

中国材料大会 2024
暨第二届世界材料大会
CMC 2024 & WMC 2024

July 8-11, 2024
Guangzhou, China

C05-高性能钛合金材料
C05-High Performance Ti-alloys

Organized by

Chinese Materials Research Society

Website: <https://cmc2024.scimeeting.cn>

C05. 高性能钛合金材料

分会主席：赵永庆、马朝利、孙巧艳、寇宏超

C05-01

Ti575 合金的力学行为与变形失效机理

寇宏超*, 谢偲偲, 吴智鸿, 习志成

西北工业大学

钛合金风扇盘、风扇叶片在服役过程中受到航空发动机开机、停机、巡航和变速过程的影响, 容易发生疲劳失效, 其疲劳变形及失效行为显著依赖于显微组织。基于此, 本团队系统研究了风扇盘用新型高强两相钛合金 Ti-5Al-7.5V 合金(Ti575)的室温拉伸、疲劳性能及其显微组织敏感性, 探讨了合金的变形行为及失效机理。结果表明: 通过组织调控, 可在较大范围内调控 Ti575 合金的室温拉伸性能, 抗拉强度最高可达 1476MPa; 当合金的相组成为等轴 α 相、 α' 六方马氏体相以及残余 β 相时, 抗拉强度和延伸率分别为 1225MPa 和 17.0%, 应力诱发马氏体相变、变形孪晶以及位错滑移的耦合机制使其具有很好的强塑性匹配。Ti575 合金高周疲劳寿命离散度大, 随疲劳寿命的增加, 疲劳裂纹萌生点从试样表面向内部转移, 且易萌生于取向有利于基面滑移的等轴 α 晶粒; 具有低等轴 α 相含量双态组织的合金具有较高的低周和保载疲劳寿命, 抗保载疲劳性能较好, 保载敏感性仅有 2.77, 且不随等轴 α 相含量的增加而显著增大。Ti575 合金的低周和保载疲劳变形主要由等轴 α 相的平面滑移承担, 与低周疲劳相比, 保载疲劳组织承担了更多的塑性变形, 刃位错和螺位错向两端或一端堆积在晶界处, 该单边堆积和双边堆积现象取决于位错源在特定晶粒中的相对位置, 与位错类型和加载条件等因素无关。低周疲劳和保载疲劳裂纹萌生于取向有利于基面滑移的等轴 α 晶粒, β 转变组织可有效抵抗裂纹扩展; 保载载荷触发裂纹萌生机制的转换, 低周疲劳为基面裂纹萌生主导, 保载疲劳为基面和柱面裂纹联合主导。

C05-02

钛合金双相组织变形机制及强韧化机制研究

王柯*, 周瑜, 李宏辉, 辛仁龙

重庆大学

研究钛合金微观变形机制有助于揭示微观组织对力学性能的影响机制, 进而为组织性能优化提供指导。对于大多数近 α 和 $\alpha+\beta$ 钛合金, 滑移是主要的变形机制。因此, 研究滑移启动和传递行为、以及裂纹成核机制, 对于揭示强韧化机制至关重要。钛合金双相组织中的相含量、晶粒大小、晶界取向和 α/β 位向关系等都会影响滑移启动和传递行为, 导致其变形机制较为复杂。本报告主要汇报内容包括: (1) α 相和 β 相之间滑移启动的先后顺序; (2) 微观组织对滑移启动和传递、以及裂纹形核的影响行为; (3) 基于微观变形机制分析了微观组织对力学性能的影响机制; (4) 基于对组织性能关系的研究, 设计并开发出一种多尺度组织, 实现了钛合金强塑性的协同提升。

C05-03

构建非均匀分布的 α 析出相实现 TWIP β -钛合金屈服强度-塑性协同

王启¹, 桑彪², 任军强³, 辛超⁴, 张永宏², 艾桃桃², 刘文富¹, 余京泰⁵

1. 黄淮学院
2. 陕西理工大学
3. 兰州理工大学
4. 西北有色金属研究院
5. 天津大学

通过控制 α 析出相的非均匀分布, 设计了一种新型的晶粒尺度异质结构的亚稳 β -Ti 合金。得益于亚稳 β -Ti 合金独特的成分依赖的变形机制, α 相的非均匀析出诱发了晶粒尺度的非均匀变形机制。促进了异质

形变诱导(HDI)强化, 提高了屈服强度。晶粒内部的 β 相保持亚稳态, 保留了诱发显著孪生诱导塑性效应的能力, 以提供优异的塑性。这种合金设计思路在不降低塑性的前提下将屈服强度提高了 33 %, 在 Ti-8.5Cr-1.5Sn 合金中实现了优异的强度-塑性协同。

C05-04

晶粒尺寸对亚稳 β 钛合金 TRIP-TWIP 转变历程的影响

王川云*, 吴越, 寇宏超, 李金山

西北工业大学

亚稳 β 钛合金 TRIP、TWIP 变形是此类材料加工硬化的重要机制, 相应转变历程随 β 晶粒尺寸减小而改变, 使亚稳 β 钛合金表现出迥异的强塑性性能。为解析晶粒细化对亚稳 β 钛合金 TRIP-TWIP 转变历程的影响, 本文将 DIC、原位/非原位 EBSD 与 TEM 技术与拉伸测试手段相结合, 系统分析了不同晶粒尺寸条件下 Ti-12Mo 合金拉伸变形行为, 建立了晶粒尺寸-强塑性性能-主控变形机制联系。结果表明: 随 β 晶粒尺寸减小, Ti-12Mo 合金拉伸变形组织中马氏体/孪晶含量比例降低, 主控变形机制由 TRIP 向 TWIP 转变; TRIP、TWIP 激活应力发生改变, 应力诱发马氏体形核位点由 β 基体内向 β 孪晶内转移; 合金屈服强度上升、延伸率下降, 局部应变集中程度加剧。

C05-05

位错-氧原子交互作用介导纳米孪晶马氏体实现超高强塑钛合金

张崇乐, 李轩哲, 李苏植, 张金钰*, 李娇, 刘刚, 孙军

西安交通大学

晶体缺陷, 如位错, 除了作为塑性载体, 还可作为有效的形核位点, 控制具有多层级/形态第二相的析出, 从而优化合金的力学性能。例如, 高比强度钛合金主要通过扩散($\beta \rightarrow \alpha$)相变形成的纳米尺寸 α 相进行强化。通常来说, 刃位错的平面应力场导致单个 α 变体沿位错线长大, 形成平行的 α 簇状结构。与此相反, 螺位错的非平面应力场促进不同 α 变体沿位错线同时形核, 形成具有孪生关系的三角形结构。尽管不同 α 变体之间存在孪晶界, 但 α 和 β 相之间的界面仍然是半共格的, 塑性变形时界面相容性较差, 从而导致其强度-塑性的倒置关系。本工作提出了一种违反直觉的设计策略, 在 Ti-Cr-Zr-Al 马氏体钛合金中有意掺杂间隙氧(O)而不是避免它(高达 0.5 wt.%), 即利用间隙原子-位错交互作用显著扭曲热机械加工预先引入刃位错的平面应力场, 使其转变为非平面应力场, 这促使多个马氏体变体沿富 O 的刃位错线同时形核, 从而构筑出间隙 O 强化的纳米孪晶 α' 马氏体新型微观结构。间隙原子-位错交互作用介导的间隙 O 纳米孪晶马氏体设计策略结合了间隙强化、共格 α'/α' 孪晶界和共格 α'/β 相界面的优点, 从而使得该钛合金的综合力学性能优于以前报道的钛合金。氧-位错交互作用策略展示了一种先进的设计原则, 即通过操纵位错特征, 例如刃位错或螺位错及其应力场, 可有效构筑纳米孪晶结构, 并为钛合金工业设计低成本、高性能的高氧耐受性钛合金提供了新的见解。

C05-06

超细晶 β 钛合金力学行为与变形机制转变研究

张冰洁^{*1}, 黄明达², 毛文奇³, Nobuhiro Tsuji³

1. 西北有色金属研究院

2. 西安交通大学

3. 京都大学

由于高温下合金元素在 β 相 (BCC 结构) 中扩散速率非常快, 很难在 β 相变点以上消除变形组织, 获得 β 细/超细晶。目前 β 晶粒细化还未被广泛研究, 尤其是对 β 相在超细晶尺度下的研究还未见报道。本文选取 β 相稳定性不同的 Ti-10Mo-8V-1Fe-3Al (Wt.%, Mo[eq]=18) 和 Ti-21Nb-8Mo (Wt.%, Mo[eq]=14) 合金作为研究对象, 利用剧烈变形和短时精准热处理对 β 相进行细晶强化, 成功地制备出了基本消除了剧烈变形组织的单相 β 超细晶试样, 使以 β 相的晶粒尺寸为单一变量研究其对力学性能的影响成为可能。力学测试

表明,相稳定性较高的 Ti-10Mo-8V-1Fe-3Al 合金在超细晶状态下塑性明显降低,屈服强度虽然增加,但屈服后应力立即下降,几乎不表现加工硬化。相反的,相稳定性较低的 Ti-21Nb-8Mo 合金的强、塑性随晶粒尺寸的减小同时增加,同时超细晶组织加工硬化率最大值高达 6 GPa,远高于粗晶试样。此外,该合金随晶粒尺寸减小,屈服行为呈现连续屈服(粗晶)→不连续屈服(细晶)→双屈服转变(超细晶)。研究表明,稳定性较高的 β 钛合金变形机制为单一的位错滑移,协调变形能力较差。而亚稳 β 钛合金的超细晶组织可通过马氏体相变协调变形,优化力学性能;同时,随晶粒尺寸减小,合金的主导变形机制发生转变,导致独特的屈服行为转变,不同的屈服行为对合金的超弹性产生显著影响。

C05-07

基于异质结构和 TRIP 效应的亚稳 β 钛合金微结构调控及力学行为研究

马新凯*, 冯腾峰

西南交通大学

亚稳 β 钛合金的低屈服强度常常限制了它们的实际应用。通过简单的冷轧和随后的短时间退火处理成功设计出具有异质晶粒尺寸的亚稳 β 钛合金 (Ti-37Nb, wt%)。与具有均匀晶粒尺寸的粗晶粒 (CG) 样品相比,异质结构 (HS) 样品不仅具有优异的屈服强度和延展性,而且具有更高的工硬化速率。异质形变诱导 (HDI) 强化和 α'' 马氏体对位错运动的阻碍使 HS 样品比 CG 样品更强,并延迟了双屈服行为。在 HDI 硬化和 TRIP 效应相互促进的作用下,样品的延展性和工硬化能力优于 CG 样品。由于 HDI 应力和施加应力的协同作用,显著的应力诱导马氏体转变 (SIMT) 使 HS 样品的转变诱导塑性 (TRIP) 变得更为显著。本研究为设计高性能亚稳 β 钛合金提供了一种新的策略。

C05-08

Ti-55531 合金棒材性能各向异性机理研究及工艺改进探索

赵鹏程*^{1,2}, 王博¹, 张鹏¹, 朱彬³, 陈威², 曹龙¹, 吴浩¹, 车伟¹

1. 陕西天成航空材料股份有限公司

2. 西安交通大学

3. 江苏理工学院

本研究针对 Ti-55531 合金大规格棒材室温性能各向异性,尤其是塑性各向异性较大的问题进行研究,采用室温拉伸和断裂韧性测试,并结合 OM、SEM 及 EBSD 等微观表征手段,对棒材初始组织、断口形貌及裂纹扩展路径等进行系统表征与分析,揭示了 Ti-55531 合金棒材拉伸性能各向异性的原因,研究表明:(1) 由于 β 相的<110>织构导致不同加载方向{101}<111>滑移系的 Schmid 因子不同,出现屈服强度差异;(2) Ti-55531 合金的拉伸塑性与断裂韧性存在明显关联,表明室温塑性的各向异性与裂纹扩展阶段密切相关,并受合金组织特征的影响;(3) Ti-55531 合金室温塑性的各向异性主要取决于 β 晶粒的形貌,并受 β 相取向织构和等轴 α_p 分布等因素的影响。在此基础上,通过后期热处理及锻造工艺改进等方式尝试探索减弱性能各向异性,结果显示通过热处理或改锻可以一定程度上减弱各向异性,但可能会导致拉伸强度和均匀性有所降低,因此仍需进一步深入研究。

C05-09

钛合金研发中存在的问题

赵永庆*

西北有色金属研究院

钛合金研究近 10 多年收到高度重视,取得了长足的技术进步,中国钛产业也达到快速发展。但是在钛合金研发过程中,不可避免地存在一些问题。本报告简要介绍了目前研发中存在的一些主要问题,如钛行业宏观上的问题,科研方面宏观上存在的问题,科研、产业微观上存在的主要问题(如低成本、合金成分均匀性、数据分析、成果转化、工艺技术创新与工业化稳定生产、稳定性和一致性、成分-工艺-组织-性能关系等),最后也提出了建议和展望。

C05-10

核用钛合金的氢、氦辐照行为研究

万明攀^{*1}, 石云梅¹, 吴珍¹, 王茜茜¹, 曹兴忠²

1. 贵州大学

2. 中国科学院高能物理研究所

钛合金因其优异的力学性能广泛应用于航空、航天、舰船、兵器等领域,在核能领域也备受关注。但由于钛合金对氢的强亲和力而表现出氢脆限制其应用。另外钛合金中氢、氦致缺陷对材料微观结构的影响机理仍不明确。因此,论文采用正电子湮没谱学(PAS)、热脱附谱仪(TDS)、透射电镜(TEM)和掠入射小角X射线衍射(GIXRD)等技术研究纯钛、Ti-Mo和Ti-5331钛合金中氢、氦辐照微观结构的演变行为、氢氦滞留行为、辐照肿胀及硬化行为。结果表明,与纯钛相比,Ti-Mo合金具有更高氢的固溶度,Mo元素促进 β 相形成,降低钛与氢之间的键合减少脆性氢化物的析出,明显的降低合金的氢脆敏感性。氦辐照后Ti-5331合金中产生大量的空位缺陷,空位的浓度和大小随着剂量和温度的增加而升高。空位捕获氦形成氦-空位复合体。不同剂量氦辐照产生的空位复合体中空位和氦比例不同。Ti-5331合金中氦辐照诱导硬化是空位簇、氦泡和位错环等缺陷相互作用的复杂结果,且合金的硬化程度随着剂量和温度的升高进一步增加。冷变形引入的位错型缺陷和少量的空位型缺陷,可作为氦的捕获位点,阻碍氦原子的扩散迁移和空位的形成,降低辐照损伤。

