

DOI: 10.16410/j.issn1000-8365.2025.5026

# Mo、Zr 元素对新型 $\alpha+\beta$ 钛合金显微组织与力学性能影响研究

韩易恒<sup>1</sup>, 陈文韬<sup>1</sup>, 戴锦华<sup>1</sup>, 吴嘉琪<sup>1</sup>, 梅金娜<sup>2</sup>, 唐 斌<sup>1,3</sup>

(1. 西北工业大学凝固技术全国重点实验室, 陕西 西安 710072; 2. 苏州热工研究院有限公司, 江苏 苏州 215002; 3. 西北工业大学重庆科创中心, 重庆 401135)

**摘要:** 研究了 Mo、Zr 元素对新型  $\alpha+\beta$  钛合金 Ti575 显微组织与力学性能的影响。通过真空电弧熔炼获得具有不同 Mo、Zr 含量的 Ti575 合金: Ti-5Al-7.5V-0.5Si (Ti575), Ti-5Al-7.5V-1Mo-0.5Si (1Mo), Ti-5Al-7.5V-1Zr-0.5Si (1Zr), Ti-5Al-7.5V-0.5Mo-0.5Zr-0.5Si (0.5Mo-0.5Zr)。对 4 种合金进行 940 °C/1 h 单相区固溶与 550 °C/6 h 两相区时效处理, 并进行拉伸性能试验与组织表征。结果表明, 随 Mo 含量增加, Ti575 合金片层  $\alpha$  与次生  $\alpha$  尺寸显著细化; Zr 对  $\alpha$  相细化作用弱于 Mo, 但降低硅化物形核能, 在 Ti575-1Zr 合金中观察到大量硅化物析出, 其他成分合金则未观察到。对于 Ti575-1Mo 合金, Mo 元素起固溶强化作用, 同时片层  $\alpha$  细化与次生  $\alpha$  细化显著缩短位错滑移平均自由程, 因而其抗拉强度 (UTS) 较 Ti575 合金大幅提升同时伸长率 ( $\epsilon_f$ ) 有所损失 (UTS: Ti575: 956 MPa, 1Mo: 1 046 MPa;  $\epsilon_f$ : Ti575: 13.6%, 1Mo: 9.4%)。对于 Ti575-1Zr 合金, 相较 Ti575 合金其片层  $\alpha$  与次生  $\alpha$  未显著细化, 其强度提升归因于 Zr 元素固溶强化与硅化物析出强化, 然而硅化物与基体间应变失配促进孔洞形核, 降低伸长率 (UTS: Ti575: 956 MPa, 1Zr: 995 MPa;  $\epsilon_f$ : Ti575: 13.6%, 1Zr: 10.8%)。对于 0.5Mo-0.5Zr 合金, 一方面 0.5% (质量分数) Mo 元素在细化  $\alpha$  片层同时不会使其过于细小, 另一方面 0.5% Zr 元素起固溶强化作用同时避免界面硅化物过度析出。综合作用下, 0.5Mo-0.5Zr 合金相较 Ti575 合金强度大幅提升同时塑性损失较小, 具备最佳强塑匹配 (UTS: Ti575: 956 MPa, 0.5Mo-0.5Zr: 1 053 MPa;  $\epsilon_f$ : Ti575: 13.6%, 0.5Mo-0.5Zr: 11.8%)。

**关键词:** Ti575; Mo 含量; Zr 含量; 强塑性匹配

中图分类号: TG146

文献标识码: A

文章编号: 1000-8365(2025)07-0673-07

## Effect of Mo and Zr Addition on the Microstructure and Mechanical Properties of a Novel $\alpha+\beta$ Titanium Alloy

HAN Yiheng<sup>1</sup>, CHEN Wentao<sup>1</sup>, DAI Jinhua<sup>1</sup>, WU Jiaqi<sup>1</sup>, MEI Jinna<sup>2</sup>, TANG Bin<sup>1,3</sup>

(1. State Key Laboratory of Solidification Processing, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China; 2. Suzhou Nuclear Power Research Institute Co., Ltd., Suzhou 215002, China; 3. Innovation Center NPU Chongqing, Chongqing 401135, China)

**Abstract:** The effects of Mo and Zr on the microstructure and mechanical properties of a novel  $\alpha+\beta$  titanium alloy, Ti575, were investigated. Ti575 alloys with different contents of Mo and Zr, including Ti-5Al-7.5V-0.5Si (Ti575), Ti-5Al-7.5V-1Mo-0.5Si (1Mo), Ti-5Al-7.5V-1Zr-0.5Si (1Zr), and Ti-5Al-7.5V-0.5Mo-0.5Zr-0.5Si (0.5Mo-0.5Zr), were obtained via vacuum arc melting. The four alloys were treated with  $\beta$  single-phase region solution at 940 °C for 1 h, followed by two-phase aging at 550 °C for 6 h, and then subjected to tensile testing and microstructure characterization. The experimental results show that with increasing Mo content, the lamellar  $\alpha$  and secondary  $\alpha$  sizes of the Ti575 alloy significantly decrease. The refining effect of Zr on the  $\alpha$  phase is weaker than that of Mo. Zr addition reduces the nucleation energy of silicide. Many silicide precipitates are observed in the Ti575-1Zr alloy, whereas no significant silicide is observed in the Ti575, 1Mo and 1Zr alloys. For the Ti575-1Mo alloy, Mo has a significant solid solution strengthening

收稿日期: 2025-02-17

基金项目: 国家重点研发计划 (2021YFB3702602)

作者简介: 韩易恒, 2003 年生, 本科生. 研究方向为钛合金力学性能. Email: khanacademic@mail.nwpu.edu.cn

通信作者: 唐 斌, 1984 年生, 博士, 教授. 研究方向为先进金属结构材料及其成型技术. Email: toby@nwpu.edu.cn

引用格式: 韩易恒, 陈文韬, 戴锦华, 吴嘉琪, 梅金娜, 唐斌. Mo、Zr 元素对新型  $\alpha+\beta$  钛合金显微组织与力学性能影响研究[J]. 铸造技术, 2025, 46(7): 673-679.

