

# 热处理对 Ti-58Ta 合金显微组织与力学性能的影响

李敏娜, 高贝特, 李欣琳, 张天有, 刘新梅

(西北有色金属研究院, 陕西 西安 710016)

**摘要:** 研究了退火温度 (700~900 °C) 及冷却方式 (水冷、空冷和炉冷) 对 Ti-58Ta 合金板坯显微组织及力学性能的影响规律。结果表明: 在空冷条件下, 随着退火温度的升高, 等轴化的  $\beta$  相逐渐增加并长大, 合金的抗拉强度逐渐降低, 塑性逐渐升高, 并出现双屈服现象; 完全再结晶后, 这种现象消失, 屈服强度趋于稳定, 表现为单屈服, 其抗拉强度在 850 MPa 以上, 屈服强度在 600 MPa 以上, 伸长率大于 20%, 断面收缩率达到 70%; Ti-58Ta 合金板坯在 900 °C 保温 60 min, 炉冷后会在晶界处析出次生  $\alpha$  相, 强度显著提高, 断后伸长率仅为 3%, 与空冷和水冷处理存在明显差异。推荐 Ti-58Ta 合金板坯的退火处理制度为 900 °C/60 min/AC。

**关键词:** Ti-58Ta 合金; 板坯; 退火温度; 冷却方式

中图分类号: TG166; TG146.23

文献标识码: A

文章编号: 1009-9964(2025)06-001-05

## Effect of Heat Treatment on Microstructure and Mechanical Properties of Ti-58Ta Alloy

Li Minna, Gao Beite, Li Xinlin, Zhang Tianyou, Liu Xinmei

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

**Abstract:** The influence of annealing temperature (700–900 °C) and cooling method (water cooling, air cooling, and furnace cooling) on the microstructure and mechanical properties of Ti-58Ta alloy slab was studied. The results indicate that under air cooling conditions, as the annealing temperature increases, the equiaxed  $\beta$  phase gradually increases and grows, the tensile strength of the alloy gradually decreases, the plasticity gradually increases, and a double yield phenomenon occurs. After complete recrystallization, this phenomenon disappears, and the yield strength tends to stabilize, exhibiting a single yield. The tensile strength of the alloy is above 850 MPa, yield strength is above 600 MPa, elongation is greater than 20%, and the reduction of area reaches about 70%. When the Ti-58Ta alloy slab is heat-treated at 900 °C for 60 min and furnace-cooled, some secondary  $\alpha$  phases precipitate at the grain boundaries, resulting in a significant increase in strength and a post-elongation of only 3%, which is markedly different from the outcomes of air cooling and water cooling treatments. The recommended annealing heat treatment process for Ti-58Ta alloy slab is 900 °C/60 min/AC.

**Keywords:** Ti-58Ta alloy; slab; annealing temperature; cooling method

钛钽合金具有高比强度、优良的耐腐蚀性和良好的生物相容性, 在航空航天、武器装备、生物医疗等诸多领域展现出广阔的应用前景<sup>[1-3]</sup>。钽是一种  $\beta$  型稳定元素, 可无限固溶于  $\beta$  钛中, 并产生较小的晶格畸变。钽在强化合金的同时, 还能使合金保持较高的塑性, 并且不会发生共析或包析反应而产生脆化相, 金相组织稳定性好。钛钽合金中高含量的  $\beta$  相稳定元素 Ta, 可以抑制冷却过程中析出  $\alpha$  相, 从而在空冷条件下将  $\beta$  相稳定至

室温, 获得优异的综合性能<sup>[4-5]</sup>。Sing 等人<sup>[6]</sup>利用选择性激光熔化 (SLM) 技术制备了 Ti-50Ta 合金, 发现该合金所具有的优异综合力学性能主要归因于合金中形成的稳定  $\beta$  相。此外, Liu 等人<sup>[7]</sup>研究了 Ta 元素对 Ti-48Al-2Cr-2Nb 合金微观组织与力学性能的影响, 发现添加 Ta 元素能够显著细化合金的晶粒, 提高其高温强度和抗氧化性能。

