 1 040 ℃ 热处理态组织形貌

Fig. 5 Microstructure of the Ti_2AlNb alloy bar after heat treatment at 1 040 ℃



1 030 ℃: (a1) IPF 图, (a2) KAM 图, (a3) KAM 分布频率与 GND 数值; 1 040 ℃: (b1) IPF 图, (b2) KAM 图, (b3) KAM 分布频率与 GND 数值

图 6 不同固溶态 EBSD 分析

Fig. 6 Different solid solution states EBSD analysis

图 6(b1) ~ (b3) 分别为 1 040 ℃ 固溶 1 h 空冷样品的 IPF、KAM 分布及其平均值,并结合 GND 密度进行分析。结果表明,合金在 1 040 ℃ 固溶条件下已发生静态再结晶,但再结晶并不完全:组织中仍保留部分含大量亚晶结构的晶粒,说明该固溶过程同时包含静态回复(多边化)与静态再结晶两类演化机制。由 KAM 图可见,试样中大量低取向差的等轴晶粒取代了原先的变形晶粒,表明晶内取向梯度与储存变形能显著降低。与 1 030 ℃ 固溶状态相比,1 040 ℃ 固溶后试样的 ρ_{GND} 由 $0.51 \times 10^{14} \text{ m}^{-2}$ 降至 $0.11 \times 10^{14} \text{ m}^{-2}$;平均 KAM 由 1.55° 降至 0.34° ,高角度晶界 HAGB(High-Angle Grain Boundary) 分数由 6.09% 显著提高至 38.9%。进一步对不同固溶温度

试样进行硬度测试,发现再结晶区域亚结构与位错显著减少,导致硬度降低;而保留亚晶结构的区域因亚晶界强化与位错强化仍保持较高硬度。1 030 ℃ 试样硬度(HV) 最高可达 346,平均硬度(HV) 为 335。值得注意的是,1 040 ℃ 试样中亚晶区域与再结晶区域的硬度(HV) 差异接近 30,反映出再结晶导致位错密度与亚结构显著降低,从而会引起局部软化。

图 7 给出了合金在 1 030 ℃ 与 1 040 ℃ 固溶条件下的室温拉伸性能。由 7 图可见,固溶温度对合金室温力学响应影响显著。尽管高温固溶使合金的主要强化相 O 相溶解,但固溶过程中静态回复形成的大量亚晶界在后续塑性变形中对位错运动具有明显阻碍作用,使 1 030 ℃ 固溶样品屈服强度仍可

接近 958 MPa。同时,亚晶界的引入有助于分散位错塞积、缓解局部应力集中并促进变形更均匀开展,从而在一定程度上改善合金塑性^[19-20]。当固溶温度进一步升高时,位错迁移与重排更为充分,材料出现部分静态再结晶。在拉伸过程中,再结晶区域与亚晶区域之间的变形能力差异会导致应变分配不均与局部应力集中,加速晶界及相界处裂纹萌生并促使试样提前失效。对应地,1 040 °C 固溶样品的室温塑性仅为 2.8%。

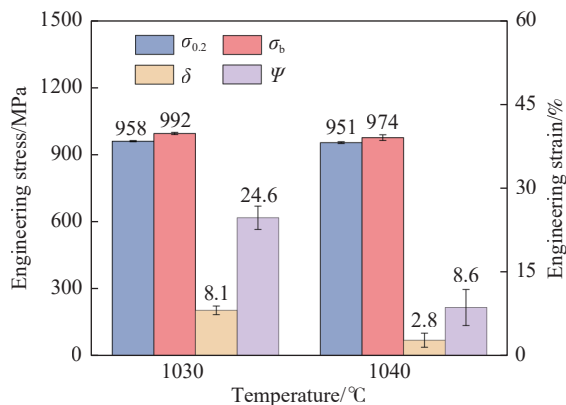
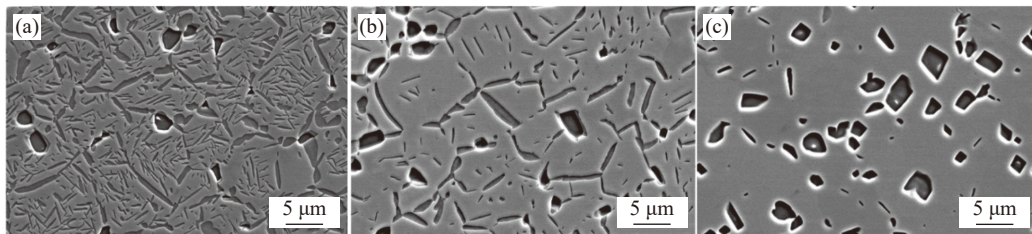