HAN Y H, CHEN W T, DAI J H, WU J Q, MEI J N, TANG B. Effect of Mo and Zr addition on the microstructure and mechanical properties of a novel  $\alpha+\beta$  titanium alloy[J]. Foundry Technology, 2025, 46(7): 673-679.

effect, and the  $\alpha$  refinement of the lamellae and secondary microstructure significantly shorten the mean free path of dislocation slip. Therefore, the tensile strength (UTS) of the alloy is significantly greater than that of the Ti575 alloy, while the elongation ( $\varepsilon_t$ ) decreases accordingly (UTS: Ti575: 956 MPa, 1Mo: 1 046 MPa;  $\varepsilon_t$ : Ti575: 13.6%, 1Mo: 9.4%). For the Ti575-1Zr alloy, the lamellar  $\alpha$  and secondary  $\alpha$  are not significantly refined compared with those of the Ti575 alloy, and the strength improvement is attributed to the solid solution strengthening of Zr and the silicide precipitation strengthening. However, the strain mismatch between the silicide and the matrix promotes pore nucleation and decreases the rate of elongation (UTS: Ti575: 956 MPa, 1Zr: 995 MPa;  $\varepsilon_t$ : Ti575: 13.6%, 1Zr: 10.8%). For the 0.5Mo-0.5Zr alloy, on the one hand, 0.5 wt.% Mo can refine the  $\alpha$  lamellar structure without making it too tiny. On the other hand, 0.5 wt.% Zr not only plays a role in solid solution strengthening but also avoids excessive precipitation of interfacial silicides. Compared with that of the Ti575 alloy, the strength of the 0.5Mo-0.5Zr alloy is greatly improved under the combined action of Mo and Zr, while its plastic loss is insignificant, leading to the best strength-ductility synergy (UTS: Ti575: 956 MPa, 0.5Mo-0.5Zr: 1 053 MPa;  $\varepsilon_t$ : Ti575: 13.6%, 0.5Mo-0.5Zr: 11.8%).

**Key words:** Ti575; Mo content; Zr content; strength and plasticity

$\alpha+\beta$  钛合金具有高室温/高温强度、低密度、低疲劳敏感性等,被广泛应用于航空发动机机匣、叶盘等核心部件的制造,在现役钛合金中占比高达50%以上<sup>[1-2]</sup>。随着航空工业进一步发展,以 TC4 为代表的传统  $\alpha+\beta$  钛合金已无法满足需求,具备更加优异强-塑-韧匹配的新型  $\alpha+\beta$  钛合金亟待开发。Ti-5Al-7.5V-0.5Si(Ti575) 合金是由美国 Timet 公司在 Ti-6Al-4V(TC4)合金基础上开发的一种新型  $\alpha+\beta$  钛合金,该合金于 2016 年第 13 届国际钛会上首次发布<sup>[3]</sup>。相较 TC4 合金, Ti575 合金通过提升 Mo 当量,降低 Al 当量,并额外加入 0.5%(质量分数,下同)Si 元素,在不损失热加工性同时,展现出比 TC4 合金更加优异的室/高温强塑匹配与冷驻疲劳性能,在发动机风扇盘、叶片等航空核心部件领域具有广阔应用前景<sup>[3-7]</sup>。

自 Ti575 合金首次公开以来,其优异的力学性能引发了学术界与航空工业界的广泛关注。Dai 等<sup>[8]</sup>通过两相区固溶炉冷加时效处理,在 Ti575 合金内调控出由等轴  $\alpha$ 、片层  $\alpha$ 、纳米次生  $\alpha$  构成的三态组织形貌,实现了抗拉强度(UTS)1 189 MPa,断后伸长率(EL)15.5%的优异强塑匹配,三态组织 Ti575 合金优异力学性能归因于超细  $\alpha$  相对位错运动的显著阻碍以及变形过程中多层次  $\alpha$  相间出色的应变协调效应。Wu 等<sup>[9]</sup>研究了固溶温度对双态组织 Ti575 合金强塑匹配的影响。等轴  $\alpha$  相因易发生变形而对合金塑性有增益作用,而存在纳米次生  $\alpha$  相析出的  $\beta$  转变组织阻碍位错运动,显著提升合金强度。当固溶温度从 760 °C 上升至 860 °C 时,微米尺度等轴  $\alpha$  体积分数从 60% 下降至 18%,含有纳米次生  $\alpha$  相的  $\beta$  转变组织体积分数从 40% 上升至 82%,因此 Ti575 合金抗拉强度由 1 289 MPa 提升至 1 383 MPa,断后伸长率则从 10.5% 下降至 8.5%。Church 等<sup>[4]</sup>研究了时效温度对三态组织 Ti575 合金组织性能的影响,

随着时效温度上升,等轴  $\alpha$  相、片层  $\alpha$  相粗化,而纳米次生  $\alpha$  逐步溶解,合金强度、塑性同步下降。目前,对新型 Ti575 合金力学性能的研究主要聚焦于热处理制度对显微组织演化及力学性能的影响。