C05-11

1800MPa 级钛合金制备与强韧化机制研究

崔喜平*

哈尔滨工业大学

针对航空航天结构减重与性能提升对钛合金更高强度-塑(韧)性匹配的迫切需求,创新性提出在 β 钛合金中引入高含量Si元素,通过对增强相构型和基体序构的双重调控,构建了包含均匀分布的亚微米Ti₅Si₃颗粒、回复层和再结晶层的异质层片结构钛基复合材料,实现抗拉强度提升10%的同时,均匀延伸率提升8倍。进一步借鉴晶界工程(GBE)思想,通过调控双级时效工艺进一步构建出由晶界纳米魏氏组织 α 相和晶内分级纳米 α 相组成的胞状结构复合材料,获得了1850MPa的超高强度和大于5%的均匀延伸率。晶内的高固溶Si抑制 ω 相均匀析出,使时效后晶内产生粗细混合的纳米分级 α (α_{HS}),而(亚)晶界存在的高密度位错诱发析出超细纳米魏氏组织 α (α_{WGB}),避免了脆性连续晶界 α 相。通过原位HR-DIC技术发现:胞状结构复合材料的胞状晶界强且可变形, α_{WGB} 避免了大量的晶界失效,提供了强化基础,而晶内 α_{HS} 承担主要的变形,通过不同尺度 α 相的异质变形行为产生了强的异质变形诱导(HDI)强化和加工硬化,显著提高了钛基复合材料强度和塑性。这种利用反常超高Si含量诱导的异质结构调控和晶界工程调控策略为设计高强高韧钛合金提供了一条可行途径。

C05-12

热处理对含锰 β 型 γ -TiAl合金组织和力学性能的影响陈传毅^{1,2}, 李小兵^{*2}, 郝俊杰², 牛红志¹, 刘奎²

1. 东北大学材料科学与工程学院

2. 季华实验室

β 型 γ -TiAl合金由于不发生包晶转变,成分偏析小,表现出良好的热加工性和高温性能。Mn作为一种低成本的强 β 相稳定元素,对发展低成本、易变形的 β 型 γ -TiAl合金发挥着重要作用。本文以一种低成本、易变形的Ti-44Al-3Mn-0.4W-0.4Mo-0.1B-0.1C合金(at.%)为研究对象,利用真空感应熔炼及常规热轧工艺制备了直径为 $\Phi 12$ mm的棒材,采用电子探针(EPMA)、透射电子显微镜(TEM)、电子背散射衍射(EBSD)等检测手段,研究了1270°C、1220°C、1170°C高温处理对合金棒材的组织与力学性能的影响规律。结果表明,热处理后合金棒材均由 γ 、 α_2 、 β_0 三相组成的近片层组织。在相同时效制度条件下,随

着高温处理温度的降低, α_2/γ 片层含量下降, 等轴 γ 相含量增加, 而 β_0 相含量先降低后增加。拉伸性能测试表明, 随着高温处理温度的下降, 合金棒材室温和 800°C 延伸率提高, 拉伸强度降低。对比发现, 高温处理温度的降低对室温延伸率的影响要远小于 800°C 延伸率, 对比 1270°C 热处理组织, 1220°C 热处理组织 800°C 延伸率提高了 280%, 1170°C 热处理组织 800°C 延伸率提高了 480%。这是由于 α_2/γ 界面阻碍孪晶和位错的运动以及高温下块状 γ 相表现出较高的高密度位错和孪晶发生率。本研究探究了 Ti-Al-Mn 系 β 型 γ -TiAl 合金显微组织与力学性能的关系, 这对推动 β 凝固 γ -TiAl 合金发展与应用有重要的现实意义。

C05-13

Ti-15Mo 合金动态力学行为与组织演化研究

潘曦, 孙久平, 辛社伟*, 毛小南

西北有色金属研究院

随着现代武器装备的不断发展, 要求地面战车更加迅猛地部署、投送至特定作战范围内, 因此如何在保证防护能力的前提下降低作战单位重量将是陆军武器平台发展的重点方向。钛及钛合金的密度低、比强度高, 是极富潜力的轻质装甲候选材料。但现有钛合金的发展主要以准静态力学性能作为评价标准并服务于航空工业, 缺乏更接近靶弹冲击等高应变速率条件下的动态力学性能和组织演化规律研究。本文采用了分离式霍普金森压杆对 Ti-15Mo 合金的动态压缩行为进行了研究, 发现与时效试样相比, 固溶试样显示出更为优异的应变硬化能力, 最大应变硬化率达 3 GPa, 最大塑性应变为 0.34。动态加载过程中, 固溶组织出现了高密度 $\{332\}<113>$ 孪晶, 随着应变率的提高, 孪晶密度增大, 导致了应变硬化率的提升。合金失效主要以绝热剪切带 (ASB) 的形成作为标志, 固溶组织的临界失效应变率高于时效组织, 具有更高的动态冲击吸收能。ASB 是应变局域化诱发的动态再结晶的结果, 由于带内变形协调性差, 导致应力集中诱发的微孔、微裂纹形成。靶弹侵彻试验表明, 固溶试样面板主要通过孪生变形和绝热剪切断裂吸收靶弹动能。

C05-14

高强亚稳 β 钛合金硼微合金化的组织、变形特征及强韧化机理

赵鼎萱, 陈威*, 张金钰, 孙军

西安交通大学

近些年, 通过硼微合金化策略来改善钛合金组织和性能已经在中强钛合金中广泛报道。B 元素在钛合金中极低的固溶度使得其常以金属间化合物 TiB 的形式存在。在中强钛合金中, 普遍认为 TiB 的主要作用是作为增强相来提升合金的强度。近两年我们的研究表明, 硼微合金化对钛合金的影响不止于此。首先, B 微合金化可以有效改善钛合金丝材热轧组织的边心差异, 提升组织均匀性以及力学性能稳定性。同时, 在高中强钛合金中通过调控 TiB 的分布不仅可以发挥 TiB 的增强作用, 还可以激发 TiB 本征塑性, 使其对于强塑性协同提高具有独特作用。我们构建了“时效基体/ α s 膜/TiB”三明治结构, 这种独特的“三明治结构”不仅有效缓解了变形过程中变形局域化带来的负面影响, 而且有助于充分激活 TiB 中的位错滑移, 使其同时对塑性做出贡献。同时进一步地, 在压缩试验中发现了 TiB 中位错诱导非晶化行为, 深入揭示了 TiB 在高中强钛合金中增强增塑的本征机理。

C05-15

激光选区熔化 Ti-Nb 合金非平衡凝固的多物理场模拟研究

王刚*

华南理工大学

Ti-Nb 合金弹性模量接近人骨且无生物毒性, 是开发新型生物医用 β 钛合金的主要候选材料之一。激光选区熔化 (SLM) 作为一种常见的金属增材制造技术手段, 具有材料利用率高、制造周期短、适合制造形状尺寸复杂零件等优点, 可以满足骨科、牙科和创伤外科等生物医学应用场景个性化定制的要求。为了获得质量和性能优异的生物医用 Ti-Nb 合金部件, 必须深刻理解该合金在 SLM 成型过程中的微观组织演变过程和规律。

SLM 是一个十分复杂的多物理场耦合过程, 涉及传热、传质、流体流动、相变等多个物理化学现象, 它们的相互作用对熔池附近的温度分布、熔池形貌与尺寸、熔池凝固后的微观组织具有重要影响。由于 SLM 的瞬时性和复杂性, 很难通过实验手段来表征熔池内的温度分布和微观组织演化。为此, 本文分别建立了 SLM 成型 Ti-Nb 合金粉末床几何模型、熔池内的传热和流体流动模型、以及非平衡凝固的有限界面耗散相场模型, 通过温度场、流场、溶质场和结构场等多物理场的跨尺度耦合, 系统研究了 Ti-25Nb (at.%) 合金在 SLM 过程中的非平衡凝固微观组织形成过程和演变规律。

研究表明, Ti-25Nb (at.%) 合金在 SLM 过程中可以在熔池内部形成典型的胞状组织和枝晶结构, 且 Nb 原子在胞状晶/树枝晶内富集、在胞状晶/树枝晶间贫乏分布; 快速凝固显著促进溶质截留效应, 减轻了溶质的微偏析; 熔池内部温度场是不均匀的, 随着温度梯度的减小和冷却速度的增大, 固液界面形貌发生树枝状-胞状-平面状的转变, 且晶粒尺寸变小, Nb 溶质偏析现象减轻; 预测的枝晶/胞晶尺寸在 0.4~0.6 μm 范围内, 与实验结果相一致。

C05-16

极端环境 X 射线原位 CT 开发与在高性能钛合金材料中的应用

缪克松, 李仁庚*

南京工业大学

材料基础科学理论与先进表征技术开发是材料科学发展的两条主线, 材料表征技术与仪器贯穿材料研发、生产制造、工程应用、服役评价全过程, 不可或缺。近年来, 随着材料研究的不断深入, 现有表征仪器已无法满足材料前沿研究需求, 亟需开发三维、原位、可检测材料深部的表征仪器与技术。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, 实现微米级高分辨 X 射线 CT 成像, 可实现毫米/厘米级试样的三维无损成像; 突破了极端环境与 CT 耦合技术, 独创采用非接触式加热模式, 可实现超高温、超低温、复杂应力、应力腐蚀、热压烧结等服役环境下材料三维原位表征。目前该技术已应用于高温合金、镁合金、铝合金、钛合金、碳纤维复合材料、陶瓷、混凝土、岩石等材料, 为三维定量化研究极端环境下关键材料与部件组织与缺陷演变规律提供了有力手段。高性能原位 X 射线 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。

C05-17

钼含量对盐酸中 Ti-Mo 合金微观结构和腐蚀行为的影响

赵恒*

西北有色金属研究院钛所

通过微观结构表征、电化学和腐蚀失重测量, 系统研究了 Ti-xMo (x=0, 1, 3, 5 wt%) 钛合金在 10 wt% 盐酸溶液中的腐蚀和钝化行为。结果表明, Ti-xMo 合金 (x=1、3、5 wt%) 表面的耐腐蚀性随 Mo 含量的增加而增加, 这是由于 Mo 含量超过 1 wt% 后钝化膜的持续增强, 腐蚀失重减少, 浸泡 10 d 后的腐蚀速率分别为 0.19 mm/a、0.001 mm/a 和 0.0007 mm/a。此外, 当 Mo 的添加量达到 3 wt% 时, 腐蚀类型从均匀腐蚀转变为点蚀, 且 Ti-5Mo 的点蚀宽度小于 Ti-3Mo 的点蚀宽度。这项工作将为通过成分优化设计油井管道高耐腐蚀材料提供可参考的数据。

C05-18

高强亚稳 beta 钛合金纤维状组织结构形成及其强韧化机制

孙巧艳*, 刘乐梁, 孙军

西安交通大学

高强钛合金强度超过 1300MPa, 合金的塑性与韧性显著降低, 成为高强钛合金性能的制约瓶颈。为了协同提升高强钛合金的强度、延展性和韧性, 本文通过在热变形与时效处理联合方式, 在钛合金中构建了纤维状 β 相时效析出的 α 片与热变形的 α 相混合的组织结构。对这种组织结构的室温拉伸性能和冲击韧性进行了测试, 发现初生 α 相对合金的强度、延展性和韧性均有重要的贡献。在热变形过程中,

微米级初生 α 相阻碍了 β 晶界的迁移, 并协调了变形, 形成了纤维状 β 晶粒, 在随后的时效处理中纤维状 β 相保持并在其中析出片层 α 相发挥强化作用。保留纤维状相提高合金的冲击韧性, 有效阻碍和偏转裂纹的扩展, 增加裂纹扩展阻力。经过热变形后, 在初生 α 相中产生了大量滑移带, 细化了初生 α 相。在拉伸试验中, 当应变较小时, 滑移带边界阻碍了位错在初生 α 相内的滑移; 当应变进一步增大时, 位错穿过滑移带边界, 协调变形, 获得高的屈服强度和塑性。纤维状组织的屈服强度为 1361 MPa, 断后延伸率为 12.7%, 冲击韧性为 48.1 J/cm², 而双态组织的屈服强度为 1328 MPa, 冲击韧性为 26.4 J/cm², 断后延伸率为 11.1%。本文结果表明, 纤维状组织钛合金的强度、塑性和韧性不低于双态组织, 实现了良好的综合力学性能。本文的研究结果为高强度钛合金的强韧化提供了新的思路。

C05-19

复杂载荷下 Ti-55531 合金的变形及断裂机制研究——以预拉伸-扭转复合载荷为例

黄朝文*, 胡孔亮

贵州大学 材料与冶金学院

Ti-55531 合金被广泛应用于制造飞机起落架及轴等承力构件, 其在服役过程常受到多重静载或循环载荷的影响, 导致构件的变形及断裂行为复杂多变, 给航空航天飞行器的安全带来了严重隐患。本研究通过采用预拉伸-扭转复合加载, 揭示了不同预拉伸应变(0%、4%和 6%)对 Ti-55531 合金双态组织的扭转性能、变形及断裂机制的影响。结果表明: 预拉伸应变的引入显著提高了合金的扭转塑性。且随预拉伸应变的增加, 合金的抗扭强度逐渐降低, 而扭转塑性先增加(预拉伸应变从 0%到 4%), 然后降低(预拉伸应变从 4%到 6%)。此外, 预拉伸变形阶段引入了一定的位错密度, 导致后续的扭转变形过程, 晶粒取向和塑性变形发生改变。不同的预拉伸应变对合金中各相的变形机制产生了显著影响。在纯扭转加载下(预拉伸应变为 0%), 初生等轴 $\alpha(\alpha_p)$ 相的变形机制主要为{0002}基面滑移。然而, 当预拉伸应变为 4%时, α_p 相的扭转变形机制转变为柱面滑移的不同滑移面之间的交互作用。当预拉伸应变进一步增加到 6%时, α_p 相内进一步激活了锥面滑移, 并与{ }柱面滑移之间产生交互作用。此外, 随预拉伸应变的增加, 扭转过程 α_p 相内形成多滑移系的概率显著增加, 而次生 $\alpha(\alpha_s)$ 相内形成孪晶的概率先增加后减少。

C05-20

Zr 的添加对热轧 TiAlNbZr 合金组织演化和力学性能的影响

逯昊燃*, 李波, 姬朋飞, 刘日平

燕山大学

Zr 的添加不仅有助于 Ti 合金的固溶强化, 还可以提高 Ti 合金在各种环境下的耐腐蚀性。以 Ti-6Al-7Nb 合金为基体, 探究 Zr 的添加对其显微组织演化和力学性能的影响。调整 Zr 的含量, 使 TANZ 合金体系有足够的稳定高温 β 相, 进而得到部分亚稳相 (α' 、 α'' 和亚稳 β 相)。TANZ 合金在具有较高屈服强度的同时还能保持较高的均匀变形和加工硬化能力。这项工作有助于拓宽 Ti 基合金在生物植入材料方面的应用。