图7 Ti₂AlNb 合金棒材一重热处理性能

Fig. 7 Mechanical properties of the Ti₂AlNb alloy bar after the first-step heat treatment



(a) 1010 °C+965 °C; (b) 1010 °C+985 °C; (c) 1010 °C+1005 °C

图8 Ti₂AlNb 合金棒材两重热处理态 SEM 组织形貌

Fig. 8 SEM micrographs of the Ti₂AlNb alloy bar after the two-step heat treatment

为进一步明确第二重固溶过程中组织演变与性能差异,采用配备 Oxford EBSD 探头的扫描电子显微镜(BSE 模式)对 985 °C 与 1 005 °C 固溶样品进行表征,结果分别见图 9 与图 10。结果表明,一重固溶后形成的亚晶界(低角度晶界)可作为 α_2 /O 相析出的优先形核位置,从而使后续析出相在空间分布上呈现一定规律性。图 9(b) 给出了合金在 985 °C 固溶后 B2 晶粒内各相的分布特征。可以看出,沿亚晶界析出的 O 相尺寸更大、体积分数更高;而在亚晶内部亦可观察到尺寸较小、短棒状且分布相对随机的 O 相,其体积分数相对较低。进一步观察如图 9(c) 所示,发现 O 相与 B2 基体之间满足 $\{110\}_{B2} // \{001\}_O$, $\langle 111 \rangle_{B2} // \langle 110 \rangle_O$ 的位相关系。该类位相关

2.3 二重固溶后合金的组织形貌与性能

选取 1 030 °C/2 h/AC 状态的试样开展第二阶段热处理。已有研究指出,通过调控 Ti₂AlNb 合金中 O 相板条的尺度与形貌可在一定程度上改善合金塑性,因此本阶段固溶处理以获得并调控粗板条 O 相为主要目标^[15]。

图 8 给出了合金分别在 965、985 °C 与 1 005 °C 进行第二重固溶后的 SEM 组织形貌。结果表明:当固溶温度为 1 005 °C 时, α_2 相体积分数升高至约 9.8%,组织主要由近等轴/短棒状 α_2 相与 B2 相构成(图 8(c))。当固溶温度为 985 °C 时,合金内部析出大量尺寸较大的板条状 O 相(图 8(b));值得注意的是,粗板条 O 相并非随机弥散分布,而呈现出较为规律的环状(近圆形)分布特征,其形成原因将在后文进一步讨论。定量统计结果显示,此时 α_2 相体积分数约为 5.2%,O 相体积分数约为 8.5%,O 相长度约为 4.64 μm 。当固溶温度进一步降低至 965 °C 时,在粗板条 O 相基础上,其余区域进一步析出随机分布的短棒状 O 相,使 O 相体积分数升高至约 21.9%,粗板条 O 相长度约为 5.6 μm ,短棒状 O 相长度约为 1.5 μm , α_2 相相对稳定,其体积分数变化不明显,仍维持在约 5.3%,其余相为 B2 相。

系通常对应较好的界面几何匹配,有利于塑性变形过程中位错在相界附近的传递与协同变形,从而降低相界处的应力集中并提升变形协调性^[21]。由图 10 可知,样品经 1 005 °C 固溶后,析出的短棒状 α_2 相同样表现出沿亚晶界优先分布的特征。随着固溶过程推进,亚晶内部位错进一步减少并发生亚晶长大,表明体系持续经历静态回复为主导的缺陷演化过程。