除热处理制度外,微合金化也是优化钛合金显微组织与力学性能的重要途径。根据合金元素添加对钛合金相变行为的影响,钛合金内合金元素可分为  $\alpha$  稳定元素(如 Al、O),  $\beta$  稳定元素(如 Mo、Fe、V)和中性元素(如 Sn、Zr)<sup>[1]</sup>。Mo 是最常见的  $\beta$  稳定元素之一,可细化合金晶粒,稳定  $\beta$  相,并在后续热处理过程中促进  $\beta$  基体中次生  $\alpha$  相析出,从而产生显著强化效果<sup>[9]</sup>。费跃等<sup>[10]</sup>研究了 Mo 含量对 TC32 合金组织与力学性能的影响。添加 3%Mo 以后,合金等轴  $\alpha$  相含量减小,条状细小次生  $\alpha$  相含量增多,拉伸强度、疲劳强度显著提升且塑性无损失。Zr 元素作为中性元素,对  $\beta$  相变点影响不大。然而 Zr 的添加可降低硅化物形核能,促进钛合金中硅化物析出,从而影响含硅钛合金力学性能<sup>[11]</sup>。徐峰等<sup>[12]</sup>研究了 Zr 含量对 Ti-1100 合金硅化物析出的影响,随 Zr 含量增加,合金硅化物溶解度下降,硅化物尺寸、体积分数上升。上述研究表明,适当的 Mo、Zr 微合金化可对钛合金内的  $\alpha$  相与硅化物析出行为进行调控,从而优化力学性能。然而对于新型富硅 Ti575 合金而言,目前尚无针对 Mo、Zr 元素微合金化对其组织性能影响的系统性研究。

本文以新型 Ti575 合金为研究对象,设计了具有不同 Mo、Zr 含量的 Ti575 体系合金: Ti-5Al-7.5V-0.5Si(Ti575), Ti-5Al-7.5V-1Mo-0.5Si(1Mo), Ti-5Al-7.5V-1Zr-0.5Si(1Zr), Ti-5Al-7.5V-0.5Mo-0.5Zr-0.5Si(0.5Mo-0.5Zr)。上述 4 种合金进行 940 °C/1 h 单相区固溶与 550 °C/6 h 两相区时效处理,开展拉伸试验并对断裂后变形组织进行表征,旨在揭示 Mo、Zr 元素对 Ti575 合金显微组织与力学性能的影响机

制,为Ti575合金成分进一步优化提供实验数据与理论支撑。

## 1 实验材料与方法

通过真空电弧熔炼,获得4种不同成分Ti575合金铸锭,Ti-5Al-7.5V-0.5Si(简称为Ti575),Ti-5Al-7.5V-1Mo-0.5Si(简称为1Mo),Ti-5Al-7.5V-1Zr-0.5Si(简称为1Zr),Ti-5Al-7.5V-0.5Mo-0.5Zr-0.5Si(简称为0.5Mo-0.5Zr)。纽扣铸锭至少进行5次重熔以确保成分均匀化。4种合金铸锭实际成分检测如表1所示,与预设值吻合良好。金相法测得4种合金 $\beta$ 相变点为 $(915\pm 10\text{ }^{\circ}\text{C})$ 。对纽扣铸锭在 $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ 保温1 h后进行热轧获得轧板,而后对轧板在 $940\text{ }^{\circ}\text{C}$ 固溶处理1 h,随炉冷却后 $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时效处理6 h,空冷,热机械处理工艺流程如图1所示。沿轧板轧向切取试样进行组织表征与力学性能测试,拉伸测试采用标距段8 mm,

表1 4种合金实测成分

Tab.1 Actual compositions of Ti575 alloys with four different compositions

| (mass fraction/%) |       |      |      |      |      |      |
|-------------------|-------|------|------|------|------|------|
| Alloy             | Ti    | Al   | V    | Zr   | Mo   | Si   |
| Ti575             | 86.39 | 5.45 | 7.60 | -    | -    | 0.56 |
| 1Zr               | 85.17 | 5.46 | 7.76 | 1.05 | -    | 0.55 |
| 1Mo               | 85.67 | 5.22 | 7.51 | -    | 1.01 | 0.59 |
| 0.5Mo-0.5Zr       | 85.21 | 5.33 | 7.76 | 0.52 | 0.56 | 0.61 |

截面尺寸 $1.5\text{ mm}\times 2.0\text{ mm}$ 的板状拉伸试样,尺寸如图2所示。采用配备了激光拉伸计(Zwick/Roell laserXtens1-15 HP)的Zwick/Roell Z 5.0 TN拉伸机进行拉伸实验,应变速率 $1\times 10^{-3}\text{ /s}$ 。采用TESCAN Clara GMH扫描电镜显微镜(SEM)对4种合金进行断口分析与显微组织观察。用于显微组织观察的试样在机械抛光后采用体积比为 $\text{HF}:\text{HNO}_3:\text{H}_2\text{O}=1:1:8$ 的腐蚀液进行腐蚀。显微组织参数在金相分析

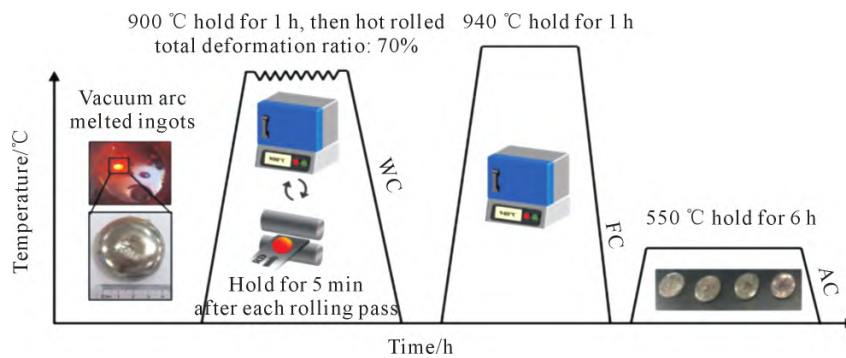


图1 4种不同成分Ti575合金制备与热处理工艺流程

Fig.1 Preparation and heat treatment of Ti575 alloys with four different compositions

