

引用格式:王龙刚,李健,杨宇航,等. 固溶时效处理对锻态 TC9 合金组织及拉伸性能的影响[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版),2026,44(3):72-79. [Wang Longgang, Li Jian, Yang Yuhang, et al. Effect of solution aging treatment on the microstructure and tensile properties of forged TC9 titanium alloy[J]. Journal of Guizhou Normal University (Natural Sciences), 2026, 44(3):72-79.]

固溶时效处理对锻态 TC9 合金组织 及拉伸性能的影响

王龙刚^{1,2}, 李健¹, 杨宇航¹, 谭长生^{1,3*}, 王亚明², 包婷婷¹

(1. 西安理工大学材料科学与工程学院, 陕西西安 710000; 2. 宝鸡钛戈金属科技股份有限公司, 陕西宝鸡 721000; 3. 扬州市管件厂有限公司, 江苏扬州 225800)

摘要:为更好地优化钛合金的强度、塑性等力学性能,采用金相显微镜、扫描电子显微镜、万能试验机等设备,通过固溶温度、固溶时间、时效温度等参数对 TC9 钛合金锻棒的显微组织、力学性能及断裂行为进行研究。结果表明:随着固溶温度的升高, α 相再结晶增加,部分小尺寸的片层 α 相消失,转变为 β 相,片层 α 相转变为短棒状 α 相;随着时效温度增加,合金中 $6\ \mu\text{m}$ 宽度以上的板条 α 相含量显著增加, β 相基体中析出片层 α 相的含量、宽度均持续增大,其中 550 、 600 、 $650\ ^\circ\text{C}$ 条件下析出的片层 α 相的宽度分别为 60 、 112 、 $154\ \text{nm}$ 。拉伸性能结果表明:相对仅固溶处理,固溶 $+550\ ^\circ\text{C}$ 、固溶 $+600\ ^\circ\text{C}$ 、固溶 $+650\ ^\circ\text{C}$ 时效处理的合金强度分别提高了 105.6 、 38.8 、 $81.8\ \text{MPa}$; $950\ ^\circ\text{C}/20\ \text{min}$ 固溶处理 $+650\ ^\circ\text{C}$ 时效 $4\ \text{h}$ 工艺的试样获得了最佳的强度($1173.4\ \text{MPa}$)和最佳的塑性匹配(3.5%)。

关键词:TC9 钛合金; 固溶时效处理; 微观组织; 强塑性匹配; 断裂机理

中图分类号: TG166.5 文献标识码: A 文章编号: 1004—5570(2026)03—0072—08

DOI: 10.16614/j.gznunj.zrb.2026.03.008

Effect of solution aging treatment on the microstructure and tensile properties of forged TC9 titanium alloy

Wang Longgang^{1,2}, Li Jian¹, Yang Yuhang¹, Tan Changsheng^{1,3*},

Wang Yaming², Bao Tingting¹

(1. School of Materials Science and Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710000, China; 2. Baoji Tige Metal Technology Co., Ltd, Baoji, Shaanxi, 721000, China; 3. Yangzhou Pipe Fittings Factory Co., Ltd, Yangzhou, Jiangsu 225800, China)

Abstract: To optimize the mechanical properties of titanium alloys such as strength, plasticity, and toughness, the microstructure, mechanical properties, and fracture behavior of TC9 titanium alloy forged bars was investigated by using metallographic microscopy, scanning electron microscopy, and universal testing machines, focusing on parameters including solution temperature, solution time, and aging temperature. The results showed that with the increase of solid solution temperature, the recrystallization of α phase increased, and some small-sized lamellar α phase disappeared and transformed into β phase,

收稿日期: 2025-02-20

基金项目: 陕西省秦创原“科学家+工程师”队伍建设项目(2025QCYKXJ148)

作者简介: 王龙刚(1982-), 男, 工程师, 研究方向: 金属材料成型热处理, E-mail: Wanglg@126.com.

* 通信作者: 谭长生(1988-), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 金属材料强韧化, E-mail: cstan@xaut.edu.cn.

while lamellar α phase transformed into short rod-shaped α phase. With the increase of aging temperature, the α content of flat noodles above 6 μm in the alloy increased significantly, and the content and size of precipitated α phase in β matrix continued to increase. The α size of precipitated α phase at 550 $^{\circ}\text{C}$, 600 $^{\circ}\text{C}$ and 650 $^{\circ}\text{C}$ was 60 nm, 112 nm and 154 nm respectively. The tensile test results showed that compared to the solution-treated-only condition, the alloy strength increased by 105.6 MPa, 38.8 MPa, and 81.8 MPa after solution treatment plus aging at 550 $^{\circ}\text{C}$, 600 $^{\circ}\text{C}$, and 650 $^{\circ}\text{C}$, respectively. Therefore, the sample subjected to solution treatment at 950 $^{\circ}\text{C}$ for 20 min followed by aging at 650 $^{\circ}\text{C}$ for 4 h achieved the optimal balance of strength (1 173.4 MPa) and ductility (3.5%).