图 11 给出了合金在不同温度第二重固溶的力学性能。与固溶前相比,合金经 1 005 °C 固溶后,亚晶尺寸增大且密度降低,使 B2 相的位错滑移更易开展,室温塑性略有提高;与此同时,固溶过程中强化相 α_2 的析出对强度起到补偿作用,使合金强度

未出现明显下降, 屈服强度仍保持在约 953 MPa。当固溶温度降至 985 °C 时, 粗板条 O 相优先沿亚晶界析出, 并逐渐成为主要组织特征; 同时, 等轴 α_2 相含量相较 1 005 °C 状态降低约 4.6%。已有研究表明, α_2 相的强化作用通常强于板条 O 相, 因此 α_2 含量下降会削弱整体强化效果。再加之 O 相与 B2 基体位相关系稳定、界面几何匹配较好, 位错更易跨界传递, 使界面塞积与亚晶界强化贡献相对减弱, 合金屈服强度与抗拉强度较 1 005 °C 固溶状态分别下降约 33 MPa 和 37 MPa。另一方面, 985 °C

下部分板条 O 相发生搭接连通(图 8(b)), 削弱 B2 相的连续变形通道, 促使应变局部化并加剧相界面处应力集中, 裂纹更易在连通带附近萌生与扩展, 从而使合金塑性降低约 3.3%。随着固溶温度进一步降低, 合金中 O 相体积分数持续升高, 相界面显著增加, 对位错运动的阻碍作用增强, 使屈服强度随之提高; 同时, 塑性承载相 B2 的体积分数下降, 变形受限进一步加剧。O 相的连通与界面密集化共同促使应变更易局部化, 使合金塑性进一步下降。

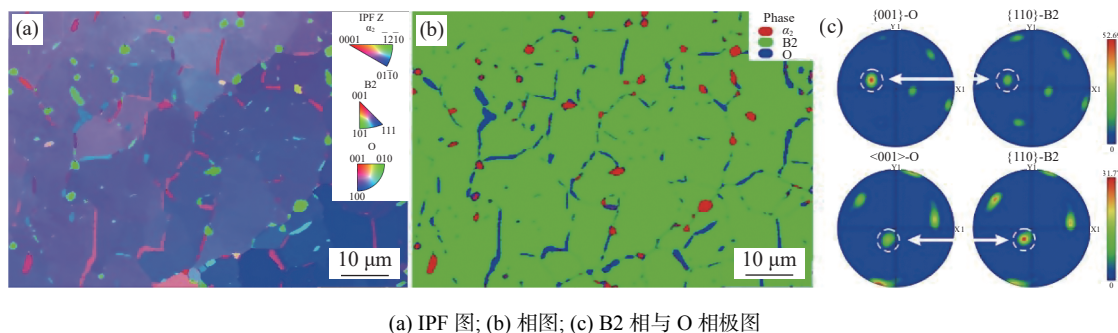


图 9 Ti_2AlNb 合金棒材 1 030 °C+985 °C 两重热处理后 EBSD 分析

Fig. 9 EBSD characterization of the Ti_2AlNb alloy bar after the two-step heat treatment at 1 030 °C and 985 °C