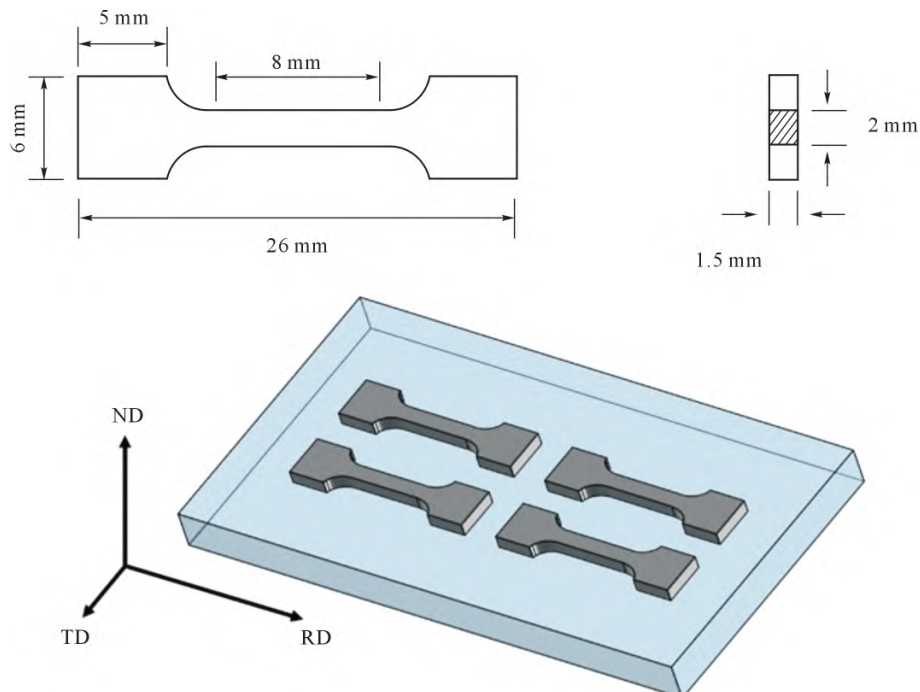


图2 拉伸试样尺寸与取样示意图

Fig.2 Schematic diagram showing the size and sampling position of the tensile sample

软件 Image Pro plus 上完成。

## 2 实验结果及讨论

### 2.1 不同成分合金显微组织

图 3 为不同成分合金经热处理后的显微组织形貌。经  $\beta$  单相区固溶加两相区时效处理后,4 种合金均呈现出典型的全片层组织形貌,即在原始  $\beta$  晶界处析出粗大晶界  $\alpha$  相,同时在原始  $\beta$  晶粒内析出取向一致、平行排列的  $\alpha$  片层团簇<sup>[13]</sup>。对比原始 Ti575 合金,1Mo 合金与 0.5Mo-0.5Zr 合金的  $\alpha$  片层团簇尺寸分别为 15.76 与 12.18  $\mu\text{m}$ , 相较于原始 Ti575 合金的 18.3  $\mu\text{m}$  分别减少了 13.9%与 33.4%; 单个  $\alpha$  片层厚度分别为 1.15 与 1.30  $\mu\text{m}$ , 相较于原始 Ti575 合金的 1.58  $\mu\text{m}$  分别减少了 27.2%与 17.7%。对于 1Zr 合金,其  $\alpha$  片层团尺寸(16.32  $\mu\text{m}$ )与单个  $\alpha$  片层尺寸(1.65  $\mu\text{m}$ )和原始 Ti575 合金相近,并未发生显著细化。进一步地,对 4 种合金进行高倍 SEM

观察,经两相区低温时效处理,4 种合金相邻片层  $\alpha$  中的残余  $\beta$  相内均析出了纳米尺度的次生  $\alpha$  相。与片层  $\alpha$  演化规律类似,相较于原始 Ti575 合金,微量 Mo 元素的加入细化了次生  $\alpha$  相,而 Zr 元素影响并不显著。Ti575, 1Mo, 1Zr, 0.5Mo-0.5Zr 合金次生  $\alpha$  相的厚度分别为 107.26, 82.66, 101.08 及 86.21 nm。值得注意的是,在 1Zr 合金中观察到大量白色硅化物颗粒,而在其他 3 种成分的 Ti575 合金中未观察到。4 种合金显微组织参数如表 2 所示。

表2 4种合金显微组织参数统计

Tab.2 Statistics of the microstructure parameters of Ti575 alloys with four different compositions

| Alloy       | Lamellar $\alpha$ colony thickness/ $\mu\text{m}$ | Single lamellar $\alpha$ thickness/ $\mu\text{m}$ | Secondary $\alpha$ thickness/nm |
|-------------|---------------------------------------------------|---------------------------------------------------|---------------------------------|
| Ti575       | 18.30                                             | 1.58                                              | 107.26                          |
| 1Mo         | 15.76                                             | 1.15                                              | 82.66                           |
| 1Zr         | 16.32                                             | 1.65                                              | 101.08                          |
| 0.5Mo-0.5Zr | 12.18                                             | 1.30                                              | 86.21                           |

