

文章编号: 0253-2697(2024)05-0866-09 DOI:10.7623/syxb202405008

固溶时效处理对钻杆用 Ti-6Al-4V-1Mo-1Zr 合金组织及性能的影响

冯春^{1,2} 张凯¹ 张芳芳¹ 朱丽娟¹ 马栋¹ 刘洪涛³ 李双贵⁴

(1. 中国石油集团工程材料研究院有限公司 油气钻采输送装备全国重点实验室 陕西西安 710077;
2. 中国石油集团渤海石油装备制造有限公司 天津 300457; 3. 中国石油塔里木油田公司 新疆库车 841000;
4. 中国石油化工股份有限公司西北油田分公司 新疆乌鲁木齐 830011)

摘要: 采用力学性能测试、组织观察等方法研究了固溶时效热处理工艺对钻杆用 Ti-6Al-4V-1Mo-1Zr 合金显微组织和力学性能的影响。研究结果表明,两相区固溶时效后实验材料得到双态组织,初生 α 相体积分数随固溶温度升高而减少, β 转变组织及次生 α 相尺寸和体积分数随固溶温度升高而增加;相变点以上固溶时效后实验材料得到片层组织,使断裂过程中裂纹路径发生偏转,提高了裂纹的扩展路径,增大了冲击过程中钛合金可吸收的能量,提高了钛合金的冲击韧性;两阶段固溶时效热处理后的钛合金屈服强度达 932 MPa 以上、伸长率为 14.1%、冲击功大于 45 J,具备良好的强韧性匹配。

关键词: 石油钻杆; Ti-6Al-4V-1Mo-1Zr 钛合金; 固溶时效; 显微组织; 力学性能; 冲击功

中图分类号: TE921

文献标识码: A

Effect of solution aging heat treatment on microstructure and properties of Ti-6Al-4V-1Mo-1Zr alloy for drill pipe

Feng Chun^{1,2} Zhang Kai¹ Zhang Fangfang¹ Zhu Lijuan¹ Ma Dong¹ Liu Hongtao³ Li Shuangui⁴

(1. CNPC Tubular Goods Research Institute; State Key Laboratory for Performance and Structure Safety of Petroleum Tubular Goods and Equipment Materials, Shaanxi Xi'an 710077, China; 2. CNPC Bohai Equipment Manufacturing Co., Ltd., Tianjin 300457, China; 3. PetroChina Tarim Oilfield Company, Xinjiang Korla 841000, China;
4. Sinopec Northwest Oilfield Company, Xinjiang Urumqi 830011, China)

Abstract: The impact of solution and aging heat treatment process on the microstructure and mechanical properties of Ti-6Al-4V-1Mo-1Zr alloy for drill pipes were studied by mechanical property test and microstructure observation. The results show that after solution aging in two-phase region, the experimental materials with duplex microstructure can be obtained; the volume fraction of primary α phase is decreased with increasing solution temperature, while the size and volume fraction of the β transition structure and secondary α phase is increased with increasing solution temperature. After solution aging above the phase transformation temperature, the experimental materials with lamellar microstructure can be obtained, as result of which the crack path is deflected during the fracture process. This has improved the crack propagation path, increased the energy absorbed by titanium alloy in the impact process, and enhanced the impact toughness of titanium alloy. The titanium alloy after TSSA treatment has the yield strength over 932 MPa, the elongation of 14.1%, and the impact energy greater than 45 J, demonstrating ideal strength and toughness matching properties.

Key words: oil drill pipe; Ti-6Al-4V-1Mo-1Zr titanium alloy; solution aging; microstructure; mechanical properties; impact energy

引用: 冯春,张凯,张芳芳,朱丽娟,马栋,刘洪涛,李双贵. 固溶时效处理对钻杆用 Ti-6Al-4V-1Mo-1Zr 合金组织及性能的影响[J]. 石油学报, 2024, 45(5): 866-874.

Cite: FENG Chun, ZHANG Kai, ZHANG Fangfang, ZHU Lijuan, MA Dong, LIU Hongtao, LI Shuangui. Effect of solution aging heat treatment on microstructure and properties of Ti-6Al-4V-1Mo-1Zr alloy for drill pipe[J]. Acta Petrolei Sinica, 2024, 45(5): 866-874.

随着深层、超深层油气资源成为中国油气增储上产的重要接替,钻井管柱重量不断增大,对钻井工具提出了更高的技术需求^[1-2]。Ti-6Al-4V-1Mo-1Zr 合金具

有低密度、高强度、耐腐蚀、抗疲劳等特点,在石油钻采领域具有广阔的应用前景^[3-10],但如何在保证强度和塑性的同时提高冲击韧性是钛合金应用的难点。为提高

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFB3700803)和中国石油天然气集团有限公司科技项目(2023ZZ11,2022DQ03-02)资助。

第一作者: 冯春,男,1980年12月生,2010年获清华大学博士学位,现为中国石油集团工程材料研究院有限公司教授级高级工程师,主要从事油气井管材失效分析与智能仿真工作。Email: fengchun003@cnpc.com.cn

通信作者: 朱丽娟,女,1986年1月生,2013年获中国科学院金属研究所博士学位,现为中国石油集团工程材料研究院有限公司正高级工程师,主要从事石油管材及装备材料研发与应用技术研究工作。Email: zhulijuan1986@cnpc.com.cn

钛合金钻杆使用性能,通常采用退火工艺来稳定钛合金组织、消除内应力及提高塑性。但传统退火热处理工艺过程合金组织发生粗化,导致钛合金强度降低^[11]。

冯春等^[12-14]通过固溶时效工艺调控石油钻杆用钛合金 α 相的形貌和数量,以细小次生 α 相、多取向片层 α 集束和不连续生长晶界 α 相的最佳组合来实现钛合金石油管材良好的强韧性匹配。刘乐^[15]研究发现,在 β 相变点之上炉冷退火主要生成片层组织,且随着退火温度的升高, α 集束尺寸变大,单个片层 α 相的宽度与长度均增加,合金强度降低,塑韧性升高。Chi 等^[16]采用三步热处理工艺研究了 Ti-Al-V-Mo-Zr 合金的组织 and 力学性能,得到了粗等轴和片层组织,显著提高了合金的延伸率和冲击韧性。郭萍等^[17]分析 TC4-DT 合金中 α 相的形态和数量对合金断裂韧性的影响结果表明, α 相晶粒尺寸的增加会导致断裂韧性提高,次生 α 相含量增加,长宽比增大,合金断裂韧性提高。周伟等^[18]研究 TC4 合金显微组织对拉伸性能、断裂韧性、裂纹扩展速率的影响表明,双态组织结构具有高拉伸性能和低断裂韧性,网篮组织具有良好的断裂韧性和疲劳性能。Wu 等^[19]研究表明,Ti-5Al-5Mo-5V-3Cr-1Zr 合金粗大的初生 α 相,能增加裂纹的扩展路径,改善合金的塑性和韧性。