Keywords: TC9 titanium alloy; solution aging treatment; microstructure; match of strength-ductility; fracture mechanism

0 引言

钛合金虽具有低密度、高强度、耐腐蚀性好等优点^[1-2],但其强度、塑韧性等基础力学性能的优化问题,却一直是材料学研究领域的难点。目前,调控合金成分的种类和含量、固溶强化、析出强化等是提升钛合金硬度、强度等力学性能最常用的方法^[3-4]。有研究显示,当合金成分确定后,采用热加工热处理工艺,通过科学调控加热、保温、冷却等流程来精细调控材料的内部微观组织结构,可实现材料性能的全面优化^[5-6]。可见,温度在钛合金的热处理流程中具有重要作用,能影响钛合金性能的稳定性与提升。另外,保温时间作为热处理过程中的关键变量,其长短可直接影响微观组织的均匀性、尺寸等参量,能对钛合金的宏观性能产生显著作用^[7]。

通常,钛合金的强化主要是通过固溶时效处理从 β 相基体析出细小针状 α 相来实现的,如 TC4^[8]、TC21^[2]、Ti55531^[9]、TC11^[10] 等。这是因为固溶时效处理能促进亚稳 β 相的分解,进而转变为稳定且弥散分布的 $\alpha + \beta$ 相^[11]。在降温过程中,钛合金中的 β 相在原始 β 相晶界处易优先析出 α 相,且形成连续分布的 α 层,连续晶界 α 相^[12-13]可使合金的塑性较低^[14]。可见,钛合金在锻造变形后,合适的热处理工艺是调控其性能的关键^[15]。有研究显示,固溶时效参数对 α 相的尺寸、含量及其室温强度也具有显著影响^[16-17],因此,研究合理的热处理工艺十分必要。

TC9 钛合金是 Ti-Al-Mo-Sn-Si 系两相钛合金,也称 BT9^[1,18]。陈国财等^[1]采用多轴向锻造结合 600 $^{\circ}\text{C}$ 低温退火处理,获得了细晶组织和 1 060 ~ 1 090 MPa 的拉伸强度;张大磊等^[18]通过高压热处

理,细化了 TC9 钛合金 α 相和马氏体相,显著提升了合金的硬度和抗压强度;关蕾等^[11]通过不同双重退火热处理工艺,对 TC9 钛合金棒材的显微组织、室温和高温拉伸性能进行研究,发现随着 1 次退火温度升高, β 相增加而初生 α 相降低,随着 2 次退火温度升高,显微组织变化不大,其中,960 $^{\circ}\text{C}/1.5 \text{ h} + 530 \text{ }^{\circ}\text{C}/6 \text{ h}$ 工艺获得了最佳的室温和高温力学性能;本课题组前期研究显示,固溶时效工艺对锻态 TC9 钛合金组织性能具有显著影响,当固溶温度增加,板条 α 相转变为短棒状、等轴 α 相,当时效温度升高,板条 α 相球化的同时 β 相基体上析出针状次生 α 相,从而导致合金强度显著升高^[15]。可见,锻造变形、固溶时效工艺对 TC9 钛合金的组织性能影响较大,尤其是对 α 相析出及再结晶行为具有明显影响。为进一步优化 TC9 钛合金的强度、塑韧性等力学性能,本研究以锻态 TC9 钛合金为研究对象,通过固溶时效热处理,分析固溶温度和保温时间对 α 、 β 相变行为的影响,同时探究时效温度对二次 α 相析出行为的影响,以期为钛合金的组织调控和性能优化提供数据支撑及参考。

1 试验与方法

所选材料为 TC9 钛合金(名义成分:Ti-6.5Al-3.5Mo-2.5Sn-0.3Si),合金相变点为 1 010 ~ 1 020 $^{\circ}\text{C}$ ^[11]。选择锻造变形量为 67% 的锻棒进行固溶时效处理,固溶温度分别为 900、950、1 000 $^{\circ}\text{C}$,固溶时间分别为 20、40、60 min,空冷;以 950 $^{\circ}\text{C}/20 \text{ min}$ 固溶试样为研究对象,时效温度分别为 500、550、600 $^{\circ}\text{C}$,时效时间均为 4 h,空冷至室温;将制备出的试样进行腐蚀,腐蚀液中氢氟酸、硝酸和水的体积比是 1:5:8,腐蚀时间为 25 ~ 30 s。采用型号为 Olympus 倒置金相显微镜(GX71)进行微观组织表征及分

析;采用 JSM-6700F 冷场发射扫描电子显微镜 (SEM) 观察和定量分析金相组织;采用 ImageJ 软件对 OM、SEM 图像进行处理并统计、分析显微组织特征参量;采用 ETM105D 型号的电子万能试验机进行室温拉伸性能测试,拉伸速度为 0.5 mm/

min。由图 1(a) 可见,原始 β 晶粒尺寸为 600 μm 。由图 1(b) 可见, β 晶界形成了连续 α 相组织,平均宽度为 4 μm , α 集束尺寸约为 65 ~ 120 μm 。可见,合金微观组织存在一定缺陷,须通过后续固溶时效热处理予以改善。

