

中国材料大会 2025

暨新材料科研仪器与设备展

7月5-8日, 2025

福建 厦门

C05-高性能钛合金材料
C05-High Performance Titanium Alloys

主办单位

中国材料研究学会

会议网址: <https://cmc2025.scimeeting.cn>



C05. 高性能钛合金材料

分会主席：赵永庆、肖文龙、寇宏超、孙巧艳、陈永

C05-01

高强钛合金变形断裂微观机制及其组织结构依赖规律

孙巧艳¹, 孙军¹

1. 西安交通大学

高强钛合金主要用于受力的结构件和零件,了解其在外力作用下的变形断裂的微观机制具有重要工程意义;揭示高强钛合金变形断裂与微观组织结构的依赖规律,为优化钛合金组织结构和提高力学性能提供有力的指导。本文主要针对高强钛合金的层片、双态组织结构,对其拉伸变形中的变形特点以及裂纹形成与扩展规律,研究层片组织结构变形局部分布以及裂纹萌生位置和扩展路径对 β 晶界与晶内的 α 相的形貌、尺寸及分布的依赖规律,揭示微米尺度 α 相在协同塑性变形的作用及其边界应变集中对裂纹萌生的影响规律。研究结果表明对于高强 β 钛合金层片组织,约 77% 的裂纹萌生在 β 晶界,约 23% 的裂纹萌生在 β 晶内。提出了裂纹萌生应变参数评价了裂纹萌生对应的应变值,发现在晶界萌生裂纹,其应变值低于晶内萌生裂纹的应变值,表明裂纹在晶界萌生所需的应变较小,因此晶界是层片组织裂纹萌生的主要位置。另外,结果发现晶界魏氏体对于阻碍裂纹萌生的积极作用,根据统计结果,对于在晶界萌生的裂纹,约 88% 的裂纹萌生在没有魏氏体的晶界,裂纹在有魏氏体的晶界萌生的比例仅占约 12%。裂纹扩展路径为穿晶和沿晶界扩展的混合形式,发现有晶界魏氏体对裂纹路径有偏转作用,提高合金抵抗裂纹扩展的阻力。对于双态组织,其强度和塑性对固溶温度比较敏感,固溶温度选择 790,810 $^{\circ}\text{C}$,时效温度为 540-630 $^{\circ}\text{C}$ 。随着时效温度降低,强度增加,延伸率变化显著。790 $^{\circ}\text{C}$ 固溶+540 $^{\circ}\text{C}$ 时效,合金的抗拉强度为 1400MPa,其断后延伸率为 6.5%, 810 $^{\circ}\text{C}$ 固溶经过 540 $^{\circ}\text{C}$ 时效,其强度为 1400MPa,但是断后延伸率已降为 2.9%。通过统计研究发现时效析出的片状 α 相宽度大于 100nm,合金的塑性(延伸率)大于 6%。

C05-02

高性能低工艺敏感性钛合金设计与制备

唐斌¹, 戴锦华¹

1. 西北工业大学

钛合金广泛用于制备重大装备关键承力构件,高性能、低成本钛合金及其制备技术是重要发展方向。然而,钛合金组织演化对热处理工艺极其敏感,致使不同工艺条件下力学性能波动较大,制约了其生产成本与服役可靠性。降低钛合金力学性能对热处理的敏感性,是突破高性能钛合金低成本化的重要途径。针对这一关键问题,本报告提出通过引入硅化物补偿多尺度 α 相对强塑性影响的钛合金成分/组织调控策略,设计了新型高强塑 $\alpha+\beta$ 型钛合金 Ti-5Al-7.5V-0.5Mo-0.5Zr-0.5Si (TC5751S)。实验结果表明,在宽固溶温度范围内,TC5751S 合金始终保持优异且稳定的强塑性匹配(抗拉强度: 1335 $\pm$ 30 MPa,屈服强度: 1245 $\pm$ 30 MPa,断裂伸长率: 9.6 $\pm$ 0.5%)。随固溶温度升高,次生 α s 相体积分数增加所导致的相界强化增加大致被硅化物溶解导致的硅化物强化降低所抵消,从而使 TC5751S 合金强度在不同固溶温度下均处于动态平衡状态;同时,硅化物溶解减少了裂纹/孔洞形核位点,弥补了由于微米初生 α p 减少和纳米次生 α s 沉淀析出导致的塑性损失,从而使 TC5751S 合金塑性在不同固溶温度下均处于动态平衡状态。通过构建微米 α p 相、纳米 α s 相与硅化物的三元平衡机制,有效突破了传统钛合金中微米 α p 相与纳米 α s 相的二元对立关系,使钛合金力学性能对热处理工艺的敏感性显著降低。本报告提出的成分/组织协同调控策略为实现高性能钛合金的低成本制造提供了新思路。

C05-03

一种新型低成本钛合金研制进展

郭萍¹

1. 西北有色金属研究院

C05-04

新型超高强亚稳 β 钛合金热变形行为及动态组织演变规律叶勇强¹, 乐建温¹, 韩远飞¹, 吕维洁¹

1. 上海交通大学

亚稳 β 钛合金属于多组元、多相、多层次结构的复杂组合体, 对组织—性能一体化热变形调控提出巨大挑战。本文系统研究了新型亚稳 β 超高强钛合金高温变形力学特征, 建立了包含变形量、应变速率和温度等参数的热变形安全判据, 揭示了等温热变形前后组织结构及固态相变等微观组织演化规律, 阐明了 β 钛合金等温变形机制以及异质相间变形协调机制, 建立了梯度热处理过程中固态相变-组织演化-力学性能间关联关系。结果表明, 在 $\alpha+\beta$ 两相区变形时会诱发 $\alpha \rightarrow \beta$ 动态相变和 α 相动态球化发生, 高温动态软化是动态再结晶和流变失稳共同作用的结果, 动态再结晶产生新晶粒的形核位置、尺寸和组织占比都对热变形参数有较高的敏感性; 发现了连续和不连续动态再结晶机制的耦合作用下发生的晶界应变集中效应和亚晶旋转形核过程。

C05-05

双功能氮-位错交互作用实现创纪录强塑性双相钛合金

张崇乐¹, 李轩哲¹, 李苏植¹, 张金钰¹, 刘刚¹, 孙军¹

1. 西安交通大学

高比强度双相 ($\alpha+\beta$) 钛合金通常表现为有限的均匀延伸率 (ϵ_u), 其主要原因包括: 1) 密排六方 (HCP) α 相中 $\langle c+a \rangle$ 位错因极高的临界分切应力 (CRSS) 难以激活, 导致加工硬化能力不足; 2) 次生 α 析出相/ β 基体间的半共格相界 (PBs) 引发应变不相容及应力集中, 降低塑性。更为关键的是, 间隙原子 (例如 N、O) 的毒化效应会加剧上述钛合金的强度-塑性倒置关系, 这主要是因为强烈的间隙原子-位错交互作用一方面增加 $\langle c+a \rangle$ 位错的 CRSS 抑制其激活, 另一方面显著强化 α 相而恶化 α/β 相界的应变不相容性。针对上述难题, 本研究以最高强间隙强化能力的氮原子为调控媒介, 在双相 Ti-2.8Cr-4.5Zr-5.2Al-0.4N (wt.%) 合金中提出一种反直觉的设计策略: 利用双功能氮-位错交互作用构建异质层状结构, 该结构由富氮低角晶界 (LAGBs) 修饰的拉长初生 α 相 (α_p) 晶粒和共格间隙氮强化 α' -纳米孪晶马氏体的 β_{trans} 组织构成。这种异质结构设计使得合金获得超高强度 (屈服强度~1532 MPa, 抗拉强度~1869 MPa), 极高的强度通过应力驱动的位错弓出与交滑移机制, 促进大量 $\langle c+a \rangle$ 位错从富氮 LAGBs 及共格界面激活, 结合富氮 LAGBs 和间隙氮 α' -NTNMs 中的共格界面缓解应力集中, 从而实现显著提升的均匀延伸率 ($\epsilon_u \sim 10.2\%$)。本工作为间隙强化钛合金开辟了一条新途径: 通过双功能间隙原子-位错相互作用构筑独特微观结构, 获得超高强度与大拉伸塑性的优异性能组合。

C05-06

亚晶界诱导多层次 α 相析出协同改善 TB18 钛合金强塑性郭金虹¹, 杨浩¹, 寇宏超^{*1}, 谢偲偲¹, 宋雨晴¹, 汪国栋¹, 刘向宏²

1. 西北工业大学凝固技术国家重点实验室

2. 西部超导材料科技股份有限公司

多层次 α 相析出及其对强塑/韧性的影响一直是亚稳 β 钛合金方向的研究热点。本研究以 TB18 钛合金为研究对象, 通过改变热处理工艺来调控亚晶界分布从而介导多层次 α 相析出。结果表明, 亚晶界的存在

影响 α 相的析出行为, 最终形成微米级 α_p 相、微米级 α_l 相、纳米级 α_s 相和超细 α_{WGB} 相组成的多层次 α 相结构, 从而使合金拉伸强度和延伸率分别达到 1365MPa 和 14.5%, 具有优异的强度-塑性匹配。进一步分析表明, 高强度不仅源于纳米级 α_s 和超细 α_{WGB} 阻碍位错运动、降低位错平均自由程起到界面强化效果, 而且还与多层次 α 相额外的 HDI 强化有关; 优异的塑性主要与 α_p 中形成多种位错构型 (特别是 $\langle c+a \rangle$ 类位错)、 α_s 中形成变形孪晶、层错以及 α_l 的扭折多种变形机制有关。本工作对进一步优化亚稳 β 钛合金热处理工艺、实现高强度与塑/韧性的匹配具有一定的参考价值。

C05-07

新型钛合金魏氏组织的硅化物析出行为及动态再结晶机制

张晨愉¹, 赵文强¹, 戴锦华¹, 陶寅¹, 习可心¹, 余凤恬⁴, 刘川*^{2,3}, 唐斌¹

1. 西北工业大学凝固技术国家重点实验室
2. 西北工业大学重庆科创中心
3. 重庆三航新材料技术研究院有限公司
4. 西北工业大学国家卓越工程师学院

以一种新型富硅 $\alpha+\beta$ 钛合金为研究对象, 通过热模拟压缩试验, 系统研究了该合金在热变形过程中硅化物的析出行为和动态再结晶机制。建立了 Ti-5Al-7.5V-0.5Mo-0.5Zr-0.5Si 合金高温变形的 Arrhenius 本构模型, 发现 DRX 是其热变形过程中主要的软化机制。结合微观结构表征, 发现硅化物析出与 DRX 之间存在一定的竞争关系, 导致硅化物析出呈现非单调变化。随着温度的升高, 硅化物尺寸增大, 体积分数先增大后减小。随着应变速率的减小, 硅化物尺寸先减小后增大, 体积分数不断减小。DRX 分数在 890 °C/0.001 s⁻¹ 时显著增加。此外, 发现 α 片层的裂解和球化是通过连续动态再结晶 (CDRX) 机制实现的。在此基础上, 将动态材料模型 (DMM) 与 DRX 和硅化物析出的相关参数相结合, 构建了新型的多维热工图。确定了合金的最佳加工参数为 870 - 884 °C/0.004 - 0.015 s⁻¹, 在该范围内加工可获得较高的功率耗散系数 η 、适宜的 DRX 体积分数和硅化物的强化效果, 有效地实现了该富硅钛合金强度与塑性的有效平衡。研究结果为优化富硅钛合金热加工工艺, 促进其工业应用提供了重要的理论依据。

C05-08

钛合金动态和抗弹性能研究

辛社伟¹

1. 西北有色金属研究院

针对钛合金高速冲击变形的特点, 以 Ti-15Mo 合金为例, 研究了合金不同加载过程中的组织性能演变规律, 指出动态冲击下 Ti-15Mo 合金产生大量孪生, Ti-15Mo 合金的绝热剪切带形成机制主要是亚晶旋转再结晶。弹丸侵彻下 Ti-15Mo 合金的绝热剪切带产生于弹孔表面内壁, 弹孔周围组织产生高密度孪晶, 平均孪晶密度随着距离弹孔的距离增加而降低。此外, 对比了 Ti-15Mo 合金和 TA15、Ti-6432、TC21 等常规钛合金的拉伸、冲击、动态性能和抗弹性能, 指出由于传统拉伸、冲击、霍普金森压杆压缩和实际靶试受力状态不同, 合金静态拉伸性、动态压缩性能和抗弹性能没有直接的对应关系, 因此评价材料抗弹性能还需要结合具体载荷方式进行研究。