研究表明,钻杆用多取向 α 集束组织钛合金具有较高的强韧性匹配^[12],但尚未对集束组织 α 片特征尺寸、体积分数等组织参量与钛合金强韧性之间的定量关系建立统一认识,制约着高强韧钛合金钻杆的组织性能科学调控。笔者针对已工业化应用的 Ti-6Al-4V-1Mo-1Zr 钛合金钻杆材料开展固溶时效热处理工艺对合金组织和性能的影响研究,探讨不同热处理工艺下的组织演变规律、不同组织参量的钛合金钻杆材料力学性能变化规律,并结合材料显微组织与冲击断口形貌特征提出了裂纹扩展理论模型假设,为其在石油钻采领域的推广应用提供理论依据和实验室数据支持。

1 实验材料与方法

1.1 实验材料

实验材料为钛合金钻杆用 Ti-6Al-4V-1Mo-1Zr 合金,经熔铸、锻造、挤压获得规格 $\Phi 88.9 \text{ mm} \times 9.35 \text{ mm}$ (外径 \times 壁厚)的挤压管坯,其组织呈排列不整齐的长条状, α 相体积分数占 82%,显微组织如图 1 所示。

采用全谱直读等离子体光谱仪检测获得实验材料主要化学成分(质量分数)为:Al 为 5.98%,V 为 3.89%,Mo 为 0.67%,Zr 为 0.67%,Ti 余量。采用连续升温金相法得到实验材料的 β 相完全转变温度 $T_{(\alpha+\beta)/\beta}$ 为 962 $^{\circ}\text{C}$ 。

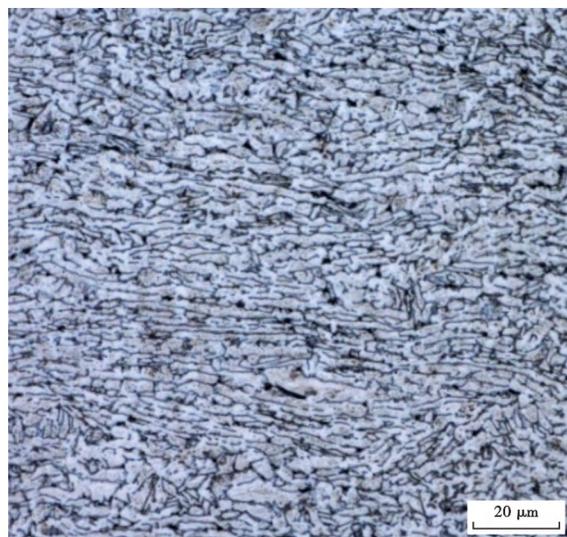


图 1 原始组织

Fig. 1 Original microstructure

1.2 实验方法

1.2.1 热处理工艺

显微组织决定材料的力学性能,组织类型、晶粒尺寸和 α 片层厚度等形貌特征可通过热处理进行调控。笔者分别在 Ti-6Al-4V-1Mo-1Zr 合金的 $T_{(\alpha+\beta)/\beta}$ 上下进行固溶时效热处理。根据固溶时效工艺对钛合金材料性能进行研究,在相变点以下固溶时效热处理[(850/900/950) $^{\circ}\text{C}/1\text{h}/\text{空冷}(\text{AC}) + 650^{\circ}\text{C}/6\text{h}/\text{AC}$]得到由等轴状 α 相和片状 α 相两种形态构成的双态组织;基于前期研究成果^[20],采用两阶段固溶时效热处理(TSSA)法,在相变点以上固溶时效热处理[1000 $^{\circ}\text{C}/1\text{h}/\text{炉冷}(\text{FC}) \rightarrow 600^{\circ}\text{C}/1\text{h}/\text{AC} + 550^{\circ}\text{C}/6\text{h}/\text{AC}$]得到原始 β 晶粒较为粗大、晶界明显、 α 相呈片层状存在的片层组织。热处理制度见表 1。

表 1 Ti-6Al-4V-1Mo-1Zr 钛合金钻杆材料的热处理工艺
Table 1 Heat treatment process of Ti-6Al-4V-1Mo-1Zr titanium alloy drill pipe material

热处理	工艺参数
固溶时效	850 $^{\circ}\text{C}/1\text{h}/\text{AC} + 650^{\circ}\text{C}/6\text{h}/\text{AC}$
	900 $^{\circ}\text{C}/1\text{h}/\text{AC} + 650^{\circ}\text{C}/6\text{h}/\text{AC}$
	950 $^{\circ}\text{C}/1\text{h}/\text{AC} + 650^{\circ}\text{C}/6\text{h}/\text{AC}$
	1000 $^{\circ}\text{C}/1\text{h}/\text{FC} \rightarrow 600^{\circ}\text{C}/1\text{h}/\text{AC} + 550^{\circ}\text{C}/6\text{h}/\text{AC}$

1.2.2 组织观察

将热处理后的实验材料切割为 10 mm \times 10 mm \times 5 mm 的金相试块,打磨、抛光至镜面,配制腐蚀液 [$v(\text{HF}) : v(\text{HNO}_3) : v(\text{H}_2\text{O}) = 1 : 3 : 7$] 侵蚀抛光面,使用激光共聚焦显微镜观察其金相组织。切取厚度为 1 mm 的实验材料薄片,采用机械减薄、电解双喷的方法制备

获得中心带小孔的 $\Phi 3$ mm 试样,利用透射电镜对试样进行观察。

1.2.3 力学性能测试

对不同热处理条件下的实验材料取样,制备 $\Phi 5$ mm 拉伸试棒,进行室温拉伸实验(UTM5305);室温冲击实验(PIT752D-2)采用规格 $7.5\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 55\text{ mm}$ 的带 V 型缺口标准试样进行;每组拉伸和冲击实验分别取 3 个平行样,任选其中 1 个冲击样在扫描电镜下观察断口形貌。