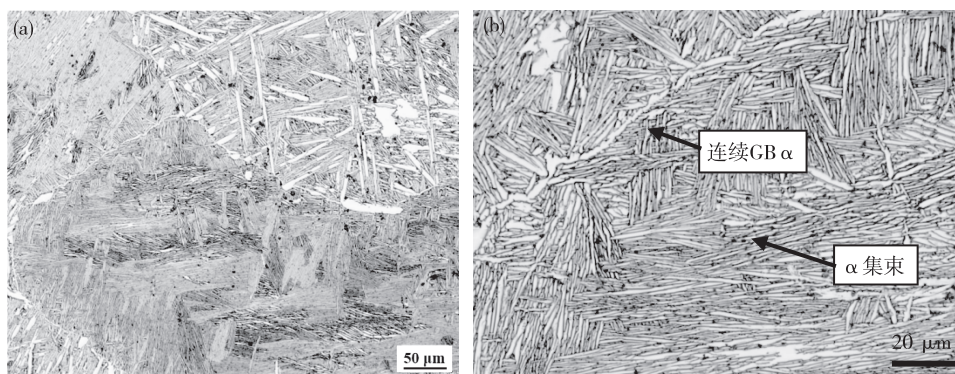


图 1 TC9 钛合金锻造变形量 67% 下的金相显微组织

Fig. 1 Microstructure of TC9 titanium alloy under forging deformation of 67%

注:(a)粗大 β 晶粒;(b) α 集束。

2 结果与讨论

2.1 显微组织分析

图 2 为 67% 变形量的 TC9 锻棒在 900、950、1 000 $^{\circ}\text{C}$ 固溶处理 20 min 的微观组织图。由图 2 (a) 可见:组织中存在部分连续晶界 α 相(平均宽度为 4 μm)及 α 集束(宽度为 40 ~ 100 μm);组织中存在少量平均直径为 16 μm 的等轴 α 相,这是锻造过程中动态再结晶形成的球化相。由图 2(b) 可见,锻态试样 900 $^{\circ}\text{C}$ 固溶处理 20 min 空冷后,组织出现大量平均宽度为 30 ~ 60 μm 的 α 集束以及短棒状、等轴状 α 相,说明该固溶处理促进了板条 α 相的破碎和再结晶,获得了组织的细化效果。由图 2(c) 可见:当固溶温度升高至 950 $^{\circ}\text{C}$ 时,合金中 α 相逐渐向 β 相转变, α 集束几乎消失,形成了大量短棒状 α 相,值得注意的是由原 β 相转变基体中的针状 α 相又转变成了 β 相(见图中浅灰色区域);微观组织由多尺度板条 α 相和基体 β 相组成,其中板条 α 相的平均宽度表现为 6.8 μm 和 2.1 μm 的双尺度特征。由图 2(d) 可见:当固溶温度为 1 000 $^{\circ}\text{C}$ 时,因接近合金相变点,导致了大量 α 相向 β 相转变,故合金 β 相含量大幅增加;合金中 α 相球化程度增加,获得更多的短棒状和等轴状 α 相,除了平均宽度为 7.2 μm 的板条 α 相,还产生

了大量平均直径为 2.7 μm 的短棒状和等轴 α 相。可见,固溶温度的升高会使 α 相集束结构减少, α 相再结晶增加,部分小尺寸的片层 α 相又转变为 β 相,片层 α 相转变为短棒状 α 相。当固溶温度升高至相变点附近时,细小的棒状 α 相会溶解,导致 α 相含量减少, β 相含量明显增大。

由图 3 (a) 可见:当固溶时间增加至 40 min 时,合金中 β 相晶界处出现了等轴 α 相(平均直径为 10 μm),形成了非连续的项链状晶界 α 相;晶内除了平均宽度为 1.5 μm 的短棒状 α 相外,还有少量直径为 4.8 μm 的等轴 α 相,其余为纯 β 相;与 20 min 固溶处理相比,40 min 固溶处理后,合金再结晶程度增加,形成大量短棒状 α 相,且 α 集束几乎消失。由图 3 (b) 可见:当固溶时间增加至 60 min 时,合金中 α 集束全部消失,形成了典型的双尺度片层组织结构;合金中更多的 α 相向 β 相转变, β 相含量逐渐增加;部分 α 相局部长大成平均宽度为 5.1 μm 的板条 α 相,其余 α 相则细化成平均宽度为 1.6 μm 的细板条 α 相。由图 2 (b)、图 3 可见,随着固溶时间的增加,组织从棒状的 α 相转变成网篮组织,且组织间相互交叉。