C05-09

基于成分调制的多尺度异构高强韧钛合金设计与制备

张天隆*¹

1. 香港科技大学

异质结构被认为是实现结构材料高强度与优异塑性共存的有效途径。然而, 尤其在钛合金领域, 设计多尺度晶内异构微观结构仍面临诸多挑战。此外, 将实验室的小规模技术推广至工业大规模应用也存在一

定难度。在本次报告中, 我将探讨一种创新性的方法, 结合热力学数据库、相场模拟与增材制造, 以提升异构材料的设计与力学性能。首先, 通过相场模拟, 我们成功展示了前驱相分离组织及双步时效过程的设计, 构建出具有多尺度分层异构双相结构的材料。随后, 结合多步时效与增材制造技术, 我们在微米尺度上实现了一种全新的异构双相结构。这种新型的微米尺度浓度调制组织展现出卓越的力学性能。这一基于简易热处理与增材制造的方法, 为浓度调制异构合金的设计开辟了新的路径, 具备广泛的应用前景, 适用于各种结构和功能材料的研发与设计。

C05-10

我国乏燃料后处理用耐蚀钛合金材料研究进展

徐建平¹

1. 西安稀有金属研究院公司

C05-11

增材制造新型微合金化钛合金

熊智慧¹, 刘仕龙^{*1}

1. 上海交通大学

传统钛合金中极少添加 Ni, 因其极易扩散并形成脆性析出相, 损害力学性能。本研究通过粉末床激光熔化 (LPBF) 制备了 Ti-0.4Ni (wt.%) 微合金化钛合金, 利用该技术的超高冷速有效抑制 Ni 扩散, 获得 Ni 过饱和固溶的纳米级马氏体组织。该合金的抗拉强度高达~1120 MPa, 并维持~8.8 %的总延伸率。本研究还通过调控时效工艺研究了 Ti₂Ni 相的析出行为及其对力学性能的影响。结果表明, Ti₂Ni 相倾向于在板条界附近形核。此外, 低温时效有利于抑制 Ti₂Ni 相粗化并获得弥散分布的纳米级 Ti₂Ni 颗粒, 通过显著的析出强化效果获得最佳力学性能。本研究通过调控 LPBF 打印工艺和时效工艺获得了具有优异力学性能的 Ti-0.4Ni 合金, 揭示了微量 Ni 添加对增材制造钛合金组织性能的影响机制, 为开发高性能增材制造钛合金提供了新思路。

C05-12

空间模拟条件下高性能钛合金的快速凝固与组织遗传特性

李星吾^{*1}, 张雪华¹, 辛社伟¹

1. 西北有色金属研究院

钛合金中的 Fe 元素能够降低相变温度、提高热加工性能, 同时降低生产成本。但是, 在常规熔炼条件下, Fe 元素极易偏析进而导致热加工过程中出现“β 斑”, 显著影响合金的力学性能。快速凝固能够有效抑制元素偏析并调控相组成, 是开发新型高性能新材料的重要手段之一。本文采用静电悬浮技术研究了 Ti-5Al-5Mo-5V-1Cr-1Fe(TC18)和 Ti-23Fe-3Al-3Mo-3V 合金的深过冷与快速凝固过程, 结合非接触式测量方法揭示了液态合金密度与热辐比随温度的变化规律。在常规凝固条件下, 两种合金的微观组织主要由等轴 β-Ti 晶粒构成, 其中 Ti-23Fe-3Al-3Mo-3V 合金中含有 TiFe 析出相。随着过冷度的提升, 两种合金中初生 β-Ti 的枝晶生长速度均以幂函数规律增大, 并且, 在单点形核与快速凝固条件下形成了完整的球形单晶。液态 TC18 合金的过冷度达到 363 K (0.19 TL)时, 初生 β-Ti 的枝晶生长速度增大到 40.0 m/s。在 388 K (0.24 TL)过冷度下, 液态 Ti-23Fe-3Al-3Mo-3V 合金中 β-Ti 的枝晶生长速度仅为 6.6 m/s, 这表明 Fe 元素的增加显著降低了 β-Ti 的枝晶生长速度, 这与合金液相线温度降低导致的扩散系数减小有关。快速凝固诱导的溶质截留效应抑制了合金的元素偏析, 并通过组织遗传效应促进了第二相的细化与均匀分布, 进而改善了合金的微观力学性能。快速凝固的 Ti-23Fe-3Al-3Mo-3V 合金由过饱和 β-Ti 基体与弥散分布的纳米 TiFe 析出相构成, 合金的纳米硬度高达 7.2 GPa。经过时效处理后的快速凝固 TC18 合金中形成大量均匀且细小的 α-Ti 层片, 其硬度相比常规条件提升 32%。

C05-13

O 及室温时效对 Ti-12Mo 合金变形机制的影响

黄欣¹, 李金山¹, 罗婷¹, 赖敏杰*¹

1. 西北工业大学

钛合金作为航空航天领域的关键结构材料, 其强塑性的协同提升一直是材料设计的重点。近年来相关研究人员通过将孪晶诱导塑性 (TWIP) 效应和相变诱导塑性 (TRIP) 效应引入亚稳 β 钛合金的设计策略中, 通过应力诱发相变及变形孪晶的动态细晶化作用, 显著提升该类合金的加工硬化率与塑性。然而, 上述变形机制的关键影响因素尚未形成系统性理论认知, 这些基础理论的缺失严重制约了现有合金的性能优化。本工作以平均 β 晶粒尺寸为 $\sim 100\mu\text{m}$ 的 Ti-12Mo 亚稳 β 钛合金为模型合金, 系统探究了亚稳 β 钛合金中常见的固溶间隙 O 原子, 以及室温时效处理对该类合金中的 $\beta \rightarrow \omega$ 相变及塑性变形机制的影响。三位原子探针结果表明, Ti-12Mo-0.04O 合金经 30 天室温时效处理后, ω 相数密度提升了 30%, 证实了室温时效过程中会发生 $\beta \rightarrow \omega$ 相变。值得注意的是, 时效过程中并未发生 β/ω 相间的元素再分配, 这表明该 $\beta \rightarrow \omega$ 相变为无扩散型相变。但是提高 O 含量会显著抑制该相变, 具体表现为室温时效过程中, Ti-12Mo-0.12O 合金内 ω 相数密度不变。变形组织结果表明, Ti-12Mo-0.04O 合金中会发生应力诱发 α'' 马氏体相变、 $\{332\}\langle 113 \rangle \beta$ 、 $\{112\}\langle 111 \rangle \beta$ 及 $\{455\}\langle 522 \rangle \beta$ 变形孪晶; 但提高 O 含量会抑制应力诱发 α'' 马氏体相变与 $\{112\}\langle 111 \rangle \beta$ 、 $\{455\}\langle 522 \rangle \beta$ 变形孪晶。另外, 室温时效也会改变合金的变形机制: 在时效态 Ti-12Mo-0.04O 合金中, 由于 ω 相数密度升高, 其内应力诱导 α'' 相变被抑制; 而对于时效态的 Ti-12Mo-0.12O 合金, 因其内 ω 相密度几乎不变, 故其变形行为与淬火态材料一致。本研究揭示了间隙 O 原子-室温时效诱导 ω 相变-变形机制三者间的内在关联, 为设计具有可调控相变/孪晶诱导塑性效应的亚稳 β 钛合金提供了理论指导。

C05-14

冷却速率对激光熔覆近 α 钛合金 Ti-7.8Al-4Mo-2Zr-0.3Si-0.2Fe 显微组织及变体选择机制的影响宋硕¹, 赵永庆*²

1. 东北大学

2. 西北有色金属研究院

本研究探讨了冷却速率对激光熔覆工艺制备新型近 α 钛合金 Ti-7.8Al-4Mo-2Zr-0.3Si-0.2Fe 显微组织演变及变体选择机制的影响规律。研究表明, 当冷却速率为 0.1°C/s 时, 显微组织呈现典型的魏氏组织特征, 微观结构以晶界 α 相和 α 集束为主导。此时 α/α 界面取向差倾向于 $10.53^\circ[0001]$, α 相的变体选择主要由界面能驱动。而当冷却速率为 1°C/s 时, 显微组织中晶界 α 集束与晶内交错分布的 α 片层呈现共存状态, 界面取向差集中于 $60^\circ[11-20]$ 。在较快冷速条件下, 应变能驱动成为变体选择的主导因素。螺位错及其分解过程中产生的层错结构所形成的局部应变场为 α 相的优先形核提供了有利位置, 进而促使 α 相发生与该应变场晶体学匹配的变体选择。

C05-15

基于六方马氏体 $\rightarrow$ 四方马氏体相变在 Ti-6Al-4V 合金中获得聚合物级超高弹性孟令健*^{1,2}, Tomonori Kitashima³, 林鹏⁴, 王志华¹, 姜正义⁵, 赵敬伟^{1,2}

1. 太原理工大学机械工程学院

2. 先进金属复合材料成形技术与装备教育部工程研究中心

3. 日本国立材料研究所 (NIMS)

4. 太原理工大学材料科学与工程学院

5. 澳大利亚伍伦贡大学

钛合金与人体骨骼相比具有较高的弹性模量和较低的弹性应变, 严重限制了其作为骨科、牙科用植入

体在生物医疗领域中的应用。本研究通过在液氮温度下（77K）对 Ti-6Al-4V 合金进行剧烈塑性变形，首次发现了钛合金中的一种新的相变模式，即应力诱发 α' 六方马氏体向 α'' 四方马氏体的相转变。通过原子尺度的结构表征与第一性原理计算揭示了 $\alpha' \rightarrow \alpha''$ 马氏体相变是由原子剪切移动与重组所主导，且存在一种具有体心结构的中间相。基于热处理及深冷变形工艺，在 Ti-6Al-4V 合金中构筑了纳米尺度的非均质 $\alpha' + \alpha''$ 马氏体微观组织。原位微柱压缩实验表明该组织具有聚合物级的线性压缩弹性应变（~11%），超过了绝大部分钛基合金，同时，该组织具有与初始合金组织同级别的屈服强度。原位 TEM 拉伸测试表明，较高的屈服强度可归因于位错强化、高密度晶界强化、异类纳米孪晶强化的协同作用，而低模量 α'' 四方马氏体的出现和 $\alpha' + \alpha''$ 马氏体组织较高的屈服强度，共同导致了聚合物级线性弹性应变的产生。

C05-16

具有 TWIP 效应的 Ti-15Mo 合金低周疲劳性能研究

任诚¹，闵小华*¹

1. 大连理工大学

为满足疲劳载荷下钛合金部件服役的长期稳定性，要求其具有较好的低周疲劳抗性。高强度的 α 相及 $\alpha + \beta$ 双相钛合金在应变控制低周疲劳条件下因塑性不足导致性能受限，而具有 $\{332\} \langle 113 \rangle$ 孪生诱发塑性 (TWIP) 效应的 β 型钛合金呈现出大的延伸率和显著的加工硬化行为，可以有效的延缓疲劳损伤的形成。然而，疲劳载荷下 $\{332\} \langle 113 \rangle$ 孪生行为及其对低周疲劳性能的影响尚不明确。本研究对 $\{332\} \langle 113 \rangle$ 孪生型 Ti-15Mo 合金进行了不同应变幅下的低周疲劳测试，并对变形组织和裂纹扩展路径进行了表征。结果表明：随着总应变幅从 0.5% 增加到 1.5%，合金低周疲劳寿命由 69377 周减少到 700 周，同应变幅下疲劳寿命约为 TC4 合金的 5~8 倍。当总应变幅为 0.5% 时，合金表现出循环稳定行为；当总应变幅为 0.75%~1.5% 时，合金发生初始循环软化，随后循环硬化直至失效，循环硬化程度随应变幅的增加而增大。在循环加载条件下 $\{332\} \langle 113 \rangle$ 孪生主导合金的塑性变形，孪晶面积分数与合金循环硬化程度正相关。高 Schmid 因子的孪生变体在循环加载过程中不断发生孪生-退孪形成高密度的片层状组织，组织内部储存大量的位错和相互交割的应力诱发 ω 相，孪生-退孪行为延迟了合金在循环加载过程中晶粒内部孪晶的饱和，产生持续的循环硬化。同时，孪晶的大量产生及交割将晶粒内部分割成网状组织，释放应力集中并阻碍疲劳裂纹的萌生。裂纹尖端存在大量的位错、孪晶以及相互交割的应力诱发 ω 相，有效钝化裂纹尖端。裂纹扩展路径附近大量孪晶相互交割形成密集而破碎的亚晶，协调局部变形并偏转裂纹的扩展路径，延缓疲劳裂纹的扩展。

C05-17

Trifunctional nanoprecipitates ductilize and toughen a strong laminated metastable titanium alloy

张金钰*¹

1. 西安交通大学

Metastability-engineering, e.g., transformation-induced plasticity (TRIP), can enhance the ductility of alloys, however it often comes at the expense of relatively low yield strength. Here, using a metastable Ti-1Al-8.5Mo-2.8Cr-2.7Zr (wt.%) alloy as a model material, we fabricate a heterogeneous laminated structure decorated by multiple-morphological α -nanoprecipitates. The hard α nanoprecipitate in our alloy acts not only as a strengthener to the material, but also as a local stress raiser to activate TRIP in the soft matrix for great uniform elongation and as a promoter to trigger interfacial delamination toughening for superior fracture resistance. By elaborately manipulating the activation sequence of lamellar-thickness-dependent deformation mechanisms in Ti-1Al-8.5Mo-2.8Cr-2.7Zr alloys, the yield strength of the present submicron-laminated alloy is twice that of equiaxed-coarse grained alloys with the same composition, yet without sacrificing the large uniform elongation. The desired mechanical properties enabled by this strategy combining the laminated metastable structure and trifunctional nanoprecipitates provide new insights into designing ultra-strong and ductile materials with great toughness.