C05-21

氧掺杂调控 TRIP/TWIP 效应协同增强亚稳 β 钛合金机制研究

高月, 肖文龙*, 王俊帅, 姜文涛

北京航空航天大学

具有 TWIP/TRIP 效应的亚稳 β -Ti 合金通常具有优异的加工硬化能力, 但伴随相对较低的屈服强度, 限制了它们的广泛使用。研究表明, 间隙氧原子可以用于调节 β 相的稳定性, 从而显著提高 TWIP/TRIP 合金的力学性能。对于 Ti-32Nb wt.%合金来讲, 0.3wt.%的氧掺杂可以使延伸率提高超过 140%, 应变达到 54%, 屈服强度提高 95%以上。本文阐明了氧掺杂对 Ti-32Nb 合金中 TWIP/TRIP 行为的影响, 揭示了通过氧调节马氏体相变、孪生和位错滑移的临界应力, 在较低的氧掺杂浓度 ($\leq 0.3\text{wt.\%O}$) 下, 多级马氏体相变和马氏体孪生产生高塑性; 在高氧含量的合金 ($\geq 0.5\text{wt.\%O}$) 中, 变形最初通过孪生发生, 而应变诱导的马氏体随后在剩余 β 相区被诱导, 导致非典型应变诱导的孪生/相变行为。氧掺杂含量可以调节 β 相的稳

定性和变形机制, 提供了一种灵活的手段来协同增强合金的强度和塑性, 用于制造高性能的 TWIP/TRIP 亚稳态 β -Ti 合金。

C05-22

固溶态 TB18 钛合金室温拉伸性能及变形机理

郭金虹^{*1}、赵乙秋²、朱明湘¹、杨浩¹、寇宏超¹

1. 西北工业大学凝固技术国家重点实验室

2. 西北工业大学材料学院

高强亚稳 β 钛合金的力学性能和变形行为不仅与析出 α 相的特征有关, 还受到残余 β 基体变形机制的影响。根据 β 相的稳定性和变形参数的不同, β 基体可发生位错滑移、应力诱导相变、变形孪晶以及扭折带等多种变形机制, 其之间的相互作用可显著协调强度-塑性关系。基于此, 本研究以 TB18 钛合金棒材为对象, 通过控制固溶温度和时间从而控制 β 基体尺寸和稳定性, 探讨 β 基体的变形机理。结果表明, TB18 钛合金在 830°C 和 850°C (β 单相区) 固溶后, β 晶粒尺寸在 120~200nm 范围内, 在 750°C 和 770°C ($(\alpha+\beta)$ 两相区) 固溶后保留了 4~8% 左右的等轴 α 相, 室温拉伸屈服强度 (790MPa 左右) 对固溶温度不敏感, 但延伸率则在较大范围内 (25~40%) 变化, 变形过程中 β 晶粒内除大量的滑移带外, 还出现了扭折带结构, 延伸率与扭折带的数量 (或密度) 正相关。进一步分析表明, 扭折带是由变形过程中受阻的位错对形成的, 当晶体的取向不利于滑移或者孪晶产生时, 或者在变形过程中受到了某些外界条件的约束时, 局部不均匀塑性变形导致产生扭折带。本工作对进一步理解亚稳 β 钛合金的变形机理, 优化热处理工艺、实现高强度与塑韧性的匹配具有一定的参考价值。

C05-23

Ti-5321 合金疲劳裂纹扩展速率研究

王欢*

西北有色金属研究院

新型高强韧 Ti-5Al-3Mo-3V-2Zr-2Cr-1Nb-1Fe (Ti-5321) 合金是应我国新一代飞机对高性能钛合金的需求, 设计和开发的一种新型高强韧损伤容限型钛合金。研究新型高强韧钛合金疲劳损伤行为的显微组织控制因素, 揭示高强韧钛合金损伤容限机理是钛合金工程应用面临的关键科学问题。本文以 Ti-5321 合金为研究对象, 构造了等轴组织和网篮组织, 通过 OM、SEM 及 EBSD 等表征手段, 开展了疲劳裂纹扩展行为方面的研究, 研究高强韧钛合金损伤行为的显微组织控制因素、揭示高强韧钛合金损伤容限机理、为材料的损伤容限设计提供可靠的数据。

C05-24

基于特定取向模量法的 TWIP 型 Ti-V 系合金成分设计

姜宇龙, 闵小华*

大连理工大学

具有 $\{332\}<113>$ 孪生诱发塑性 (TWIP) 效应的亚稳 β 型钛合金呈现出高的强塑积和冲击功, 设计兼具强韧性的新型 TWIP 型钛合金逐渐成为研究热点。然而, 传统的经验试错法设计合金效率低下, 其缺陷在于没有建立合金设计参数同相组成与变形方式之间的联系, 而热诱发的亚稳相变机制和应力诱发的塑性变形机制及两者相互之间的关联主要是 β 相中特定取向上原子的剪切、重组或塌陷的难易程度。亚稳 β 钛合金中, α'' 马氏体相变的剪切和重组过程分别与杨氏模量 (E_{100}) 和四方剪切模量 (C') 有关; ω 相变的塌陷过程与剪切模量 (G_{111}) 有关; $\{332\}<113>$ 孪生的重组过程与四方剪切模量 (C') 有关。依托这些特定取向模量参数, 参考二元 TWIP 型合金 Ti-22V, 设计了一系列 Ti-V-(Fe, Cr, Nb, Al) 多元合金, 以检验是否可以通过特定取向模量参数建立 Ti-V 系合金成分同相组成和变形方式之间的联系, 并指导合金设计。采用 OM、TEM、XRD、EBSD 等实验方法对合金的固溶组织和变形组织进行表征, 通过拉伸试验进行力学性能测试。结果表明: 所设计的多组元 Ti-V 系合金的固溶组织均为 β 相和三方结构的无热 ω 相; 合金的主要变形方式均

为{332}<113>孪生, 即均具有 TWIP 效应。所设计的合金兼具良好的强度和塑性, 相比 Ti-22V 合金表现出更优异的力学性能, 一方面加入了固溶强化效果显著的 Fe、Cr 和 Al 元素, 合金的屈服强度显著提升; 另一方面, 变形过程中产生的{332}<113>孪晶使得有效晶粒尺寸动态减少, 应力集中减少, 从而延迟颈缩。所设计的 TWIP 型 Ti-V 系合金的固溶组织和塑性变形方式体现了特定取向模量法在设计合金方面的合理性, 可以使用特定取向模量参数指导合金设计。

C05-25

Influence of pre-strain on phase transformations and microstructures in near β Ti alloy during aging

Bo Song^{*1}, Wenlong Xiao², Chaoli Ma², Lian Zhou^{2*}

1. Liaocheng University

2. Beihang University

The influence of pre-strain on phase transformations, microstructures and hardening response in near β Ti alloy Ti-5Al-3Mo-3V-2Cr-2Zr-1Nb-1Fe (wt.%) during aging treatment is studied in this work. The results showed that obvious α phase refinement and stronger age hardening effect can be achieved when slightly deformed before aging treatment. Because the intermediate phases (O' , ω and O'') formation suppressed long-range stress induced martensitic transformation and mechanical twinning, the samples are mainly deformed via dislocations slipping during loading. Numbers of crystal defects are generated during pre-deformation. With the pre-strain increasing, the number density of dislocations increases gradually. These crystal defects generated by pre-deformation will partly annihilate upon early aging, but the precipitation of α is also be promoted and results in refined α precipitates. In the sample pre-strained to 5 %, the average thickness of α precipitates is decreased by 57 % during aging at 600 oC than the unstrained sample, and the number density is increased from 7.0 ± 1 laths/ μm^2 to 22.0 ± 3 laths/ μm^2 . Some platelet-shaped α are formed when the samples experience comparably large pre-strains, i.e. 12 % and 20 %. It proves clearly that the refined α precipitates and higher hardening effect can be obtained by pre-deformation plus aging treatment in titanium alloy.

C05-26

新型高性能亚稳 β 钛合金的组织调控及强韧化机理研究

肖文龙*

北京航空航天大学

高性能亚稳钛合金是极其重要的轻质结构材料,它具有比强度高、耐蚀性强、高低温性能良好、弹性模量低等特点,在航空、航天、航海,以及化工医疗等领域有着非常重要的应用价值和广阔的应用前景。但高强亚稳 β 钛合金仍需要克服强塑性倒置的瓶颈,并且在实际应用过程中通常还需要承受动态冲击载荷,因此高性能的亚稳 β 钛合金应实现强度-塑性-冲击韧性之间的良好匹配。本文基于前期开发的新型亚稳 β 钛合金,通过热处理调控,分别获得了 $\alpha+\beta$ 两相全等轴组织和片层组织,重点研究了两种组织的强度-塑性-冲击韧性之间的相互匹配及变形机制,研究结果显示全等轴组织的屈服强度,延伸率,冲击韧性分别为 987 MPa, 38.5%, 119.2 J/cm², 片层组织的屈服强度,延伸率,冲击韧性分别为 811MPa, 27.6%, 107.9J /cm², 两种组织表现出的综合力学性能均优于目前报道的 $\alpha+\beta$ 两相钛合金以及亚稳 β 钛合金。合金在拉伸载荷和冲击载荷下展现出不同的变形行为,拉应力作用下产生了应力诱发梯度纳米孪晶({332}<113>、{112}<111>)表现出良好的塑性和加工硬化能力,而冲击载荷下 β 相的应力诱发梯度孪晶、扭转, α 相的变形扭折、剧烈塑性变形使合金展现出强的抗冲击变形能力。新型合金的组织调控及强韧化机理的研究结果,拓宽了高性能亚稳 β 钛合金的研究思路。

C05-27

Ti-6Al-4V 合金中的 $\beta \rightarrow \alpha\text{m} \rightarrow \alpha+\beta$ 连续相变研究

杨义^{*1}、胡嘉南²

1. 上海理工大学

2. 中国科学院金属研究所

在传统制造的钛合金和 3D 打印的钛合金中均发现了 $\beta \rightarrow \alpha m$ 块状相变, 越来越多的研究给予关注, 然而块状 αm 的分解机制仍不清晰。研究了 Ti-6Al-4V 合金在冷却过程中的 $\beta \rightarrow \alpha m \rightarrow \alpha + \beta$ 连续相变, 发现在中等冷速下发生块状相变, 形成不规则的 αm , β 稳定元素过饱和的 αm 在热力学上不稳定, 在继续冷却过程中倾向于分解。热应力首先造成 αm 中形成大量位错将 αm 分割, 伴随着元素的扩散和再分布, 位错列处富集 β 稳定元素, 最终转变为 β 相, 形成超细的 $\alpha + \beta$ 结构, $\beta \rightarrow \alpha m \rightarrow \alpha + \beta$ 连续相变过程中两相始终遵循 Burgers 取向关系。

C05-28

V 元素对 Ti-6Al-4V 合金相变影响的原位研究

侯祎*

西北工业大学材料学院

本文以激光立体成形 Ti-6Al-4V 合金为对象, 通过原位加热电镜研究了沉积态合金在升温过程中的组织演变规律, 重点分析了 V 元素在其中的作用。结果显示: 沉积态样品中三种变体占优, α 板条间 V 元素聚集且存在纳米级 β 相; 在加热过程中板条融合、变体合并, 微观上 β 被 α 吞并、小变体被大变体吞并, 900 °C 时发生变体破碎和转动, 出现中间相, 形貌上形成约 700 nm 的起伏; 保温后析出 β 孪晶并形成新的变体类型, β 内部析出 ω 相和次生 α 相。研究发现, V 元素在加热前后有明显的扩散现象, 因此推断加热过程中 V 元素的聚集促进了新变体的形成和 β 相的析出。

C05-29

基于成分设计探究 Cr 和 Nb 对含 Mn 的 β 凝固 γ -TiAl 合金的相变路径的影响张孟祥¹, 薛鹏*², 陈波², 李小兵², 王向杰¹, 刘奎²

1. 东北大学 材料科学与工程学院

2. 季华实验室 材料与科学技术研究部

γ -TiAl 金属间化合物具有低密度、高比强度、抗氧化性优异等诸多优点, 但其变形能力较差, 近年新发展的 β 凝固 γ -TiAl 利用在 β 单相区析出等轴 α 相来提升高温变形能力, 具有热加工性优异、成分偏析小的特性。在 Ti43.5Al1.5Mn 合金基础上, 本文首先利用 Pandat 热力学软件计算了不同的 Cr 和 Nb 添加量对该合金凝固路径和相组成的影响, 通过成分优化出热加工性较好、 β 单相区较宽的 Ti43.5Al1.5Mn1Cr2Nb(at.%) 合金。然后对优化的合金开展了水淬实验, 通过差示扫描量热法(DSC)、电子探针 - 背散射电子 (EPMA-BSE) 和 X 射线衍射 (XRD) 探明了合金的相变路径为 $L \rightarrow L + \beta \rightarrow \beta \rightarrow \beta + \alpha \rightarrow \alpha \rightarrow \alpha + \gamma \rightarrow \beta + \alpha + \gamma \rightarrow \beta + \gamma \rightarrow \beta + \alpha + 2\gamma$, 确定出 β 相转变温度(T_β)、 γ 相溶解温度($T_{\gamma\text{-solv}}$)和共析转变温度(T_{eut})。理论计算和实验结果表明 Cr 和 Nb 的添加提高了 TiAl 合金铸态组织中 β 相含量, 且 Cr 的 β 相稳定作用强于 Nb 元素。本文的研究结果为含 Cr 和 Nb 的 β 凝固 γ -TiAl 合金的组织 and 性能调控奠定理论基础。

C05-30

应力诱发马氏体相变对 Ti-Mo 基亚稳态 β 钛合金应变硬化行为的显著贡献

陈初阳, 芦晨曦, 杨秀静, 景家瑞, 黄欣, 李金山, 赖敏杰*

西北工业大学

亚稳态 β 钛合金因具有高比强度、优异耐腐蚀性和显著的析出硬化能力, 在航空航天领域备受重视。近年来, 该类合金中 β 基体的相稳定性与其塑性变形机制之间的关系获得了广泛关注。当稳定性很低时, 除位错滑移外, $\{332\} \langle 113 \rangle \beta$ 变形孪晶和应力诱发 $\beta \rightarrow \alpha''$ 马氏体相变 (SIMT) 也会被激活, 并分别激发孪晶诱导塑性 (TWIP) 和相变诱导塑性 (TRIP) 效应, 从而能提高应变硬化能力和塑性。在大多数亚稳 β 钛合金中, SIMT 与 $\{332\} \langle 113 \rangle \beta$ 孪晶同时产生, 因此很难评估各自对应应变硬化行为的单独贡献。本工作