2 实验结果及分析

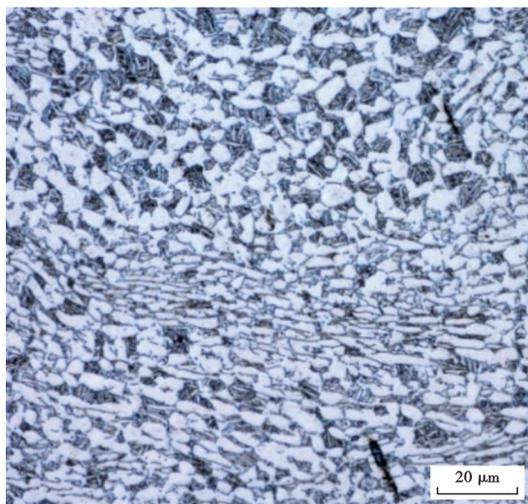
2.1 显微组织

经 $(850/900/950)^\circ\text{C}/1\text{ h}/\text{AC} + 650^\circ\text{C}/6\text{ h}/\text{AC}$ 固溶时效处理后 Ti-6Al-4V-1Mo-1Zr 合金显微组织如图 2 所示。实验材料均为双态组织,初生等轴 α 晶粒平均尺寸基本保持约为 $4\ \mu\text{m}$ 。固溶温度为 850°C [图 2(a)]

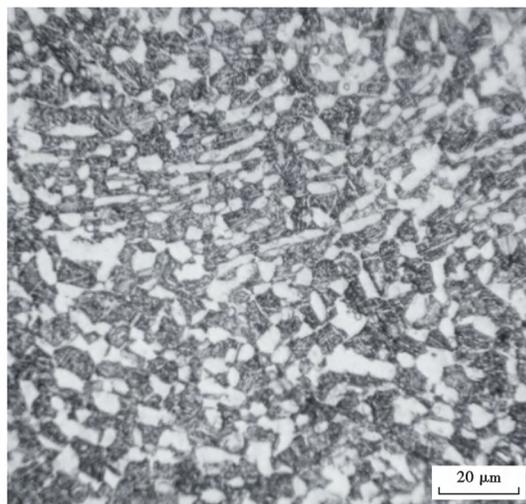
条件下,初生等轴 α 相体积分数约为 50%,且存在被拉长的 α 相,其余 β 转变组织长、宽方向平均尺寸分别约为 $6.0\ \mu\text{m}$ 和 $3.9\ \mu\text{m}$ 。固溶温度为 900°C [图 2(b)] 条件下,初生等轴 α 相体积分数约为 36%, β 转变组织长、宽方向平均尺寸分别约为 $11.0\ \mu\text{m}$ 和 $5.9\ \mu\text{m}$ 。固溶温度为 950°C [图 2(c)] 条件下,显微组织中初生等轴 α 相体积分数约为 21%,平均尺寸约为 $3.9\ \mu\text{m}$, β 转变组织长、宽方向平均尺寸分别约为 $14\ \mu\text{m}$ 和 $8\ \mu\text{m}$ 。在固溶温度为 1000°C [图 2(d)] 条件下,合金显微组织为片层组织,原始 β 晶界处存在多取向的 α 集束析出,集束宽度达 $120\ \mu\text{m}$,片层厚度约为 $2.4\ \mu\text{m}$ 。

2.2 拉伸力学性能

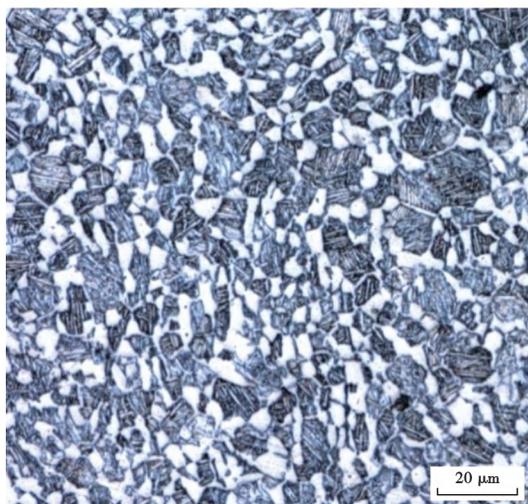
实验材料 Ti-6Al-4V-1Mo-1Zr 合金经 $(850/900/950)^\circ\text{C}/1\text{ h}/\text{AC} + 650^\circ\text{C}/6\text{ h}/\text{AC}$ 热处理后,抗拉强度 R_m 、屈服强度 $R_{0.2}$ 和延伸率 A 随固溶温度变化曲线见图 3。



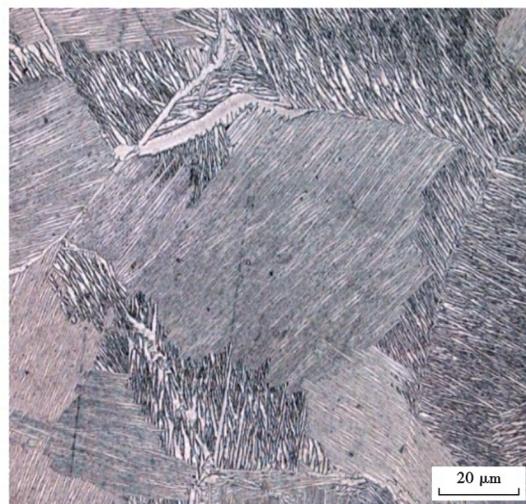
(a) $850^\circ\text{C}/1\text{ h}/\text{AC} + 650^\circ\text{C}/6\text{ h}/\text{AC}$



(b) $900^\circ\text{C}/1\text{ h}/\text{AC} + 650^\circ\text{C}/6\text{ h}/\text{AC}$



(c) $950^\circ\text{C}/1\text{ h}/\text{AC} + 650^\circ\text{C}/6\text{ h}/\text{AC}$



(d) $1000^\circ\text{C}/1\text{ h}/\text{FC} \rightarrow 600^\circ\text{C}/1\text{ h}/\text{AC} + 550^\circ\text{C}/6\text{ h}/\text{AC}$

图 2 固溶时效后显微组织

Fig. 2 Microstructure after solution aging

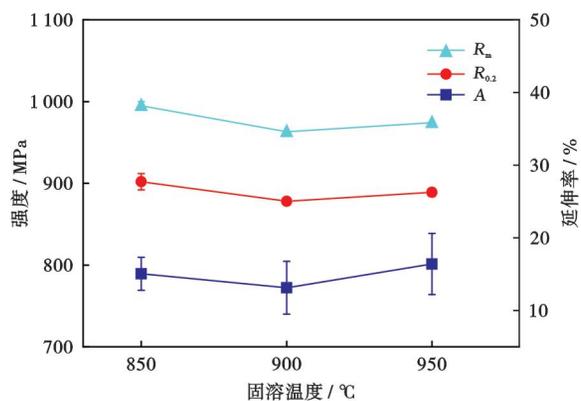


图3 不同固溶温度下的力学性能

Fig. 3 Mechanical properties at different solution temperatures

由图3可以看出,随固溶温度升高,900℃固溶时的抗拉强度相比850℃减小3.2%(32 MPa),屈服强度减小2.6%(24 MPa);950℃固溶时的抗拉强度相比900℃升高1.1%(11 MPa),屈服强度升高1.2%(11 MPa);在850℃固溶条件下,实验材料强度最高,抗拉强度为995 MPa,屈服强度为902 MPa。延伸率随固溶温度的变化趋势与强度一致,950℃固溶+650℃时效后达到峰值16.6%。实验材料经TSSA工艺热处理后,抗拉强度为974 MPa,屈服强度为932 MPa,延伸率为14%,组织为片层组织[图2(d)]。