鉴于钽 (熔点 2996 °C) 与钛 (熔点 1668 °C) 的物理性质差异巨大, 传统熔炼工艺难以实现高 Ta 含量钛钽合金的成分均匀化控制, 因此当前研究主要聚焦于

收稿日期: 2025-06-03

通信作者: 李敏娜 (1992—), 女, 高级工程师。

粉末冶金技术路线。然而,粉末冶金工艺虽可实现近净成形及规模化生产<sup>[8-10]</sup>,但其固有的冷速特性限制了对 $\beta$ 组织的深度调控。在此背景下,通过熔炼制备高 Ta 含量钛钽合金并开展组织性能优化研究,不仅可以突破现有制备技术的性能瓶颈,而且对于研究综合性能优异的高 Ta 含量钛钽合金具有重要意义。为此,以 Ti-58Ta 合金为研究对象,分析了不同退火热处理制度对 Ti-58Ta 合金板坯组织及性能的影响规律,以期高 Ta 含量钛钽合金的工业化热处理工艺选择提供参考。

## 1 实验

实验材料为经过 1 次电子束熔炼和 2 次电弧熔炼而成的钛钽合金铸锭。铸锭直径为 210 mm, Ta 元素含量为 58% (质量分数,下同), O 元素含量为 0.18%, 余量为 Ti 和不可避免的杂质。铸锭经多火次锻造后,再经热轧加工得到 30 mm 厚板坯。加工态 Ti-58Ta 合金板坯的纵向显微组织主要表现为沿轧制方向具有加工流线的变形组织,如图 1 所示。

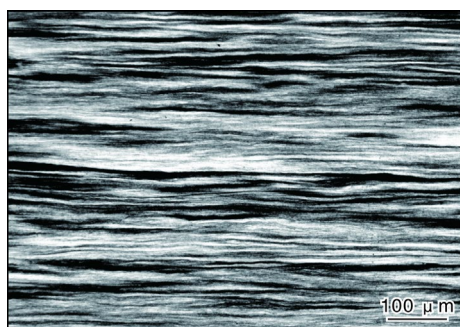


图 1 加工态 Ti-58Ta 合金板坯的显微组织

Fig.1 Microstructure of Ti-58Ta alloy slab as-rolled

选用 5 种退火温度及 3 种冷却方式对 Ti-58Ta 合金板坯进行退火处理,具体工艺见表 1。采用 Olympus PMG-3 光学显微镜和 JSM6460 扫描电子显微镜 (SEM) 对加工态及退火态板坯的显微组织进行观

表 1 Ti-58Ta 合金板坯热处理工艺

Table 1 Heat treatment processes of Ti-58Ta alloy slab

No.	Heat treatment process
1 <sup>#</sup>	700 °C/60 min/AC
2 <sup>#</sup>	750 °C/60 min/AC
3 <sup>#</sup>	800 °C/60 min/AC
4 <sup>#</sup>	850 °C/60 min/AC
5 <sup>#</sup>	900 °C/60 min/AC
6 <sup>#</sup>	900 °C/60 min/WC
7 <sup>#</sup>	900 °C/60 min/FC

察,采用 INSTRON 电子万能试验机进行室温拉伸测试,拉伸速率为  $10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 。