2.2 时效处理对 TC9 钛合金微观组织的影响

钛合金主要是通过时效处理从 β 相基体析出细小针状 α 相来实现合金的强化效果^[9,19-21]。本试验结果显示,高温固溶处理空冷后,除了形成短

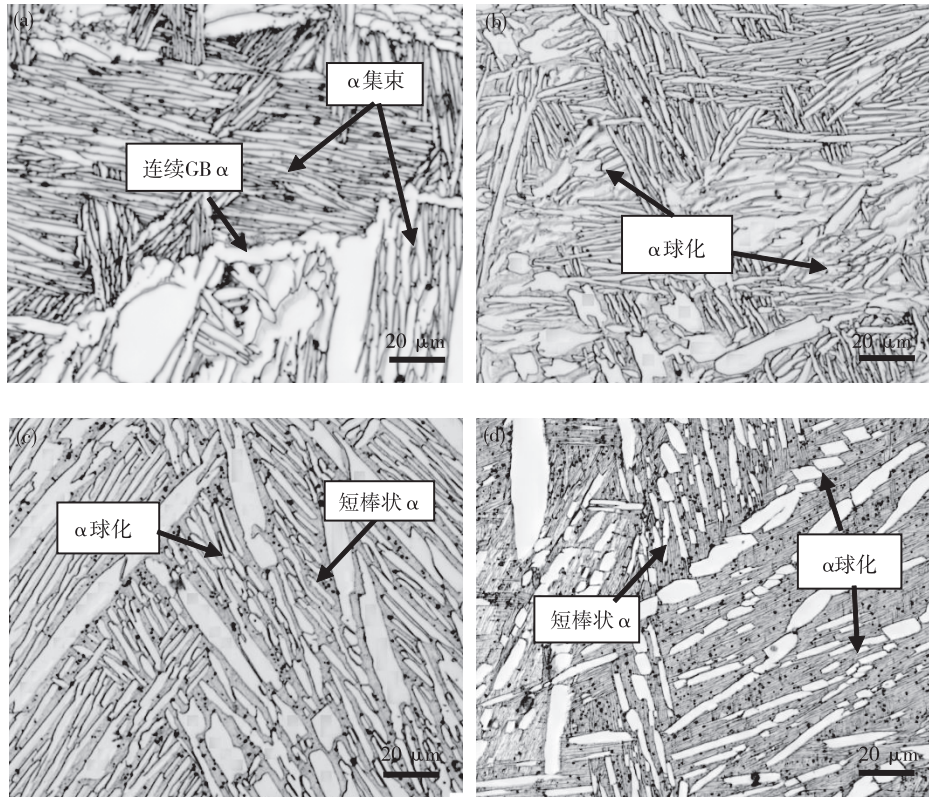


图2 固溶处理前、后的微观组织

Fig. 2 Microstructure before and after solution treatment

注:(a)锻造态;(b)900 °C/20 min, AC;(c)950 °C/20 min, AC;(d)1 000 °C/20 min, AC。

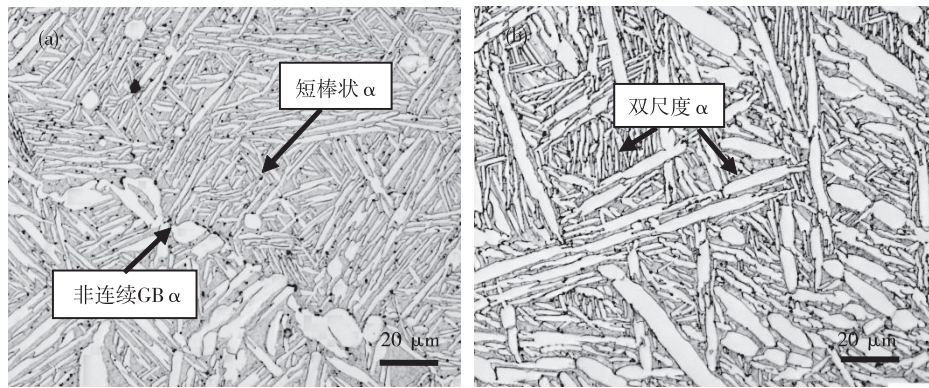


图3 950 °C 固溶不同时间对微观组织的影响

Fig. 3 Effect of different solid solution times at 950 °C on microstructure

注:(a)40 min, AC;(b)60 min, AC。

棒状 α 相,还获得了大量的纯 β 相基体。为此,在保持一定量初生板条 α 相的基础上,继续进行时效处理,使 β 相基体析出大量细小二次 α 相以实现强化作用。由图 4(a)可见,合金组织主要以少量平均宽度为 6.4 μm 板条 α 相和平均宽度为 1.8 μm 板条 α 相组成,其中存在少量平均宽度为 30 μm 的 α 集束。由图 4(b)可见,板条 β 相里面析出了大量纳米尺寸的 α 相,其平均尺寸约为

60 nm。由图 4(c)可见,当时效温度升高至 600 °C 时,合金出现明显的晶界非连续的等轴 α 相,以及大量的平均直径为 6.3 μm 短棒状 α 相和平均宽度为 2.1 μm 的板条 α 相。由图 4(d)可见,600 °C 时效后,β 相基体析出大量宽度为 112 nm 的针状 α 相。由图 4(e)可见,当时效温度持续升高至 650 °C 时,合金中仍然存在 2 种尺度的板条 α 相,其平均宽度分别为 6.7、2.4 μm,与更高温度相比,

此时的 α 相尺寸略有长大。由图4(f)可见, β 相基体中析出了大量的纳米尺寸 α 相,其平均宽度为154 nm。可见,随着时效温度的增加,合金中的初生板条 α 相的尺寸略有增加,其中尺寸为6 μm 以上的板条 α 相含量显著增加,这是因为温度升

高,元素扩散速度增加,促进了 α 相的长大。SEM结果表明,随着时效温度的增加, β 相基体中析出 α 相的含量、尺寸均持续增大,其中550、600、650 $^{\circ}\text{C}$ 条件下析出的 α 相尺寸分别为60、112、154 nm。