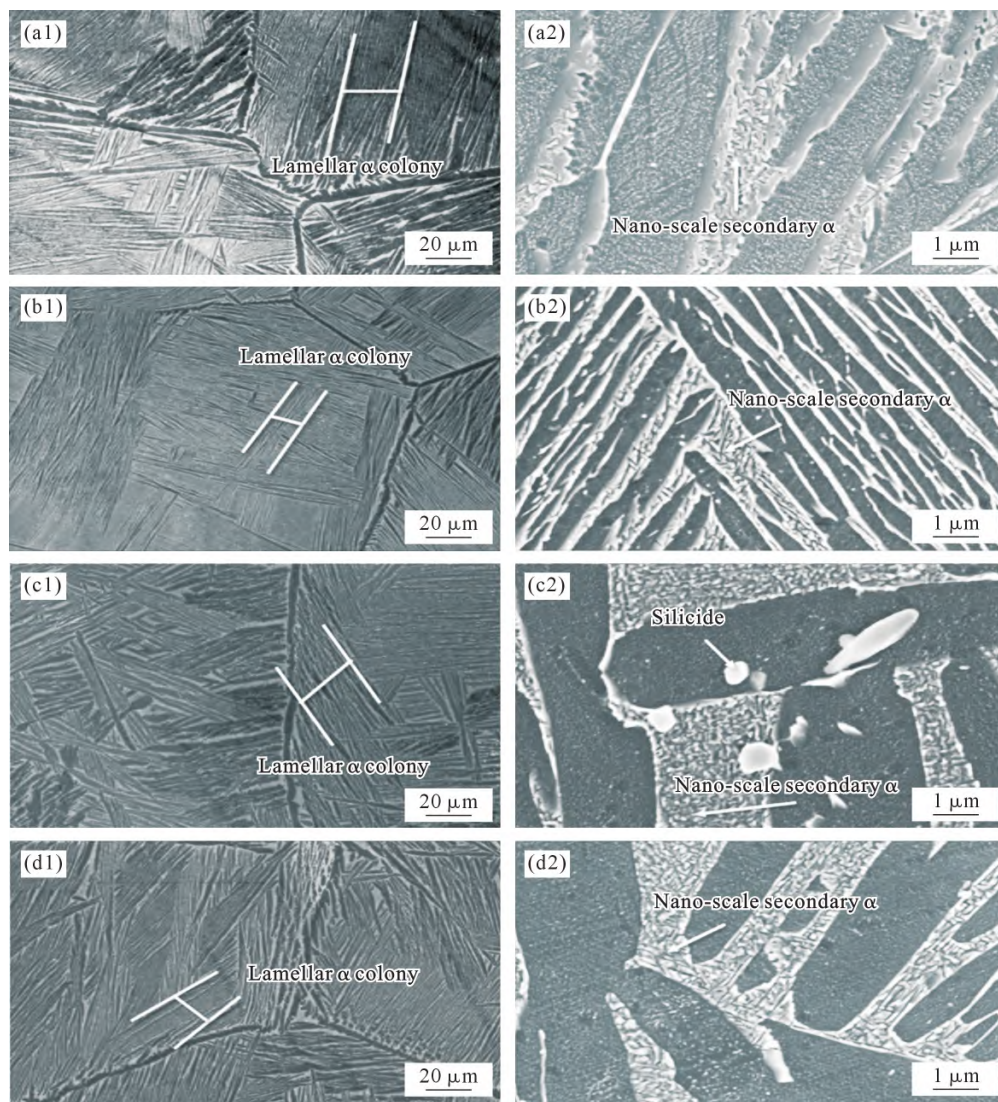


图 3 4 种合金初始组织表征:(a1~a2) Ti575; (b1~b2) 1Mo; (c1~c2) 1Zr; (d1~d2) 0.5Mo-0.5Zr  
Fig.3 Initial microstructures of Ti575 alloys with different compositions: (a1~a2) Ti575; (b1~b2) 1Mo; (c1~c2) 1Zr; (d1~d2) 0.5Mo-0.5Zr

## 2.2 不同成分钛合金拉伸性能

图 4 为不同成分 Ti575 合金的工程应力应变曲线、抗拉强度(UTS)、屈服强度(YS)以及断裂应变值( $\epsilon_f$ )。相较原始 Ti575 合金,1Mo 和 1Zr 的抗拉强度分别提升了 90 和 39 MPa,同时塑性都有一定的损失(1Mo: 9.4%, 1Zr: 10.8%),相较 Ti575(13.6%)分别降低了 31.01%和 20.82%。对于 0.5Mo-0.5Zr 合金,其抗拉强度为 4 种合金中最高(1 053 MPa),同时保持了较为可观的塑性(11.8%)。拉伸结果表明,0.5Mo-0.5Zr 合金具备最佳的强塑匹配。

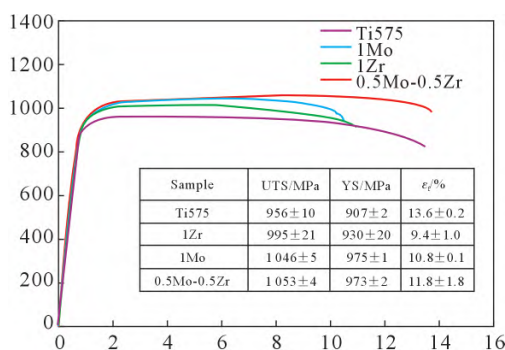


图 4 4 种不同成分 Ti575 合金工程应力应变曲线

Fig.4 Engineering stress-strain curves of Ti575 alloys with four different compositions

## 2.3 不同成分钛合金拉伸断口与变形组织

4 种成分合金拉伸宏观断口如图 5 所示。可以发现,对于 Ti575 合金和 0.5Mo-0.5Zr 合金,其室温拉伸断口由大量韧窝和少量解理台阶组成,为典型的韧性断裂特征,表明 Ti575 和 0.5Mo-0.5Zr 合金在拉伸过程中产生了较为明显的塑性变形。对于

1Mo 合金与 1Zr 合金,其断口中也观察到韧窝,但韧窝的深度、尺寸均小于 Ti575 与 0.5Mo-0.5Zr 合金。此外,在 1Mo 和 1Zr 合金断口中观察到大面积的解理面,证明 1Mo 与 1Zr 在拉伸过程中,裂纹迅速失稳,沿原始  $\beta$  晶粒扩展,变形协调能力较弱。4 种合金的断口特征与工程应力-应变曲线结果相吻合。

对 4 种合金拉伸断口附近的变形组织进行进一步表征。对于 Ti575, 1Zr 与 0.5Mo-0.5Zr 合金,在靠近断口处观察到粗片层  $\alpha$  的拉长、扭折,证明粗片层  $\alpha$  在拉伸过程中承担了大量的塑性变形。1% Mo 元素的加入显著细化了片层  $\alpha$  相,在 1Mo 合金断口附近未观察到片层  $\alpha$  被扭折或拉长,证明相较于粗片层  $\alpha$ ,细片层  $\alpha$  强度更高,变形能力较差。值得注意的是,在 1Zr 合金的断口附近观察到大量的裂纹孔洞。对孔洞进行高倍 SEM 观察,发现存在硬质硅化物颗粒,证明硅化物可作为裂纹孔洞的形核位点<sup>[4]</sup>。值得注意的是,由于硅化物与基体合金之间模量差较大<sup>[15]</sup>,当合金基体在拉伸作用下发生严重扭折时,硬质硅化物仍未产生明显塑性变形。