2.3 冲击功及断口形貌

图4为实验材料Ti-6Al-4V-1Mo-1Zr合金在不同热处理工艺处理后的夏比冲击功值,其中工艺1—3分别为(850/900/950)℃/1h/AC+650℃/6h/AC、工艺4为TSSA。由图4可以看出,经(850/900/950)℃固溶1h后时效处理,材料冲击功随固溶温度的升高而降低,850℃固溶时冲击功最高,达到42.5 J;实验材料经TSSA工艺处理后,冲击功高达45 J。

图5为不同固溶时效工艺处理后Ti-6Al-4V-1Mo-1Zr合金的室温冲击断口宏观形貌及断口中部纤维区微观SEM图像。从宏观形貌可以看出,图5(a)—图5(c)断口由纤维区和放射区组成,未观察到剪切唇区;图5(d)仅观察到纤维区。此外,随固溶温度的升高,图5(a)—图5(c)断口表面裂纹扩展纤维区粗糙程度逐渐减小,这与其裂纹扩展阻力逐渐降低相对应。从微观形貌可以看出,各断口裂纹扩展区微观形貌均呈韧窝状,断裂方式为穿晶和沿晶混合断裂。其中,图5(a)—图5(c)中韧窝较浅,图5(c)中撕裂棱明显较多,且图5(a)和图5(b)中存在撕裂小平。由此可知,图5(c)表现出最好的塑性;图5(d)中断口上韧窝最大,约为60 μm,说明裂纹扩展路径长,扩展消耗能量多,表现为韧性最高。

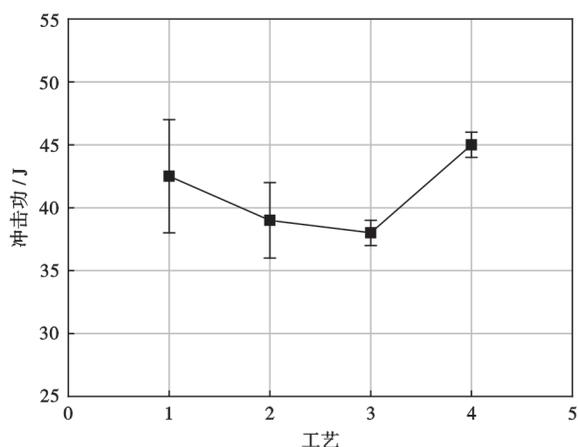


图4 不同固溶时效工艺后的冲击功

Fig. 4 Impact energy after different solution aging processes

3 分析与讨论

3.1 固溶时效热处理组织演变规律

两相区固溶时,一部分原始挤压态 α 组织转变为 β 组织。挤压过程中晶粒的变形程度会影响 $\alpha \rightarrow \beta$ 的相变行为[图2(a)],原始挤压管材畸变严重的初生 α 相的晶粒尺寸更为细长,热处理过程中延长度方向分裂为多个等轴晶粒,但其 β 转变比率较低,而畸变较小的区域则有更多的初生 α 相转变为 β 相。随着固溶温度的不断升高,该因素的影响几乎可以忽略[图2(b)—图2(c)],得到了较为均匀的双态组织。固溶温度的升高也促进了更为充分的 $\alpha \rightarrow \beta$ 相变,初生 α 相含量不断减少并进一步等轴化, β 转变组织体积分数随固溶温度升高不断增加,形成等轴 $\alpha + \beta$ 的高温两相组织。在固溶保温后的空冷过程中, β 相内部以及 α/β 界面发生 $\beta \rightarrow \alpha$ 相转变。固溶温度越高则空冷时间越长,初生 α 晶粒具有更多时间向周边生长,在一定程度上抵消了固溶过程中温差对初生 α 晶粒尺寸带来的影响(表2),最终表现为(850/950)℃温度下初生 α 晶粒尺寸基本保持不变。与初生 α 相不同,次生 α 相体积分数的片层厚度主要受 β 相区稳定元素含量和冷却时间的影响。固溶温度越高,合金元素扩散越充分, β 相稳定性因相区内V等合金元素浓度减少而降低,冷却过程中次生 α 相的析出阻力减小,加之 β 相区内Al元素浓度升高,固溶温度升高带来的冷却时间延长,共同促进了次生 α 相的形核和长大,固溶温度由850℃升高至950℃,固溶时效后次生 α 相体积分及片层厚度分别增加58%和67%(表2)。