C05-18

轧制工艺对高温钛合金板材组织及性能的影响

贾蔚菊*¹

1. 西北有色金属研究院

C05-19

钛合金低温力学性能的研究进展

吴聪*¹

1. 陕西科技大学

钛合金因其优异的高比强度、耐蚀性、无磁性和良好的低温塑性，可用作液氢储运、深潜装备等低温工况下应用的结构材料。本文系统综述了钛合金低温力学性能：低温拉伸实验表明，TA7、CT20、TC4-DT等合金随试验温度的降低，抗拉强度显著上升，其根本原因是变形机制由室温的位错滑移转变为低温的位错滑移与孪生切变的协同作用；低温冲击试验研究表明，纯钛在低温下的冲击韧性几乎不变，其他牌号合金随温度降低其冲击韧性呈下降趋势；低温下冲击韧性降低的根本原因是低温下孪晶密度降低，导致塑性区尺寸减小。对钛合金低温力学性能的研究进行展望：其低温性能研究需聚焦更高强度级别合金，并探索增材制造钛合金低温力学性能与显微组织的关系。

C05-20

多模态(TiB+TiC)/TC4 构型设计及其强韧化机制探究

陈福¹，吕维^{1*}，韩远飞¹

1. 上海交通大学

构型化复合是突破钛基复合材料强韧性倒置瓶颈的重要途径之一。在本研究中，受自然生物材料组装原理的启发，创新性地引入了一种“基元组装-分级建构”的粉末组装策略，以内嵌超细纳米(TiB+TiC)网状结构的复材粉末作为结构基元，通过粉末冶金技术精准组装不同特性的结构基元，分级构筑出具有异质分布微纳增强体与三模态晶粒基体的高强韧(TiB+TiC)/TC4 复合材料。研究发现，三模态晶粒结构引入的多重非均质界面，通过非均质变形诱导 GNDs 增殖、积累，产生强烈的应变梯度效应，提高加工硬化能力。具有更高变形能力的合金区能够有效偏转和屏蔽裂纹，并承担更多的应变，从而增强抗裂性并维持材料的延展性。另外，合金区的片层结构通过基面/棱柱面 $\langle a \rangle$ 滑移与 HDI 应力诱导的额外棱柱面 $\langle c+a \rangle$ 滑移的协同作用，以及复材区中因纳米增强体激活的额外 $\langle c+a \rangle$ 位错，有效实现了变形协调并产生额外的加工硬化效应。

C05-21

等温锻造成形超高强 TiB/Ti-55531 复合材料的组织演化及力学性能

张家铭¹，乐建温¹，吕维洁*¹

1. 上海交通大学

成形是制约钛基复合材料应用的重要因素，而等温成形为此提供了有效的解决方案。本文采用真空自耗熔炼制备了 Ti-55531 钛合金及不同增强体含量的 TiB/Ti-55531 超高强钛基复合材料，探究了等温锻造过程中显微组织演化及其对力学性能的影响。结果表明，在等温锻造过程中，增强体周围通过 TiB 的粒子促进形核机制促进非连续动态再结晶，形成大量细小的等轴晶粒，促使晶粒细化。相较于 Ti-55531 合金，复材在等温锻造后力学性能提升明显，2.5vol.%TiB/Ti-55531 抗拉强度达到 1505 MPa、延伸率达到 5.2%。这主要归因于细晶强化，增强体承载强化以及次生 α 相强化。本研究所采用的等温锻造工艺在维持优异力学性能的基础上，极大简化了生产工艺流程，具有显著的工程应用价值。

C05-22

高温钛合金微纳双模态组织调控实现室温强塑性和高温性能协同提升

丛光辉¹, 崔喜平^{*1}, 张圆园¹, 王之祺¹, 黄陆军¹, 耿林¹

1. 哈尔滨工业大学

高温钛合金是空天领域最具潜力的轻质耐热结构材料之一,但随着温度升高材料软化现象显著。向钛合金中引入陶瓷增强相可以使其强度、刚度和高温性能等显著提升,同时对热变形过程中钛合金组织的调控具有辅助作用。本文在钛合金基体中的 β 晶界和 α/β 相界处通过原位自生反应分别引入微米 TiB 晶须和微纳 Y2O3 颗粒,使其沿钛合金基体 β 晶界分布形成网状结构,利用热变形将钛合金基体的微观组织调控成微纳片层异质结构,设计制备出新型微纳双模态结构的钛合金材料,发挥微纳米双尺度增强相的跨尺度多级强化作用以及微纳双模态片层结构基体的异质形变诱导强化/硬化效应,实现钛基复合材料室温强度和塑韧性协同提升,同时其高温强度和耐热温度显著提升。该材料在高温下展现出卓越的拉伸性能,同时在室温下保持了强度与延展性协同。原位研究表明,局部应变均匀化, α_p 晶格中激活的额外 $\langle c+a \rangle$ 位错以及由独特的双模微结构引起的异质变形(HDI)硬化,共同促进了钛合金的延展性。室温和 600°C 下的强度提升,归因于纳米级 α_s 、微米级 TiB 晶须和微/纳米级 Y2O3 颗粒的协同强化作用,以及 HDI 的强化效果。这些发现为提高钛合金的机械性能提供了新的参考。

C05-23

基于特征筛选方法提高钛合金弹性模量的关键合金化元素选择

黄庆国¹, 张志豪^{*1}

1. 北京科技大学新材料技术研究院

在现代工业设计追求轻量化与高性能的背景下,钛合金的弹性模量成为制约其结构效率与承载能力的关键问题。本研究通过机器学习驱动的特征筛选策略,对自行设计的 40 种钛合金的数据集进行三步特征筛选,确定了基态原子能量均值(Fm1)、a 的晶格常数均值(Fm29)、核电荷数均值(Fm40)及熔化焓方差(Fv43)为影响弹性模量的四个关键特征。基于特征筛选结果,我们进行了合金成分设计,对模型进行修正后,模型预测精度 R2 达 0.96,并通过符号回归算法建立了弹性模量与这四个关键合金因子之间的数学表达式,实现了从输入特征到目标性能的显示关联。通过实验验证,发现 Ga、B 和 Si 等元素的添加能提高钛合金的弹性模量,成功制备了弹性模量在 135 GPa 以上的钛合金,与传统 TC4 钛合金相比弹性模量提高了 25 % 以上。进一步的研究表明,新制备钛合金的高弹性模量特性主要归因于组织中析出的高模量第二相 α_2 、TiB 和 Ti5Si3,这些第二相的存在显著增强了合金的整体弹性模量。

C05-24

马氏体工程多策略调控驱动纳米马氏体超高比强度

传凯洋¹, 张崇乐¹, 张金钰^{1*}, 刘刚¹, 孙军¹

1. 西安交通大学

钛合金因其密度低、比强度高、耐腐蚀性好等优点,被广泛应用于航空航天、航海以及生物医疗等领域。然而,随着工业和科技的发展,传统牌号钛合金已无法满足相关领域更高性能指标的要求。因此,开发低成本、高强塑的钛合金以及破解合金“强塑倒置”的难题在未来航天航空等领域的应用中具有十分重要的意义。本课题在总结高强钛合金组织及成分设计理论的基础上,通过在 Ti-2.8Cr-5.2Al-4.5Zr 合金中引入 2 wt.% 的 Cu 元素,控制不同的冷却速率调控马氏体的体积分数、尺寸和自调节形态,利用时效过程中马氏体亚稳相的分解提高能够阻碍位错滑移的界面含量,同时析出纳米级 Ti2Cu 颗粒促进元素扩散和钉扎纳米界面滑移,最终协同使得合金屈服强度约 1397 MPa,强度约 1462 MPa,总延伸率约 10.7%。与此同时,本文总结和研究了合金的微观组织-力学性能-变形机制内在联系,明晰了淬火速率对马氏体析出的不同影响,澄清了该合金的强化机制,研究结果为利用马氏体相变工程助力高强韧钛合金的研发奠定了坚实的理论基础。

C05-25

高强低模量钛合金的弹塑性变形行为

肖文龙^{1*}, 高月¹

1. 北京航空航天大学

$\alpha+\beta$ 双相钛合金因其优异的综合性能, 在生物医用、航空航天等领域应用广泛。其中, α 相的形态和分布, 及其对剩余 β 相结构稳定性的影响, 决定了合金的力学性能。阐明微观组织与弹塑性变形行为的关联机制, 对优化合金的组织性能至关重要。本文通过调控热处理工艺, 分别获得了 α 相非均匀分布的层状组织, 以及 α 相均匀分布的等轴和双态组织。结合原位拉伸 HE-XRD 和 TEM 的等技术, 探究不同组织形态对钛合金弹性和塑性变形行为的作用机制。结果表明, 层状组织的断裂延伸率可达到 21%, 屈服强度和弹性模量分别为 906 MPa 和 60 GPa。等轴组织通过应力诱发 $\alpha''\rightarrow\alpha'$ 相变呈现非线性弹性变形特征, 模量降低至 53 GPa, 屈服强度和延伸率分别为 775 MPa 和 23%。双态组织中大量次生 α 相的析出提高了剩余 β 相的结构稳定性, 引入 O' 纳米畴, 使其在弹性变形阶段发生 $O'\rightarrow\alpha''$ 相变, 呈近似线弹性变形特征, 实现了低模量 (64 GPa), 高屈服强度 (1018 MPa) 和高塑性 (16%) 的良好匹配。

C05-26

降温循环热处理调控近 β 钛合金显微组织研究杨义^{1*}

1. 上海理工大学

在增材制造逐层堆积的过程中, 已沉积层受到反复的加热和冷却循环, 从下层到上层经历的循环次数和峰值温度存在差异, 增材制造的构件中会形成不均匀的显微组织。本研究针对 Ti-5Al-3Mo-3V-2Cr-2Zr-1Nb-1Fe (Ti5321) 近 β 型高强韧钛合金, 采用逐渐降低温度的循环热处理 (CHT) 实验模拟增材制造沉积过程中的热历程, 研究了降温 CHT 处理对 Ti5321 合金显微组织演变 (尤其是 α 相球化) 和显微硬度的影响。发现随着 CHT 次数的增加, α 相的体积分数从 1 次循环后的 35.9% 逐渐增加至 100 次循环后的 60.9%; α 相的长度先增加后逐渐缩短, 宽度则缓慢增加, α 相的长宽比从 1 次循环后的 9.90 ± 3.39 降至 100 次循环后的 2.37 ± 0.87 。表明 CHT 可诱导 α 相球化, 其是由边界分裂机制和终止迁移机制共同作用导致的。显微组织的演变影响其力学性能, 随着 CHT 次数的增加, 硬度整体呈上升趋势。本研究为仅通过热处理调控近 β 钛合金的显微组织提供了一种潜在方法, 尤其适用于不可变形的增材制造金属构件。

C05-27

3D 打印钛合金中的晶界 α 相: 析出以及影响作用张恺^{1*}

1. 苏州大学

激光直接沉积技术能够生产相对复杂的大型零部件并不受生产设备成型仓尺寸限制, 在航空航天等领域获得了广泛关注, 并已经得到一定的应用。然而, 研究发现激光直接沉积钛合金材料中容易存在粗大柱状 β 晶粒, 容易产生各向异性并降低强度, 影响激光直接沉积钛合金零件的实际应用。针对激光直接沉积钛合金中存在的粗大柱状晶问题, 我们系统性地研究了这类组织结构产生的原因以及各种可能的解决办法。在不超出钛合金 TC4 (Ti-6Al-4V) 标准成分范围的前提下, 通过采用微量元素添加方法优化激光直接沉积钛合金组织结构, 减弱各向异性并提升强度。此外, 采用结合了微锻造的混合制造方法同样可以在不改变材料成分的前提下, 优化 TC4 的组织结构并改善其性能。