## 2.4 Mo、Zr 元素对 Ti575 合金显微组织影响机制

合金元素的添加显著影响 Ti575 合金显微组织形貌与相析出行为,进而影响合金服役性能。如表 2 所示,1Mo 与 0.5Mo 合金的片层  $\alpha$  团簇尺寸、单个片层  $\alpha$  尺寸及次生  $\alpha$  尺寸均较原始 Ti575 合金显著细化,而 1Zr 合金变化则不明显,这表明 Mo 元素对组织的细化作用较 Zr 元素更加显著。Mo 元素对组织的细化作用可从晶格常数与扩散系数两方面进

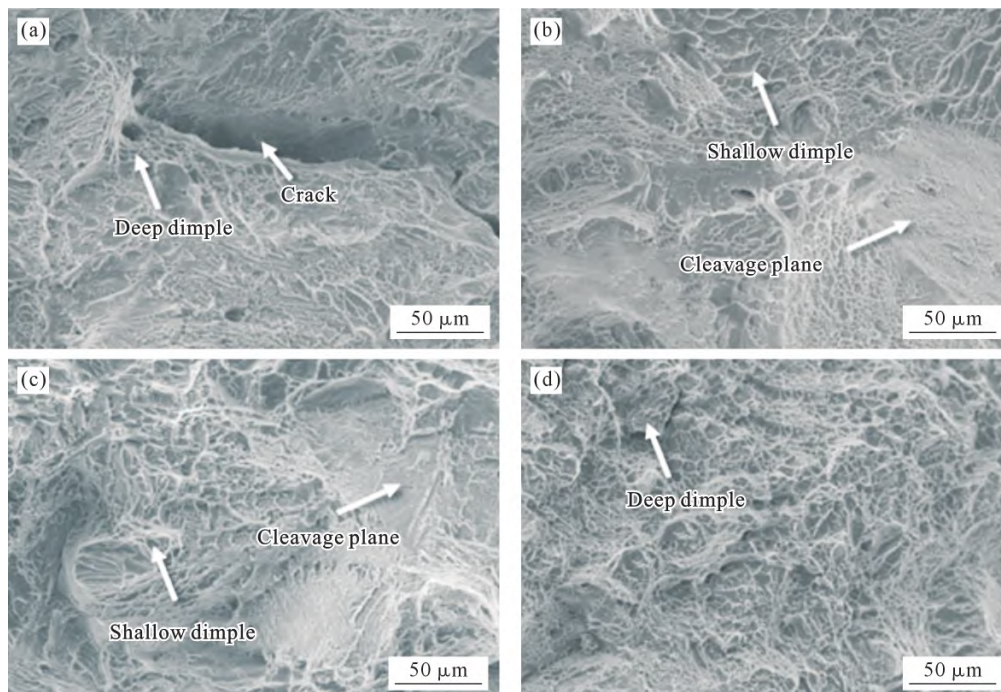


图 5 4 种不同成分 Ti575 合金拉伸断口特征:(a) Ti575; (b) 1Mo; (c) 1Zr; (d) 0.5Mo-0.5Zr

Fig.5 Tensile fracture characteristics of Ti575 alloys with four different compositions: (a) Ti575; (b) 1Mo; (c) 1Zr; (d) 0.5Mo-0.5Zr

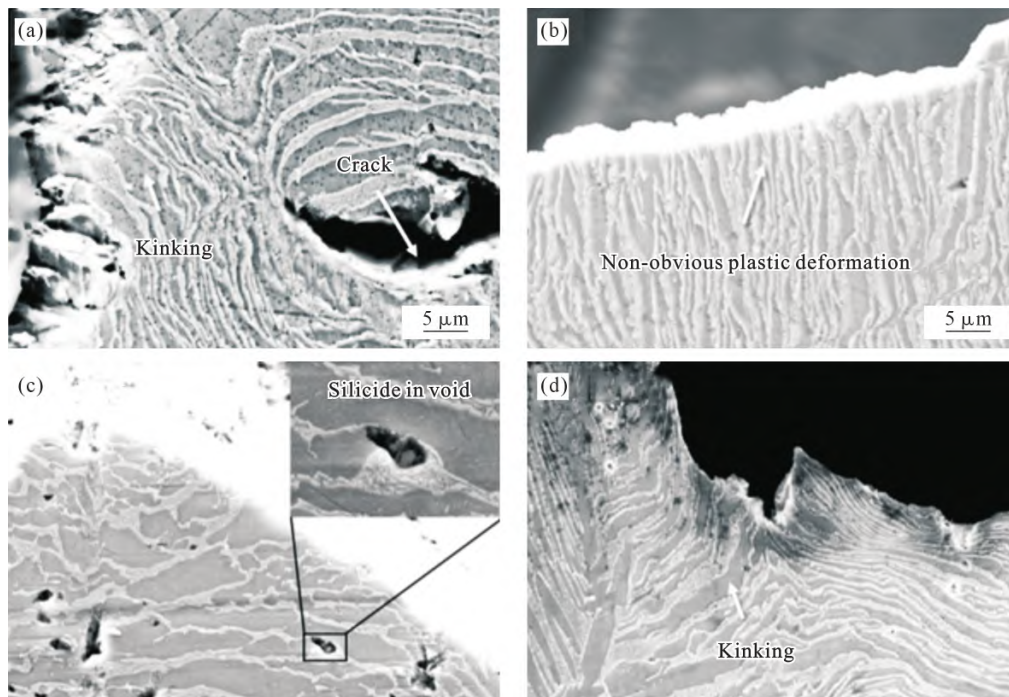


图 6 4 种不同成分 Ti575 合金变形组织特征: (a) Ti575; (b) 1Mo; (c) 1Zr; (d) 0.5Mo-0.5Zr  
Fig.6 Deformed microstructure characterization of Ti575 alloys with four different compositions: (a) Ti575; (b) 1Mo; (c) 1Zr; (d) 0.5Mo-0.5Zr