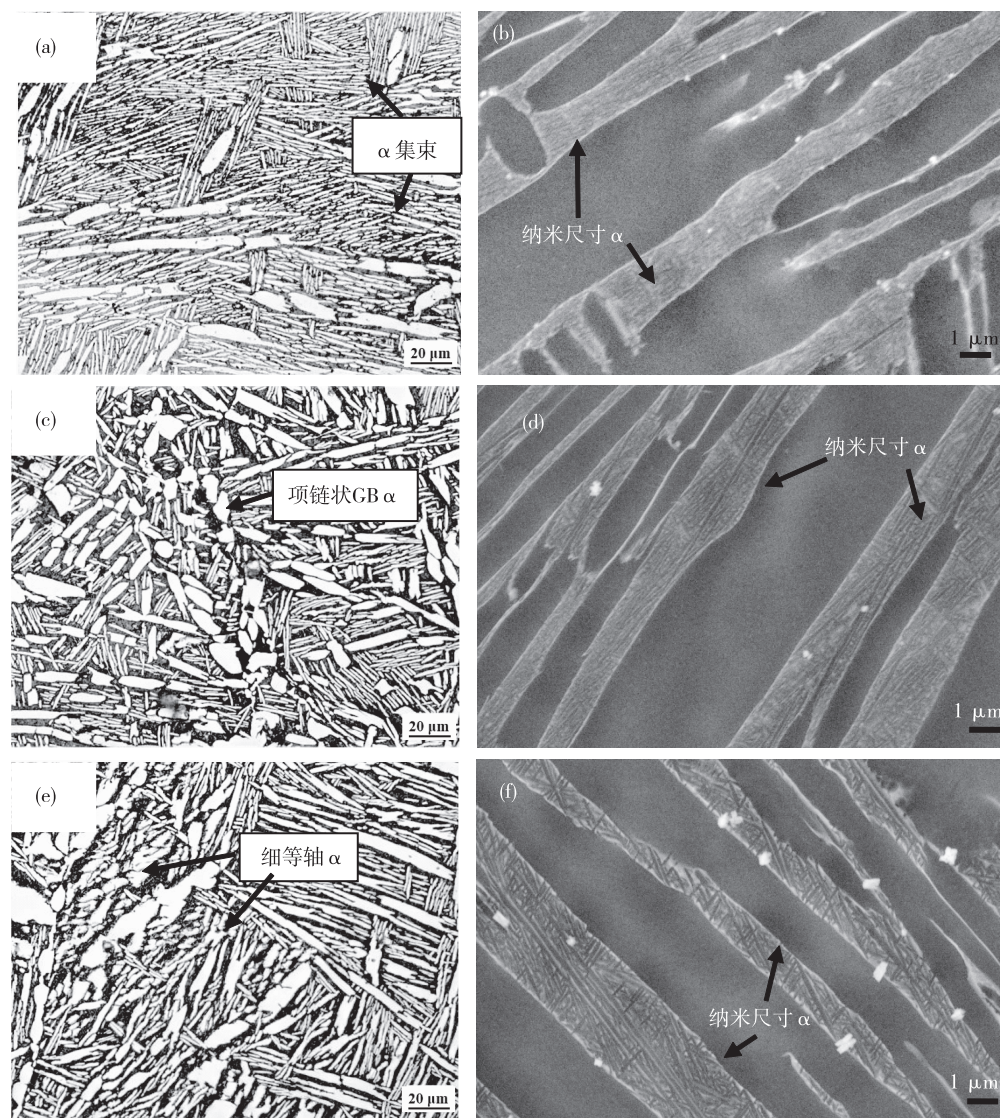


图4 950 $^{\circ}\text{C}$ 固溶处理 + 不同时效温度对微观组织的影响

Fig. 4 Effects of 950 $^{\circ}\text{C}$ solution treatment and different aging temperatures on microstructure

注:(a~b)550 $^{\circ}\text{C}$, AC;(c~d)600 $^{\circ}\text{C}$, AC;(e~f)650 $^{\circ}\text{C}$, AC。

图5为TC9锻棒不同固溶温度处理后,600 $^{\circ}\text{C}$ 时效4 h空冷后的微观组织图。由图5(a)可见,当固溶温度为900 $^{\circ}\text{C}$ 时,合金组织主要由白色板条 α 相和黑灰色的 β 相基体组成,其中板条 α 相尺寸主要有2种,平均宽度分别为5.9、1.4 μm ,这是因为固溶过程中初生短棒状 α 相略有长大,此外还存在一些 α 集束(平均宽度为1.4 μm)。由图5(b)可见, β 相基体中析出了细小的二次 α 相,其

尺寸为108 nm左右。由图5(c)可见,当固溶温度增加至1 000 $^{\circ}\text{C}$ 时,合金中形成了更多的短棒状 α 相,其平均直径为7.1 μm ,且板条 α 相出现球化;相对低温固溶,1 000 $^{\circ}\text{C}$ 固溶处理后,更多的 α 相转变为 β 相,此时合金中只有1种尺寸的初生板条 α 相。由图5(d)可见, β 相基体析出了大量的二次 α 相,且尺寸显著增加至146 nm。