C05-28

 α 相析出对富含 ω 相亚稳 β 钛合金变形行为的调控机理景家瑞¹, 陈初阳¹, 陈冉², 黄欣¹, 赖敏杰^{1*}

1. 西北工业大学

2. 国家电投集团中央研究院

亚稳 β 钛合金是重要的航空用结构材料, 其力学性能与主要析出相 (ω 相和 α 相) 的组织特征密切相关。其中, α 相析出通常可在提升合金强度的同时保持良好塑性, 而 ω 相则常被用作前驱体以辅助 α 相形核。然而, 在高温时效过程中, ω 相往往会被迅速且完全取代为 α 相, 难以稳定获得两者共存组织。尽管已有大量研究探讨了 ω 相辅助 α 相的形核机制, 但关于两者共存的组织特征对亚稳 β 钛合金力学性能的影响仍缺乏系统研究。本工作以 Ti-12Mo-1Al (wt.%) 模型合金为研究对象, 探讨了其在三种不同时效态下的变形行为, 分别对应不同含量的 α 相析出: (i) 无 α 相、(ii) 少量 α 相和 (iii) 富 α 相。其中, 前两者富含 ω 相, 而后者中 ω 相含量显著降低。在无 α 相和少量 α 相状态下, 位错滑移是主要的变形机制, 且滑移带呈现为 ω 相大量消失的位错通道。无 α 相状态下, ω 相体积分数 (f) 超过 65%, 显著阻碍位错运动, 导致塑性变形高度局域化, 合金表现出极高的屈服强度 ($YS > 1250$ MPa) 但断裂延伸率很低 ($ETF < 2.5\%$)。相比之下, 少量 α 相析出 ($f < 15\%$) 显著降低 ($> 35\%$) ω 相的体积分数, 不仅有利于位错通道的形成, 还激活少量变形孪晶和应力诱发 α' 马氏体。这些机制协同促进塑性变形均匀化, 显著抑制沿晶断裂, 从而有效缓解 ω 相引发的脆性效应。因此, 合金的 ETF 显著提高至 $\sim 11\%$, 同时仍保持超过 1000 MPa 的 YS。而在富 α 相状态下, α 相体积分数高达 48.07%, 变形过程中位错活动主要局限在晶粒内部, 且伴随显著的沿晶裂纹。尽管合金的 YS 较少量 α 相状态略有提升 (23 MPa), 但 ETF 下降至 4.79%。综上所述, α 相析出在调控 ω 相强化亚稳 β 钛合金的变形行为中起着关键作用, 为提升此类合金的工程适用性提供了新思路。

C05-29

非均质组织和纳米 α 相析出协同提升 β -C 钛合金强-塑性性能的机制研究赵彤^{1,2}, 邱建科², 胡明², 许海生¹, 张金虎², 王峰², 徐东生^{2*}

1. 东北大学

2. 中国科学院金属研究所

亚稳 β 钛合金作为飞机紧固件的常用材料, 其服役性能直接关系到航空器的安全与可靠。随着航空工业对材料性能提出更高要求, 实现亚稳 β 钛合金强度与塑性的协同提升始终是材料设计领域的重要挑战。本研究通过热轧工艺在 β -C 钛合金中引入非均质组织, 结合双步时效热处理工艺, 促进次生纳米 α 相的析出。最终获得的合金表现出优异的综合力学性能, 抗拉强度和延伸率分别达到 1525 MPa 和 11.94%。与等轴组织材料相比, 该方法在显著提升强度的同时, 仅导致较小的塑性损失。分析表明, 热轧过程中形成的大量位错、小角晶界等结构缺陷, 有效促进了次生 α 相的异质形核, 消除了无析出区, 实现了高密度、细小的次生 α 相分布。此外, 断裂过程中细小次生 α 相与 β 基体间的协同变形, 以及等轴 β 组织对裂纹扩展的阻碍作用, 共同赋予合金优异的强-塑性匹配。

C05-30

 α' 马氏体相变及其部分分解协同提升三态 Ti80 钛合金强塑性冯乐越¹, 范玉容¹, 李金山¹, 罗婷^{1*}

1. 西北工业大学

Ti80 钛合金由于比强度高, 耐腐蚀, 可焊接因而广泛应用于海洋工业领域。海洋工业的发展对 Ti80 钛合金的强度-塑性匹配提出了更高的要求。本文通过双重固溶热处理构建了由等轴 α 相 (α_p)、片层 α 相 (α_l) 和 α' 马氏体相组成的三态组织, 并通过双重固溶+时效热处理研究时效温度对 α' 相分解的影响。通过准静态拉伸实验, 探究 α' 马氏体相变及其分解的力学性能响应。此外还研究了 ($\alpha_p + \alpha_l + \alpha'$) 三态组织形成

过程中特殊的变体选择行为。结果表明 ($\alpha_p + \alpha_l + \alpha'$) 三态组织在保留相当塑性的条件下 (总延伸率~16.9%) 能够大幅提高 Ti80 钛合金的强度 (抗拉强度~1091 MPa), 同时由于 α_l 相对 α' 相具有诱导作用, α' 相倾向于形成三变体簇结构从而最小化形状应变, 形成 63.26 %[-1055-3] 界面主导的变体间界面关系。双重固溶+时效处理结果表明 α' 相在 400 °C 及 550 °C 会转变为不完全分解的过渡态 α' dec 相, 在 800 °C 则完全分解为 α_s/β 结构, 其中 550 °C 时效组织可实现强度-塑性的协同提高, 其抗拉强度~991 MPa, 总延伸率~19.3 %, 均匀延伸率达到~6.7 %。其优异的强度水平源于纳米尺度的 α'/α' dec 相产生的界面强化, 而塑性则源于 α/α' 相间优异的塑性协调能力。

C05-31

深过冷与强流动条件下 Ti-Co-Al 合金中的三元包晶转变机理与拉伸性能优化

李浩然¹, 阮莹^{1*}, 魏炳波¹

1. 西北工业大学

三元包晶转变是三元合金体系中特有的一种相变类型, 包晶相的生长方式与凝固过程参数密切相关, 凝固条件与三元包晶转变之间的关联性有待深入研究。采用电磁悬浮技术实现了 Ti73Co20Al7 合金的深过冷快速凝固, 分析了热力学亚稳态对合金中三元包晶转变过程的影响, 讨论了合金的拉伸性能强化机制。合金在液固相变过程中依次发生初生(β Ti)枝晶生长、二相共晶转变 $L \rightarrow \text{TiCo} + (\beta\text{Ti})$ 与三元包晶转变 $L + \text{TiCo} + (\beta\text{Ti}) \rightarrow \text{Ti}_2\text{Co}$ 。当过冷度由 40 K 增加至 240 K 时, 初生(β Ti)枝晶的生长速度呈指数型增大, 晶粒形貌由粗大枝晶转变为细化的等轴晶, 同时在溶质截留效应的影响下枝晶中 Co 元素含量由 11.7% 增加至 14.1%。电磁搅拌加速了残余熔体内的流动与溶质传输过程。细化的初生(β Ti)枝晶作为三元包晶转变过程中的异质形核点促进了 Ti_2Co 包晶相的形成, Ti_2Co 包晶相体积分数随过冷度线性递增, 同时 Ti_2Co 包晶相由规则至非规则状的生长变化体现了二相共晶与三元包晶转变之间的遗传性。电磁悬浮条件下的强液相流动与均匀分布的温度场共同作用下, 合金中的宏观偏析被抑制, 在深过冷条件下, 细化的初生(β Ti)枝晶有效缓解了拉伸过程中晶界区域的应力集中, 并且枝晶内部 Co 元素的固溶强化与枝晶间 Ti_2Co 包晶相的强化作用使裂纹扩展阻力增加。当过冷度为 240 K 时, 合金的抗拉强度达到 710 MPa, 与电弧熔炼合金相比提升达 280%。

C05-32

强变形条件下氧对商业纯钛组织和性能的影响

张方利¹, 于利超¹, 李宏光¹, 王泽奎¹, 李艳国¹, 陈晨¹, 杨志南^{*2,3}, 张福成²

1. 燕山大学

2. 华北理工大学

3. 燕赵钢铁实验室

本研究针对强变形条件下氧元素对商业纯钛组织与性能的影响进行展开。通过高压扭转(High pressure torsion, HPT)处理, 成功制备出超细晶块体 TA1 和 TA2 材料。综合运用 XRD、EBSD 以及 TEM 等多种分析手段, 对 HPT 变形过程中纯钛的微观组织特征及其演变历程进行了系统探究, 并进一步将这些微观组织特征与纯钛的力学性能建立关联分析。研究结果显示, 当 HPT 变形达到 15 圈时, 材料晶粒尺寸显著细化, 形成了约 80 nm 的等轴晶结构。在变形初期, 受氧元素影响, TA1 和 TA2 表现出不同的变形机制, 导致 TA1 试样硬度提升更为显著。试样硬度的显著提升是晶粒细化、 ω 相强化、应变梯度硬化以及织构强化共同作用的结果。计算数据表明, 经 HPT 处理后, TA1 和 TA2 试样的屈服强度分别提升了 255% 和 141%。屈服强度的提升与 HPT 过程中形成的大角度晶界和小角度晶界密切相关, 且纯钛的塑性对 ω 相表现出极高的敏感性。

C05-33

深海用超高强钛合金热变形行为及动态组织演化规律

韩远飞*¹

1. 上海交通大学

深海用高强钛合金是海洋工程及装备用关键材料，然而，深海环境压力大、运动及腐蚀环境恶劣，传统钛合金屈强比高，抗冲击能力差，迫切需要开展深海苛刻服役环境用高强钛合金强韧化协同等方面的系统研究。本研究聚焦主要开展超高强 β 钛合金的热变形机制研究，形成了等温锻造基础热变形加工窗口；针对典型结构件开展了复杂构件等温精密成形模具设计方案及优化，开展了钛合金复杂构件等温精密成形仿真分析，确定了钛合金复杂半球结构的高温变形行为，及其变形应力、应变分布，结合仿真，对变形失稳开裂进行了预测，为结构件的实验制造提供了基础数据，优化形成了变形后超高强钛合金梯度热处理工艺。

C05-34

基于超高频感应加热的 Ti-55531 合金梯度组织及其扭转性能的调控

黄朝文*^{1,2}, 赵彦彦¹

1. 贵州大学 材料与冶金学院

2. 南洋理工大学 机械与宇航工程学院

本文研究了高频电磁感应加热（HFEIQ）处理对 Ti-55531 合金梯度组织演变、扭转性能及变形机制的影响。结果表明：HFEIQ 后再时效处理形成了典型的梯度组织：表面由亚稳 β' 相分解形成的细小 α s 片层组成，而心部保持半等轴结构。扭转试验结果表明，HFEIQ 处理显著提高了合金的扭转强度，HFEIQ-5.6s 试样的最大剪应力为 1158.08 MPa（比基材提高 8.75%）。值得注意的是，这种强度提高与延展性（~9.63%）相适应，获得最佳的强度-延性协同作用。梯度结构通过两种机制（几何必要位错积累和背应力强化）抑制裂纹的萌生和扩展，从而提高扭转性能。透射电镜观察表明，在初始变形阶段， α s/ β r 界面积聚了大量位错，随着应变的增加，当位错滑移难以协调塑性变形时， α s 片层内部产生变形孪晶，辅助协调变形。其中，孪晶和位错之间的相互作用可能是导致 α s/ β r 界面萌生微裂纹的主要原因。然而，随着 HFEIQ 时间增加到 5.7 s，由于 α s 片层的粗化，位错滑移数量增加，孪晶数量减少。本研究采用 HFEIQ 处理方法制备 Ti55531 合金的梯度组织，实现强度-塑性协同优化，为航天轴类构件设计提供了重要的指导。

C05-35

基于高速变形的钛合金的极端加工和制造

毛博*¹

1. 上海交通大学

C05-36

基于特定取向模量的 TWIP 型钛合金成分设计

吕明远¹, 闵小华*¹

1. 大连理工大学

具有孪生诱发塑性（TWIP）效应的 β 型钛合金在变形过程中可产生稠密的 $\{332\}<113>$ 孪晶，赋予其大的均匀延伸率、良好的应变硬化能力、优异的冷加工成型性以及卓越的冲击和低温性能，已成为材料领域的研究热点。然而，目前 TWIP 型钛合金设计主要采用 Mo 当量法、电子浓度法和 d 电子合金设计理论等，虽能在一定程度上指导合金设计，但尚未在本质上建立合金元素与塑性变形机制的内在关联。前期研究发现， β 型钛合金中热诱发亚稳相变和应力诱发变形机制与特定面上原子沿特定方向的剪切、重组和塌陷过程相关，并且这些过程可以通过特定取向模量来评价。因此，本研究参考具有显著 TWIP 效应合金的