## 2 结果与讨论

### 2.1 退火温度对组织性能的影响

图 2 为 Ti-58Ta 合金板坯分别在 700、750、800、850、900 °C 保温 60 min 空冷后的显微组织。从图 2 可以看出,经 700 °C 退火后, Ti-58Ta 合金板坯在纵向上的加工流线分布弱化;当退火温度达到 750 °C 时,材料已经发生再结晶,但晶粒细小且局部再结晶不完全;随着退火温度的进一步提高,再结晶晶粒逐渐长大,800 °C 时再结晶率已达到 80% 以上,850 °C 时已完全再结晶,但表现为明显的混晶组织。这主要是因为合金在变形过程中的应变分布不均匀,且随着变形量的增加,这种不均匀的累积应变也随之增加。因此,累积应变小于动态再结晶临界应变时,晶粒在随后的冷却过程中未发生动态再结晶而逐渐长大;累积应变大于动态再结晶临界应变时,将通过动态再结晶得到超细的晶粒,在最终的微观结构中形成晶粒尺寸大小不一的混晶组织<sup>[11]</sup>。退火温度为 900 °C 时,合金内部的应变能已全部释放,显微组织表现为均匀一致的等轴组织。

表 2 为不同温度退火后 Ti-58Ta 合金板坯的室温拉伸性能。从表 2 可以看出,随着退火温度的升高, Ti-58Ta 合金的抗拉强度逐渐降低,塑性逐渐升高,符合  $\beta$  钛合金的材料特性,即随着退火温度的升高,  $\alpha$  相逐渐转变为等轴  $\beta$  相。 $\beta$  相能赋予材料优异的塑性和较低的强度,因此  $\beta$  钛合金尤为适合冷加工成形<sup>[12]</sup>。

Ti-58Ta 合金板坯的拉伸应力-应变曲线如图 3 所示。由图 3 可以看出,加工态以及 700、750、800 °C 退火的 Ti-58Ta 合金板坯,在变形过程中均发生了双屈服现象。结合表 2 (所测屈服强度均为第一屈服强度)可以发现, Ti-58Ta 合金板坯退火温度越低,第一屈服点越低。结合显微组织的变化规律可知,当 Ti-58Ta 合金未完全再结晶时,拉伸过程中会出现双屈服现象,而完全再结晶后,这种现象消失,表现为稳定的屈服状态,力学性能也趋于稳定。研究表明,钛合金室温变形过程中若生成应力/应变诱导马氏体相,其显著特征是工程应力-应变曲线或真应力-应变曲线出现双屈服现象<sup>[13]</sup>,从而推测 Ti-58Ta 合金处于未完全再结晶状态时,变形过程中可能发生了应力诱导相变因而出现双屈服现象,这种现象在合金完全再结晶后消失。Ti-58Ta 合金经过完全再结晶退火后,抗拉强度大于 850 MPa,屈服强度大于 600 MPa,伸长率