以 Ti-11Mo(wt.%)模型合金为研究对象,探讨了 SIMT 对 Ti-Mo 基亚稳态 β 钛合金应变硬化行为的影响。结果表明,该合金具有出色的应变硬化能力,在塑性变形的早期阶段,合金内部已出现 $\{332\}<113>\beta$ 孪晶和应力诱发 α'' 马氏体,且在各个应变下,应力诱发 α'' 马氏体的体积分数均远高于 $\{332\}<113>\beta$ 孪晶,表明其出色的应变硬化能力主要来自于 SIMT 和位错滑移的贡献。另外,该合金在 SIMT 过程中产生了很大的转变应变,使其应力诱发 α'' 马氏体可以有效阻碍位错运动。在变形过程中,动态产生的应力诱发 α'' 马氏体一方面能降低位错平均自由程(动态霍尔佩奇效应),另一方面还能促进位错存储,从而造成加工硬化能力的显著提高。

C05-31

间隙 O 元素对 Ti-Mo 合金亚稳相变和变形方式影响机制

任诚、闵小华*

大连理工大学

O 元素的加入会影响亚稳 β 钛合金中的热诱发相变行为和塑性变形方式,在前期研究中发现 Ti-10Mo 合金中加入 0.5%wt.的 O 元素可以使合金的变形方式由应力诱发 α'' 马氏体相变和 $\{332\}<113>$ 孪生转变为位错滑移。然而, O 元素的加入对热诱发相变行为和变形方式转变的影响机制尚不清楚。因此,本研究通过在 β 相 54 原子超胞中构建 3Mo 和 3Mo-1O 团簇结构模型,分别对应 Ti-10Mo 和 Ti-10Mo-0.5O 合金。通过第一性原理计算分析 O 元素对 β 相结构稳定性及特定取向模量的影响,讨论 O 元素对热诱发相变和变形方式的影响机制,并通过 TEM、EBSD 等技术观察合金的固溶态组织及变形组织以验证结论。结果表明, O 倾向于占据 β 相中的八面体间隙,其加入使 Mo 原子和 Ti 原子的低能级电子参与成键,增加了合金的成键电子数,从而导致 β 相的稳定性提高。同时,通过差分电荷密度计算发现, O 元素的加入导致合金沿 $<100>\beta$ 方向形成了较强的 Mo-O 键和 Ti-O 键,并增强了沿 $<111>\beta$ 和 $<110>\beta$ 方向的 Ti-Ti 键。这导致了合金的特定取向模量 E100、C'、G111 和 G113 的升高。其中, G111 的升高抑制了合金中热诱发 ω 相变的塌陷过程, C' 和 E100 的升高抑制了应力诱发 α'' 马氏体相变的剪切和重组过程, C' 和 G113 的升高抑制了 $\{332\}<113>$ 孪生的剪切和重组过程。这导致了合金中热诱发 ω 相数量的减少并且使合金的变形方式从应力诱发 α'' 马氏体相变和 $\{332\}<113>$ 孪生向位错滑移转变。

C05-32

Achieving strength and ductility synergy via compositionally-modulated microstructure in a spinodal decomposition Ti-Nb-based titanium alloy

Delun Gong, Yulin Hao*

Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences

Strength and ductility are vital mechanical properties of solid materials but generally demonstrate a mutually exclusive relationship. Here reports that this conflict can be defeated by a compositionally-modulated dual-phase microstructure in a Ti-Nb-based spinodal decomposition titanium alloy. Aging treatment at 748 K for 4 hours leads to a microstructural transition from a nanoscale sponge-like Nb-modulated microstructure of single β phase to a high-density plate-like modulated microstructure consisting of Nb-lean α'' phase and Nb-rich β matrix phase. This results in approximately a 50% increase in yield strength but no loss in ductility. These findings suggest that this Nb-modulated $\alpha''+\beta$ dual-phase microstructure has the merit of balancing high strength and good ductility in comparison with the conventional $\alpha+\beta$ dual-phase microstructure, offering great potential for the microstructural design in developing strong yet ductile titanium alloys.

C05-33

钛合金 VAR 熔炼过程宏观偏析缺陷形成的数值模拟研究

曹江海*, 戴毅, 李维, 侯智敏

西部钛业有限责任公司

宏观偏析是钛合金铸锭真空自耗电弧熔炼 (Vacuum arc Remelting, VAR) 中形成的一种典型缺陷, 也是钢或镍基高温合金大型铸锭均质化问题的重点研究内容。本研究以 TC17 等合金为例, 通过数值模拟方法对 VAR 熔炼过程展开研究, 探讨了熔炼电流、磁场搅拌强度及搅拌周期对温度场、流场、溶质场, 以及最终元素宏观偏析的影响。结果表明, VAR 熔炼钛合金时, 随着熔炼过程的进行熔池形状由“扁平状”逐渐向“V 形”转变。同时, 熔炼电流产生的洛伦兹力使熔体沿逆时针方向流动, 且熔炼电流越大, 熔体流动更剧烈, 铸锭中心和冒口处出现更为严重的宏观偏析。搅拌磁场产生的洛伦兹力作用于整个熔池, 不仅促进了熔池上部熔体的流动, 也有利于熔池下部熔体的流动; 为有效控制 VAR 熔炼钛合金时宏观偏析缺陷的产生, 应采取小熔炼电流和合适的搅拌强度。

C05-34

间隙原子介导的超高强钛合金组织结构设计 with 强韧化

Jinyu Zhang*, Hang Zhang

Xi'an Jiaotong University

In conventional duplex titanium (Ti) alloys, the soft primary α -precipitates (α_p) are beneficial to ductility with the loss of high yield strength, while the continuous α -precipitates at grain boundaries (GBs, α GBs) often accompanied with α precipitate-free zones (α -PFZs) renders the strain incompatibility for limited ductility. Here, to overcome this longstanding issue, we utilize interstitial (O and N) atoms to notably strengthen the α -phase, and simultaneously architect the multi-morphologic secondary α -precipitates (α_s) so as to improve the strain compatibility nearby GBs, thus develop a Ti-4.1Al-2.5Zr-2.5Cr-6.8Mo (wt.%) alloy with ultra-high yield strength of ~ 1580 MPa and good ductility of $\sim 8.2\%$. The phase boundaries between the hard α -precipitates and the soft β -matrix not only act as dislocation barriers for strengthening, but also as sustainable dislocation sources for ductilizing to achieve a good combination of strength and ductility in our Ti alloys. This strategy not only sheds light on the understanding of the strength-ductility synergy of duplex Ti alloys, but also offers an available pathway to design ultra-strong and ductile alloys.

C05-35

基于扭折的亚稳 β 钛合金形变特性及其强塑韧化

陈威*, 李可尔, 张金钰, 孙军

西安交通大学

扭折(deformation kinking)与普通位错滑移、孪生切变和形变诱发相变不同, 是材料中一种不太常见的变形方式。早期人们认为, 低对称晶体结构并由此衍生的强烈变形各向异性是扭折发生的共性材料特征。近年来在对高对称性金属材料, 例如我们研究的体心立方的 Ti-V 亚稳 β 钛合金中亦发现了扭折现象。结果表明, 与低对称结构晶体不同, 亚稳 β 钛合金中扭折带形成经历了扭折胚高度协同的形核长大过程, 同时在后续变形过程中成熟扭折带又显示出本质软性特征, 通过扭折带内快速的结构演化协调了大量应变, 呈现出新颖的变形协调和晶粒细化特点。进一步, 我们发现, 在组织中引入扭折带可同时提高强度、塑性和韧性, 实现合金强塑韧性的协同增加, 由此我们发展了一种新的钛合金强塑韧化策略, 并深入揭示了其内在机理。

C05-36

基于伪调幅分解机制的 β 钛合金异质微观组织设计及力学性能优化郝梦园*¹, 王栋², 张天隆³, 郑雨枫⁴, 王云志⁵

1. 西北有色金属研究院
2. 西安交通大学
3. 香港科技大学

4. 北德克萨斯大学

5. 俄亥俄州立大学

同时提高结构材料的强度和塑性一直是材料科学长期追逐的目标。钛合金作为一种重要的结构材料,因其高的比强度、良好的耐腐蚀性等特性而成为航天航空结构件的关键材料,然而强度与塑性的倒置关系限制了其应用范围。受天然生物材料异质结构的启发,根据相场模拟微观组织指导模型材料设计的思路,提出通过激活不同相变机制设计合金多尺度微观组织的新方法,进而克服钛合金强度和塑性的不匹配效应。以高强钛合金 Ti-55531 为例,通过耦合热力学数据库、相场动力学模型和实验表征,探索不同热处理工艺对合金微观组织和相变机制的影响规律,分别提出双步时效和调控冷速的热处理方案设计多尺度异质微观组织。经典形核长大机制和伪调幅分解机制的耦合是形成多尺度异质微观组织的物理原因。进一步的力学性能测试表明,与传统热处理工艺形成的均匀微观组织相比,多尺度微观组织具有更好的强度与塑性匹配性能。基于相变理论的热处理工艺为通过调控多尺度微观组织优化合金力学性能提供了新思路。

C05-37

低成本 Ti-Al-Cr 合金的塑性变形机制研究

许鑫^{*1,2}, 马巍^{1,2}, 梁泓¹

1. 中山大学

2. 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海)

开发高强度-高塑性的低成本钛合金对于拓展钛合金的应用具有重要意义。在该研究中,设计了低成本 Fe-Al-Cr 三元合金,通过简单的 $\alpha+\beta$ 固溶处理工艺,使合金形成 $\alpha+\beta$ 双相组织,并调控成分分配,从而调控两相的稳定性,最终使合金获得了较高的抗拉强度和加工硬化速率。经微观组织分析, α 和 β 相均处于亚稳状态并在变形过程中发生了相变,其中超细晶 α 板条应变诱发产生面心立方(FCC)相,亚稳 β 相则发生了马氏体相变,塑性变形过程中同时产生的两种相变使 Ti-Al-Cr 合金获得了较高的加工硬化速率,屈服强度可达~970MPa,抗拉强度~1040MPa 和延伸率~12.5%,综合拉伸力学性能优于 Ti-6Al-4V。使 α 相和 β 相同时发生应力/应变诱发相变的合金设计思路,可为新型低成本钛合金的开发提供借鉴与参考。

C05-38

优化 TiAl 合金强度-塑性匹配的微观结构设计策略

郑国明¹、赵嵩宽²、唐斌^{*2}、辛社伟¹、李金山²

1. 西北有色金属研究院

2. 西北工业大学

TiAl 合金是目前发现的唯一可在温度区间 650-900 °C 内替代更重的镍基高温合金制备航空航天耐热结构件的轻质候选材料。更轻的重量不仅可降低构件的燃油消耗,还可以提高其工作效率。然而,一直以来,TiAl 合金的强度-塑性匹配并不理想,严重限制了其工程化应用。作者团队发明了三种微观结构,分别为纳米全片层组织、新型三相三态(Three-phase Tri-modal,简称 T-T)和新型蜂窝壳结构,发现他们很好的优化了 TiAl 合金从室温到最大服役温度范围内的强度-塑性,并对此现象背后的强塑化机制进行了深入分析,获得的结论如下:

(1) 当 TiAl 合金的片层间距降低到纳米级时,位错滑动和机械孪生被完全抑制,片层组织主要通过平行于片层边界的长程有序堆垛(Long-period stacking ordering,简称 LPSO)结构进行变形,LPSO 结构对 TiAl 合金片层组织的室温强度-塑性基本无影响,可明显提高合金在 700 °C 的高度强度,当拉伸温度达到 750 °C 时,会形成成片的 LPSO 变形带,致使合金在不降低屈服强度的同时,塑性提高 4 倍。

(2) 新型 T-T 结构耦合了孪生诱导塑性(Twinning induced plasticity,简称 TWIP)效应和背应力强化效应,其从室温到 750 °C 范围内的屈服强度相比纳米全片层组织提高 18% 以上,同时延展性提高 2 倍以上。

(3) 与粉末冶金获得的等轴近 γ 组织相比,新型蜂窝壳结构在不降低室温塑性的情况下,提高了 TiAl

合金的室温和高温强度，同时将抗蠕变速率降低了约 5 倍，背后的变形机制尚待进一步研究。

因此，三种微观结构的发明为优化 TiAl 合金的强度-塑性匹配提供了新思路，促进了 TiAl 合金在航空航天飞行器耐高温部件中的应用。

C05-39

不同冷却速率下 Ti₂AlNb 合金的凝固行为与微观结构调控研究

杨林, 卜志强, 李金富*

上海交通大学

本研究探讨了 Ti₂AlNb 基合金的凝固行为及其对微观结构和性能的影响。通过改变冷却速率，研究了合金的显微组织变化，发现冷却速率的降低导致枝晶尺寸增大和元素偏聚现象加剧。利用 X 射线衍射、电子衍射和能谱分析等技术，揭示了不同冷却速率下合金的凝固路径和元素分布特征。研究结果表明，通过调节凝固条件，可以有效改善 Ti₂AlNb 合金的显微组织，进而提高其综合性能，为合金的应用提供了理论依据和技术支持。

C05-40

通过增材制造调控生物功能钛合金析出相取向制备高性能涂层

毛雅梅¹、赵秦阳*¹、陈永楠¹、赵永庆^{1,2}

1. 长安大学

2. 西北有色金属研究院

为了在生物功能钛合金上制备具有优异耐磨和抗菌活性的高性能微弧氧化涂层，采用增材制造(AM)技术制备了 Ti-Cu 合金。由于晶面取向的原子致密度高低会影响合金的功函数的大小，从而控制合金在膜层制备过程中的功能离子释放程度，最终影响原位合成的 PEO 涂层中功能元素的含量。因此，通过增材制造技术控制析出相取向以低密排面为主，以促进 PEO 过程中 Cu 离子的释放。与 Ti₂Cu-(103)取向的铸锭冶金(IM) Ti-Cu 合金相比，Ti₂Cu-(110)取向的 AM-Ti-Cu 合金由于其低原子紧密堆积，具有较低的功函数和较差的耐腐蚀性。促进了微弧氧化过程中铜离子的释放，促进 Cu 价电子从 4s 能级逸出，形成高含量的氧化铜(CuO)。经过 PEO 处理后，AM-PEO 涂层比 IM-PEO 涂层(3.6 wt%)含有更多的 CuO (44.44 wt%)，从而具有更好的耐腐蚀性和更低的摩擦系数(AM-PEO 为 0.13, IM-PEO 为 0.34)。AM-PEO 涂层的抗菌效果达到 99.62%。本研究强调了增材制造工艺中调节析出相取向的优势，这是一种有效制备功能性合金 PEO 涂层的创新方法，为钛合金的应用领域扩展将起到一定的促进作用。