特定取向模量, 如杨氏模量 (E_{100})、四方剪切模量 (C') 和剪切模量 (G_{111}), 来设计三元、四元和五元合金, 并通过力学性能测试和显微组织表征分析其热/应力诱发产物和冷加工成型性, 以探究基于特定取向模量设计 TWIP 型钛合金的可行性。结果表明, 三种合金固溶处理后的微观组织为 β 相和三方结构的热诱发 ω 相, 塑性变形方式以 $\{332\}<113>$ 孪生为主, 均呈现出显著的 TWIP 效应及优异的冷加工成型性和拉伸性能。此外, 三种合金的应变硬化行为显著, 归因于变形组织中大量 $\{332\}<113>$ 孪晶所导致的动态 Hall-Petch 效应和背应力强化。三种 TWIP 型钛合金的成功设计充分验证了基于特定取向模量法的可行性和合理性, 同时有助于其它功能结构钛合金的设计。

C05-37

β 型钛合金中无热 ω 相塌陷机制的原子尺度研究

马堂鹏¹, 闵小华*¹

1. 大连理工大学

无热 ω 相变是 β 型钛合金在淬火过程中发生的一种原子切变过程, 对合金的力学性能有着显著影响, 从而引起了研究人员的广泛关注。目前被普遍接受的无热 ω 相变机制是 $\{111\}\beta$ 面上原子沿 $<111>\beta$ 方向的塌陷。然而, 由于淬火过程中的高冷却速率, 无热 ω 相变的动态塌陷过程始终没有被捕捉到, 导致其温度依赖性仍不清楚。此外, 由于该塌陷过程涉及特定面上原子沿特定方向的位移, 相应的原子成键对塌陷过程的影响也需要进一步研究。因此, 本研究采用第一性原理分子动力学 (AIMD) 模拟和高角环形暗场扫描透射电镜 (HAADF-STEM) 技术在原子尺度上研究了 β 型 Ti-Mo 合金中无热 ω 相变的塌陷机制。通过 AIMD 模拟, 首次捕获了无热 ω 相变的动态塌陷过程。根据快速冷却过程中 Honeycutt-Anderson 对和塌陷程度随温度的演变, 揭示了无热 ω 相变的温度依赖性。结果显示, 无热 ω 相变的临界温度为 700 K, 且其在 700-500 K 温度范围内表现地更为活跃。此外, AIMD 结果还表明, 塌陷过程被 Ti 原子周围的局域结构所主导, 这与 HAADF-STEM 观测结果一致, 即无热 ω 相倾向于在贫 Mo 区形成。从电子层面来看, $<111>\beta$ 方向上较强的 Mo-Ti 键抑制了 Mo 原子周围局域结构的塌陷。相反, 较弱的 Ti-Ti 键促进了 Ti 原子周围局域结构的塌陷。两者的协同作用导致了无热 ω 相在贫 Mo 区形成的趋势。上述研究结果不仅促进了对无热 ω 相变机制的进一步理解, 也为 β 型钛合金中其它亚稳相变机制的研究提供了更广泛的启示。

C05-38

Y2O3 对 TA15 合金选区激光熔化微观组织和力学性能的影响

章雷¹, 万明攀*¹

1. 贵州大学

通过机械球磨制备了 TA15-xY2O3 复合粉末 ($x=0.1$ 、 0.4 、 0.7 、 1 wt.%), 利用 SLM 成形制备了 TA15-xY2O3 合金, 结合 OM、LSCM、SEM、EBSD、TEM 等表征技术系统研究了 Y2O3 纳米颗粒含量、SLM 制备工艺、热处理工艺对 TA15-xY2O3 合金的显微组织和力学性能的影响。获得最佳 SLM 制备工艺参数为 $P=220$ W, $V=1050$ mm/s, $D=0.12$ mm ($VED=58.2$ J/mm³)。在成形态下, Y2O3 通过协同促进形核和抑制生长, 使 α' 相尺寸从 $2.94\ \mu\text{m}$ 细化到 $2.18\ \mu\text{m}$ 。合金的屈服强度 (YS) 和抗拉强度 (UTS) 随 Y2O3 含量先增加后减小, 合金基体与 Y2O3 界面结合较弱, 断裂机理主要为微孔聚集型断裂。在退火态下, 合金中 Y2O3 抑制了 α 、 β 相晶界迁移, α 片层宽度从 $1.183\ \mu\text{m}$ 减小到 $0.487\ \mu\text{m}$, 原始 β 相尺寸从 $8.32\ \mu\text{m}$ 减小到 $6.88\ \mu\text{m}$ 。TA15-0.1Y2O3 合金通过细晶和弥散强化优化了强度-塑性平衡 (UTS 提高 14.7%, 延伸率 (EL) 提高 11.4%)。随退火温度增加 α 相尺寸从 $2.18\ \mu\text{m}$ 增至 $2.42\ \mu\text{m}$, 原始 β 相从 $6.73\ \mu\text{m}$ 增至 $8.22\ \mu\text{m}$, 在 500~600 °C 退火合金的 UTS 从 1244 MPa 提高到 1339 MPa。

C05-39

新型 Ti-575 合金片层组织和三态组织的单轴拉伸变形行为对比研究

余凤恬¹, 戴锦华¹, 王怡蕾¹, 刘川^{2,3}, 张晨愉¹, 刁可心¹, 唐斌*¹

1. 西北工业大学凝固技术国家重点实验室
2. 西北工业大学重庆科创中心
3. 重庆三航新材料技术研究院有限公司

本工作研究了新型 $\alpha+\beta$ 钛合金 Ti-5Al-7.5V-0.5Si-0.25Fe-0.2O (Ti-575 合金) 在准静态单轴拉伸变形过程中滑移系开动与演化规律。通过调控固溶时效热处理工艺, 在 Ti-575 合金中调控出三态组织和片层组织, 并进一步进行中断拉伸与准原位 EBSD 分析。实验结果表明, 三态组织和片层组织拉伸塑性变形机制均以位错滑移为主导。在拉伸变形初期, 在三态组织和片层组织内观察到单滑移系开动, Schmid 因子和临界分切应力共同影响滑移系激活行为; 随应变量增加, 三态组织和片层组织变形行为呈现显著差异: 三态组织中单个 α 晶粒内出现多重滑移系同时激活, 并通过 α 晶粒间滑移传递进一步协调局部应变; 而片层组织仍依赖单一滑移系开动协调变形, 位错运动在 α 片层团边界或晶界 α 处受阻, 导致局部应力集中, 进而诱导开裂。总体而言, 三态组织展现出比片层组织更加优异的变形协调能力。本工作揭示了显微组织特征对新型 Ti-575 合金拉伸变形行为的影响机制, 为高强韧钛合金的显微组织设计提供了重要理论指导。

C05-40

顺序激活的多变形机制使三态分级结构钛合金具有高强塑性协同效应

杨家坤¹, 张金钰*¹

1. 西安交通大学

亚稳 β 钛合金中的 HCP 结构 α 相沉淀物, 作为位错运动的障碍, 表现出非凡的强化效果。然而, 其固有的有限变形机制往往导致相界面处的局部应力集中和微裂纹, 成为双相钛合金强度-延性冲突的根源。在这项工作中, 使用 Ti-4.5Al-4.5Mo-7V-1.5Cr-1.5Zr (wt.%) 合金作为模型材料, 通过沉淀析出构筑多尺度和多形态的 α 相三态组织结构, 并引入多种变形机制。随着应变的增加, α 相中的塑性机制被依次激活, 以改善 α/β 相界面处的应变相容性和应变离域。顺序激活塑性机制 (SAPMs) 涉及多种滑移, 如球形 α_g 相中的 $\langle a \rangle$ 和 $\langle c+a \rangle$ 型位错和交滑移, 棒状 α_r 相中的锥面层错、纳米孪晶和 HCP 到 FCC 的相变, 以及针状 α_s 相中的滑移转移和剪切。 α 相中的顺序激活塑性机制强烈依赖于其相尺寸, 这可以用临界分辨剪切应力 (CRSS) 来解释。最后, 通过相应的强化系数定量计算沉淀强化, 揭示了 α_r 和 α_s 强化机制起源的差异。该策略实现了具有 1550/1614 MPa 的高屈服/极限抗拉强度和~8.7%的延展性的三态分级结构钛合金的理想力学性能, 克服了强度-延展性权衡。

C05-41

有序氧元素强化的超高强钛合金

赵秦阳*¹

1. 长安大学

C05-42

高性能变形钛铝合金

鲁园园*¹

1. 北京航空航天大学

钛铝合金具有低密度、高强度、优良的抗氧化性等特点, 已用于制造航空发动机低压涡轮叶片和高压压气机叶片。适用于锻造、热挤出、轧制等变形工艺的钛铝合金被认为是批量化生产的首选。为克服钛铝合金热加工窗口窄、服役过程中热稳定性较差等问题, 本研究通过优化合金中 β 稳定元素配比、改进热处理工艺条件, 制备出具有优异高温强度和蠕变抗性的变形钛铝合金, 并深入探究了变形钛铝合金“成分-工艺-组织-性能”相关性, 为制造高性能钛铝合金叶片提供支撑。

C05-43

钛合金跨尺度析出相异构组织设计制备及强韧机制研究

周岳新¹, 贾琰迪², 彭静¹, 马英杰², 施荣沛*¹

1. 哈尔滨工业大学(深圳)

2. 中科院金属研究所

异构组织通过非均匀变形诱导强化、应变梯度效应及异质变形诱导加工硬化等机制,为解决航空航天领域对轻质高强韧钛合金的迫切需求提供了新途径。然而,如何精准设计钛合金的析出相异构组织并有效调控其多尺度协同强化增韧机制仍面临重要挑战。本报告将介绍基于相变路径调控、激光增材制造技术在钛合金中跨尺度异构组织(特别是析出相分布构型)的设计策略与构筑方法。通过运用多尺度表征技术与集成计算方法,阐明跨尺度异构组织的形成动力学与演化机理,重点揭示其关键结构特征及其对强韧协同效应的调控机制,为开发高性能钛合金的设计范式提供理论依据。

C05-44

高氧含量高性能粉末冶金钛合金的制备及力学性能研究

刘小涛*¹

1. 华中科技大学

氧能通过固溶强化增强粉末冶金钛合金强度,但是当其含量超过 3300ppm 时,会严重损害其塑性。本文系统研究了氧含量(范围为 0.22~0.77 wt%)对粉末冶金 TC4 力学性能和变形机制的影响。通过优化热塑性加工与热处理工艺,在该氧含量范围内,粉末冶金 TC4 实现了 985MPa~1222MPa 的抗拉强度和 23%~6% 的延伸率,打破了强度和塑性相互制约的瓶颈。研究发现当氧含量约为 0.22 wt% 时,良好的力学性能来源于高密度位错(尤其是波浪型位错)及微孪晶的综合作用,这有助于调控 hcp 结构 c 轴方向应变。当氧含量达到 0.42 wt% 时,虽然部分波浪型位错转变为平面位错,但微米级的 α - β - α 层状微观结构延缓了裂纹扩展,从而使钛合金继续保持良好的塑性。当氧含量进一步增加到 0.61 wt% 时,除层状 α - β - α 微观结构外,还出现了部分层错,使得在此情形下仍能维持约 18% 的塑性。而当氧含量上升到 0.77 wt% 时,位错密度从 $8.87 \times 10^{14} \text{m}^{-2}$ 显著降低到 $3.54 \times 10^{14} \text{m}^{-2}$,导致塑性降低到 6%。此外,随着氧含量从 0.22 wt% 增加到 0.77 wt%,溶质强化效应占比从 43.3% 增加到 66.9%,而位错强化的比例则从 25.6% 降低到 12.4%,晶粒尺寸和晶格畸变应力控制的强度比例几乎保持不变。