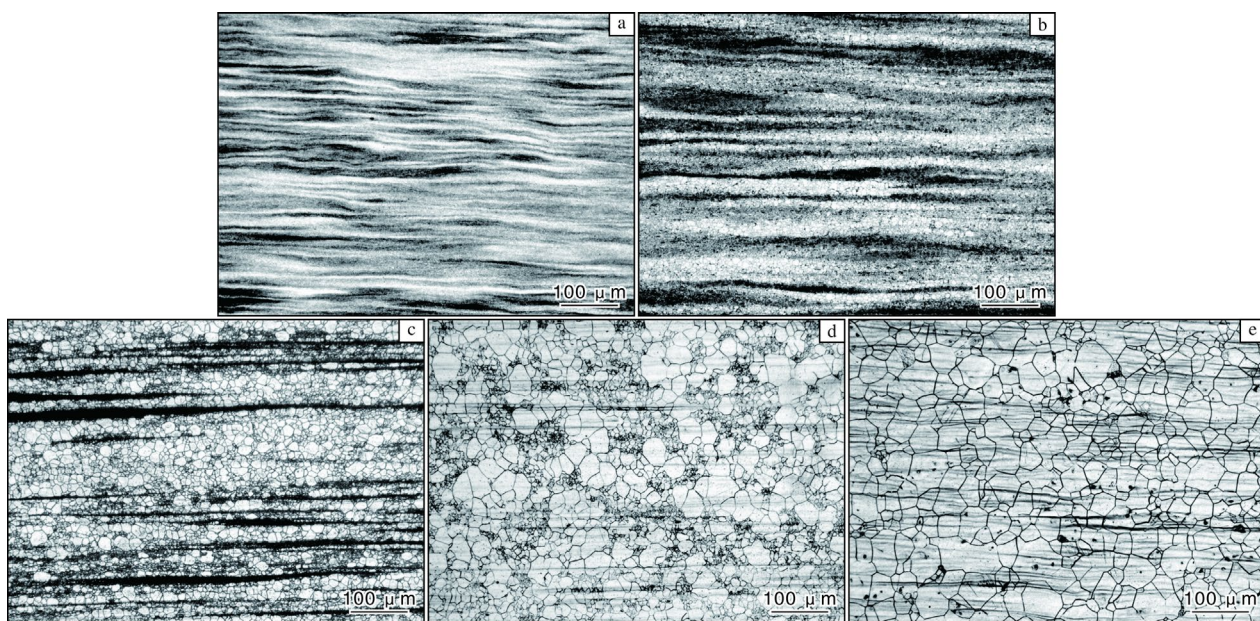


图 2 不同温度退火后 Ti-58Ta 合金板坯的显微组织

Fig.2 Microstructures of Ti-58Ta alloy slab after annealing at different temperatures: (a) 700 °C; (b) 750 °C; (c) 800 °C; (d) 850 °C; (e) 900 °C

表 2 不同温度退火后 Ti-58Ta 合金板坯的室温拉伸性能

Table 2 Room temperature tensile properties of Ti-58Ta alloy slab after annealing at different temperatures

Temperature/°C	$R_m$ /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	$A$ /%	$Z$ /%
As-rolled	1214	375	4.0	11
700	1028	183	5.0	14
750	1017	289	10.0	31
800	975	442	10.5	34
850	930	640	25.5	70
900	880	613	33.0	73

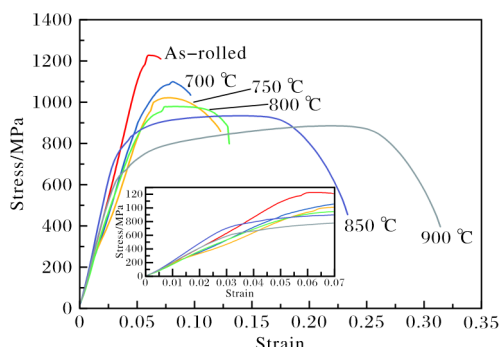


图 3 Ti-58Ta 合金板坯的拉伸应力-应变曲线

Fig.3 Tensile stress-strain curves of Ti-58Ta alloy slab

大于 20%，断面收缩率达到 70%，相比 Ti-3Ta<sup>[14]</sup>、Ti-6Ta<sup>[15]</sup>、Ti-29Ta<sup>[16]</sup>、Ti-30Ta<sup>[17]</sup>、Ti-32Ta<sup>[16]</sup>等钛钽合金，表现出最优的力学性能。

## 2.2 冷却方式对组织性能的影响

Ti-58Ta 合金板坯在 900 °C 下保温 60 min 后，分别以水冷、空冷、炉冷方式冷却至室温，不同冷却方式下的显微组织和力学性能分别见图 4 和表 3。从图 4 可以看出，虽然冷却方式不同，但 Ti-58Ta 合金板坯的显微组织相似，均由单一的等轴  $\beta$  晶粒组成，且晶粒尺寸差异不大。从表 3 可知，Ti-58Ta 合金板坯在水冷方式下的强度最低，塑性最好，而在空冷方式下的强度提高，塑性下降，但两者的差异较小。与空冷相比，Ti-58Ta 合金板坯在水冷方式下的冷却速度更快，此时部分高温  $\beta$  相转变为不稳定的室温亚稳  $\beta$  相，这种亚稳  $\beta$  相可以使材料表现出优异的塑性和较低的强度，且高温  $\beta$  相含量越高，冷却后转变成的亚稳  $\beta$  相也越多<sup>[18]</sup>。炉冷方式下 Ti-58Ta 合金板坯的强度显著提高，但延伸率仅有 3%，可能与炉冷时晶界处的析出物有关。