TSSA工艺在相变点以上对实验材料进行固溶处理,初生 α 相完全消失, β 晶界迁移阻碍消失,发生急剧长大,形成了 β 相粗晶,而后较慢地从 β 相区冷却下

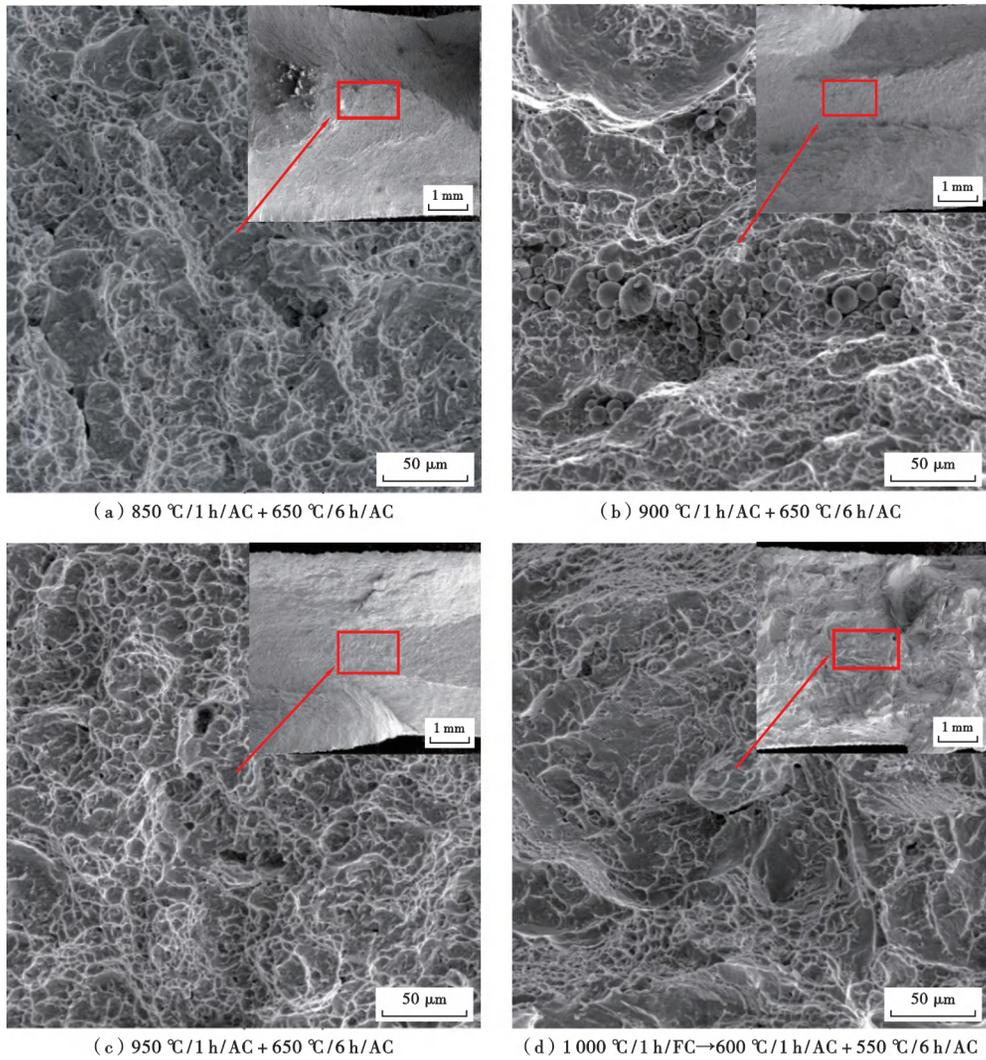


图5 固溶时效后室温冲击断口形貌

Fig. 5 Impact fracture morphology at room temperature after solution aging

表2 Ti-6Al-4V-1Mo-1Zr合金在不同工艺下的组织参数

Table 2 Microstructure parameters of Ti-6Al-4V-1Mo-1Zr alloy under different processes

热处理工艺	初生 α 相		次生 α 相	
	体积分数/%	平均直径/ μm	体积分数/%	平均厚度/ μm
850 °C/1 h/AC + 650 °C/6 h/AC	50	4.0	26	1.5
950 °C/1 h/AC + 650 °C/6 h/AC	21	3.9	41	2.5
1000 °C/1 h/FC → 600 °C/1 h/AC + 550 °C/6 h/AC			54	2.4

来,冷却过程中 α 相得以析出长大。 α 析出相存在两种状态[图6(a)]:①沿原始 β 相晶界处形成晶界 α 片层;②在 β 晶粒内形成 α 集束,同一集束内 α 片层彼此平行,且呈同一取向分布。通常认为, α 析出相形态演变和最终形貌是由沿着原始 β 晶界平面的横向生长和从晶界 α 相发出的 α 侧板的发展之间的动态相互作用所决定的^[20]。观察图6(a)发现,侧板集束由多尺度的 α 片层组成,晶内 α 相的生长不均匀。一部分片层形核于原始 β 晶界并向内侧持续生长,形成了完整单一

的、长条状 α 片,另一部分 α 片在原始 β 晶内的各个位置的亚结构处形核长大,最终发生体积碰撞,形成由长度方向多个块状 α 组合的片层形貌。无论以何种方式形核长大,其析出位置及方向均具有选择性,总是沿着阻力最小的方向生长,此时已在原始 β 晶内大致形成了成簇的多取向 α 集束。在进一步的550 °C时效过程中,细小块状 α 不断合并长大,最终形成组织形貌如图6(b)所示。可以明显观察到原始 β 晶界,晶内集束宽度约为120 μm , α 片层尺寸均匀。

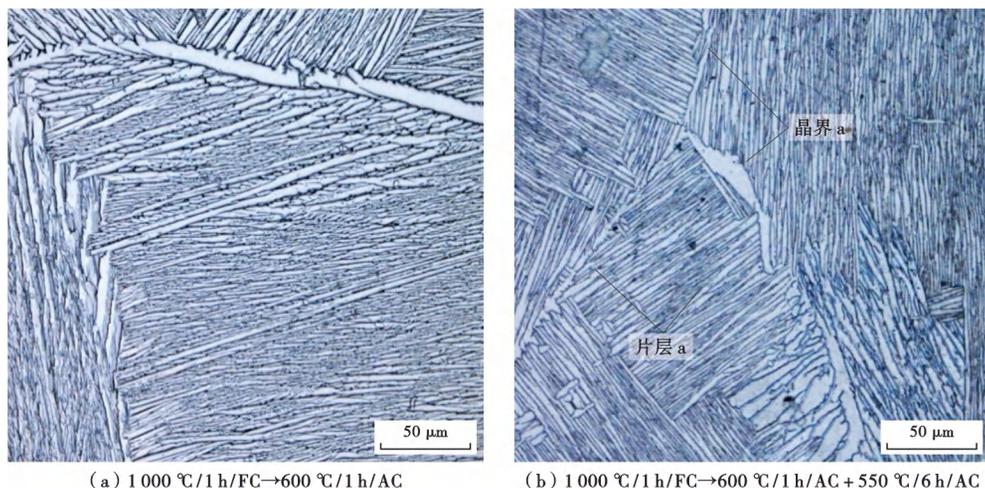


图 6 TSSA 过程中材料组织演变

Fig. 6 Evolution of material microstructure during TSSA

3.2 组织形貌对材料强韧性的影响

在 TSSA 工艺下,实验材料的强韧性匹配最佳,其屈服强度达到 932 MPa、冲击功达到 45 J,这与固溶时效过程中位错迁移以及显微组织演变密切相关^[21-24]。该工艺条件下材料显微组织以多取向 α 集束

为主。结合前期研究结果^[12-15,20]和图 7 分析可发现, α 相基体分布有少量位错, α/β 相界面和 β 相区聚集较多位错,主要以“位错墙”的形式存在,阻碍位错的进一步迁移和分解,通过位错强化方式保证了 TSSA 工艺处理后钛合金优良的强度性能。