C05-45

微观组织对低成本钛合金冲击韧性的影响机理研究

乔忠立^{1,2}, 赵永庆*²

1. 西安建筑科技大学

2. 西北有色金属研究院

低成本钛合金因其优异的力学性能与经济性极具应用潜力,但苛刻工况下的力学性能差距制约了其在高端制造领域的应用。本研究针对 Ti-Al-V-Fe-Mo 系低成本钛合金,通过调控固溶处理温度与冷却速率制备了等轴和双态组织试样,探究了其动态冲击载荷下的变形行为。结果表明:等轴组织的冲击韧性为 62.5 J/cm²,较双态组织(47.6 J/cm²)和相同组织的 TC4 合金(50 J/cm²)分别提升了 31% 和 25%。微观组织分析显示,双态组织试样具有低 α 相长宽比、高球化率,而等轴组织试样具有更大的晶粒尺寸。等轴组织试样在冲击后展现出高达 58.7% 的孪晶密度。高密度孪晶消耗了冲击能量,导致试样的裂纹扩展路径更曲折并显著增强了裂纹扩展抗性——这是其优于双态组织冲击韧性的核心机制。进一步的研究表明,高密度孪晶不仅促进了位错形核和滑移,而且细化了整体晶粒尺寸,提高了合金的能量吸收能力。有趣的是, α 相内的孪晶形核是由大量的堆叠层错诱导的。我们揭示了孪晶的形核和生长与位错之间的相互作用机制,建立了 Fe、Mo 元素与位错滑移和孪晶生长之间的关联性。

C05-46

双相组织调控实现 Ti-5321-O 合金强塑性协同突破

姜文涛^{1,2}, 高月^{1,2}, 杨昌一^{1,2}, 肖文龙^{*1,2}

1. 北京航空航天大学

2. 天目山实验室

间隙原子（如 O、N）引入的显著固溶强化效应虽可大幅提升亚稳 β 钛合金的屈服强度，但通常伴随塑性的显著降低，导致强度-塑性难以匹配。本文以 Ti-5321 高强亚稳 β 钛合金为基础，设计制备了 Ti5321-0.35O 合金，并通过微观组织调控分别获得了 β 单相与 $\alpha+\beta$ 双相组织。其中，具有双相等轴组织的 Ti5321-0.35O 合金展现出优异的力学性能：屈服强度达 1060 MPa 的同时，塑性仍保持在 23.3%，相较于 β 单相组织塑性提升一倍以上，实现了超越传统含氧高强钛合金的优异强塑性匹配。基于原位同步辐射和 TEM 等表征技术，系统研究了双相 Ti5321-0.35O 合金变形过程中 α 相与 β 相的变形行为，并揭示了其优良强塑性的来源：在宽应变范围内， β 相发生 $\beta \rightarrow \alpha'' \rightarrow \alpha'$ 顺次诱发马氏体相变，提供持续的加工硬化与良好的均匀塑性变形能力；而 α 相则通过启动 $\langle c+a \rangle$ 滑移协调塑性变形。氧原子在 α 相和 β 相中的差异化分布，是合金具备丰富变形机制和优异强度-塑性协同的根本原因。该研究结论为利用间隙原子设计开发新型高强韧性钛合金提供了新思路和新见解。

C05-47

热处理对激光熔化沉积 Ti-55531 合金微观组织的影响研究

章凡荣^{1,2}, 温艳^{*1,2}, 华林^{1,2}, 谢乐春^{1,2}

1. 高温轻合金与应用技术全国重点实验室，武汉理工大学，湖北 武汉 430070

2. 现代汽车零部件技术湖北省重点实验室，武汉理工大学，湖北 武汉 430070

激光熔化沉积（Laser melting deposition, LMD）技术作为一种快速成型加工方法，可用于直接成型各种高性能复杂金属构件。由于高比例 β 稳定元素的存在，LMD 制备 Ti-55531（Ti-5Al-5Mo-5V-3Cr-1Zr）合金在其冷却过程中保留了大部分 β 相，经过 EBSD 分析， β 相占比接近 99%。对 LMD 制备的 Ti-55531 钛合金进行 α/β 固溶-时效处理（ α/β -STA），时效结束后分别采用空冷、炉冷以及炉冷至 400°C+空冷的冷却方式对试样降温，并且对沉积态和不同冷却方式下热处理后的 Ti-55531 钛合金微观组织进行表征和分析。观察试样 SEM 图像发现，LMD Ti-55531 试样组织由柱状晶和等轴晶交替排列，呈现竹节状。而 α/β -STA 试样组织存在大量 α 相，且 XRD 图谱中出现明显的双峰结构。另外，对比热处理后经不同方式冷却试样的 SEM 与 EBSD 图像发现，随着冷却速率的下降， α 相的平均尺寸逐渐增大， β 相比例逐渐降低。探究热处理不同冷却速率下试样的微观组织，可以进一步了解 α 相的平均尺寸对 Ti-55531 钛合金力学性能的影响。为实现高强度与良好塑性的协同优化提供一种解决方案。

C05-48

TC18 合金弹性压应力下诱导 $\beta \rightarrow \alpha$ 微观组织转变梁柏志^{*1}

1. 上海理工大学

$\beta \rightarrow \alpha$ 转变是钛及其合金中最基本和最重要的相变。本研究采用等离子熔丝技术制备了具有 $[001]\beta$ 取向的 TC18 钛合金柱状晶组织，沿 $[001]\beta$ 方向在 750°C 下分别施加 5.5MPa 和 11MPa 的弹性压应力，研究了对 $\beta \rightarrow \alpha$ 相变的影响。结果表明，5.5MPa 应力时，由于沿 $[001]\beta$ 方向施加压应力会使得 $[001]\beta$ 轴收缩，促进 V7、V8、V11 和 V12 变体的形成，变体之间自协调作用增加，同时，促使 V5/V6、V9/V10 变体以团簇形式析出，这些团簇有助于进一步降低整体应变能。当应力增加至 11MPa 时，这一趋势更为显著。

C05-49

强磁场辅助热处理增材制造 Ti-6Al-4V 钛合金

赵睿鑫^{*1}, 陈超越¹, 王江¹, 任忠鸣¹

1. 上海大学

This work reports the use of a novel strategy, high magnetic field (HMF, 3T) heat treatment (HT), to modify the microstructure of Ti-6Al-4V (Ti64) alloy fabricated by laser-powder bed fusion (L-PBF) to improve mechanical properties. Applying an HMF-HT to L-PBF Ti64 at 800–900 °C increased the sub-grain boundaries in the α -phase from ~7% to ~21%. The distribution of high kernel average misorientation (KAM) values is consistent with the distribution of the sub-grain boundaries in the α -phase. This finding was further supported by analysis using the modified Williamson-Hall approach and transmission electron microscopy (TEM) characterization. HMF-HT accelerated the coarsening and globularization of the α -phase, resulting in thick α -laths (3.40 μm) and the formation of globular α -phase particles. The HMF-HT at 900 °C further increased the β -phase volume fraction from 6.5% to 13.4% with a larger lattice parameter of 3.2143 Å due to the resulting lower average V content (confirmed by TEM analysis). In addition, the HMF-HT rendered the α -variants to better align with the $\langle 11\bar{2}0 \rangle_\alpha$ direction, where the prismatic and basal slips in the $\langle 11\bar{2}0 \rangle_\alpha$ direction are the easiest slip modes to activate in the α -variants. These combined effects enhanced the tensile ductility of Ti64 to $15.4 \pm 1.3\%$. HMF-HT can be used to effectively tune the microstructure and mechanical properties of L-PBF α - β titanium alloys.

C05-50

钛合金跨尺度层状异质结构的电-热协同构筑与强韧化机理

谭长生^{*1}, 樊伊朵¹, 包婷婷¹, 王新², 黄朝文³, 赵金星², 潘艳¹, 张国君¹

1. 西安理工大学

2. 宝鸡钛业股份有限公司

3. 贵州大学

随着航空航天、舰船等设备的大型化、高速化和远程化发展,对轻质高强钛合金的强度、塑韧性等基础力学性能提出更加苛刻的要求。本文针对热轧态 Ti55531 钛合金,采用脉冲电场与热场复合调节温度以实现钛合金的局部快速热处理,设计与制备了钛合金跨尺度层状异质结构,系统研究了电-热处理工艺对 β 相再结晶、 α 相析出行为及力学性能的影响机制。研究表明,高频脉冲电场显著降低 β 再结晶势垒,获得 5 μm 级超细 β 晶粒,在此基础上,采用多级时效处理制度使得次生 α 相呈现多尺度析出特征;跨尺度层状异质结构使合金表现出超高强度 (1450MPa) 及优异的延性 (13%) 组合,其优异强塑性匹配归因于不同尺度相独特变形模式的耦合效应:微米和亚微米尺度相丰富滑移及层错等塑性变形效应与纳米尺度相、异质结构界面强化效应的耦合作用。通过定量评估微观组织对强度的贡献表明,异构界面的背应力强化是合金主要强化机制。研究成果可为多相钛合金的组织设计及性能优化提供新策略。

C05-51

晶界工程促进变形孪晶提高纯钛的力学性能

付雨^{1*}、彭华备¹、文玉华¹

1. 四川大学

晶界工程被应用于具有较低层错能的面心立方合金中,以调控特殊的退火孪晶界面提高抗晶间腐蚀、晶间开裂和塑性等性能。然而,基于退火孪晶调控的晶界工程不能应用于具有高层错能的密排六方金属。本研究以密排六方纯钛为模型材料,通过控轧+退火的晶界工程处理,在纯钛中构筑了具有大量小角度晶界的均匀分布的未再结晶晶粒,从而重新激活了纯钛中因晶粒细化 and 基面织构而被严重抑制的变形孪生。未再结晶晶粒和再结晶晶粒之间的协调变形和局域应力集中激活了额外的几何必须位错和形变孪生,引入

的小角度晶界消除了大角度晶界对孪生扩展的阻碍作用，不仅协同提高了纯钛的强度、均匀延伸率和加工硬化能力，还改善了屈服变形各向异性。以上结果表明，晶界工程可应用于密排六方金属，通过晶界工程调控其晶界特征促进形变孪生而提高力学性能，这为钛、锆、镁等材料的力学性能优化提供了新思路。

C05-52

TC4 钛合金双峰组织超塑性拉伸过程中的微观组织演化规律

田睿轩¹，张聪惠¹，常仕琦¹，朱文光^{1*}，董召召¹

1. 西安建筑科技大学

TC4 钛合金因其优异的综合性能被广泛应用于航空航天等领域。具有双峰组织的钛合金由于其优异的强-塑性匹配而受到关注。本文通过对 TC4 合金进行包覆叠轧制备双峰组织，结合高温拉伸实验，研究合金的超塑性性能与组织演变。合金经两相区包覆叠轧后退火，其组织为细小的再结晶晶粒（ $\sim 0.5\mu\text{m}$ ）与较大的变形晶粒（ $\sim 8\mu\text{m}$ ）组成的双峰组织。高温拉伸结果表明，双峰组织在 750°C - 850°C 、 $5\times 10^{-3}\text{s}$ ~ $5\times 10^{-4}\text{s}$ 条件下展现出超塑性，在 750°C - $1\times 10^{-3}\text{s}$ 下延伸率达 875%。随着应变量的增加，微观组织发生显著变化：双峰组织逐渐演化为均匀等轴组织（ $2\mu\text{m}$ ），初始 B 型织构的强度（ $\langle 0001 \rangle // \text{ND}$ ）显著弱化，最终无明显择优取向。这种组织演变主要源于超塑性变形过程中晶界滑动、动态再结晶和应变诱导 $\alpha \rightarrow \beta$ 相变三种机制的协同作用。其中动态再结晶、晶界滑动促进晶粒细化，而应变诱导相变则进一步优化了组织的均匀性；动态再结晶与晶粒旋转共同弱化织构。

C05-53

高屈服强度与 TRIP 效应共存：新型高强韧钛合金的设计及变形机理研究

陈俊阳¹，相志磊¹，钱城¹，周宗熠¹，王冰¹，李继豪¹，陈子勇^{*1}

1. 北京工业大学

本研究提出了一种基于变形诱导亚稳 β 相以及局部 TRIP 效应的高屈服、高韧性 TRIP 钛合金设计策略，并通过短流程热机械工艺优化其制备过程。结果表明，轧制变形诱导的亚稳 β 相在塑性变形过程中会发生局部 TRIP 效应，显著提高了合金的屈服强度（1250 MPa），避免了传统 TRIP 钛合金因大规模 SIM（应力诱导马氏体相变）引起的屈服强度下降问题。此外，马氏体-位错相互作用提供了一种动态强化机制，使合金实现了优异的强度-塑性匹配。同时，结合固溶处理和变形诱导 β 相稳定性调谐的短工艺制造路线消除了传统钛合金所需的时效处理，显著降低了制造成本，同时提高了大规模工业应用的可行性。这种设计策略利用了变形诱导的亚稳态结构和局部 TRIP 效应，实现了理想的机械性能，为高强度和高韧性材料的开发提供了新的见解。