表 3 不同冷却方式下 Ti-58Ta 合金板坯的室温拉伸性能

Table 3 Room temperature tensile properties of Ti-58Ta alloy slab in different cooling methods

Cooling method	$R_m$ /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	$A$ /%	$Z$ /%
WC	816	568	37	84.4
AC	880	613	33	73.0
FC	1136	1113	3	7.5

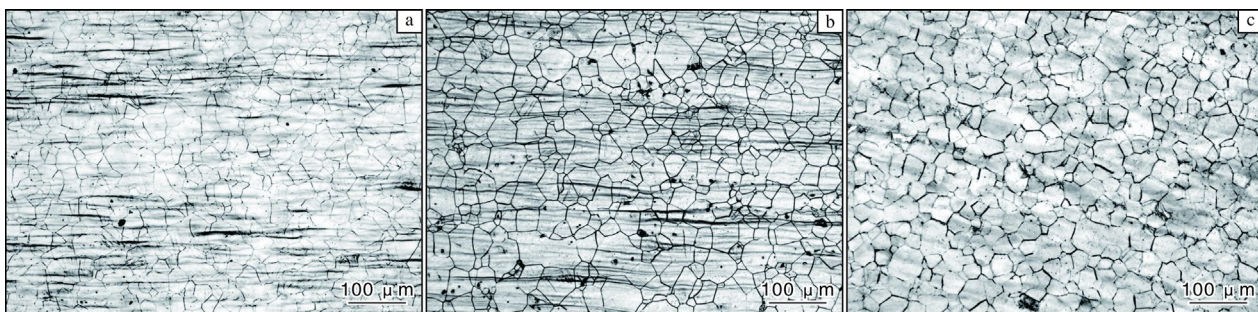


图4 不同冷却方式下 Ti-58Ta 合金板坯的显微组织

Fig.4 Microstructures of Ti-58Ta alloy slab in different cooling methods: (a) WC; (b) AC; (c) FC

图5为空冷和炉冷方式下 Ti-58Ta 合金板坯的 SEM 照片。从图5可以看出,空冷方式下 Ti-58Ta 合金的晶界平滑,没有明显的析出物,而炉冷方式下合金的晶界和晶内均有少量针状析出物。这种细针状析出相实际是次生  $\alpha$  相,是由于炉冷温降速率较慢,在温度降低至室温过程中,形成了类似于时效的氛围,次生

$\alpha$  相优先在晶界和晶内的高密度位错区形核,若时效时间较短,则主要集中在晶界处。这种细小且弥散分布的次生  $\alpha$  相能够有效阻碍位错运动,显著提高合金的屈服强度和抗拉强度,但同时也伴随着材料脆性的增加,导致 Ti-58Ta 合金板坯经炉冷后强度显著提高,塑性下降。

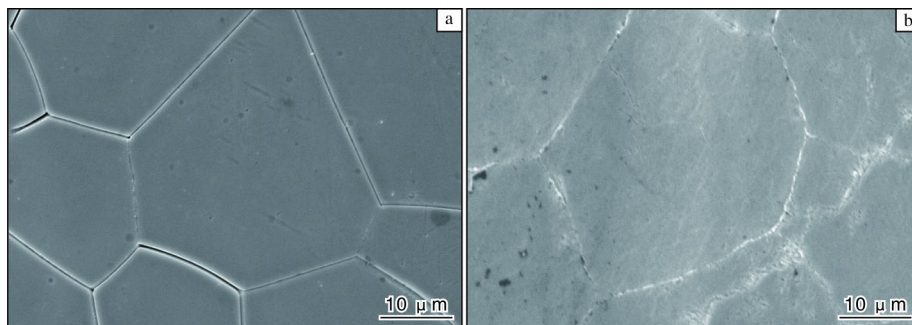


图5 不同冷却方式下 Ti-58Ta 合金板坯的 SEM 照片

Fig.5 SEM images of Ti-58Ta alloy slab in different cooling methods: (a) AC; (b) FC