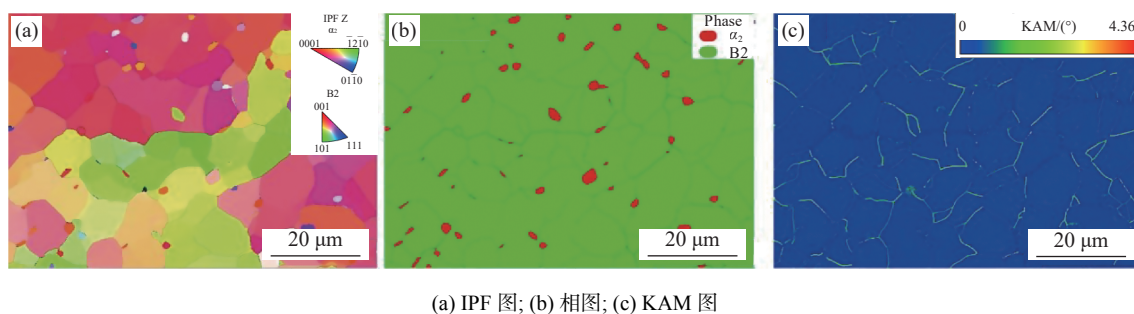


图 10 10 Ti_2AlNb 合金棒材 1 030 °C+1 005 °C 两重热处理后 EBSD 分析

Fig. 10 EBSD characterization of the Ti_2AlNb alloy bar after the two-step heat treatment at 1 030 °C and 1 005 °C

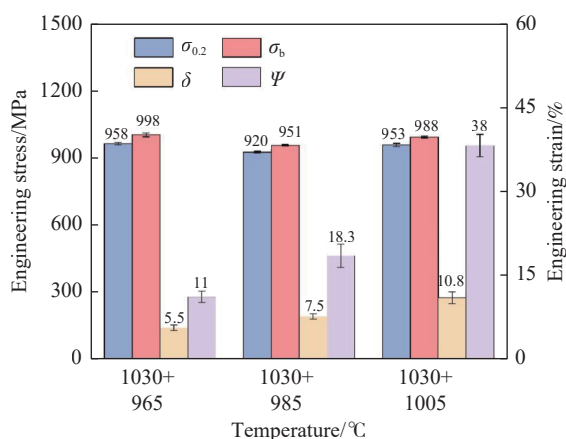


图 11 Ti_2AlNb 合金棒材二重热处理性能

Fig. 11 Mechanical properties of the Ti_2AlNb alloy bar in the as-forged and two-step heat-treated conditions

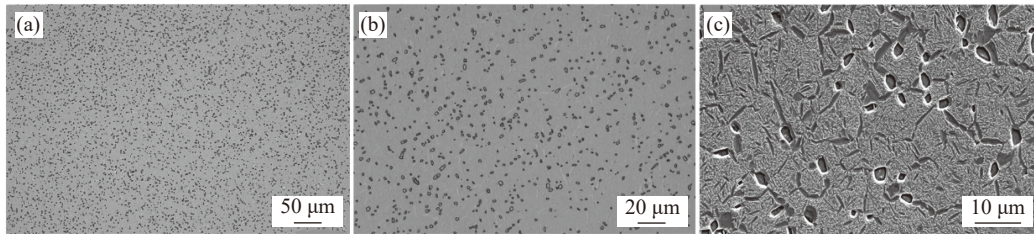
2.4 三重热处理后合金的组织形貌与性能

通过热处理实现 Ti_2AlNb 合金组织与性能优化, 往往需要围绕主要强化相 O 相的析出行为与形貌调控展开^[15]。合金经 1 030 °C/1 h/AC + 985 °C/2 h/AC 两阶段热处理后, 组织由 α_2 + B2 + 粗板条 O 相构成。为在保持强度的同时进一步提高服役适应性, 在此基础上采用 820 °C/24 h/AC 进行第三阶段热处理, 以获得大量针状 O 相析出, 实现多尺度 O 相的协同强化。

图 12 为合金经三重热处理 (1030 °C+985 °C+820 °C) 后的显微组织。由图 12 可见, 合金呈 α_2 + B2 + 双尺度 O 相 (粗板条 O 相与针状 O 相) 的组织状态。定量统计结果表明, α_2 相体积分数约为 6.7%, B2 相约为 25.5%, 粗板条 O 相约为 13.94%, 平均长度约 3.67 μm ,

针状 O 相约为 53.7%, 平均长度约 $0.79\ \mu\text{m}$ 。其在室温与 $750\ ^\circ\text{C}$ 的力学性能测试如图 13 所示, 经过特定的多重热处理后合金表现出优异的室温、高温力