C05-41

一种双态组织的高强度 Ti-Ru 合金中应变强化机理研究

张先兵*, 何西, 何斌斌

南方科技大学

钌(Ru)通常被添加到钛(Ti)合金中以提高其耐腐蚀性能。结合 Ru 金属本身的高硬度，利用 Ru 作为合金元素有望得到耐腐蚀且高强度的 Ti-Ru 合金。然而，关于 Ti-Ru 合金的力学性能和变形机制的认识仍然存在不足。本研究制备了一种新型的 Ti-Ru 合金，并进行了包括均匀化处理、热轧、固溶处理和水淬在内的热机械处理。电子背散射衍射(EBSD)和透射电子显微镜(TEM)研究表明，所得到的 Ti-Ru 合金具有双态微观结构，包括由 α' 马氏体和残留 β 相构成的“基体”，以及嵌入其中的初生 α 相(α P)块。 α P 块和 α' 马氏体均与残留 β 相保持经典的伯格取向关系。纳米压痕试验结果表明， α P 块的硬度高于 $\alpha'+\beta$ “基体”区域。室温拉伸试验得到 Ti-Ru 合金优异的机械性能，包括 98 GPa 的杨氏模量、987 MPa 的屈服强度，而显著的应变强化使得抗拉强度和均匀延伸率分别达到了 1237 MPa 和 5.7%。该 Ti-Ru 合金的高强度归因于细化的 $\beta+\alpha'$ 结构以及 α P 块中 Ru 元素的固溶强化。此外， α P 块内的 $\langle a \rangle$ 和 $\langle c \rangle$ 型位错的缠结作用，以及残留 β 相中变形诱导 α' 和 α'' 马氏体带来的相变诱导塑性(TRIP)效应，共同贡献了 Ti-Ru 合金中显著的应变硬化。本研究通过对一种 Ti-Ru 合金的微观组织、力学性能和变形机理研究，揭示了这种 Ti-Ru

合金结构和力学性能的稳定性，结论有助于指导探索高强度 Ti-Ru 合金的设计和应用。

C05-42

航发增材制造 600℃高温钛合金研究与发展

弭光宝*

中国航发北京航空材料研究院

新一代先进航空发动机的快速发展对新型 600℃高温钛合金及高性能制造提出迫切需求。增材制造拥有材料设计-制造一体化、复杂设计-定制一体化等独特优势，为 600℃高温钛合金新材料/新技术研发提供了有效途径。报告首先简要回顾 600℃高温钛合金材料及应用技术研究，其次重点介绍不同增材制造工艺下 600℃高温钛合金沉积态和后处理态的微观组织特点；在综合性能研究方面，列举并分析拉伸性能、蠕变性能和抗氧化性能等关键性能；在复杂设计/复合结构方面，涉及以 600℃高温钛合金为基体的复合材料和梯度结构等研究内容；最后对增材制造 600℃高温钛合金一体化技术探索、关键性能评价标准建立等技术方向进行了展望。

C05-43

亚稳 β 钛合金极低温变形行为

辛社伟*

西北有色金属研究院 钛合金研究所

钛合金可以在 20K 的极低温度下保持良好塑性，使其成为极少数适用于液体氢氧火箭发动机液氢系统的关键材料。从各国对极低温钛合金的研究和应用来看， α 型合金是目前在 20K 下应用最为广泛的合金，然而 α 型钛合金强度低，限制了其应用。为了提高合金强度，就必须引入 β 相，而有关 β 钛合金极低温变形机理的相关研究很少。基于此，本文以孪生型亚稳 β Ti-Mo 系合金为研究对象，研究了典型 Mo 当量合金 20K 准静态拉伸变形行为，对比分析了不同合金力学性能、断裂行为、屈服特征和变形机制，揭示了孪生、位错极低温交互变形机理与合金成分的依赖关系，为该类合金在航天液体火箭发动机应用提供基础指导。

C05-44

难熔高熵钛合金屈服强度的机器学习的预测与实验

丁书剑，张逸凡，翁祥，任卫，王伟丽*

西北工业大学 物理科学与技术学院

难熔高熵合金易于形成的简单固溶体，具有高温下强度好、硬度高、抗氧化性强等特点，被广泛用于诸多高温领域，因此成为近年来研究的热点。但难熔高熵合金常温下韧性低等问题，阻碍了其进一步应用。由于高熵合金的设计空间广阔，传统的实验法效率低、成本高，因此急需一种高效开发难熔高熵合金的方法。

随着人工智能的发展，机器学习在材料研究中得到了广泛应用。据此，本研究提出了一种基于 LightGBM 算法的高熵合金屈服强度预测模型。通过多种特征筛选方法，将 T、D.B、 μ 、Smix、Gmix 和 r 的特征识别为最优特征集。该模型具有较好的预测效果，测试集的决定系数(R²)为 0.9605，均方根误差(RMSE)为 111.99 MPa。额外的难熔高熵合金样本验证了模型的泛化性。通过 SHAP 等方法分析了特征对屈服强度的影响，并设计了一个新的具有优良屈服强度的 RHEAs 的设计策略。根据该框架，制备了 TiTaNbHfNi_{0.25} 和 TiTaNbHfNi_{0.5} 两种新型铸态难熔高熵合金。XRD 和 SEM 结果表明合金具有两种 BCC 相，呈现柱状晶形貌。枝晶为富 Nb-Ta 的 BCC1 相，枝晶间组织为富 Ni-Hf-Ti 的 BCC2 相。其室温屈服强度分别为 1230 和 1311 MPa，预测误差仅为 6.3%和 3.7%。同时 TiTaNbHfNi_{0.25} 和 TiTaNbHfNi_{0.5} 在室温下的压缩断裂强度为 2224 和 1582 MPa，最大应变为 47.5%和 21.7%。以上验证证明了本框架的精度和泛化性，以及该设计策略的有效性。

C05-45

深冷处理对 Ti55531 合金组织和性能的影响

刘志, 邓同生*

江西理工大学

采用液氮制冷法对近 β 型 Ti-5Al-5Mo-5V-3Cr-1Zr (Ti55531) 合金进行深冷处理, 利用扫描电镜(SEM)、电子背散射衍射(EBSD)、X 射线衍射(XRD)以及透射电镜(TEM)等分析测试方法对显微组织进行表征。研究表明, DCT8h 时试样的显微硬度、抗拉强度和伸长率相较未处理的试样分别提高了 44.3HV3、81MPa 和 8.0%。所以在深冷时间为 8h 时, 合金达到最佳性能, 显微组织分析表明, 深冷处理细化了晶粒尺寸, 增加位错密度, 促进了 β 相向 α 相的转变, 从而提高 α 相含量。深冷后板条状 α 相由垂直态转变为平行态并且 α 相平均宽度降低, 同时深冷导致织构强度得到削弱, 提高合金各向均匀性。深冷后的变化归因于在深低温下的冷压缩力使得合金体积以及晶格发生收缩, 从而产生内应力导致晶粒发生偏转。

C05-46

新型海洋工程用钛合金微织构对组织球化及力学性能的影响

凡盼盼、樊江昆*、寇宏超、李金山

西北工业大学 凝固技术国家重点实验室

以新型高强海洋工程钛合金为对象, 基于单向和交叉轧制工艺得到了具有不同微织构板材, 阐明了不同取向微织构对组织静态球化和力学性能的影响规律, 并揭示了合金板材微观变形机理。研究结果发现静态球化机制为边界分裂, 该过程和位错运动密切相关, 由于微织构中相邻 α 相的取向相近, 导致热处理时微织构中的组织难以球化, 微织构的取向基本保持不变, 其尺寸发生变化。单向轧制退火板材形成的 (0001)//TD 微织构使其力学性能具有明显的各向异性, 主要原因为(0001)//TD 微织构沿 RD、TD 拉伸时变形机制的差异, RD 拉伸时以柱面滑移系为主, 而 TD 以锥面-II 滑移系和孪晶为主。交叉轧制板材形成两种不同取向的微织构, 受微织构不同取向以及变形不相容性影响, 裂纹倾向于在两种微织构边界萌生, 并沿着微织构长度方向快速扩展, 导致交叉轧制退火板材的室温塑性具有一定的离散性, 样品中微织构分布面积越多其塑性越差。

C05-47

Ti7333 合金多层次 α 组织特征及强塑性机理

杨浩*, 朱明湘, 谢偲偲, 汪国栋, 李金山, 寇宏超

西北工业大学

Ti1023、Ti5553 等亚稳 β 钛合金已广泛用于制造飞机起落架等主承力构件, 其优异的力学性能主要来源于次生 α 相的显著强化和残余 β 基体的塑性变形, 通过调整 α 相的尺寸、形貌等可以将强度提升至 1400MPa 以上, 但也伴随着塑性和韧性的显著降低。近年来, 构造异质结构和多层次组织成为金属材料打破强度-塑性倒置关系的有效方法。基于此, 本文以 Ti-7333 (Ti-7Mo-3Nb-3Cr-3Al) 为对象, 通过轧制和热处理相结合的方法调控 β 基体上的缺陷种类及分布, 进一步时效获得多层次 α 组织, 分析其拉伸性能及变形机理。结果表明: 轧制+部分再结晶后 Ti-7333 合金形成由等轴 β 晶粒、变形片层晶粒和大量亚晶交替分布的异质片层 β 结构, 其中变形片层晶粒区域含有大量亚晶界和存储位错; 进一步时效后, 等轴 β 晶粒中析出微米级片层 α_1 相, 晶界上形成晶界 α_{GB} 相和晶界魏氏组织 α_{WGB} , 而变形片层晶粒中含有少量等轴 α_p 相和大量细密分布的纳米级 α_s 相, 整体形成多层次 α 组织, 此时屈服强度、抗拉强度和延伸率分别为 1360MPa、1430MPa 和 8%, 表现出良好的室温强塑性匹配。变形过程中, 多层次 α 组织一方面和位错具有极强的交互作用, 分割 β 基体阻碍位错滑移使得合金具有较高的强度, 另一方面有利于变形过程中的应变分配, 促进了大应变下微米级 α 相的变形, 避免过早在界面处失效, 保证合金在高强度条件一下具有一定塑性。本文研究提供了一种适用于多型钛合金构造多层次组织的思路, 对实现亚稳 β 钛合金强塑性匹配、优化合金及锻件制备工艺具有一定意义。

C05-48

间隙氧原子对 Ti5321 合金力学性能和变形行为的影响

姜文涛, 肖文龙*, 高月, 杨昌一, 马朝利, 赵新青

北京航空航天大学

为了克服传统亚稳 β 钛合金屈服强度低, 导致应用范围受到极大限制这一瓶颈问题。本文基于 Ti-5321 高强亚稳 β 钛合金, 通过间隙氧原子掺杂和微观组织调控, 成功制备了含 0.35 wt% 间隙氧元素的 Ti-5321-O 等轴双相钛合金。研究表明, 氧元素掺杂的 Ti5321-O 合金热轧后在 $\alpha+\beta$ 两相区固溶后获得双相全等轴组织, 其表现出良好的强塑性匹配, 屈服强度、抗拉强度和延伸率分别为 1060 MPa, 1100MPa, 23.3%。氧的添加不仅使合金的屈服强度由 720 MPa 提高至 1019 MPa, 同时还保持了良好的塑性, 合金的高屈服强度和塑性匹配优于部分典型的高强亚稳 β -Ti 合金。利用原位同步辐射技术和 TEM 系统研究了 Ti-5321-O 合金在变形过程中的变形行为, 氧强烈的固溶强化效果使合金屈服强度显著提高, β 相内的 $\beta \rightarrow \alpha'' \rightarrow \alpha'$ 顺次诱发相变, 有效的松弛局部应力集中, 强的 $\langle 0001 \rangle_\alpha$ 基面促进 α 相开启 $\langle c+a \rangle$ 滑移, 两者共同使合金保持良好塑性。该结果为后续利用氧元素的间隙固溶强化作用开发新型高强韧性钛合金提供了新的思路。

C05-49

热循环过程中 Ti2Cu 相粗化机制的动态竞争

耿纪华¹, 王楠¹, 毛雅梅¹, 陈永楠^{*1}, 侯志敏², 赵秦阳¹, 张勇¹, 欧阳文博², 朱丽霞³, 赵永庆⁴

1. 长安大学

2. 西部钛业有限责任公司

3. 中国石油集团工程材料研究院有限公司

4. 西北有色金属研究院

在多相金属材料中, 粗化机制之间的动态竞争激活了析出相的各种粗化行为, 导致合金不同的力学性能。本文研究了 Ti-14Cu 合金中 Ti2Cu 相在 200 ~ 600 °C 热循环过程中的形态演变和粗化动力学。我们的结果表明, 粗化动力学从 Lifshitz-Slyozov-Wagner (LSW) 机制逐渐过渡到跨界面扩散控制(TIDC)机制。在低温(200 ~ 400 °C)下, LSW 机制主导 Ti2Cu 相的粗化行为, 其在 α -Ti 基体的三重结点处不连续析出并沿高能晶界生长成片状。在较高温度(400 ~ 600 °C)下, TIDC 机制主导 Ti2Cu 相的粗化行为, 低角度晶界加速了粗化过程中溶质原子的扩散, 从而导致了片层的边界分裂。另外, 块状 Ti2Cu 相的高固溶强化提高了合金的屈服强度。这项工作为研究钛铜合金的粗化机制提供了一个清晰的认识, 可以为热加工工艺设计提高钛铜合金的损伤容限提供理论依据。

C05-50

固溶时效 Ti575 合金的室温拉伸性能及位错滑移行为

谢偲偲*, 杨浩, 宋雨晴, 朱明湘, 寇宏超

西北工业大学凝固技术国家重点实验室

($\alpha+\beta$)两相钛合金因具有优异的综合性能而在航空航天等领域得到广泛应用, 采用固溶时效等热处理工艺可在较宽范围内调控其力学性能, 变形机理及其工艺-组织-性能关系一直是钛合金材料领域关注的重点。本文研究了 Ti575 合金(名义成分 Ti-5.3Al-7.7V-0.25Fe-0.5Si-0.18O)固溶时效过程中片层 α 相的析出行为, 探讨了合金拉伸性能与显微组织的关联并分析了强化机理。结果表明: Ti575 合金经 850°C/30min/AC 固溶处理后, 获得由等轴 α 相、片层 α 相以及残余 β 相组成的显微组织, 其中, 片层 α 相的宽度约为 $0.35 \pm 0.23 \mu\text{m}$, β 相的体积分数约为 10.5%, 合金屈服强度、抗拉强度和断裂应变分别为 1010MPa、1110MPa 和 13.0%。合金经过 850°C/30min/AC+500°C/8h/AC 固溶时效处理后, 其显微组织组成依然为等轴 α 相、片层 α 相以及残余 β 相, 其中, 等轴 α 相的尺寸和体积分数与固溶态相近, 片层 α 相宽度显著增加, 为 $0.54 \pm 0.17 \mu\text{m}$, β 相体积分数显著减少, 为 3.7%, 合金屈服强度、抗拉强度和断裂应变分别为 1078MPa、1170Pa 和 11.8%, 与固溶态相比, 强度和塑性没有发生显著改变。对固溶态和时效态合金不同应变量的变形组织进行表征发