行解释。一方面,Mo 原子直径约为 135 pm,Ti 原子约为 147 pm,当 Mo 原子固溶入 BCC-Ti 晶格时,会导致 BCC-Ti 晶格常数下降, $\beta\{110\}$ 晶面间距缩短,原子位移能垒下降。原子位移能垒的下降有助于降低  $\beta$ - $\alpha$  相变阻力,使得  $\alpha$  相在  $\beta$  基体中析出的形核位点增加<sup>[9]</sup>,因此  $\alpha$  相随 Mo 元素加入显著细化;另一方面, $\alpha$  相的外延生长过程受  $\beta$  稳定元素从  $\alpha$  相内向  $\beta$  基体内扩散速率的影响,由于 Mo 元素在钛合金内属于慢扩散元素,其加入显著抑制  $\alpha$  相外延生长,因此组织显著细化<sup>[10]</sup>。相较 Mo 元素,Zr 元素由于其较快的扩散速率,对  $\alpha$  相细化作用并不显著。然而,微量 Zr 元素的添加显著影响硅化物析出行为。如图 3 所示,当 Zr 含量为 0.5%时,在 0.5Mo-0.5Zr 合金内尚未观察到大量硅化物析出。而当 Zr 含量继续增加至 1%时,在 1Zr 合金内观察到硅化物。有文献指出,Zr 元素含量增加会降低 Si 元素在钛合金中的固溶度<sup>[11-12]</sup>。当 Zr 元素含量增加至 1%时,合金中硅元素含量超过其在晶格中的固溶极限,因而硅化物开始在 1Zr 合金内析出。

## 2.5 不同成分 Ti575 合金强塑匹配影响机制

如图 4 所示,Mo、Zr 元素加入显著提升合金强度,同时塑性有所下降。相比 1Mo 与 1Zr 合金,0.5Mo-0.5Zr 合金在保持了高强度的同时,相较 Ti575 原始合金塑性损失最小。Mo 元素对 Ti575 合金强度贡献主要归因于固溶强化与  $\alpha$  组织细化诱导的霍尔佩奇强化。一方面,固溶入钛合金  $\alpha$ 、 $\beta$  晶

格内的 Mo 原子增大了晶格摩擦阻力<sup>[17-18]</sup>;另一方面,Mo 元素添加可显著细化片层  $\alpha$  相与次生  $\alpha$  相,降低位错滑移平均自由程<sup>[19]</sup>。然而,过量 Mo 元素的加入会使得片层  $\alpha$  与次生  $\alpha$  变得过于细小,极大降低位错可动性,加剧微区应力集中。因此,对于 1Mo 合金,其强度相比原始 Ti575 合金提升约 100 MPa 的同时,塑性损失近 30%。对于 1Zr 合金而言,Zr 元素的加入并未显著细化  $\alpha$  相,由此可推断,1Zr 合金强度提升主要归因于 Zr 元素固溶强化以及硅化物析出所诱导的奥罗万强化<sup>[20]</sup>。然而作为不可被位错切过的硬质颗粒,变形过程硅化物附近塞积大量位错,产生严重的微区应力集中。同时,硅化物在变形过程中与基体的应变失配又进一步加剧了硅化物/基体合金界面的应力集中,导致裂纹孔洞在硅化物与基体界面处大量萌生。尽管 1Zr 合金中片层  $\alpha$ 、次生  $\alpha$  尺寸较原始 Ti575 并未明显减小,但硅化物诱导的开裂行为仍然使得 1Zr 合金塑性相比原始 Ti575 合金降低近 20%。对于 0.5Mo-0.5Zr 合金,其综合了 1Mo 与 1Zr 合金的优点。一方面,0.5% Mo 元素的加入在细化  $\alpha$  片层同时不会使其过于细小,从而平衡了位错阻力与位错可动性;另一方面,0.5% Zr 元素加入在起固溶强化作用同时,避免了界面硅化物过量析出,降低了拉伸过程中的开裂倾向。综合作用下,0.5Mo-0.5Zr 合金相较 Ti575 基体合金,在强度明显提升的同时塑性损失最小,具备最佳综合力学性能。

### 3 结论

(1)随着 Mo 含量增加,Ti575 合金片层  $\alpha$  与次生  $\alpha$  尺寸显著细化;Zr 元素对  $\alpha$  相细化作用弱于 Mo,但可降低硅化物析出能。当添加 1%Zr 元素后,在 1Zr 合金中可观察到大量硅化物析出。

(2)Ti575-1Mo 合金强度提升源于 Mo 元素固溶强化与组织细化诱导的霍尔佩奇强化,但同时位错滑移自由度下降,塑性较 Ti575 合金下降;Ti575-1Zr 合金强度提升源于 Zr 元素固溶强化与硅化物析出诱导的奥罗万强化,但同时硅化物与基体间应变失配促进孔洞形核,塑性较 Ti575 合金下降。

(3)对于 0.5Mo-0.5Zr 合金,一方面 0.5% Mo 元素在细化  $\alpha$  片层同时不会使其过于细小,另一方面 0.5% Zr 元素起固溶强化作用同时避免界面硅化物过度析出。综合作用下,0.5Mo-0.5Zr 合金较 Ti575 合金强度大幅提升同时塑性损失最小,具备最佳强塑匹配。