学性能, 室温塑性约 7.5%, 在 $750\ ^\circ\text{C}$ 条件下, 屈服强度为 606 MPa、抗拉强度为 837 MPa、延伸率约 14%、断面收缩率约 41%, 表现出良好的高温力学性能。



(a), (b) 金相; (c) SEM

图 12 Ti_2AlNb 合金棒材三重热处理态组织形貌

Fig. 12 Microstructure of the Ti_2AlNb alloy bar after the three-step heat treatment

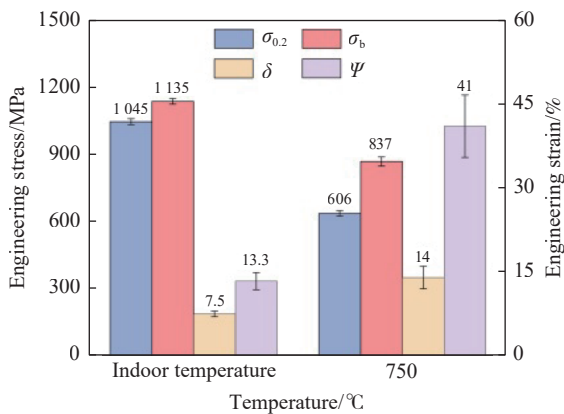
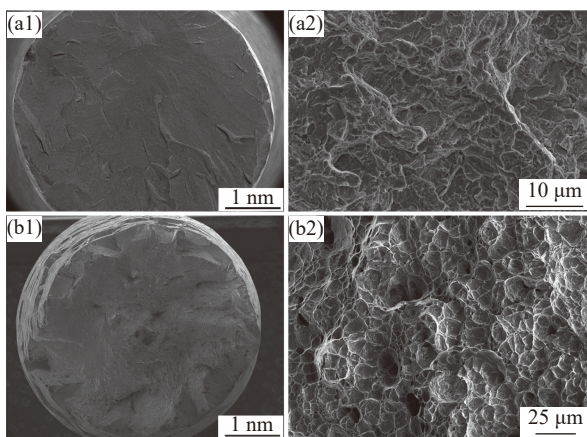


图 13 Ti_2AlNb 合金棒材三重热处理性能

Fig. 13 Mechanical properties of the Ti_2AlNb alloy bar in the as-forged and three-step heat-treated conditions

图 14 给出了三重热处理态 Ti_2AlNb 合金在室温与 $750\ ^\circ\text{C}$ 拉伸后的断口形貌。



(a1) (a2) 室温; (b1) (b2) $750\ ^\circ\text{C}$

图 14 Ti_2AlNb 合金三重热处理态棒材的不同温度的拉伸断口形貌

Fig. 14 Tensile fracture morphologies of Ti_2AlNb alloy rods at different temperatures

室温断口低倍形貌如图 14(a1) 所示, 断口表面可见大量解理台阶、解理面及二次裂纹, 且未看到

明显剪切唇, 表明室温断裂以穿晶准解理断裂为主。该类解理面通常与裂纹沿特定晶体学取向穿越 B2 晶粒的传播过程相关。由高倍断口形貌 (图 14(a2)) 可见局部存在等轴韧窝, 反映出 B2 相在断裂过程中仍可发生一定程度的韧性微孔聚合; 相比之下, α_2 相与 O 相作为强化相, 其室温变形能力相对较弱, 更易以解理的形式参与断裂, 从而与 B2 相的韧窝形貌共同构成准解理特征。与室温相比, $750\ ^\circ\text{C}$ 拉伸断口形貌差异显著。图 14(b1) 显示断口存在明显的宏观颈缩与断面收缩; 高倍图 (图 14(b2)) 中出现大量深大、等轴的韧窝, 断裂以穿晶韧性断裂为主, 表明高温下材料塑性变形能力显著增强, 损伤演化更倾向于孔洞形核—长大—聚合主导的失效路径。

3 结论

1) 在 $1030\ ^\circ\text{C}$ (α_2 +B2 两相区) 固溶条件下, 合金中板条 O 相可充分溶解; 高温保温促进位错重排与回复, 形成密集亚晶界, 从而在削弱析出强化的同时仍维持较高强度, 其屈服强度与锻态相接近。