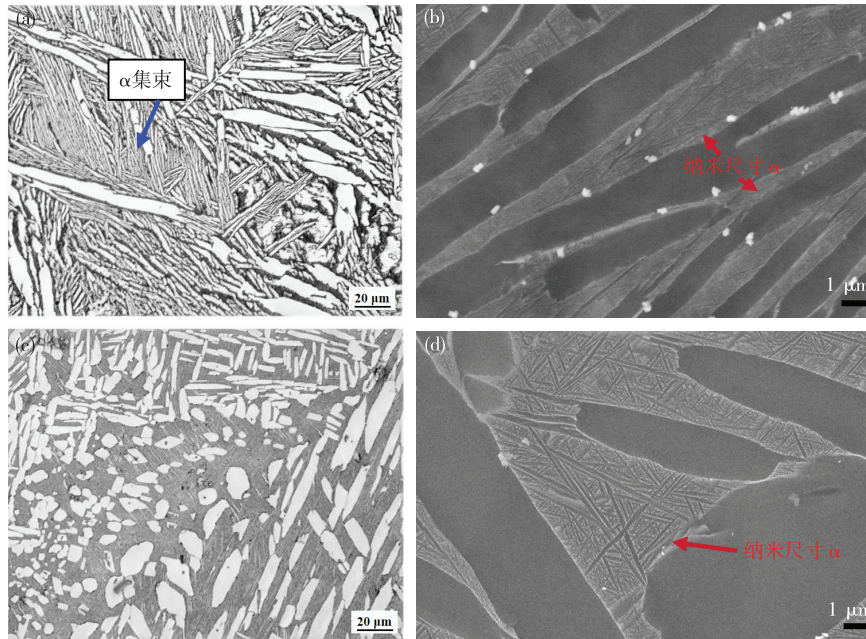


图5 不同固溶温度 +600 °C 时效处理对微观组织的影响

Fig. 5 Effect of different solution temperatures +600 °C aging treatment on microstructure

注:(a~b)为900 °C,AC;(c~d)为1000 °C,AC。

2.3 TC9 钛合金的拉伸性能及断裂机理

微观组织形貌决定了材料的力学性能,为此考察了固溶时效处理对 TC9 钛合金拉伸性能的影响。图6为 TC9 钛合金固溶工艺和固溶时效工艺2种组织状态的拉伸应力-应变曲线图。由图6(a)可见:当 TC9 钛合金在950 °C保温时间分别为20、40、60 min的固溶处理后,合金的抗拉强度和延伸率分别为1 091.6、1 087.4、1 129.8 MPa和5.9%、2.5%、4.4%;950 °C固溶处理20 min的综合力学性能最优。由图6(b)可见:在550、600、650 °C温度时效分别处理4 h后,合金的抗拉强度和延伸率分别为1 197.2、1 130.4、1 173.4 MPa和2.6%、

2.3%、3.5%;相对仅固溶处理,固溶+550 °C、固溶+600 °C、固溶+650 °C时效处理后,合金的强度分别提高了105.6、38.8、81.8 MPa,合金的延伸率分别下降了3.3%、3.6%、2.4%;950 °C/20 min固溶处理+650 °C时效4 h工艺的试样获得了最佳的强度和塑性匹配。有研究显示,通过β相基体析出的纳米尺寸且弥散分布的次生α相具有明显的强化效应,可大幅提高合金的强度^[9,22-23]。因此,固溶时效处理后,合金的强度得到了明显的提升而塑性均有下降。本试验结果显示,950 °C/20 min固溶处理+650 °C时效4 h处理是最佳强度和塑性匹配。可见,固溶时效热处理能提升钛合金的拉伸性能。

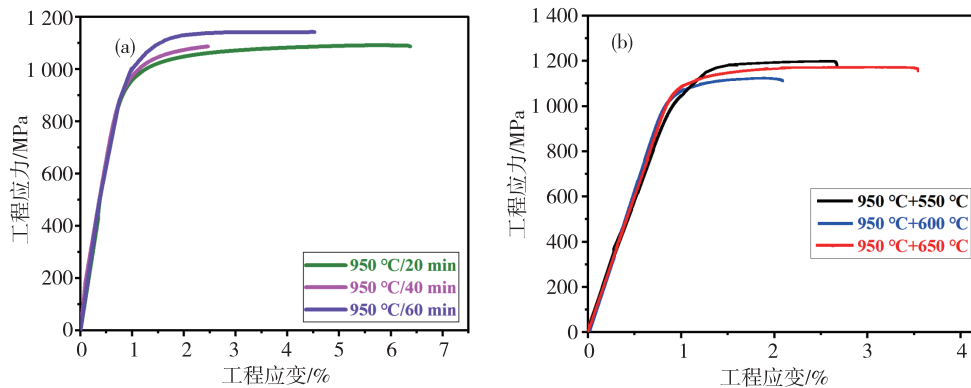


图6 TC9 钛合金经不同热处理处理后的工程应力-应变曲线

Fig. 6 Engineering stress-strain curve of TC9 titanium alloy after different heat treatments

注:(a)不同固溶时间;(b)不同时效温度。

图7为TC9钛合金950℃固溶处理20min后,不同时效处理试样的拉伸断口形貌图。由图7(a)可见,宏观断口上形成了部分刻面和较大尺寸的二次裂纹。由图7(b)可见,试样断口产生相互平行的带状特征,其宽度约为20μm,接近α集束平均宽度,由此可判断其为α集束界面开裂现象,此外,还出现了少量撕裂棱特征。由图7(c)可见,试样拉伸断口的起伏程度相差不大。图7(d)是断口局部特征的高倍形貌图,可观察到试样中出现了撕裂棱和韧窝以及微裂纹。由图7(e)、图7(f)可见,宏观断口形貌凹凸明显,在局部区域放大图中,