C05-54

高硅含量和异质片层结构实现亚稳态 $\beta 21\text{S}$ 合金的强度-延性平衡

翟相鑫¹，崔喜平^{*1}

1. 哈尔滨工业大学材料科学与工程学院

亚稳 $\beta 21\text{S}$ 钛合金因其屈服强度不足和均匀延伸率受限，在实际应用中面临重大挑战。虽然添加 Si 能有效提升钛合金的力学性能，但传统观念认为，为避免形成粗大的硅化物导致脆性，Si 含量应限制在 $\leq 0.5\text{wt.}\%$ 。

本研究中通过创新的合金设计挑战了这一范式，加入 $0.9\text{wt.}\%$ 的硅，并结合等温处理和热挤压工艺，制备出具有异质片层结构(HLS)的 $\beta 21\text{S}$ -Si 合金。该方法实现了微观结构的双重控制：等温预处理诱导出约 10nm 的纳米线状硅化物前驱体，使最终析出物从传统工艺中的 700nm 细化至 230nm ；随后的挤压工艺破坏了连续的晶界硅化物，并构建出由再结晶片层和亚结构片层组成的清晰异质层状结构。优化后的 HLS $\beta 21\text{S}$ -Si 合金展现出卓越的力学性能，与基准 $\beta 21\text{S}$ 合金相比，屈服强度达到 1035MPa （提高了 10%），均匀

延伸率达到 12%(提高了 8 倍)。

结合扫描电子显微镜数字图像相关技术(SEM-DIC)和第一性原理计算的多尺度表征揭示了一种独特的连续加工硬化机制:非均质变形诱导(HDI)硬化主导了早期阶段,随后是硅促进的交叉滑移活动,最终在后期变形期间应力诱导的 ω 相变。这种微观结构设计的变形机制协同作用,为克服亚稳非均质变形诱导(HDI)硬化主导了早期阶段,随后是硅促进的交叉滑移活动,最终在后期变形期间为应力诱导的 ω 相变。这种微观结构与工程变形机制的协同相互作用为克服亚稳 β 钛合金中长期存在的强度-延展性平衡问题开辟了新途径,对要求高性能结构材料的航空航天应用具有重要意义。

C05-55

Simultaneously achieving strength-ductility in additive-manufactured Ti6Al4V alloy via ultrasonic surface rolling process

Changgao Zhou¹, Dan Liu^{*1}

1. National & Local Joint Engineering Laboratory for High-Performance Metal Structure Materials and Advanced Manufacturing Technology, Guizhou University, 550025, Guiyang, China

Additively manufactured alloys have a great potential in engineering field, but there still have many issues to be addressed, i.e., the reliability, strength-ductility trade-off of manufactured parts. In this study, a treatment called ultrasonic surface rolling process (USRP) was utilized to achieve superior strength and ductility in the Ti6Al4V alloy prepared via electron beam melting (EBM). The treated additive-manufactured alloy obtained various gradient microstructures and excellent surface quality, as well as its mechanical properties were significantly improved. Especially, the USRP-3 specimen exhibited a high elongation of $17.1 \pm 0.9\%$ and a good ultimate tensile strength of 1043 ± 5.0 MPa, which were both higher than those of untreated specimen; the fine laminated structure with a preferred orientation of $\langle \rangle$ direction and gradient structure promoted the hardening capacity and provided the rich dislocations sources, taking a better strength-ductility combination. In addition, the surface microhardness of the multi-pass processed specimen was markedly enhanced. However, excessive USRP treatment would induce micro-cracks in the nano-composite layer, resulting in a significant reduction in ductility. Therefore, appropriate USRP treatment is expected to expand the application range of additive-manufactured metallic materials.

C05-56

激光熔覆沉积新型亚稳 β 钛合金变形机制研究

唐子浩^{*1}

1. 上海理工大学

基于几种典型合金设计理论的结合,使用商用 Ti-6Al-4V 和 Ti-3Al-8V-6Cr-4Mo-4Zr 合金粉末混合,设计了新型亚稳 β 钛合金 Ti-4.9Al-6.0V-2.9Cr-2.1Mo-2.0Zr,采用激光熔覆沉积(DLD)工艺制备了试样,通过 XRD、EBSD 和 TEM 研究了合金经过 β 相区固溶处理后的室温压缩变形机制。结果表明,固溶处理后合金中仅存在 β 相,室温压缩时先以 β 基体内位错滑移、少量应力诱发 $\beta \rightarrow \omega$ 相变、应力诱发 $\beta \rightarrow \alpha''$ 马氏体(α'' SIM)相变进行变形;随后,一方面初生 α'' SIMp片层厚度增大,并通过位错滑移和 $\langle \alpha'' \rangle$ 孪生参与变形,另一方面 α'' SIMp片层之间的 β 基体继续通过滑移和应力诱发二次 α'' SIMs变形, α'' SIMs尺寸和厚度均较小,被限制在两片 α'' SIMp片层之间。大量 α'' SIM的形成分割了 β 晶粒,并形成大量 β/α'' SIM相界,产生动态细晶强化和双相界面强化作用,导致合金具有高的应变硬化率。

C05-57

基于成分设计与组织调控的超塑性钛合金研究

朱文光^{*1}, 张聪惠¹, 田睿轩¹, 茹汇鑫¹

1. 西安建筑科技大学

钛合金超塑性成形技术可在保证结构性能的同时, 减重约 30%, 降低制造成本约 40%, 广泛应用于航空航天复杂薄壁构件制备, 具有显著的经济效益与战略意义。然而, 诸如 TC4 等传统钛合金存在超塑性成温度高 (~920°C), 成形速率低等问题。本研究基于两相区 TMP 工艺成果制备出平均晶粒尺寸~2μm 的 TC4 钛合金细晶板材, 显著降低 TC4 合金超塑成形温度至 750°C。进一步, 结合多因素成分设计准则与动态再结组织调控方法, 开发了新型 Ti-Al-V-Mo-Fe-Si 系低温超塑性钛合金, 其室温力学性能与 TC4 相当, 超塑性成形温度可著降低超 200°C。新合金在 650°C、 5×10^{-4} 应变速率条件下, 断后延伸率高达 2150%, 在 700°C、 1×10^{-3} 应变速率条件下, 断后延伸率高达 2430%, 应用前景广阔。

C05-58

新型高性能低成本 Ti-6411 合金损伤断裂行为研究

王欢^{*1}

1. 西北有色金属研究院

C05-59

微合金化对 TiAl-Zr 合金凝固行为与力学性能的影响

刘小林^{*1}

1. 贵州大学

TiAl 合金的室温塑性低与高温强度不足是制约其在先进航空航天装备中深入应用的关键, 成分设计与优化是改善其综合力学性能的重要途径。Zr 元素具有比 Nb 元素更好的固溶强化作用, 能有效提高 TiAl 合金的高温强度与抗蠕变性能, 是 Nb 合金化的潜在替代者。研究表明, Zr 元素添加改变了 TiAl 合金的凝固路径, 有助于等轴 γ 相的形成, 能有效提升 TiAl 合金综合力学性能。Zr 含量上升导致 TiAl 合金的室温力学性能先上升后下降, 2Zr 含量下材料室温强塑性达到最佳。在此基础上, 系统研究 Cr、Mn、Fe 等增韧元素与 Zr 元素的协同作用对 Ti-46Al-2Zr-2X 合金的凝固行为与力学性能的影响, 研究发现 Cr、Mn 元素显著细化了 TiAl 合金的晶粒尺寸和片层间距, 降低了 γ 相的四方形性, 并促进了纳米孪晶形成, 有效提升 TiAl 合金的强韧化能力。而 Fe 元素诱导网络状 τ_3 相的析出, 对综合力学性能提升效果不如 Cr、Mn 元素。

C05-60

利用多次等离子电解氧化技术制备具有高效应变传递效果的梯度涂层实现钛合金长效减磨

宁炳坤¹, 陈永楠^{*1}

1. 长安大学

通过多重等离子体电解氧化法在钛合金上制备了具有高效应变传递效率的骨关节状结构的 MoS₂ 浓度梯度涂层。这种结构通过位错湮灭和 MoS₂ 层间滑动消散压缩应变和剪切应变, 从而保持应变梯度, 从而促进高效应变传递。利用这一机制, 摩擦系数比石墨烯涂层降低了 50.2%, 而摩擦稳定时间则比单 MoS₂/TiO₂ 延长了 160%。这项研究阐明了这种结构中摩擦过程中的位错行为和应变传递机制。

C05-61

Ti2AlNb 合金轧制变形过程中组织与织构演变

习可心¹, 周亦奇¹, 张志鑫², 张晨愉¹, 余凤恬¹, 唐斌^{*1}

1. 西北工业大学凝固技术国家重点实验室

2. 西北工业大学重庆科创中心

本工作研究了 Ti-22Al-24Nb-0.5Mo (Ti₂AlNb 合金) 在不同轧制工艺下各相的析出行为, 分析了轧制参数对板材织构的影响规律, 并建立了轧制工艺与显微组织之间的关系。通过调控轧制温度与轧制方向, 利用 SEM 表征 Ti₂AlNb 合金轧制过程中力热协同作用下的多相组织演变过程与第二相析出行为, 并进一步进行 XRD 与 EBSD 分析。实验结果表明: 合金在 1100°C 单向轧制过程中 O 相不断溶解, 组织主要由 B2 相和 α_2 相组成, 在轧制的整个过程中板材的织构类型未发生太大的变化, 主要发生织构强度的改变, 原因在于高温轧制时作为基体的 B2 相晶粒没有发生机械破碎及再结晶, 晶粒取向变化不显著。合金在 980°C 单向轧制后晶界处的 α_2 相表现为不连续的等轴状, 轧制过程中受到大应力大应变作用使得部分 α_2 相和 O 相沿着相同方向伸长, 板材织构类型变化不大。而在 980°C 换向轧制后, 由于轧制过程的大应力大应变使得巨大的 B2 相晶粒破碎, 变成了较小的等轴状晶粒, 且轧制过程有再结晶现象出现, 晶体学的变化使得织构类型有明显改变。

本工作揭示了轧制温度与轧制方向对 Ti₂AlNb 合金组织及织构的影响机制, 为 Ti₂AlNb 合金的热处理和力学性能研究提供了基础。

C05-62

后处理对激光选区熔化 Ti-6Al-4V 合金中显微缺陷和组织的影响研究

张弘毅*¹

1. 上海理工大学

基于几种典型合金设计理论的结合, 使用商用 Ti-6Al-4V 和 Ti-3Al-8V-6Cr-4Mo-4Zr 合金粉末混合, 设计了新型亚稳 β 钛合金 Ti-4.9Al-6.0V-2.9Cr-2.1Mo-2.0Zr, 采用激光熔覆沉积(DLD)工艺制备了试样, 通过 XRD、EBSD 和 TEM 研究了合金经过 β 相区固溶处理后的室温压缩变形机制。结果表明, 固溶处理后合金中仅存在 β 相, 室温压缩时先以 β 基体内位错滑移、少量应力诱发 $\beta \rightarrow \omega$ 相变、应力诱发 $\beta \rightarrow \alpha''$ 马氏体 (α'' SIM) 相变进行变形; 随后, 一方面初生 α'' SIMp 片层厚度增大, 并通过位错滑移和 α'' 孪生参与变形, 另一方面 α'' SIMp 片层之间的 β 基体继续通过滑移和应力诱发二次 α'' SIMs 变形, α'' SIMs 尺寸和厚度均较小, 被限制在两片 α'' SIMp 片层之间。大量 α'' SIM 的形成分割了 β 晶粒, 并形成大量 β/α'' SIM 相界, 产生动态细晶强化和双相界面强化作用, 导致合金具有高的应变硬化率。

C05-63

极端服役环境 X 射线显微 CT 在高性能合金材料领域的应用

李仁庚*¹

1. 南京工业大学

随着高性能合金材料在航空、航天、军工等关键领域的应用, 在高温、低温和复杂应力等极端服役条件下对关键材料和构件的内部缺陷形成、演变和裂纹扩展进行可视化、定量化、数字化原位研究, 成为评估部件服役可靠性和预测剩余寿命的重要实验手段。基于 X 射线强穿透能力和计算机断层扫描(CT)技术, 结合亚微米级精密控制转台和机械控制, 可实现毫米/厘米级试样的三维无损成像。通过配置超高温模块、低温模块、高载荷模块(拉伸/压缩/弯曲/疲劳), 构建热-力耦合系统, 实现超高温变形、超低温变形以及热冲击、疲劳、蠕变等复杂工况下高性能合金材料与部件的原位 CT 成像。极端服役环境 X 射线显微原位 CT 设备的成功研发, 将极大提升关键结构材料在服役工况下的可靠性和安全性。