现, 两种状态下合金的变形都由等轴 α 相的位错滑移所主导, 且位错组态类似; 变形前期, 等轴 α 相内 $\langle c \rangle$ 类位错和 $\langle a \rangle$ 类位错占主导, 随着应变量增加, $\langle c+a \rangle$ 类位错增多, 平面滑移特征逐渐显著。时效态合金的等轴 α 相内存在许多亚晶界, 能有效阻碍位错滑移, 固溶态合金中虽然也存在亚晶界, 但数量较少。尽管时效处理促进了片层 α 相的析出, 但合金的变形主要依赖于等轴 α 相, 时效强化效果不显著。

C05-51

微观组织对 Ti60 高温钛合金超塑性变形行为的影响

秦羽满*, 戴毅, 侯智敏

西部钛业有限责任公司

本文研究微观组织对 $\alpha+\beta$ 两相区轧制的 Ti60 合金薄板超塑性变形行为的影响。通过热处理工艺调控, 使材料呈现不同的微观组织特征, 利用 OM, SEM 和 EBSD 等手段表征微观组织特征。通过测试不同工艺试样在不同温度下的超塑性变形行为, 得到材料组织与超塑性性能之间的匹配关系。结果表明: 对于一次退火的试样, 组织包含大量变形态的初生 α 相和碎化的 α' 相, 表现为等轴组织特征, 与轧制后组织特征相似。在 930°C 拥有最佳的超塑性延伸率, 为 821%。对于双重退火的试样, 组织中包含形状规则的初生 α 相和层片状 α' 相, 呈现双态组织特征。在 960°C 拥有最佳超塑性延伸率, 为 641%。一次退火试样表现出的超塑性性能优于双重退火试样。分析认为, 一次退火未消除轧制过程中产生的畸变组织, 使得材料保留轧制过程中产生的高位错密度, 在高温超塑性试验过程中, 畸变组织发生动态再结晶, 形成大量细小的晶粒, 促进晶界上位错运动, 从而减缓变形过程中裂纹的形核与扩展, 使得材料表现出较优异的延伸率; 而双重退火的试样, 组织已经完全再结晶, 在高温超塑性试验过程中, 仅发生等轴晶粒的长大, 无法形成较多的界面阻碍裂纹的扩展, 从而表现出较低的延伸率。

C05-52

抗冲击钛合金显微组织调控及强韧化机理研究

吴聪*¹, 赵永庆², 周廉²

1. 陕西科技大学

2. 西北有色金属研究院

抗冲击钛合金在动静态载荷下的综合性能, 尤其是强度、塑性和冲击韧性之间的矛盾, 为航空航天、海洋工程及国防领域的材料设计和选材带来了挑战。冲击韧性反映结构材料抵抗瞬时动态冲击载荷的能力, 是应用在航空航天、海洋及武器装备等领域钛合金材料的重要的力学性能指标之一。本文对不同牌号钛合金的冲击韧性进行了研究和综述, 重点探讨了近 α 钛合金、 $\alpha+\beta$ 两相钛合金以及亚稳 β 钛合金中典型组织(等轴组织、双态组织以及片层组织)的强度-塑性-冲击韧性的匹配关系。示波冲击结果表明, 冲击功主要由裂纹萌生功和裂纹扩展功组成, 裂纹萌生功主要消耗于弹性、塑性变形以及裂纹形成, 裂纹扩展功主要消耗于裂纹前沿微观塑性变形及裂纹扩展。不同牌号钛合金冲击韧性与显微组织相关性较大, 位错增殖、形变孪生、扭折、剧烈塑性变形甚至于破碎的动态变形特征是主要塑性变形机制。通过以上研究, 从理论上深入理解抗冲击钛合金的基础变形行为, 为抗冲击组织设计调控及强韧化, 发展高抗冲击钛合金提供坚实的实验依据和理论基础。

C05-53

基于应力诱发 α' 马氏体相变和 ω 相变实现高强塑 TRIP 钛合金的研究

付雨*¹、肖文龙²、赵新青²、马朝利²

1. 四川大学

2. 北京航空航天大学

基于应力诱发马氏体相变设计 TRIP/TWIP 钛合金, 是开发高强塑亚稳 β 钛合金的有效策略。然而, 应力诱发 $\beta \rightarrow \alpha'$ 马氏体(正交结构)相变的低临界应力导致 TRIP/TWIP 钛合金的屈服强度还较低。本研究通过引入应力诱发 $\beta \rightarrow \alpha'$ 马氏体(密排六方, hcp)设计制备了 TRIP 型 Ti-15Nb-5Zr-4Sn-1Fe(简称 Ti-15541)

合金,研究了合金的应力诱发 $\beta \rightarrow \alpha'$ 马氏体相变行为对超高加工硬化率的作用机理,并发现变形时合金的应力诱发 $\beta \rightarrow \alpha'$ 马氏体相变与 ω 相变密切相关。因此,进一步探索研究了利用 ω 相调控应力诱发马氏体相变行为实现兼具高屈服强度和高塑性的 TRIP 型 Ti-15541 合金。结果表明,经过低温短时时效调控 ω 相析出特征,可在大幅提高屈服强度的同时提高塑性,在 TRIP 钛合金中实现了高屈服强度(高于 750 MPa)和塑性的良好匹配。

C05-54

热处理对 SLM-NiTi 合金微观组织和原位腐蚀行为的影响

吴嘉丽、邓运来*

中南大学

NiTi 作为一种医用植入材料,必须具有良好的耐腐蚀性,才能适应人体内复杂的环境。然而,热处理对选择性激光熔化(SLM)制备的 NiTi 合金耐腐蚀性的影响尚不清楚。本工作通过原位腐蚀方法研究了热处理对 SLM-NiTi 合金组织和腐蚀行为的影响。结果表明,在 SLM-NiTi 合金中,腐蚀主要发生在晶界上,这是因为晶界上的高位错密度和能量使它们不稳定。同时,SLM-NiTi 合金经过热处理后,整体耐腐蚀性能得到提高。这种提高是因为 HAGBs 逐渐转变为 LAGBs,应变和位错密度降低。结合电化学测试,发现钝化膜 R_f 增加,合金表面的钝化膜更致密,晶界更稳定。此外,B19'相含量显著增加,并集中分布在 $GOS < 1$ 的晶粒中,在这些晶粒中有更多的能量发生相变,使这些晶粒更容易形成点蚀源,导致更严重的点蚀。该工作为制备高耐蚀性 SLM-NiTi 合金提供了理论依据。

C05-55

He 保护气对 CMT 电弧增材 Ti6Al4V 组织、力学及腐蚀性能的影响

陈振文、梁焱宁、徐程、章晓勇、孔见、王克鸿、彭勇*

南京理工大学

冷金属短路过渡(CMT)电弧增材钛合金具有效率高的优势,适合于大型钛合金装甲构件的增材,但是由于钛合金表面张力大、润湿性差,在增材过程中容易发生阴极漂移,电弧不稳定,使得钛合金构件的成型精度较低。本研究在 CMT 电弧增材 Ti6Al4V 过程中使用的焊接保护气中添加不同比例的 He 气,提高电弧稳定性及成型质量,同时探究不同比例的 He 含量对 CMT 电弧增材 Ti6Al4V 组织、力学性能及腐蚀行为的影响规律。在研究中发现,在 CMT 电弧增材 Ti6Al4V 过程中,随着 He 比例增大,增材成型精度得到提高;在显微组织中观察到原始 β 晶粒尺寸随着 He 比例增大逐渐增大,马氏体 α' 向网篮 $\alpha + \beta$ 转变, α 相长度和宽度变大,织构强度减弱,斯密特因子增大;不同比例的 He 试样在水平和垂直方向上的拉伸力学性能随着 He 比例增加,增材热输入增大,强塑积显著增大,同时通过在 3.5wt.% NaCl 溶液中的电化学测试发现,He 气加入可以显著提高 Ti6Al4V 耐腐蚀性能,且保护气比例为 50%He+50%Ar 时耐腐蚀性能最好,且远优于铸造态 Ti6Al4V 和锻件相当。

C05-56

激光熔覆制备近 α 钛合金连续冷却过程组织与性能研究

宋硕*

东北大学

以激光熔覆制备新型 Ti-Al-Zr-Mo-Si-Fe 系近 α 钛合金为研究对象,采用膨胀法对近 α 钛合金 β 单相区连续冷却过程微观组织转变规律进行研究,获得合金连续冷却(CCT)曲线。并研究冷却过程中 α 相的析出和变体选择。结果表明:不同冷速下形成的组织形貌具有明显特征,在慢冷(0.1°C/s~1°C/s)条件下为片层组织,中冷(5°C/s~20°C/s)条件下为网篮组织,快冷(50°C/s)条件下为马氏体组织。随着冷却速率的增加, α 相的含量和 α 片层的厚度和长度减小。在 $\beta \rightarrow \alpha$ 冷却过程中,均满足 Burgers 关系的取向,随着冷却速率的改变, α 变体的种类也发生改变。

C05-57

增材制造 NiTi 合金的超弹性调控机理

卢海洲^{1,2}, 杨超^{*2}

1. 广东技术师范大学
2. 华南理工大学

NiTi 合金具有良好的形状记忆效应、超弹性和生物相容性等功能特性, 被广泛应用于航空航天、传感驱动器、医疗器械等领域。高反应敏感性和低热导率等物性, 导致传统工艺制备的 NiTi 合金构件几何形状比较简单, 如丝材、和板材等。近来, 增材制造技术在近净成形复杂几何形状的金属构件方面表现出显著的优越性。有鉴于此, 本研究采用选区激光熔化增材制造工艺制备 NiTi 合金, 调控 NiTi 合金基体内部 Ni₄Ti₃ 纳米沉淀相的尺寸和分布, 通过循环拉伸超弹性试验, 探索 Ni₄Ti₃ 纳米沉淀相与基体形成位错的相互作用机制, 建立其微观组织—拉伸超弹性的内在联系, 揭示其超弹性演变机理, 为进一步扩展增材制造 NiTi 合金的工程应用提供理论基础。

C05-58

Effect of Heat Treatment on the Mechanical Properties of TA29 High-Temperature Titanium Alloy

Hui Xu, Juan Li*, Jianming Cai, Xu Huang

AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials

The microstructural characteristics, tensile and creep properties of TA29 titanium alloy under different heat treatment temperatures were investigated. The fracture morphologies of tensile specimens were observed using scanning electron microscope (SEM), and the internal microstructure and dislocation features after creep deformation were analyzed using transmission electron microscope (TEM). The results indicate that the TA29 alloy exhibits a typical duplex structure under solution heat treatment at 1035°C. With increasing solution heat treatment temperature, the content of the primary α phase gradually decreases, while the transformed β grains and clusters increase, resulting in higher tensile strength and reduced plasticity. The TA29 alloy demonstrates good creep performance, with the residual creep strain decreasing from 0.084% at 1035°C to 0.032% at 1080°C. At room temperature, the TA29 alloy shows cleavage fracture characteristics, and the fracture morphology does not change significantly with increasing heat treatment temperature, while at high temperatures, it exhibits typical ductile fracture characteristics. When heat-treated below the phase transformation point, as the primary α phase decreases, the lamellar α and residual β grains in the transformed β structure increase, which hinders grain boundary sliding and enhances creep resistance. During the creep deformation of lamellar structure specimens, the alternating arrangement of lamellar α and residual β phases, with some of the lamellae oriented parallel to the load direction, reduces the number of grain boundaries subjected to high shear stress, thereby impeding the formation and growth of creep voids and significantly improving the alloy's creep performance.

C05-59

高性能阻尼钛合金的研发和性能研究

任磊^{*1}, 魏延鹏¹, 肖文龙², 马朝利²

1. 中国科学院力学研究所
2. 北京航空航天大学

飞行器和武器装备的发展日趋高速化和大功率化, 受发动机和高速气流激励带来的振动和噪声问题尤为突出, 对高性能阻尼材料提出更迫切的实际需求。钛合金因比强度高、耐腐蚀、使用温度宽等特点而受到航空航天领域的重点关注, 开展具备抗冲击、高可靠性的高性能阻尼钛合金具有重要的军事意义。本文概述了现有高阻尼合金的组织设计和能量耗散机理; 在此基础上, 结合钛合金合金化原理和异构组织强化机制, 发展新型高阻尼钛合金的合金设计理论; 并结合大变形技术与热处理工艺耦合, 研发了具有高阻尼

和高强度的新型高阻尼钛合金。研究表明, 该合金兼具高阻尼系数($\tan \phi \geq 0.08$)、高屈服强度($\sigma_{0.2} \geq 1000$ MPa)、高均匀延伸率($\delta_{un} \geq 20\%$)和高加工硬化率(≥ 2 GPa), 表现出极佳的力学与阻尼性能配合。经三级杆平台实验验证, 该合金同样具有很好的减振降噪效果。基于此, 进一步探讨了合金的强韧化和能量耗散机制, 为高性能阻尼钛合金的研发和工程化应用奠定了基础。

C05-60

电脉冲诱导非平衡相变对 Ti-6Al-4V 合金组织与性能的影响

严旭东*

大连理工大学化工海洋与生命学院

本研究以轧制退火态和激光选区熔化制备 (SLM) 的 Ti-6Al-4V 合金为研究对象, 以电脉冲加热结合不同冷却方式来控制钛合金中元素扩散和相变过程, 利用背散射衍射分析 (EBSD)、透射电镜分析 (TEM)、拉伸测试和电化学等技术手段, 探究了 Ti-6Al-4V 合金在的组织与性能在不同相变过程中的演变规律, 并且通过理论计算对相关过程进行了分析, 揭示了其内在关系。本研究的主要研究结果如下:

(1) 研究了电脉冲加热至单相区后空冷对 SLM Ti-6Al-4V 合金的变体选择行为和组织演变的影响, 分析了电脉冲与热处理产生不同变体选择的原因, 阐明了 SLM Ti-6Al-4V 合金在电脉冲作用下的组织演变机理。电脉冲在原始 β 晶粒内部诱导了塑性变形 (引入位错和残余压应力), 进而改变了冷却过程中 α 变体的形核与生长方式, 最终形成集束和网篮混合组织。由于网篮组织可以阻碍位错运动和微裂纹扩展, 电脉冲处理的 SLM Ti-6Al-4V 合金显示出高的强塑性配合 (屈服强度为 ~ 925 MPa, 延伸率为 $\sim 15\%$)。具有全集束组织的热处理合金则表现出较低的延伸率 ($\sim 12\%$)。同时研究了电脉冲处理产生的集束和网篮混合组织的热稳定性, 分析了影响热稳定性的因素, 确定了集束和网篮混合组织具有高热稳定性的原因。在稳定化退火 (973 K/16 h) 期间, β 相含量的增加会抑制 α 板条的粗化。因此, 稳定化退火后的集束和网篮混合组织仍然保持高的强塑性配合。