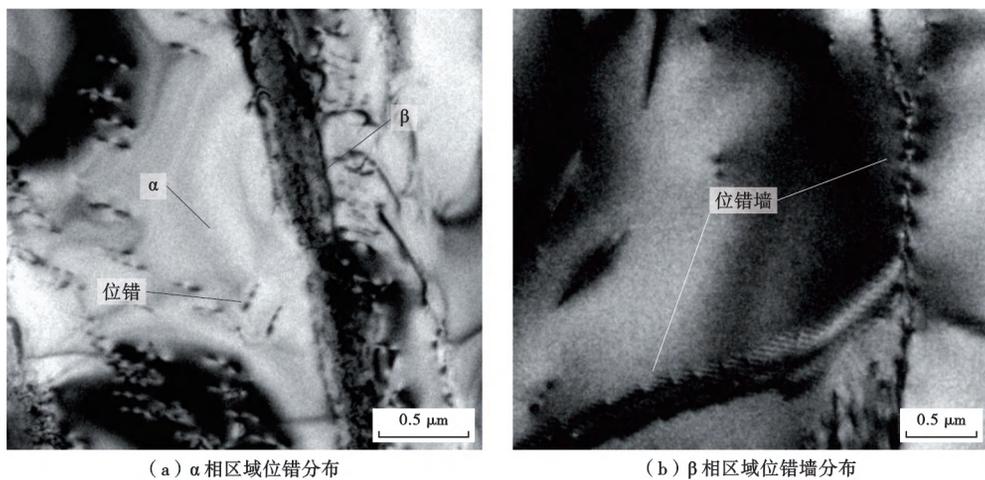


图 7 TSSA 处理后的 TEM 组织

Fig. 7 TEM microstructure after TSSA treatment

对比不同组织特征下 Ti-6Al-4V-1Mo-1Zr 合金的拉伸性能发现,TSSA 工艺获得的片层组织伸长率低于 950 °C 固溶时的双态组织。这是由于位错在两种组织中的运动方式不同造成的^[25]。双态组织中,位错首先在等轴 α 相晶粒中开始滑移,随后向周围的 β 转变组织扩展,晶界处位错塞积应力小,推迟了空洞的形核和发展,允许材料断裂前产生更大的变形,使合金获得更高的塑性。片层组织中,由于同一 α 集束具有相同的惯析面,位错可穿过互相平行的 α 集束,微区变形不均匀,多出现粗滑移带,在晶界处易形成位错墙,产生

严重的位错塞积,这促进了空洞的形成和发展,导致试样过早断裂,伸长率下降^[26]。

显微组织特征参量也对材料力学性能影响较大。表 2 为 Ti-6Al-4V-1Mo-1Zr 合金在不同固溶时效工艺下的显微组织形态参数,图 8 为不同固溶时效工艺下次生 α 相的宽度频率分布直方图。初生等轴 α 相随固溶温度升高,晶粒尺寸保持稳定,含量不断减少直至全部消失;与之对应,次生 α 相含量不断增加;实验材料的力学性能也随之变化。Ti-6Al-4V-1Mo-1Zr 合金在 β 相变点以下固溶时效时,形成的双态组织随着固溶

温度的升高,初生等轴 α 相含量降至21%,延伸率稍有升高,过多含量的初生等轴 α 相相对塑性并无裨益^[27];而次生 α 相含量从26%增加至41%,次生 α 片层平均厚度从1.5 μm 增加至2.5 μm ,材料强度与韧性同时降低,这与次生 α 相粗化但未形成足够规模的 α 集束有关。当温度进一步升高,在 β 相变点以上固溶时效时,片层平均厚度为2.4 μm ,次生 α 相含量达到54%,形成了以多取向 α 集束为主的片层组织,显著提高了材料冲击韧性,这也是片层组织相比于双态组织具有更高断裂韧性的主要原因^[28-29]。因此,为提高Ti-6Al-4V-1Mo-1Zr合金钻杆材料的冲击韧性,同时保持较高的拉伸强度性能,应在相变点以上进行固溶处理,并控制次生 α 相的片层厚度。

3.3 Ti-6Al-4V-1Mo-1Zr合金裂纹扩展机理

实验材料Ti-6Al-4V-1Mo-1Zr随着初生等轴 α 含量减少、次生 α 含量及其片层宽度增加[图2(a)—图2(c)]。宏观上,冲击断口裂纹扩展纤维区粗糙程度逐渐减小[图5(a)—图5(c)],即裂纹扩展阻力不断降低;钛合金钻杆材料以片层组织为主时[图2(d)],冲击断口裂纹扩展纤维区粗糙程度最大[图5(d)]。微观上,全片层组织钛合金材料的冲击断口韧窝尺寸明显大于双态组织材料(图5),即裂纹扩展路径长、扩展消耗能量多。小尺寸次生片层 α 为裂纹扩展提供了更多路径,不利于材料冲击韧性的提高;大尺寸、成规模的多取向集束 α 片层,通过裂纹路径偏转,有效延长裂纹长度,提高了裂纹扩展功。基于以上认识,建立了裂纹扩展理论模型(图9)。