墙报

C05-P01

通过在纯钛中掺杂低含量氧化铁实现 Ti-Fe-O 材料的优异机械性能

李雪霞*¹

1. 北京理工大学材料学院

这项工作的重点是同时利用铁(Fe)和氧(O)这两种对 $\alpha + \beta$ Ti 合金最有力的稳定元素和强化剂,将合金设计与快速热压烧结技术(FAST)和热轧技术(HR)相结合,展示了一系列具有出色机械性能的 Ti-Fe-O 成分。研究创新性地采用了具有成本效益的氧化铁粉(Fe_2O_3)作为前驱体,使其完全溶解到纯钛基体中。研究表明,通过精确控制铁和氧化物的含量,只需加入 0.71 wt% 的 Fe_2O_3 ,就能获得接近 1012 MPa 的超高拉伸强度,而且不会影响伸长率(约 31%)。铁含量的增加有效地提高了 β -Ti 相的体积分数,并细化了初级 α (α_p) Ti 晶粒,同时 O 促进了针状次级 α 相(α_s)的析出。Ti-Fe-O 合金的主要强化因素是晶粒细化、 β -Ti 硬相分散和固溶强化。特别是,在 Ti-0.71 wt% Fe_2O_3 样品中观察到了 α_s 孪晶行为,这有利于获得优异的延展性。这些发现为利用廉价的氧化铁设计低成本、高性能的钛合金提供了一种新方法,并为钛合金的未来发展铺平了新的道路。氧化铁设计低成本高性能钛合金的新方法,并为潜在的工业应用铺平了道路。

C05-P02

热加工工艺对 TA11 合金微观组织及力学性能的影响规律研究

董召召¹, 朱文光¹, 张聪惠^{1*}, 田睿轩¹

1. 西安建筑科技大学

本文以 TA11 合金为研究对象,对比研究了热轧和径锻两种热加工方式及双重退火热处理对 TA11 合金微观组织及力学性能的影响规律。结果表明,热轧的 TA11 合金棒材组织更均匀,平均晶粒尺寸 $d \sim 8 \mu\text{m}$ 。经 $910^\circ\text{C}/1\text{h}\cdot\text{FC}+580^\circ\text{C}/8\text{h}\cdot\text{AC}$ 热处理后,热轧和径锻样品的晶粒发生了长大。在热轧及后续热处理过程中,较高比例的晶界为再结晶提供了更多的形核位置,使得 TA11 合金更容易发生再结晶。热处理后径锻棒材的力学性能更好,同时,通过计算细晶强化,固溶强化和位错强化三种强化机制对合金强度的贡献发现,位错强化对径锻棒材强度增加的贡献更大,强度增量比热轧棒材热处理后的强度增量高 68 MPa。

C05-P03

 β 稳定元素对钛铝合金热变形行为的影响研究王希凯¹, 鲁园园*^{1,2}, 南茜^{1,2}, 马朝利^{1,2}

1. 北京航空航天大学

2. 天目山实验室

钛铝合金(γ -TiAl)具有低密度、高强度、优良的抗氧化性等特点,是极具竞争力的新一代航空发动机叶片材料。目前,钛铝合金叶片主要通过精密铸造工艺生产,成本高昂。开发适用于钛铝合金叶片的热加工成型工艺可以消除铸造缺陷,降低生产成本,对于钛铝合金叶片的规模化生产具有重要意义。本研究制备具有不同 β 稳定元素配比的钛铝合金,对其开展热压缩模拟试验(Gleeble),分析各合金在不同温度和应变速率条件下的变形行为,结合热变形前后的合金微观组织分析,探究 β 稳定元素对钛铝合金热变形行为的影响规律。实验结果表明,Mo 元素的添加可以提高合金中 β 相的体积分数,降低合金的变形抗力。在同一锻造条件下,单一添加 Nb 元素的合金在变形量达 20%时发生开裂,但含有 Mo 元素的合金在变形量达 70%时仍未开裂,锻后组织均匀,晶粒尺寸相较于变形前有显著减小。

C05-P04

Instability of Omega phase induces synchronously improved strength and plasticity of metastable β -titanium alloysChang Mi¹, shuzhi zhang^{1*}, xinyu zhang¹, riping liu¹

1. Yanshan University

Metastable β -Titanium alloys combine excellent work-hardenability and good plasticity due to phase transformation induced plasticity (TRIP) and/or twinning induced plasticity (TWIP) effects, but exhibit poor yield strength. While isothermal ω -phase (ω iso) precipitation effectively strengthens these alloys, it typically compromises their plasticity. This study develops a strategy to harness ω -phase precipitation for simultaneously enhancing tensile strength and maintaining plasticity in metastable β titanium alloys. Experimental results reveal that ω -phase particles significantly improve yield strength while initiating localized necking through dislocation channel formation. This necking facilitates the rapid multiplication of dislocations in the strain-localization area, leading to forest dislocation hardening. Additionally, there is extra work hardening due to the interaction of dislocations with stress-induced twins and α'' martensites. This dual work-hardening mechanism restrains and stabilizes premature necking. Continuous interactions between ω -phase particles and lattice defects (dislocations, twins, α'' martensites), coupled with subsequent hardening from dislocation-defect interplay, induce two distinct necking events prior to final fracture. Each necking stage triggers corresponding hardening responses that progressively regulate deformation behavior. Consequently, an exceptional strength-ductility synergy is achieved, resulting in a 680 MPa yield strength and 51.77% elongation after 150°C aging. This work provides an instability-control strategy that coordinates forest hardening with dislocation-twin/ α'' martensites interaction hardening, thereby synchronously improving strength and plasticity (SISP) of metastable β titanium alloys.

仅发表论文

C05-PO01

Ti2AlNb 合金的相组成研究卢斌^{*1}, 尹建明², 杨锐

1. 中国科学院金属研究所

2. 国核宝钛铝业股份有限公司, 陕西 宝鸡

本文通过 X 射线衍射和透射电子显微镜观察等对 Ti2AlNb 合金中各个相区的温度范围进行了测定, 并对各个相区内相成分和相组成的变化特点进行了研究。结果表明: (1) Ti2AlNb 合金在 1100°C~800°C 之间自上到下依次存在 B2+ α_2 、B2+ α_2 +O 和 B2+O 三个相区; B2+ α_2 相区的温度下限位于 950°C~960°C 之间, B2+O 相区的温度上限位于 940°C~950°C 之间, B2+ α_2 +O 相区位于上述两个相区之间一个较窄的温度区间范围内 (2) Ti2AlNb 合金中 α_2 相的化学成分约为 Ti-27Al-17Nb, 化学计量比接近 (Ti, Nb)3Al; O 相的化学成分约为 Ti-25Al-23Nb, 化学计量比接近 Ti2AlNb; 随时效温度的降低, 显微组织中 α_2 /O 相体积分数的增加引起 B2 相中的 Al 元素含量减少, Nb 元素含量增加, 原子百分比稳定在 Ti/(Al, Nb)=1 附近。(3) Ti2AlNb 合金在 B2+ α_2 两相区时效 12h, 可获得的析出相体积分数不超过 15%; 在 B2+O 相区进行时效时, 随着时效温度的降低, O 相的体积分数急剧上升, 并在 880°C 以下趋于缓慢, 达到约 70% 左右的相对稳定水平。(4) Ti2AlNb 合金在 1100°C~1000°C 之间时效处理时, 因为 B2 相中 Al 元素含量减小, 而使得合金维氏硬度有所降低, 出现轻微软化现象; 在 1000°C 以下, 随着时效温度的降低, 析出相含量的增加以及尺寸的减小, 析出强化作用增强, 维氏硬度明显升高。

C05-PO02

钛合金叶盘结构设计及优化

陈晓文^{1*}, 陈佳¹, 王同辉¹

1. 中国航发涡轮院

本文对某发动机整体叶盘开展结构优化设计, 优化目标为在满足强度设计要求的前提下实现该整体叶盘的轻量化设计, 满足其性能提升需求。为此, 本文设计了三种轮盘优化结构, 并对各优化方案开展有限元强度计算分析, 结果表明三种结构的轮盘强度均满足强度设计要求。与原方案相比, 三种优化结构方案均具有一定的减重效果, 在各优化方案金属盘体应力水平基本相当时, 纤维增强整体叶环结构减重效果最明显。对方案 1 优化整体叶盘开展轮盘破坏试验, 结果表明, 轮盘实际破裂转速与预测破裂转速误差很小, 强度设计方法可靠。

C05-PO03

TA18 钛合金冷轧带材微观组织演化与力学性能的尺寸效应研究

袁利红^{1*}, 李欣琳¹, 吴俊宇¹, 高贝特¹

1. 西北有色金属研究院

研究了 TA18 钛合金带材 (Ti-3Al-2.5V) 在 0.15-0.8mm 厚度范围内的尺寸效应。通过室温拉伸试验、显微组织测试及 EBSD 分析发现: 当带材厚度从 0.8mm 减小至 0.15mm 时, 抗拉强度提升 6%, 屈服强度提升约 12% (从 533MPa 增至 597MPa), 但延伸率下降 56%。微观结构表征表明: 这种尺寸效应主要源于随着试样厚度减小, 导致厚向晶粒数量减小导致的约束强化机制。随着试样厚度减小, 织构强度由 13.21 降低将至 7.08, 且极图显示织构漫散, 表明晶粒取向发生变化。晶界取向差占比图分析结果表明大角度晶界占比迅速增加, 在厚度为 0.15mm 的带材中大角度晶界占 92.6%, 但其延伸率却明显降低, 表明在尺寸效应存在的情况下, 不能通过提高再结晶率以及大角度晶界占比提升钛合金带材的塑性。

C05-PO04

Thermal distortion evolution and residual stress characteristics of Ti-6Al-4 V alloy by laser-directed energy deposition: In-situ monitoring, contour method, and XRDRuixin Wang¹, Chaoyue Chen^{1*}, Ruixin Zhao¹, Zhongming Ren¹

1. Shanghai University

Thermal distortion and residual stress are major issues affecting dimensional accuracy and mechanical properties in laser additive manufacturing (LAM). This study investigates the evolution of thermal distortion and the formation mechanism of residual stress in Ti-6Al-4V alloy during laser-directed energy deposition (L-DED). An in-situ monitoring system recorded the distortion and temperature histories of the sample during deposition. Residual stress in various regions and directions of the final thin-wall was analyzed using the contour method and XRD. The results show that during each layer deposition, the interaction between tensile and compressive stresses causes the free end of the substrate to initially bend downward and subsequently upward. Different linear energy densities (El) lead to varying distortion modes of the substrate. For El values between 75 and 150 J/mm, substrate distortion height increases with deposition layers. For El values between 150 and 300 J/mm, it first increases and then decreases. By combining in-situ monitoring data with residual stress results, this study clarifies the evolution of thermal distortion, the mechanism of residual stress formation, and their relationship during L-DED. Samples with greater distortion tend to exhibit lower residual stress. The distortion of E_{high} samples is 0.73 mm greater than that of E_{low} samples, yet their maximum residual stress is 82.8 MPa lower. The higher cooling rate in the deposition region creates local tensile stress, while compressive stress forms in the surrounding region. As deposition progresses, the region of maximum tensile stress shifts upward along the building direction until

complete. This study provides new insights into the evolution of thermal distortion and the mechanisms of residual stress formation in LAM, contributing to the control and reduction of residual stress.

C05-PO04

Machine Learning-Driven Design Optimization of High-Strength Titanium Alloys for Petroleum Industry Applications

Yuze Ji¹, Peng Wang^{*2}, Shi-qing Wang¹, Jia-kuan Ren², Li-juan Zhu², Xin-yan Liu²

1. Xi'an Shiyou University, School of Materials Science and Engineering, Xian 710065, China

2. National Key Laboratory of Oil and Gas Drilling and Transportation Equipment, CNPC Tubular Goods Research Institute, Xi'an, Shanxi, 710077, China

High-strength titanium alloys (HSTAs) have great application potential in ultra deep drilling due to their exceptional strength-to-weight ratio and good fatigue resistance. However, the contradiction in strength and toughness control remains the bottleneck restricting its application. This study proposes an innovative approach combining machine learning and genetic algorithms to optimize the composition and heat-treating process design of HSTAs, achieving a balance of superior yield strength (YS) and impact toughness (α_k). A modified greedy algorithm was employed for feature selection, efficiently identifying key variables from high-dimensional datasets. Through 200 random partitions of the data set, 121 performance prediction models were screened out, and were further used to comprehensively calculate the predicted results. Coupled with a dual-objective genetic algorithm, the target performances with the YS>890MPa and the α_k >48J/cm² were set to optimize the composition and process parameters. Finally, a new HSTAs with the YS>900MPa and the α_k >50J/cm² was designed and verified by experiment successfully, exhibiting a great alloy cost advantage. This data-driven material design framework provides an efficient pathway for accelerating the design of titanium alloys.