2) 固溶温度进一步升高至 $1040\ ^\circ\text{C}$ (α_2 +B2 两相区), 组织中出现局部静态再结晶, 再结晶晶粒与保留亚晶结构晶粒之间的变形协调性不足, 易引发应变局域化并导致塑性显著下降, 塑性由 $1030\ ^\circ\text{C}$ 固溶时的 8.1% 下降至 2.8%。

3) 一重固溶后形成的亚晶界可作为后续相析出的优先形核位置, 使二重固溶后 O/ α_2 相的形核与分布呈现一定规律性, 并在此固溶过程中获得尺寸粗大的板条 O 相, 以用来改善合金室温塑性。

4) 经三重热处理后, 合金内部析出针状 O 相, 此时合金由等轴 α_2 、B2 及双尺度 O 相构成。室温拉伸延伸率约 7.5%; 在 $750\ ^\circ\text{C}$ 下, 屈服强度为 606 MPa、抗拉强度为 837 MPa、延伸率约 14%、断面收缩率约 41%, 表现出良好的室温塑性与高温力学性能匹配。

参考文献

- [1] 刘巧沐, 吴杰, 陈玉龙, 等. 热等静压温度和粉末粒度对 Ti_2AlNb 合金组织与性能的影响[J]. 材料研究学报, 2019, 33(3): 161-169.
Liu Qiaomu, Wu Jie, Chen Yulong, et al. Effect of temperature and powder particle size on mechanical properties and microstructure of PM Ti_2AlNb alloy prepared via hot isostatic pressing[J]. Chinese Journal of Materials Research, 2019, 33(3): 161-169.
- [2] 王子彧, 陈志勇, 王新, 等. Ti_2AlNb 薄板的织构及其对拉伸性能各向异性的影响[J]. 金属学报, 2025, 61(11): 1625-1637.
Wang Ziyu, Chen Zhiyong, Wang Xin, et al. Texture of Ti_2AlNb sheet and its effect on anisotropy of tensile properties[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2025, 61(11): 1625-1637.
- [3] 王一迪, 王鹏程, 刘晓飞, 等. 粉末冶金态 Ti_2AlNb 合金电子束焊接头组织性能及裂纹产生机制研究[J/OL]. 金属学报: 1-12[2026-01-27]. <https://link.cnki.net/urlid/21.1139.TG.20250701.1451.022>.
Wang Yidi, Wang Pengcheng, Liu Xiaofei, et al. Microstructure, mechanical property, and crack formation mechanism in electron beam welded joints of powder metallurgy Ti_2AlNb alloy[J/OL]. Acta Metallurgica Sinica: 1-12[2026-01-27]. <https://link.cnki.net/urlid/21.1139.TG.20250701.1451.022>.
- [4] 王清江, 刘建荣, 杨锐. 高温钛合金的现状与前景[J]. 航空材料学报, 2014, 34(4): 1-26.
Wang Qingjiang, Liu Jianrong, Yang Rui. High-temperature titanium alloys: status and perspective[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2014, 34(4): 1-26.
- [5] 刘石双, 曹京霞, 周毅, 等. Ti_2AlNb 合金研究与展望[J]. 中国有色金属学报, 2021, 31(11): 3106-3126.
Liu Shishuang, Cao Jingxia, Zhou Yi, et al. Research and prospect of Ti_2AlNb alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021, 31(11): 3106-3126.
- [6] 冯艾寒, 李渤渤, 沈军. Ti_2AlNb 基合金的研究进展[J]. 材料与冶金学报, 2011, 10(1): 30-38.
Feng Aihan, Li Bobo, Shen Jun. Recent advances on Ti_2AlNb -based alloys[J]. Journal of Materials and Metallurgy, 2011, 10(1): 30-38.
- [7] 杜刚, 崔林林, 雷强, 等. O 相合金 Ti_2AlNb 的研究进展[J]. 中国材料进展, 2018, 37(1): 68-73.