### 3 结 论

(1) Ti-58Ta 合金板坯在 900 °C 退火空冷后得到均匀单一的等轴  $\beta$  组织。随着退火温度的升高,合金的抗拉强度逐渐降低,塑性逐渐升高。Ti-58Ta 合金板坯在未完全再结晶时会生成应力/应变诱导马氏体相,进而出现双屈服现象,完全再结晶以后这种现象消失,屈服强度趋于稳定。

(2) Ti-58Ta 合金板坯经过完全再结晶退火后,其抗拉强度在 850 MPa 以上,屈服强度在 600 MPa 以上,伸长率大于 20%,断面收缩率达到 70%。

(3) Ti-58Ta 合金板坯经 900 °C 保温 60 min 退火处理,水冷后强度最低,塑性最高,空冷后强度提高,塑性下降,但相较水冷性能差异较小,炉冷后板坯强度显著提高,而断后伸长率仅为 3%,这主要与炉冷过程中晶界析出的次生  $\alpha$  相有关,工程化应用中应予以

避免。推荐 Ti-58Ta 合金板坯的退火处理制度为 900 °C/60 min/AC。

#### 参考文献 References

- [1] Brodie E G, Wegener T, Richter J, et al. A mechanical comparison of alpha and beta phase biomedical TiTa lattice structures[J]. Materials & Design, 2021, 212: 110220.
- [2] 侯旭升. Ti/Ta 层状复合材料组织和力学性能研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2022.
- [3] 杨帆. 钛钽合金的组织结构与腐蚀行为研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2015.
- [4] 蒲芸娜. Ti-25Ta 合金射频等离子球化及选区激光熔化成形研究[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2023.
- [5] Sing S L, Wiria F E, Yeong W Y. Selective laser melting of titanium alloy with 50wt% tantalum: effect of laser process parameters on part quality[J]. International Journal of



- Refractory Metals and Hard Materials, 2018, 77: 120-127.
- [6] Sing S L, Yeong W Y, Wiria F E. Selective laser melting of titanium alloy with 50wt% tantalum: microstructure and mechanical properties[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2016, 660: 461-470.
- [7] Liu Z Q, Wang C Y, Wang W B, et al. Effects of tantalum on the microstructure and properties of Ti-48Al-2Cr-2Nb alloy fabricated via laser additive manufacturing[J]. Materials Characterization, 2021, 179: 111317.
- [8] 李旭, 张志彬, 何鹏飞, 等. 钽及钽合金的研究现状与展望[J]. 稀有金属材料与工程, 2023, 52(3): 1131-1142.
- [9] 徐满敏, 刘宁, 刘爱军, 等. 钽及钽合金的制备方法和力学性能研究[J]. 热处理, 2019, 34(1): 6-11.
- [10] 赵少阳, 殷京瓿, 王利卿, 等. Ti-60Ta 合金快速凝固过程中的相变研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2022, 51(3): 934-939.
- [11] 朱国辉, Subramanian S V. 多道次轧制过程中超细晶粒控制[J]. 安徽工业大学学报(自然科学版), 2005, 22(4): 313-318.
- [12] Wang Q J, Gao B T, Wang W, et al. Effect of primary  $\alpha$  phase on the plastic deformation mechanism of Ti-10Mo-1Fe alloys at room temperature[J]. Advanced Engineering Materials, 2021, 202101150.
- [13] Gao B T, Wang Q J, Wang W, et al. Study on the deformation mechanism of Ti-10Mo-1Fe solid-solution alloys with different cooling rates[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 23: 5221-5229.
- [14] 荣宇航. Ti-Ta-Nb 耐蚀合金组织结构与性能研究[D]. 西安: 西安石油大学, 2023.
- [15] 赵圣泽, 郭获子, 王晓, 等. Ti-Ta 系近  $\alpha$  型钛合金极薄壁管材退火工艺研究[J]. 钛工业进展, 2022, 39(6): 28-31.
- [16] 司曼曼. 深冷处理 Ti-Ta 形状记忆合金的马氏体相变与功能特性[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2024.
- [17] 郑晓航. Ti-Ta-Zr 高温记忆合金的马氏体相变与形状记忆效应[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- [18] Liu C C, Li Y H Z, Gu J, et al. Phase transformation in titanium alloys: a review[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2024, 34(10): 3093-3117.