#### 参考文献:

- [1] BANERJEE D, WILLIAMS J C. Perspectives on titanium science and technology[J]. *Acta Materialia*, 2013, 61(3): 844-879.
- [2] SRINIVASU G, NATRAJ Y, BHATTACHARJEE A, NANDY T K, NAGESWARA RAO G V S. Tensile and fracture toughness of high strength  $\beta$  titanium alloy, Ti-10V-2Fe-3Al, as a function of rolling and solution treatment temperatures[J]. *Materials & Design*, 2013, 47: 323-330.
- [3] WU Z H, KOU H C, LI J S, HÉMERY S, CHEN N N, TANG J H, QIANG F M, SUN F, PRIMA F. High-strength and low-dwell-sensitivity titanium alloy showing high tolerance to microcracking under dwell fatigue condition[J]. *International Journal of Plasticity*, 2022, 159: 103449.
- [4] CHURCH N L, JAMES I C, MARTIN N, JONES N G. The effect of heat treatment temperature on the mechanical properties of TIMETAL® 575[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2024, 890: 145991.
- [5] 刘凯华,唐斌,刘运玺,戴锦华,陈晓飞,郑国明,李金山. Ti-575 钛合金热变形行为及微观组织演变[J]. *铸造技术*, 2023, 44(10): 909-916.
- [6] LIU K H, TANG B, LIU Y X, DAI J H, CHEN X F, ZHENG G M, LI J S. Thermal deformation behavior and microstructure evolution of a Ti-575 titanium alloy[J]. *Foundry Technology*, 2023, 44(10): 909-916.
- [7] WU Z H, KOU H C, CHEN N N, QIANG F M, FAN J K, TANG B, LI J S. Crack initiation mechanism in a high-strength Ti-5Al-7.5V alloy subjected to high cycle fatigue loading[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2023, 148: 107201.
- [8] WU Z H, KOU H C, LI J S, CHEN N N, XI Z C, SUN F, PRIMA F. Crack initiation mechanism of a silicide-containing high-strength Ti-5Al-7.5V alloy under low-cycle fatigue loading[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2023, 865: 144654.
- [9] DAI J H, TANG B, CHU Y D, LIU K H, ZHENG G M, CHEN X F, LI J S, ZHANG P X. Effect of microstructure on impact fracture mechanism of a high-strength Ti-5Al-7.5V-0.5Si-0.25Fe-0.2O alloy[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2024, 890: 145900.
- [10] ZHU C P, PENG G S, LIN Y C, ZHANG X Y, LIU C Q, ZHOU K C. Effects of Mo and Cr contents on microstructures and mechanical properties of near  $\beta$ -Ti alloy[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2021, 825: 141882.
- [11] 费跃,王新南,商国强,李静,祝力伟,朱知寿. 合金元素对新型 TC32 钛合金组织和性能的影响[J]. *热加工工艺*, 2022, 51(16): 64-66, 71.
- [12] FEI Y, WANG X N, SHANG G Q, LI J, ZHU L W, ZHU Z S. Influence of alloying elements on microstructure and property of new TC32 titanium alloy[J]. *Hot Working Technology*, 2022, 51(16): 64-66, 71.
- [13] ZHAO E T, SUN S C, ZHANG Y. Recent advances in silicon containing high temperature titanium alloys[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2021, 14: 3029-3042.
- [14] 徐峰,李阁平,杨锐,VARLIOGLU M, NASH P. Zr 含量对 Ti-1100 合金中硅化物析出的影响[J]. *金属学报*, 2006, 42(7): 770-776.
- [15] XU F, LI G P, YANG R, VARLIOGLU M, NASH P. Effect of zirconium content on precipitation of silicide in Ti-1100 alloy[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2006, 42(7): 770-776.
- [16] DAVIS A E, DONOGHUE J, KENNEDY J R, BYRES N, PRANGNELL P B. In-situ observation of single variant  $\alpha$  colony formation in Ti-6Al-4V[J]. *Acta Materialia*, 2021, 220: 117315.
- [17] SU Y, FAN H Y, YOU F H, KONG F T, WANG X P, CHEN Y Y. Improved tensile properties of a novel near- $\alpha$  titanium alloy via tailoring microstructure by hot-rolling[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2020, 790: 139588.
- [18] SU Y, HAO G J, FAN H Y, ZHAI Y W, KONG F T, WANG X P, CHEN Y Y. Study on rolling of a new near- $\alpha$  titanium alloy: Microstructure refinement and dual-scale silicides evolution[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2021, 852: 156867.
- [19] QI M, MA Y J, YANG J, JIA Y D, WENG H B, HUANG S S, ZHANG R X, QIU J K, LEI J F, YANG R. Microtexture evolution effected by Mo content in  $\alpha+\beta$  titanium alloys [J]. *Materials Characterization*, 2022, 188: 111884.
- [20] ZHAO G H, LIANG X Z, KIM B, RIVERA-DÍAZ-DEL-CASTILLO R E J. Modelling strengthening mechanisms in beta-type Ti alloys [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2019, 756: 156-160.
- [21] ZHANG H, ZHANG J Y, HOU J P, ZHANG D D, YUE Y H, LIU G, SUN J. Making a low-cost duplex titanium alloy ultra-strong and ductile via interstitial solutes[J]. *Acta Materialia*, 2022, 241: 118411.
- [22] ZHANG C L, BAO X Y, HAO M Y, CHEN W, ZHANG D D, WANG D, ZHANG J Y, LIU G, SUN J. Hierarchical nano-martensite-engineered a low-cost ultra-strong and ductile titanium alloy [J]. *Nature Communications*, 2022, 13(1): 5966.
- [23] ZHANG C J, YANG Z B, QU B L, LIAN Q H, GUO R P, ZHANG S Z, KONG F T, CAO P. Superior strength-ductility synergy in a near- $\alpha$  titanium alloy fabricated by severe plastic deformation at lower temperatures[J]. *Scripta Materialia*, 2024, 248: 116140.

(责任编辑:宫文婧)