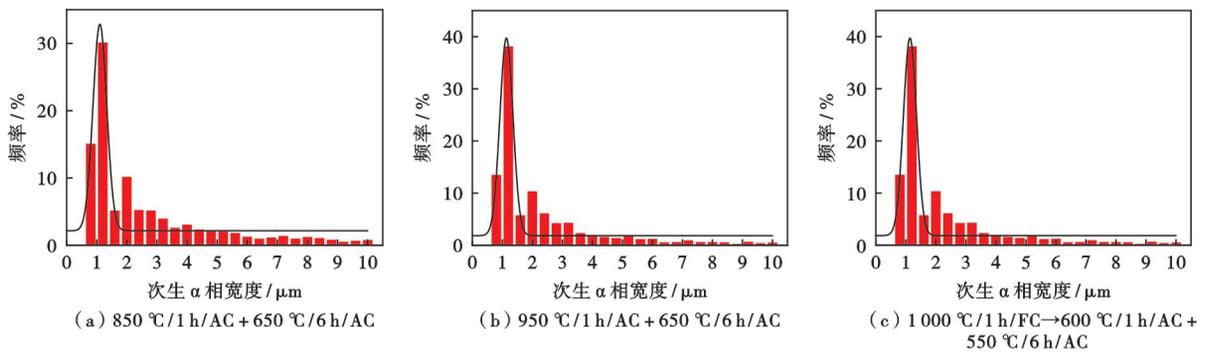


图8 次生 α 相的宽度频率分布直方图

Fig. 8 Width frequency distribution histogram of secondary α phase

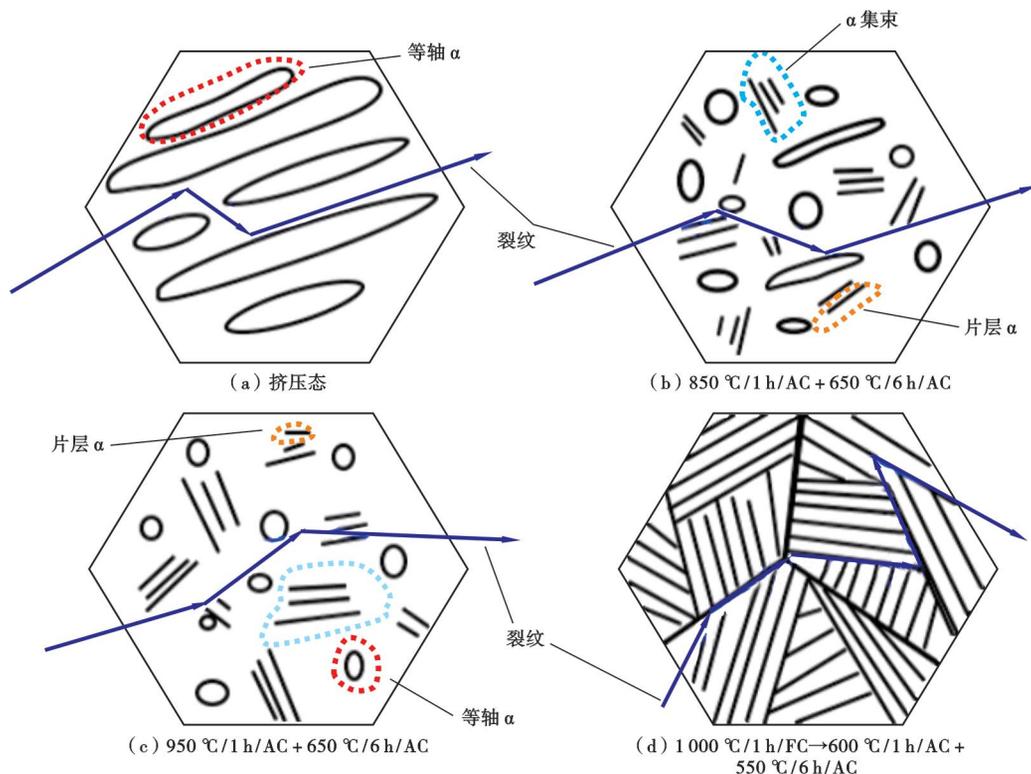


图9 裂纹扩展示意

Fig. 9 Schematic diagram of crack propagation

图 9(a)中,裂纹沿挤压态中 α 相被拉长的方向扩展,裂纹扩展阻碍小,速度快。图 9(b)—图 9(c)均由双态组织构成,裂纹沿等轴 α 组织扩展。当遇到 β 转变组织时,裂纹会穿过 β 转变组织。图 9(b)中的初生 α 相尺寸大,延长了裂纹扩展的路径,导致裂纹需要更多的能量来扩展;图 9(c)中 α 相尺寸小,裂纹扩展可直接从相邻 α 之间穿过 β 转变组织,韧性降低。图 9(d)中,片层组织优先在原始 β 晶界处形核,沿着 β 晶界向两边外延生长,当遇到其他片层组织时会被截断停止生长,裂纹沿层状 α/β 界面扩展, α 集束边界起到阻挡和偏转裂纹扩展的作用^[30]。片层组织中裂纹随着 α 片层和 α 集束位向的变化不断改变扩展方向,扩展路径曲折程度增加,提高了材料断裂韧性^[31]。

4 结 论

(1) Ti-6Al-4V-1Mo-1Zr 合金在两相区固溶时效时产生双态组织,初生 α 相体积分随固溶温度升高而减少, β 转变组织及次生 α 相尺寸和体积分随固溶温度升高而增加。

(2) 两相区固溶时效条件下,随着固溶温度的降低,材料抗拉强度和屈服强度分别增加至 995 MPa 和 902 MPa,冲击功增加至 42.5 J;TSSA 工艺处理后合金形成 α 和 β 相间的片层组织,材料抗拉强度为 974 MPa,屈服强度为 932 MPa,冲击功为 45 J。

(3) Ti-6Al-4V-1Mo-1Zr 合金的韧性与裂纹扩展路径和曲折程度有关,路径越长越曲折则材料韧性越高。等轴组织中裂纹能平直地穿过转变 β 基体中的 α 相;片层组织中裂纹沿着 α/β 相界面扩展或穿过 α 集束,随着 α 片层和 α 集束位向的变化不断改变扩展方向。

符号注释: $T_{(\alpha+\beta)/\beta}$ — β 相完全转变温度, $^{\circ}\text{C}$; R_m —抗拉强度, MPa; $R_{0.2}$ —屈服强度, MPa; A —延伸率; v —体积。

参 考 文 献

- [1] 贾承造. 中国石油工业上游前景与未来理论技术五大挑战[J]. 石油学报, 2024, 45(1): 1-14.
JIA Chengzao. Prospects and five future theoretical and technical challenges of the upstream petroleum industry in China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2024, 45(1): 1-14.
- [2] 王清华, 徐振平, 张荣虎, 等. 塔里木盆地油气勘探新领域、新类型及资源潜力[J]. 石油学报, 2024, 45(1): 15-32.
WANG Qinghua, XU Zhenping, ZHANG Ronghu, et al. New fields, new types of hydrocarbon explorations and their resource potentials in Tarim Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2024, 45(1): 15-32.
- [3] KUMAR P, PRAKASH O, RAMAMURTY U. Micro- and meso-

structures and their influence on mechanical properties of selectively laser melted Ti-6Al-4V[J]. Acta Materialia, 2018, 154: 246-260.