## 研究简报

### 受钢筋混凝土增强机理启发的网格状钛合金骨架增强铝基复合材料

受钢筋混凝土多尺度协同增强机制启发, 针对金属复合材料在高温下因基体动态回复与再结晶而导致强度显著衰减的问题, 提出并实现了一种多尺度仿生结构金属复合材料的设计与制备。该研究通过构建“结构-材料一体化”的设计与制备体系, 使材料在宽温域(室温至 500 °C)内兼具高强度、高比强度及优异的抗高温软化能力。

首先以 AlSi7Mg 合金为基体材料, 以选区激光熔化(SLM)成形的 Ti6Al4V 三维微点阵为宏观连续增强骨架(发挥类似钢筋的承载作用); 再以铸造过程中原位生成的微米级  $\text{Al}_3\text{Ti}$  金属间化合物颗粒为耐热弥散相(发挥类似混凝土骨料的增强作用); 最后通过热处理, 在基体中析出纳米尺度沉淀相(如  $\text{AlSi}_2\text{Ti}_6$ ), 从而构建出涵盖亚毫米、微米与纳米尺度的多级协同增强结构。利用力学性能测试与多尺度模拟分析该复合材料的高温性能及其内在机制。

实验结果表明: 在 400 °C 高温下, 该铝基复合材料的压缩屈服强度达到 938 MPa, 比强度为 235 kN·m/kg; 500 °C 时仍保持 335 MPa 的屈服强度, 显著抑制了高温软化效应, 综合性能超过多数已报道的铝基材料。机理研究表明, 其性能的提升源于多尺度组分的协同作用。Ti6Al4V 框架承担主要载荷;  $\text{Al}_3\text{Ti}$  颗粒不仅提供弥散强化, 更表现出独特的“反常热致孪生”行为。当温度由 25 °C 升至 400 °C 时, 其孪生倾向显著增强, 主要源于  $\text{D0}_{22}$  晶体结构可降低孪生临界分切应力, 起到协调界面应变、抑制微裂纹萌生与扩展的作用, 从而提升高温变形能力。同时, 纳米沉淀相通过钉扎位错, 产生强化作用。材料实测强度显著高于混合法则预测值, 进一步证实了跨尺度结构的协同强化效应。结合宏观-微观有限元与分子动力学模拟, 进一步阐明了多相界面处的应力-应变演化、位错与孪生机制的竞争关系以及框架结构对整体失效模式的影响规律, 为理解此类复合材料的变形机理提供了理论依据。

该项工作不仅为提升铝基复合材料的高温性能提供了有效途径, 更展示了一种基于仿生理念的“结构-材料一体化”设计制备新模式。该策略突破了传统单一尺度增强的局限, 未来可通过优化框架拓扑、调控增强相类型与空间分布等方式, 为航空航天、国防装备等极端高温服役环境所需高性能轻量化结构材料的开发开辟新的技术路径。

罗莹、雷征摘译自《Nat Commun》2025, 16