Du Gang, Cui Linlin, Lei Qiang, et al. Research and development of orthorhombic titanium aluminide[J]. Materials China, 2018, 37(1): 68-73.
- [8] 杜思敏, 李雄, 林发驹. 热处理工艺对 Cr12MoV 钢组织及硬度的影响[J]. 钢铁钒钛, 2021, 42(3): 148-154.
Du Simin, Li Xiong, Lin Faju. Effect of heat treatment process on microstructure and hardness of Cr12MoV steel[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2021, 42(3): 148-154.
- [9] 范玉婷, 彭力, 李京懋, 等. 不同热处理温度对 TA16 棒材显微组织和力学性能的影响[J]. 钢铁钒钛, 2025, 46(3): 53-59.
Fan Yuting, Peng Li, Li Jingmao, et al. Microstructure and mechanical properties of TA16 bar with different heat treatment temperatures[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2025, 46(3): 53-59.
- [10] 姚小凤, 开海全, 谢盈盈, 等. 22MnB5 钢亚温区加热淬火组织与力学性能的影响[J]. 钢铁钒钛, 2025, 46(6): 164-171.
Yao Xiaofeng, Qi Haiquan, Xie Yingying, et al. The influence of sub-temperature heating on the quenching microstructure and mechanical properties of 22MnB5 steel[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2025, 46(6): 164-171.
- [11] 霍俊美, 何博. Ti_2AlNb 基合金及其增材制造技术研究进展[J]. 中国材料进展, 2022, 41(8): 645-652.
Huo Junmei, He Bo. Research progress of Ti_2AlNb -based alloy and its additive manufacturing technology[J]. Materials China, 2022, 41(8): 645-652.
- [12] 梁弼宁, 曹烁, 王慈, 等. 高温钛合金中合金原子在 α_2 相中占位选择的第一性原理研究[J/OL]. 金属学报: 1-18[2026-01-27]. <https://link.cnki.net/urlid/21.1139.TG.20250826.1617.008>.
Liang Bining, Cao Shuo, Wang Ci, et al. Site occupation of alloying elements in α_2 phase in high-temperature titanium alloys: a first-principles study[J/OL]. Acta Metallurgica Sinica: 1-18[2026-01-27]. <https://link.cnki.net/urlid/21.1139.TG.20250826.1617.008>.
- [13] 薛晨, 曾卫东, 王伟, 等. 第二相颗粒对 Ti-22Al-25Nb 合金中 B2 晶粒长大的抑制作用[J]. 中国有色金属学报, 2013, 23(S1): S72-S74.
Xue Chen, Zeng Weidong, Wang Wei, et al. Pinning effect of second-phase particles on B2 grain growth of Ti-22Al-25Nb alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2013, 23(S1): S72-S74.
- [14] 刘泽栋, 杨劫人, 陈瑞润, 等. Ti_2AlNb 基金属间化合物: 研究进展、挑战及展望[J]. 中国有色金属学报, 2023, 33(12): 4039-4058.
Liu Zedong, Yang Jieren, Chen Ruirun, et al. Ti_2AlNb -based intermetallic compounds: research progress, challenges, and prospects[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2023, 33(12): 4039-4058.