- [4] FERRELLI T E, CRAIG B D, ALDRICH C S. Degradation of titanium drillpipe from corrosion and wear[J]. SPE Drilling & Completion, 1993, 8(2): 105-110.
- [5] ZHANG Fangfang, FENG Chun, ZHU Lijuan, et al. Research progress on corrosion resistance of titanium alloy oil well tubing[J]. Materials Science Forum, 2021, 1035: 528-533.
- [6] LI Ruizhe, FENG Chun, JIANG Long, et al. Research status and development of titanium alloy drill pipes[J]. Materials Science Forum, 2019, 944: 903-909.
- [7] 杨进, 李磊, 宋宇, 等. 中国海洋油气钻井技术发展现状及展望[J]. 石油学报, 2023, 44(12): 2308-2318.
YANG Jin, LI Lei, SONG Yu, et al. Current status and prospects of offshore oil and gas drilling technology development in China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(12): 2308-2318.
- [8] XU X L, LIU H J, ZHANG H L, et al. Current status and future prospects of titanium alloy drill pipes in drilling engineering[J]. Journal of Power and Energy Engineering, 2019, 1(6): 27-31.
- [9] 冯春, 张凯, 刘会群, 等. 油气钻采用钛合金钻杆材料服役损伤行为研究进展[J]. 石油管材与仪器, 2023, 9(4): 10-14.
FENG Chun, ZHANG Kai, LIU Huiqun, et al. Research progress on service damage behavior of titanium alloy drill pipe material for oil and gas drilling[J]. Petroleum Tubular Goods & Instruments, 2023, 9(4): 10-14.
- [10] 刘岩生, 张佳伟, 黄洪春. 中国深层—超深层钻完井关键技术及发展方向[J]. 石油学报, 2024, 45(1): 312-324.
LIU Yansheng, ZHANG Jiawei, HUANG Hongchun. Key technologies and development direction for deep and ultra-deep drilling and completion in China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2024, 45(1): 312-324.
- [11] KUMAR P, RAMAMURTY U. Microstructural optimization through heat treatment for enhancing the fracture toughness and fatigue crack growth resistance of selective laser melted Ti-6Al-4V alloy[J]. Acta Materialia, 2019, 169: 45-59.
- [12] FENG Chun, LI Ruizhe, LIU Yonggang, et al. Aging treatment effect on microstructure and mechanical properties of Ti-5Al-3V-1.5Mo-2Zr titanium alloy drill pipe[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2020, 29(11): 7011-7025.
- [13] WU Guicheng, FENG Chun, LIU Huiqun, et al. Fine secondary α phase-induced strengthening in a Ti-5.5Al-2Zr-1Mo-2.5V alloy pipe with a widmanstätten microstructure[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2020, 29(3): 1869-1881.
- [14] 李睿哲, 冯春, 刘永刚, 等. 固溶处理对 TA15X 钛合金钻杆材料组织与性能的影响[J]. 材料与冶金学报, 2020, 19(1): 45-50.
LI Ruizhe, FENG Chun, LIU Yonggang, et al. Effect of solution treatment on microstructure and properties of TA15X titanium alloy drill pipe materials[J]. Journal of Materials and Metallurgy, 2020, 19(1): 45-50.
- [15] 刘乐. 热处理对 Ti-Al-V-Mo-Zr 钛合金钻杆组织与性能的影响[D]. 西安: 西安石油大学, 2021.
LIU Le. Effect of heat treatment on microstructure and properties of Ti-Al-V-Mo-Zr titanium alloy drill pipe[D]. Xi'an: Xi'an

- Shiyu University, 2021.
- [16] CHI Guangfang, LIU Huiqun, YI Danqing. Drastic improvement in elongation and impact toughness of Ti-Al-V-Mo-Zr alloy tube via three-step heat treatment[J]. *Materials Letters*, 2021, 284: 128925.
- [17] 郭萍, 赵永庆, 曾卫东, 等. 两相区热处理对 TC4-DT 钛合金断裂韧性的影响[J]. *稀有金属材料与工程*, 2018, 47(4): 1221-1225.
GUO Ping, ZHAO Yongqing, ZENG Weidong, et al. Effect of heat treatment in $\alpha + \beta$ zone on fracture toughness of TC4-DT titanium alloy[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2018, 47(4): 1221-1225.
- [18] 周伟, 曲恒磊, 赵永庆, 等. 热处理对 TC4 合金组织与性能的影响[J]. *热加工工艺*, 2005, 34(8): 26-27.
ZHOU Wei, QU Henglei, ZHAO Yongqing, et al. Effect of heat treatment on microstructure and mechanical properties of TC4 alloy[J]. *Hot Working Technology*, 2005, 34(8): 26-27.
- [19] WU Chuan, ZHAN Mei. Effect of solution plus aging heat treatment on microstructural evolution and mechanical properties of near- β titanium alloy[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2019, 29(5): 997-1006.
- [20] 冯春, 宋文文, 张凯, 等. 固溶时效对 Ti-5Al-3V-1Mo-1Zr 钛合金钻杆组织演变及力学性能的影响[J]. *中国有色金属学报*, 2023, 33(6): 1795-1803.
FENG Chun, SONG Wenwen, ZHANG Kai, et al. Effect of solution aging on microstructure evolution and mechanical properties of Ti-5Al-3V-1Mo-1Zr titanium drill pipe[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2023, 33(6): 1795-1803.
- [21] LÜTJERING G. Influence of processing on microstructure and mechanical properties of ($\alpha + \beta$) titanium alloys[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 1998, 243(1/2): 32-45.
- [22] LI Chenglin, ZOU Lina, FU Yanyan, et al. Effect of heat treatments on microstructure and property of a high strength/toughness Ti-8V-1.5Mo-2Fe-3Al alloy[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2014, 616: 207-213.
- [23] DONG Ruifeng, ZHANG Xiaoyang, KOU Hongchao, et al. Texture evolution associated with the preferential recrystallization during annealing process in a hot-rolled near β titanium alloy[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2021, 12: 63-73.
- [24] OBASI G C, BIROSCA S, DA FONSECA J Q, et al. Effect of β grain growth on variant selection and texture memory effect during $\alpha \rightarrow \beta \rightarrow \alpha$ phase transformation in Ti-6 Al-4V[J]. *Acta Materialia*, 2012, 60(3): 1048-1058.
- [25] ZHAO Zibo, WANG Qingjiang, LIU Jianrong, et al. Effect of heat treatment on the crystallographic orientation evolution in a near- α titanium alloy Ti60[J]. *Acta Materialia*, 2017, 131: 305-314.
- [26] TERLINDE G, LUETJERING G. Influence of grain size and age-hardening on dislocation pile-ups and tensile fracture for a Ti-Al alloy[J]. *Metallurgical Transactions A*, 1982, 13(7): 1283-1292.
- [27] 周义刚, 曾卫东, 李晓芹, 等. 钛合金高温形变强化机理[J]. *金属学报*, 1999, 35(1): 45-48.
ZHOU Yigang, ZENG Weidong, LI Xiaoqin, et al. An investigation of high-temperature deformation strengthening and toughening mechanism of titanium alloy[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 1999, 35(1): 45-48.
- [28] LU Jinwen, ZHAO Yongqing, GE Peng, et al. Precipitation behavior and tensile properties of new high strength beta titanium alloy Ti-1300[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2015, 637: 1-4.
- [29] ZHOU Yigang, ZENG Weidong, YU Hanqing. A new high-temperature deformation strengthening and toughening process for titanium alloys[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 1996, 221(1/2): 58-62.
- [30] 李金山, 唐斌, 樊江昆, 等. 高强亚稳 β 钛合金变形机制及其组织调控方法[J]. *金属学报*, 2021, 57(11): 1438-1454.
LI Jinshan, TANG Bin, FAN Jiangkun, et al. Deformation mechanism and microstructure control of high strength metastable β titanium alloy[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2021, 57(11): 1438-1454.
- [31] 杨锐, 马英杰, 雷家峰, 等. 高强韧钛合金组成成分和形态的精细调控[J]. *金属学报*, 2021, 57(11): 1455-1470.
YANG Rui, MA Yingjie, LEI Jiafeng, et al. Toughening high strength titanium alloys through fine tuning phase composition and refining microstructure[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2021, 57(11): 1455-1470.

(收稿日期 2022-12-07 改回日期 2024-03-14 编辑 王培玺)