除观察到大量的韧窝外,还有曲折的微裂纹,说明合金具有较优异的抵抗裂纹扩展能力。本课题组前期研究显示,TC9锻棒固溶时效处理后,合金中板条α相会逐渐通过再结晶行为球化为短棒状、等轴α相,能提高合金的塑性变形协调能力^[15]。另外,时效处理还会使原纯β相基体析出大量的、具有明显强化效应的高密度二次针状α相,也可提升合金的强度^[2,19,23]。可见,通过对锻态TC9钛合金的再结晶球化控制获得短棒状和等轴α相,以及时效析出弥散分布的二次α相,可实现TC9钛合金硬度、强度、塑性等力学性能的优化。

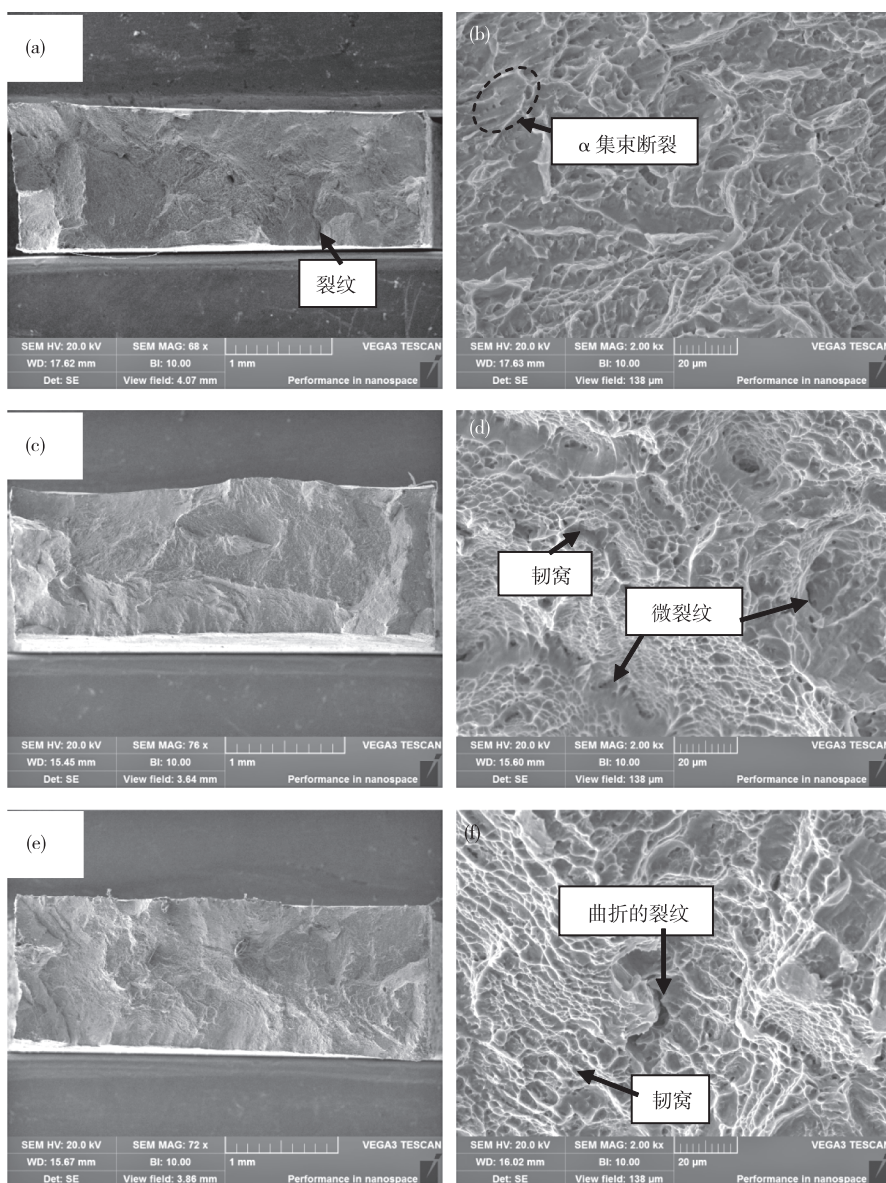


图7 TC9锻棒950℃固溶+不同温度时效4h后的拉伸断口形貌

Fig.7 The tensile fracture morphology of TC9 forged rod after solution treated at 950℃ with 4 h aging treatment at different temperatures

注:(a~b)为550℃,AC;(c~d)为600℃,AC;(e~f)为650℃,AC。

3 结论

1)随着固溶温度的升高, α 相再结晶增加,弱化了 α 集束,部分小尺寸的片层 α 相消失,转变为 β 相,变形的板条 α 相细化为短棒状 α 相。

2)随着时效温度增加,合金中的初生板条 α 相尺寸略有增加,其中6 μm 尺寸以上板条 α 相含量显著增加,这是因为温度升高,元素扩散速度增加,促进了 α 相的长大;SEM结果表明,随着时效温度增加, β 相基体中析出 α 相含量和尺寸均持续增大,其中550、600、650 $^{\circ}\text{C}$ 条件下的析出 α 相尺寸分别为60、112、154 nm。