(2) 研究了两相区淬火热处理的 Ti-6Al-4V 合金在电脉冲单相区处理下的组织演变过程, 制备了一种新型双板条组织, 具有该组织的合金表现出优异的力学性能 (屈服强度: ~ 1188 MPa; 抗拉强度: ~ 1264 MPa; 延伸率: $\sim 13.9\%$)。电脉冲的高电流密度致使合金快速升温并产生瞬时相变, 随后的水冷限制了合金元素的扩散和原始 β 晶粒的长大。水冷过程中, 同一原始 β 晶粒的 Al 或 V 元素富集区域发生了不同的相变, 进而产生由富 Al 粗马氏体板条和富 V 细马氏体板条构成的新型双板条组织。这种特殊的非平衡微观组织演变可以显著细化 Ti-6Al-4V 合金的组织, 从而提高其力学性能。

(3) 研究了 SLM Ti-6Al-4V 合金在热处理结合电脉冲处理下的组织演变过程, 制备了新型双板条组织, 获得了优异的力学性能 (屈服强度: ~ 1118 MPa; 抗拉强度: ~ 1280 MPa; 延伸率: $\sim 11.2\%$)。电脉冲加热至 1366 K 可以使富 Al 的初生 α 板条和富 V 的马氏体板条都转变为高温 β 相, 但超快的升温过程抑制了元素的扩散, 从而使高温 β 相大致保留了两相区淬火的元素分布状态。水冷时, 富 Al 区域的马氏体开始转变温度 (1149 K) 比富 V 区域 (983 K) 高, 前者先相变而转变成粗马氏体板条, 后者后相变而转变成细马氏体板条。同时研究了新型双板条组织的变形行为, 阐明了热处理结合电脉冲处理获得优异力学性能的机理。拉伸过程中, 富 V 的细马氏体板条区域先变形而富 Al 的粗马氏体板条区域后变形, 致使新型双板条组织相较于均匀成分的马氏体组织表现出更高的加工硬化能力和延伸率。

(4) 研究了电脉冲两相区处理对 SLM Ti-6Al-4V 合金元素配分 (Alloy element partitioning, AEP) 的影响, 分析了 AEP 对力学和耐腐蚀性能的影响机理。与相同温度下的传统热处理相比, 电脉冲加热至 1173 K 产生了接近的 β 相含量, 但超快的升温过程抑制了元素的扩散, 进而抑制了 SLM Ti-6Al-4V 合金的 AEP 过程, 大致保留了初始组织的元素分布状态。此外, 电脉冲过程中 V 的扩散距离虽然很短 (~ 60 nm), 但足以使原 β 相位置的高 V 浓度得到明显降低, 进而获得了元素浓度差较小的双板条组织。电脉冲同时抑制了初生 α (α_p) 板条的粗化, 还获得了更细的 α' 板条。铝元素分布更均匀的电脉冲处理试样呈现出明显高于热处理试样的屈服强度 (952 vs. 855 MPa)。电脉冲两相区处理的 SLM Ti-6Al-4V 合金具有低的元素不均匀性和小的板条尺寸, 因而表现出高的电荷转移电阻 (R_{ct}) 和稳定的表面腐蚀产物膜以及少的点蚀位点。

C05-61

Effect of oxygen contents on the fluidity of a newly developed metastable β titanium alloy

Zongyi Zhou*

Beijing University of Technology

Fluidity of Ti-4Mo-3V-4Cr-0.5Fe-3.5Al-xO alloy with different contents of oxygen addition has been studied. The fluidity of alloy displays obviously improvement with the enhancement of oxygen contents up to 0.6 wt%. The influence of oxygen on the microstructure and thermophysical parameters is analyzed and discussed. With increase of the oxygen content, the changes of superheat, solidification interval width, viscosity, and density exhibit negative effects on the fluidity of alloy melt. However, the refined grains, enhanced crystallization latent heat, and declined thermal conductivity play positive effects on the evolution of fluidity for alloy melt. And positive effects dominate the evolution of fluidity. Therefore, the addition of oxygen can improve the fluidity of Ti-4Mo-3V-4Cr-0.5Fe-3.5Al.

C05-62

电冲击处理对 Ti-6.5Al-3.5Mo-1.5Zr-0.3Si 合金的晶粒和再结晶行为影响研究

周健, 刘畅, 李嘉顺, 华林, 谢乐春*

武汉理工大学

Ti-6.5Al-3.5Mo-1.5Zr-0.3Si 合金因其密度低、比强度高、耐腐蚀而广泛应用于航天、汽车、船舶等关键领域。电冲击处理因其具有响应速度快、绿色环保、靶向调控等优点而越来越受到研究者青睐。本文表征分析电冲击处理前后 Ti-6.5Al-3.5Mo-1.5Zr-0.3Si 合金的晶粒形状、晶粒取向、再结晶形成及织构演变机理。研究表明, 初始试样由初生 α p 相, 次生 α s 相以及 β 相组成, 经过 0.04 s 电冲击处理后, 次生 α s 相减小; 经过 0.06 s 的电冲击处理后, 针状马氏体相析出; 利用分形维数 ψ 可高效灵敏评估晶粒形状复杂度, 电冲击处理后分形维数 ψ 的增加表明晶粒形状呈现更多的凸起、孔洞和分叉枝干, 晶界越来越复杂; 粒内取向逐渐趋于一致; 变形晶粒减少, 再结晶晶粒数量增加; 织构分布的更加均匀。力学性能研究结果表明, 电冲击处理时间增加为 0.06 s, 析出马氏体相显著强化显微硬度, 残余应力分布更加均匀。该研究从晶粒分布、再结晶、力学性能方面阐述了电冲击处理对 Ti-6.5Al-3.5Mo-1.5Zr-0.3Si 合金的影响, 可为钛合金力学性能改善提供一种新思路。

C05-63

显微组织对低成本钛合金腐蚀行为的影响

乔忠立*^{1,2}

1. 西安建筑科技大学

2. 西北有色金属研究院

近年来, 人们越来越期待开发出具有低成本和优异性能的钛合金。为实现这一目标, 本文通过真空熔炼、锻造和固溶处理技术, 在 Ti-Al-V-Fe-Mo 合金中获得了由微米级 α 相和微米级、纳米级 α' 相组成的分级相结构。这种高密度的分级 α' 马氏体结构具有较高的晶界密度和 Fe 与 Mo 的弱偏析性。它促进了低缺陷密度、高膜阻的钝化膜形成与基体内溶质 (特别是 Fe 和 Mo) 的均匀分布。这种均匀性大大降低了点蚀的倾向, 并增强了合金的整体耐腐蚀性。价电子理论模型的分析结果表明, α (0001) / β (110) 界面处较高的电子密度差是 α/β 界面点蚀的主要原因。此外, α 相的低最强键能导致其比 β 相先腐蚀。理论计算结果进一步证实了观察到的实验结果, 并在价电子水平为实验现象提供了理论支持。

C05-64

马氏体相对增材制造钛合金拉伸性能和蠕变持久性能的影响

张艳*^{1,2}

1. 东北大学

2. 西北有色金属研究院

在增材制造过程中, 极高的冷却速率导致钛合金中形成马氏体 α' 相。但对于工业应用, 马氏体相可能不受青睐。本文研究了马氏体对增材制造 Ti-6.9Al-6.8Zr-2.3Mo-2.2V-0.7Nb 合金拉伸性能和蠕变断裂性能的影响。结果表明, 由于 Burgers 取向关系和 α' 相之间相似的弹性模量, 在 α'/α' 界面处不易形成微孔。因此, 由马氏体 α' 相组成的微观组织比由平衡 α 和 β 相的组成微观组织表现出更好的塑性。然而, 非平衡 α' 相的分解可以显著提高元素的扩散速率, 从而促进动态回复和连续动态再结晶, 最终降低合金的高温蠕变断裂寿命。本文对增材制造钛合金综合力学性能的探讨可为增材制造钛合金在具体服役环境中的显微组织选择提供更加可靠的参考。

C05-65

时效温度对 RT1400 钛合金力学性能及耐磨性的影响

张硕, 马健凯*

西安稀有金属材料研究院有限公司

钛合金具有比强度高、耐腐蚀、高低温性能优异等优良的综合性能, 在航空航天、武器装备、能源化工、船舶及海洋工程等领域具有巨大的应用潜力。然而, 钛合金耐磨性普遍较差, 严重制约了其推广应用, 尤其是在兵器、高端交通装备等同时考虑减重和磨损环境的相关领域。本文对 RT1400 (Ti-4.8Al-5.6Mo-3V-1.5Cr-1.6Fe, wt.%) 高强亚稳 β 钛合金进行固溶时效处理, 探究时效温度对 RT1400 钛合金力学性能及耐磨性的影响。结果表明: RT1400 试样在 480 °C 保温 4 h 后的综合力学性能较好, 其抗拉强度为 1612 MPa, 硬度值为 43.6 HRC, 磨损量为 0.15 mg, 摩擦系数为 0.358。由表面磨痕分析可知, 时效温度为 480 °C 时, RT1400 钛合金的磨损机制为黏着磨损, 时效温度为 500 °C 时的磨损机制为黏着磨损和磨粒磨损。较低的时效温度可以提高 RT1400 钛合金的抗拉强度和耐磨性, 该结果为提高 β 钛合金耐磨性及扩大 β 钛合金的应用领域提供理论支持。

C05-66

原位研究近 β 钛合金不均匀的拉伸变形行为刘文豪¹, 邓浩², 陈龙庆*¹

1. 四川大学

2. 中国第二重型机械集团万航模锻有限责任公司

利用原位背向散射电子衍射 (EBSD) 技术研究了具有变形 β 晶粒, $\langle 100 \rangle \beta$ 和 $\langle 111 \rangle \beta$ 组织的 Ti-5Al-5Mo-5V-1Cr-1Fe (Ti55511) 锻件的拉伸变形机理。变形时, 在 β 晶粒水平上, $\langle 100 \rangle \beta$ 晶粒相比 $\langle 111 \rangle \beta$ 晶粒具有更明显的应力应变集中, 在变形的早期阶段就能观察到明显的塑性运动, 该区域被认定为塑性运动开始的区域。在 α 晶粒水平上, 对 12 种初生 α 变体的力学行为分别进行了研究, 发现材料的力学行为不仅受晶体取向的影响, 还受周围 β 晶粒的影响。在 $\langle 100 \rangle \beta$ 区域, 初生 α 变体倾向于发生基面和柱面滑移, 经历最显著塑性变形的初生 α 变体具有最大的施密特因子, 在向基体滑移传递的过程中, 具有最小的残余伯氏矢量和最大的几何相容因子。相反, 在 $\langle 111 \rangle \beta$ 区域, 初生 α 变体倾向于发生锥面 $\langle a \rangle$ 滑移, 通过启动难以发生的滑移系和滑移转移以适应系统不均匀的变形。总之, $\langle 100 \rangle \beta$ 晶粒变形不均匀, 初生 α 变体的不均匀变形是导致合金力学性能沿锻造方向恶化的主要原因。

墙报

C05-P01

钛铝系合金在高温高速气流环境中的摩擦着火特性

邱越海^{1,2}, 弭光宝*¹, 李培杰²

1. 中国航发北京航空材料研究院

2. 清华大学新材料国际研发中心

采用高温高速摩擦点燃法研究钛铝系合金在 220~400 m/s 气流环境的起火燃烧行为。结果表明：当流速达到 260 m/s 时，合金开始发生起燃；当流速超过 380 m/s 时，合金不再发生起燃。从气体动力学方程及固体热传导方程出发，考虑气-固交界面上氧消耗，以及气流入口的氧补给的边界条件，建立钛铝系合金表面的氧浓度和基体的摩擦-氧化升温计算模型。随着流速增大，对流散热速率和氧化产热速率均增大，但后者的增大速率的减小速率大于前者的，使得净产热速率先增大后减小，在 320 m/s 时出现转折。故而钛铝系合金可达到的最高温度先增大再减小，并且仅当流速为 260~380 m/s 时，升温过程中温度会发生快速增长，合金发生起燃，即计算结果与实验结果基本一致，验证了模型的可靠性。

C05-P02

基于微/介观尺度效应的辊冲成形超薄钛双极板回弹控制方法研究

王铭*

电子科技大学（深圳）高等研究院

随着氢能及其燃料电池的快速发展，钛和钛合金因其优异的性能被越来越多地应用于双极板中。然而，钛板存在各向异性等缺点，这影响了钛板的整体成形性，并严重影响成形后双极板的精度。辊冲成形结合了辊压成形和冲压工艺的的优点，既有辊压成形的渐变弯曲特性，又有传统冲压工艺的强约束性，可以避免两种工艺中的常见问题。使用纯弯曲装置建立了材料的各向异性、混合硬化和非线性卸载构成关系。此外，还利用 SEM 和 EBSD 等微观实验分析方法预测了薄板的弯曲变形过程，并准确确定了影响回弹的关键参数。阐明了核心流场元件参数与工艺参数之间的耦合关系，从而提出了一种全面的零件精度控制方法。建立了精密辊压成形过程中超薄钛板的回弹应变预测模型，并研究了材料的变形机理。

C05-P03

高强亚稳 β 钛合金丝材的制备技术及其组织性能研究

朱欣怡，肖文龙*

北京航空航天大学材料科学与工程学院

不同的应用领域对钛合金丝材的性能要求不同，且现有钛合金丝材无法满足在苛刻环境下的服役要求，因此需要探究新的丝材体系以满足应用。亚稳 β 钛合金以其高强度、良好的塑性、生物相容性、良好的加工成型性等优势，被认为最有希望成为优良钛合金丝材。本研究中，选取两种不同合金成分的亚稳 β 钛合金，即 Ti-5321 和 Ti-38Nb-0.8O 作为丝材原料，采用单向拉丝机，调控不同的丝材制备工艺参数和热处理工艺，实现丝径 0.5~1 mm 高强 Ti-5321 和 Ti-38Nb-0.8O 丝材的制备，通过扫描电子显微镜、电子背散射衍射、电子万能试验机等方法测试了丝材的组织与力学性能，系统地分析了两种丝材的工艺参数与组织结构、变形机制以及性能的关系，为航空航天和生物医用领域高强亚稳 β 钛合金丝材的生产应用提供新的制备思路。