- utilization of melting slag[D]. Shenyang: Northeastern University, 2015.
- [17] 于继洋, 李东明, 贾立根, 等. 电铝热法冶炼钒铝合金的炉衬打结工艺[J]. 河北冶金, 2021(2): 37-41.
Yu Jiyang, Li Dongming, Jia Ligen, et al. Lining knotting of smelting vanadium-aluminum alloy by electric aluminothermic method[J]. Hebei Metallurgy, 2021(2): 37-41.
- [18] 李兰杰, 万贺利, 王方, 等. 一种用于石墨坩埚的涂层料浆及其制备和应用方法: 202210248159. X[P]. 2022-07-05.
Li Lanjie, Wan Heli, Wang Fang, et al. A coating slurry for graphite crucibles and its preparation and application method: 202210248159. X[P]. 2022-07-05.
- [19] 高雷章, 陈海军, 尹丹凤, 等. 一种降低石墨坩埚渗碳的涂层及其制备方法: 202311140687.4[P]. 2023-12-05.
Gao Leizhang, Chen Haijun, Yin Danfeng, et al. A coating for reducing carburization of graphite crucibles and its preparation method: 202311140687.4[P]. 2023-12-05.
- [20] 史忠兵, 马凤仓, 王飞, 等. Al-V 系二元相图的计算、评估及其活度[J]. 有色金属材料与工程, 2017, 38(4): 222-228.
Shi Zhongbing, Ma Fengcang, Wang Fei, et al. Calculation, assessment and activity of the Al-V binary phase diagram[J]. Nonferrous Metal Materials and Engineering, 2017, 38(4): 222-228.
- [21] 李善军, 牛成强, 万强, 等. 渗层强化的果园运输机驱动轮耐磨性能[J]. 农业工程学报, 2024, 40(2): 176-186.
Li Shanjun, Niu Chengqiang, Wan Qiang, et al. Wear resistance of the driving wheels of orchard conveyor with coating strengthening[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2024. 40(2): 176-186.
- [22] 宋芊汀, 徐映坤, 徐坚. (TiZrNbTa)₉₀Mo₁₀ 高熵合金与 Al₂O₃ 干摩擦条件下的滑动磨损行为[J]. 金属学报, 2020, 56(11): 1507-1520.
Song Qianting, Xu Yingkun, Xu Jian. Dry-sliding wear behavior of (TiZrNbTa)₉₀Mo₁₀ high-entropy alloy against Al₂O₃[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2020, 56(11): 1507-1520.
- [23] 王兰, 丁红燕, 刘爱辉, 等. TC4 合金在不同摩擦体系中磨损性能的研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2017, 46(9): 2449-2454.
Wang Lan, Ding Hongyan, Liu Aihui, et al. Wear performance of TC4 alloys in different tribo-systems[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2017, 46(9): 2449-2454.

编辑 唐肖

(上接第 50 页)

- [15] 李楠. Ti-22Al-24Nb-0.5Mo 合金组织设计与变形行为研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2023.
Li Nan. Microstructure design and deformation behavior of Ti-22Al-24Nb-0.5Mo alloy[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2023.
- [16] 金淼, 李文权, 郝硕, 等. 固溶温度对 Mn-N 型双相不锈钢拉伸变形行为的影响[J]. 金属学报, 2019, 55(4): 436-444.
Jin Miao, Li Wenquan, Hao Shuo, et al. Effect of solution temperature on tensile deformation behavior of Mn-N-bearing duplex stainless steel[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2019, 55(4): 436-444.
- [17] 刘智恩. 材料科学基础[M]. 第 5 版. 西安: 西北工业大学出版社, 2019.
Liu Zhien. Fundamentals of materials science[M]. 5th ed. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2019.
- [18] Baker I. Recovery, recrystallization and grain growth in ordered alloys[J]. Intermetallics, 2000, 8(9-11): 1183-1196.
- [19] Sun Shichen, Fang Hongze, Hao Jiaqi, et al. Formation behavior of subcrystals and its strengthening and toughening mechanism by coupling with α phase in titanium alloys during forging at various temperatures[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2025, 336: 118705.
- [20] Zhao Yanan, Ma Zongqing, Yu Liming, et al. The simultaneous improvements of strength and ductility in additive manufactured Ni-based superalloy via controlling cellular subgrain microstructure[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2021, 68: 184-190.
- [21] 赵子博, 王清江, 刘建荣, 等. 两种可用于描述晶粒变形传递倾向性的物理量: 滑移位向差和孪生取向差[J]. 聊城大学学报(自然科学版), 2025, 38(5): 703-706.
Zhao Zibo, Wang Qingjiang, Liu Jianrong, et al. Two physical quantities to describe the tendency of grain deformation transfer: slip misorientation and twinning misorientation[J]. Journal of Liaocheng University (Natural Science Edition), 2025, 38(5): 703-706.

编辑 徐飞翔