3)当TC9钛合金经过950 $^{\circ}\text{C}$ 保温20、40、60 min固溶处理后,合金的抗拉强度和塑性分别为1 091.6、1 087.4、1 129.8 MPa和5.9%、2.5%、4.4%。相对仅固溶处理,固溶+550 $^{\circ}\text{C}$ 、固溶+600 $^{\circ}\text{C}$ 、固溶+650 $^{\circ}\text{C}$ 时效处理后,合金的抗拉强度和塑性分别为1 197.2、1 130.4、1 173.4 MPa和2.6%、2.3%、3.5%,合金强度分别提高了105.6、38.8、81.8 MPa。因此,950 $^{\circ}\text{C}/20\text{ min}+650\text{ }^{\circ}\text{C}/4\text{ h}$ 工艺的试样获得了最佳的强度(1 173.4 MPa)和塑性(3.5%)匹配。

参考文献:

- [1] 陈国财,杨文甲,晁雷,等. TC9钛合金锻棒的生产工艺及组织与性能研究[J]. 钛工业进展,2010,27(2):28-30.
- [2] Fan Yiduo, Tan Changsheng, Huang Chaowen, et al. Strength and ductility improvement of the axial gradient microstructure TC21 titanium alloys manufactured by electropulsing plus step-quenching treatment [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2024, 984:173979.
- [3] 周念,张浪,李青,等. CoCrMnNiFe高熵合金成分对力学性能影响机制研究[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版),2024,42(3):113-121.
- [4] 赵飞,黄文森. Al-Mg系合金中合金化元素作用及其对力学性能的影响[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版),2024,42(1):1-11.
- [5] 刘思依,张晶棋,刘博玮,等. 热处理及预拉伸对TC4-0.55Fe合金组织和力学性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程,2023,52(10):3485-3494.
- [6] 兰中霖,王玉凤,尹来胜,等. 热处理对电弧增材制造TC4钛合金组织和性能影响的研究进展[J]. 铸造,2024,73(9):1197-1209.
- [7] 张继时. 热等静压态TC4钛合金热变形及热处理组织演变规律研究[D]. 太原:中北大学,2022.
- [8] 马鑫,孙前江,文超,等. 准 β 热处理工艺对TC4-DT钛合金组织和拉伸性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程,2023,52(12):4260-4267.
- [9] Tan Changsheng, Yang Tao, Huang Chaowen, et al. Enhanced strength-ductility synergy in Ti55531 titanium alloys through gradient microstructural design strategy [J]. Materials Science and Engineering: A, 2024, 909:146823.
- [10] 左承坤,任勇,王涛,等. 准 β 锻造和 β 热处理对TC11组织和断裂韧性的影响[J]. 热处理技术与装备,2024,45(1):24-28.
- [11] 关蕾,陶海林,雒水会,等. 热处理制度对TC9钛合金棒材组织和力学性能的影响[J]. 世界有色金属,2016(14):44-46.
- [12] Raghunathan S L, Stapleton A M, Dashwood R J, et al. Micromechanics of Ti-10V-2Fe-3Al: insitu synchrotron characterisation and modelling [J]. Acta Materialia, 2007, 55(20):6861.
- [13] Zhang Yu, Xin Renlong, Guo Baoqi, et al. Influence of alternate grain boundary α on the development of Widmanstätten microstructure in TC21 Ti alloy [J]. Materials Characterization, 2021, 177:111162.
- [14] Tan Changsheng, Sun Qiaoyan, Zhang Guojun. Role of microstructure in plastic deformation and crack propagation behaviour of an α/β titanium alloy [J]. Vacuum, 2021, 183:109848.
- [15] 王龙刚,包婷婷,谭长生,等. 形变热处理对TC9钛合金组织及拉伸性能的影响[J]. 材料热处理学报,2024,45(11):85-92.
- [16] Zhang Shuangyin, Lin Xin, Chen Jing, et al. Heat-treated microstructure and mechanical properties of laser solid forming Ti-6Al-4V alloy [J]. Rare Metals, 2009, 28(6):537.
- [17] Tiley J, Searles T, Lee E. Quantification of microstructural features in α/β titanium alloys [J]. Materials Science and Engineering: A, 2004, 372:191.
- [18] 张大磊,李媛媛. 高压热处理对TC9钛合金显微组织和力学性能的影响[J]. 机械工程材料,2021,45(8):72-76.
- [19] Jian Shichao, Wang Jiangxiong, Xu Dan, et al. Gradient microstructure and mechanical properties of Ti-6Al-4V titanium alloy fabricated by high-frequency induction quenching treatment [J]. Materials and Design, 2022, 222:111031.
- [20] 王志录,胡博文,范佳俊,等. 冷却速率对Ti55531合金组织与性能的影响[J]. 钛工业进展,2023,40(6):22-26.
- [21] 王江雄. 多重热处理对高强韧Ti55531合金组织及强韧性的影响[D]. 贵阳:贵州大学,2023.
- [22] Cao Yuankui, Li Na, Luo Yaofeng, et al. A novel ultra-high strength titanium alloy via hierarchical α/α' precipitation strengthening [J]. Materials Science and Engineering: A, 2022, 840:142878.
- [23] Kar S K, Suman S, Shivaprasad S, et al. Processing-microstructure-yield strength correlation in a near β Ti alloy Ti-5Al-5Mo-5V-3Cr [J]. Materials Science and Engineering: A, 2014, 610:171-180.

责任编辑:赵建华