C05-P04

Ti-55511 合金在双级轧制过程中的组织结构演变

刘畅畅，顾及，宋旻*

中南大学

在本工作中，首先对 Ti-55511 钛合金进行了单相区不同变形量的高温轧制，获得了不同再结晶程度的组织。在此基础上，我们对该过程存在的包括连续动态再结晶（CDRX）和非连续动态再结晶（DDRX）在内的几种动态再结晶（DRX）机制以及特征进行了探讨，并进一步研究了该过程所涉及的相变过程。结果表明，在整个 DRX 过程中，随着变形程度的增加，再结晶晶粒优先在晶界、剪切带等高能区域形核，

然后不断长大,直至达到完全再结晶状态。且根据再结晶机制的不同,DDRX 主要发生在晶界处,而 CDRX 晶粒则在剪切带内形核。同时,表征结果还呈现出 ω 相、 α'' 相以及漫散条纹等亚稳状态存在的特征,也为亚稳相辅助 α 相形核长大提供支撑。

随后,我们在单相区轧制的基础上,进一步进行了双相区温度区间的轧制,在引入机械应力的同时,获得大量的 α 相对合金实现了进一步的强化。且微观组织表征结果显示,由于不均匀的应力分布,在再结晶晶界处形成了具有梯度尺寸分布的 α 相。 α 相与 β 基体在再结晶区的梯度结构处呈现为 Burgers 位相关系。而在部分再结晶试样的未再结晶区和完全再结晶试样的晶粒内部, α 相和 β 相表现出 Pitsch-Schrader 位相关系。除此以外,还观察到大量的纳米 α'' 马氏体条带。这些条带起源于 α/β 界面,并向 α 相内部生长。且随着双相区轧制变形量的增加,这些纳米条带数量减少,并随之出现了 α 相的变形孪晶。

C05-P05

热处理对 TB18 高强钛合金微观组织和力学性能的影响

汤家凤, 陈龙庆*

四川大学

近 β 和亚稳 β 态合金因其独特的高比强度、抗深硬化和优异的耐腐蚀性组合而广泛应用于航空航天和骨科植入行业。这些合金表现出异常高的强度,但高强度往往以降低延性为代价。为了达到强度和延性之间的最佳平衡,这些合金的微观结构可以通过热处理过程进行调节。TB18 合金是一种最近开发的亚稳态 β 钛合金,以其显著的力学性能而闻名,还需要进一步的探索。本文系统地研究了热处理对 TB18 合金微观组织和力学性能的影响。对合金进行了不同时间的固溶处理和不同时间的时效温度,然后利用各种表征技术进行了彻底的微观结构分析。研究表明, β 晶粒的尺寸随着固溶处理时间的延长而增大。此外,在较高的温度下时效会导致更大的 α 颗粒。特别是在 530°C 处, α 相的析出最为明显,表明其在该温度下的 α 相析出最快。拉伸试验显示,由于固溶时间延长, β 颗粒尺寸延长,因此延性降低,但对合金强度的影响很小。相反,较高的时效温度会提高其拉伸强度,同时逐渐降低延性。强度与 α 晶粒尺寸之间的关系符合霍尔-佩奇关系,而延展性和强度与位错滑移相关。

C05-P06

热处理对不同打印方向电子束选区熔化 TC4 显微组织与力学性能的影响

盛开*

四川大学

电子束选区熔化(EBSM)是目前增材制造最常用的手段之一,其生产的零件具有与传统制造零件相当的强度。然而不同方向构筑的试样力学性能不同。采用 EBSM 制备了 XY 向与 Z 向的 TC4 合金,研究了梯度热处理制度对其微观组织演变和力学性能的影响。在 800°C×4h、900°C×2h+540°C×4h、950°C×4h+540°C×4h 的制度下,显微组织呈现网篮组织结合少量片层组织,且随着温度升高, α 片层依次增大,其力学性能差异较小。当热处理温度提高到 980°C×4h+540°C×4h、1000°C×4h+540°C×4h,温度接近 β 相变点,显微组织发生突变,出现大量魏氏组织,塑性显著降低。对于 XY 向与 Z 向构筑的 TC4 合金,1000°C×4h+540°C×4h 制度下的力学性能差异最小。本研究对热处理调控沉积态 TC4 显微组织,消除不同打印方向的影响具有重要意义。

C05-P07

Combination of multiple strengthening mechanisms facilitates excellent strength-ductility balance in metastable β titanium alloy

Haoran Lu, Shuzhi Zhang, Xinyu Zhang, Riping Liu*

Yanshan University

It is difficult to achieve excellent strength-ductility equilibrium in metastable β titanium alloys with only a single deformation mechanism. Grain refinement can effectively improve the yield strength of metastable β titanium alloys on the premise of maintaining high plasticity and high work hardening rate. So, in this work, combined with solid solution strengthening, fine grain strengthening, and dispersion strengthening, metastable β -type Ti-4V-2Mo-2Fe alloys achieve an excellent strength-ductility balance, including a high yield strength of 844 MPa, ultra-high ductility of 35.6% and a peak work hardening rate of over 2 GPa. This work contributes a new member to high performance metastable β titanium alloys.

仅发表论文

C05-PO01

Influence of aging on the evolution of micro-nano structure and mechanical properties for high temperature titanium alloy

Xiaozhao Ma^{*1}, Ziyong Chen²

1. AVIC Manufacture Technology Institute (MTI)

2. Beijing University of Technology

Aging duration of heat treatments are used to optimize the microstructure and promote the mechanical properties of Ti-7Al-2.5Sn-6Zr-0.5Mo-0.25Si-1Nb-1W-0.1Er. Evolution of microstructures, mechanical properties and precipitated Ti₃Al phase after heat treatments are carefully investigated in current study. Corresponding strengthening mechanism are also revealed. For alloys after heat treatments, with the prolongation of aging duration, variations of contents of primary α phase and transformed β phase is not obvious. For alloys after air cooling, average widths of α lamellas gradually increase with the increasing aging duration. For water-quenched alloy, criss-crossed α lamellas with significantly reduced width of 221 nm precipitate inside β grains. And the aspect ratio of α lamellas is significantly decreased. At room temperature, yielding and ultimate tensile strengths of as-heat treated alloy increase comparing with as-forged alloy. With the prolongation of aging time, strengths do not show obvious change, while elongations continue to decrease. At 650°C, yielding and ultimate tensile strengths of air-cooled alloys increase with the prolonged aging times, simultaneously and continuously. The 650°C elongations increase first, and then decrease. For WC-4, both the yielding and ultimate tensile strengths at room temperature and high temperature increase significantly comparing with other alloys. And 15.9% high temperature elongation is still maintained. The existence of Ti₃Al phase is in the form of clusters with many tiny Ti₃Al phase particles inside of them. Size of Ti₃Al phase clusters increases significantly after heat treatments, and it gradually increases with the increasing aging time.

C05-PO02

热处理工艺对 Ti₂AlNb 合金锻件微观组织和力学性能的影响

李志红*, 郭博迪, 王静, 王丹, 薛少博, 王国栋

西北有色金属研究院

本文以 Ti-22Al-24.5Nb-0.5Mo 合金锻件为研究对象, 通过表征研究了固溶时效工艺对材料微观组织与力学性能的影响, 并揭示了不同固溶、时效工艺下锻件显微组织演变规律及其对力学性能的影响机制。研究表明, 经过固溶+时效处理后, 形成了以等轴 α_2 颗粒、一次板条状 O 相和二次针状 O 相为主的双态组织结构。并随着固溶温度的提高, 时效过程中析出的二次针状 O 相含量明显增加, 这种二次针状 O 相的存在显著抑制了变形过程中位错的运动, 降低了其平均自由程, 增强了析出强化效应, 从而提高了合金的室温和高温强度, 从而会导致塑性的降低。此时, 提高时效温度可使二次针状 O 相板条组织尺寸显著增加, 进而提高了室温和高温塑性。

C05-PO03

Research on Optimization of Stress Relief Annealing Process and Micro-mechanism Analysis for High-Temperature Titanium Alloy Welded ComponentsJianming Cai¹, Juan Li^{*1}, Yuanwei Zhang², Anqin Zhang³, Qingyun Xiao²

1. AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials
2. AECC Guizhou Liyang Aero-Engine Co., Ltd.
3. AECC Guiyang Engine Design Research Institute

In response to the practical engineering requirements of stress relief annealing for high-temperature titanium alloy electron beam welded drum components, the effects of annealing at different temperatures on tensile strength and impact toughness of alloy at room temperature were studied. The fracture morphology and microstructure were characterized using scanning electron microscopy (SEM) and transmission electron microscopy (TEM), and the micro-mechanical behavior mechanisms were analyzed. The results showed that the mechanical properties of TC25 titanium alloy discs were not significantly affected by low-temperature annealing at 600 °C. However, after high-temperature annealing at 900 °C, the tensile strength, plasticity, and impact toughness were significantly reduced. The reason was that during high-temperature annealing, the transformed β structure underwent significant changes, lamellar α phase coarsened and showed a tendency to spheroidize. The α and β phases regained equilibrium, and the residual β phase tended to stabilize, resulting in a transition of tensile and impact fracture characteristics from ductile dimple fracture to brittle intergranular cleavage fracture. For TC25 titanium alloy welded drum components used in aircraft engines, it is advisable to use a low-temperature stress relief annealing process after welding to maintain the inherent mechanical properties. Avoid using high-temperature stress relief annealing above the recrystallization temperature.

C05-PO04

亚稳 β -Ti-1023 合金变形不均匀行为及应变速率敏感性研究王雪丽^{*1,2}, 李付国², 张治民¹, 王强¹

1. 中北大学
2. 西北工业大学

亚稳 β -Ti-10V-2Fe-3Al (β -Ti-1023) 合金作为高强韧钛合金中的“全能选手”代表, 其复杂的多级微观结构和应力诱导马氏体相变 (Stress-induced martensite transformation, SIMT) 和变形诱导马氏体孪晶 (Deformation-induced martensite twinning, DIMIT) 增强增塑机制使其兼具高强度和大延性, 在航空航天和机械制造等重点领域广受青睐。因此, 研究 β -Ti-1023 合金在变形过程中 SIMT/DIMIT 激活引起的微观组织演化以及形变和相变耦合的性能演变等是该领域的研究热点问题。本文采用数字图像相关技术 (Digital image correlation, DIC) 实时追踪不同应变速率下应变分布及局部应变演变规律, 研究应变分布的传播行为及其应变速率敏感性; 采用 EBSD 技术分析材料变形后微观组织演化及 α'' 马氏体/马氏体孪晶的演变过程; 采用 SEM 技术观察分析材料的断口形貌。可以得出以下结论: (1) 应变分布由近似于均匀分布向非均匀分布演变, 呈现出了应变集中现象, 最终在应变集中区域发生断裂, 且低应变速率下试样的颈缩现象最明显; (2) 应力-应变曲线呈现明显的双屈服现象, 表现出负应变速率敏感性效应, 即低应变速率可以产生更高的应变硬化率; (3) 随着应变速率降低, α'' 马氏体含量显著增加, 晶粒尺寸明显细化, KAM 和 GNDs 平均值显著增大, 说明 SIMT 含量增加有助于变形试样的位错密度累积, 更有利于多种塑性变形机制的耦合作用; (4) 断口形貌呈拉伸型, 主要由韧窝型空洞聚合造成。低应变速率变形可以产生明显的颈缩现象, 韧窝受力从单向受拉迅速向三向受拉发展, 韧窝得到充分长大, 所以韧性断裂特征占优, 而高应变速率表现出明显的脆性断裂特征。

C05-PO05

热处理对一种钛合金的组织及力学性能的影响

吴丽君*

西北有色金属研究院

本文探究一种高 Al 含量 (Al 当量 11、Mo 当量 0.64) 的 Ti-Al-Zr-Nb-Mo-Si 系钛合金在不同的固溶温度 (1000°C、1070°C) 及不同的冷却方式 (空冷、水冷) 下固溶时效后的显微组织及室温、高温 (550°C、600°C) 力学性能。结果表明, 固溶温度对该合金的力学性能影响不大, 但冷却方式影响较明显。1070°C 固溶水冷后, 综合力学性能最优, 室温下, 抗拉强度 1185 MPa, 屈服强度 1178 MPa, 断裂延伸率 16.5%; 550°C 高温下, 抗拉强度 802 MPa, 屈服强度 676 MPa, 断裂延伸率 28%; 600°C 高温下, 抗拉强度 746 MPa, 屈服强度 610 MPa, 断裂延伸率 30%。与典型的 Ti60、IMI834 等高温钛合金相比, 该合金在室温及高温下均表现出优异的性能, 具有成为新型高温钛合金的潜力。

C05-PO06

Effects of Cyclic Oxidation on the Microstructure and Mechanical Properties of Ti₂AlNb Alloys

Hongze Zhao, Xiong Ma*, Xiaoqiang Shi, Xiaobo Liang, Jianwei Zhang

西北有色金属研究院

The Ti₂AlNb alloys developed on Ti-Al series of intermetallic compounds, which have great potentials in aerospace applications because of their attractive performance at high temperature including high specific strength and stiffness, excellent oxidation and creep resistance. The Ti-22Al-25Nb (at.%) alloy was studied in this article, which belong to Ti₂AlNb intermetallic compound. Specimens of Ti-22Al-25Nb (at.%) alloy were subjected to cyclic oxidation tests within the temperature range of 600°C~700°C to investigate both the alloy's cyclic oxidation resistance and the ensuing impact on its mechanical properties. Following high-temperature cyclic oxidation, the alloy exhibited minimal variations in tensile strength while experiencing a significant decline in elongation. The microstructure kept stable during cyclic oxidation tests. The formation of a brittle surface layer during the cyclic oxidation process was identified as the primary factor contributing to the reduction in elongation. These results suggest that the Ti-22Al-25Nb alloy possesses robust cyclic oxidation resistance, particularly in terms of load-bearing capacity.

C05-PO07

熔炼工艺对 TC6 铸锭成分均匀性及其 β 斑偏析规律的影响

李欣琳*, 张天有, 王国栋, 张英明, 郭金明, 韩呈祥, 邢学伟

西北有色金属研究院

本文以小颗粒海绵钛、中间合金和单质金属为原料, 通过真空自耗电弧熔炼 (VAR) 制备了 3t 级 TC6 合金铸锭 (Ti-6Al-1.5Cr-2.5Mo-0.5Fe-0.3Si), 研究了不同稳弧电流和原料种类对合金铸锭成分均匀性及显微组织的影响。结果表明, 选用二元中间合金为原料, 稳弧电流为 10A/20s 时合金铸锭整体化学成分均匀, Cr 元素范围为 1.39~1.44wt.%, 铸锭组织中无 β 斑产生; 选用金属单质为原料, 稳弧电流为 10A/20s 时铸锭成分波动较大, Cr 元素范围为 1.32~1.48wt.%. 铸锭中存在富 Cr 元素和 Fe 元素、贫 Al 元素的 β 斑。实际生产中应通过合理的熔炼工艺制备出整体成分均匀, 无 β 斑的 TC6 铸锭。