

不同原始组织 Ti80 合金热变形行为及组织演变规律研究

陶欢, 孙二举, 潘一帆, 郁炎, 宋德军, 余巍

(中国船舶重工集团公司第七二五研究所, 河南 洛阳 471039)

摘要: 通过热模拟压缩试验, 研究了等轴组织和魏氏组织 Ti80 合金在温度 850~1000 °C、应变速率 0.01~10 s⁻¹、变形量 20%~60% 条件下的热变形行为及组织演变。结果表明: Ti80 合金为温度敏感型和应变速率敏感型材料, 两相区变形时软化机制以动态再结晶为主, 单相区变形时以动态回复为主。低应变速率条件下(0.01 s⁻¹), 等轴组织的流变应力峰值高于魏氏组织, 高应变速率条件下(1~10 s⁻¹)则相反。相同变形参数下, 原始组织类型对合金显微组织演变有显著影响。在 β 相变点以下, 随着变形温度升高, 等轴组织基体中初生 α 相减少, 次生片状 α 相破碎形成不规则小颗粒; 魏氏组织晶界 α 相完全破碎, β 晶粒内部大部分片状 α 相破碎形成等轴颗粒, 只保留少量不同位向集束状 α 相。随着变形量增大, 等轴组织中 α 相再结晶晶粒尺寸增大明显, 魏氏组织中集束片状 α 相逐渐被破碎, 形成细小的短条状和等轴再结晶 α 晶粒。

关键词: Ti80 合金; 等轴组织; 魏氏组织; 热变形; 组织演变

中图分类号: TG146.23

文献标识码: A

文章编号: 1009-9964(2021)06-018-06

Study on Hot Deformation Behavior and Microstructure Evolution of Ti80 Alloy with Different Original Microstructures

Tao Huan, Sun Erju, Pan Yifan, Yu Yan, Song Dejun, Yu Wei

(Luoyang Ship Material Research Institute, Luoyang 471039, China)

Abstract: The hot deformation behavior and microstructure evolution of Ti80 alloy with equiaxed and widmanstatten microstructures were studied by thermal simulation compression tests at the temperature of 850~1000 °C and strain rate of 0.01~10 s⁻¹ with deformation of 20%~60%. The results show that Ti80 alloy is a temperature-sensitive and strain rate sensitive material. The softening mechanism during deformation is mainly dynamic recrystallization in two-phase region, and dynamic recovery in single-phase region. Under the low strain rate condition (0.01 s⁻¹), the peak flow stress of the equiaxed structure is higher than that of the widmanstatten structure, while the high strain rate condition (1~10 s⁻¹) is the opposite. Under the same deformation parameters, the original structure type has a significant effect on the microstructure evolution of Ti80 alloy. Below the β phase transition point, with the increase of deformation temperature, the primary α phase in the equiaxed structure matrix decreases, and the secondary platelet α phase breaks to form irregular small particles; the grain boundary α phase of the widmanstatten structure is completely broken, and most of the platelet α phases in the β grains are broken and transform into the equiaxed particles, only a few colonies α phases in different orientations remain. As the deformation increases, the α phase recrystallized grain size in the equiaxed structure increases significantly, and the colonies platelet α phase in the widmanstatten structure is broken into small short strip and equiaxed recrystallized α grains.

Key words: Ti80 alloy; equiaxed microstructure; widmanstatten microstructure; hot deformation; microstructure evolution

Ti80 合金是一种近 α 型钛合金, 名义成分为 Ti-

6Al-3Nb-2Zr-1Mo。该合金是我国自主研发的 785 MPa 级船用结构钛合金, 具有中等的室温强度、良好的焊接性能和优异的抗海洋环境腐蚀能力^[1,2], 目前已成功用于深潜器耐压壳体、高压容器、船舶管

路系统、紧固件、轴等^[3-5]。影响钛合金热变形行为的因素众多,主要包括变形温度、应变速率、变形量及原始组织类型等,若变形工艺设计不合理,则易产生“ β 脆性”、组织“遗传性”等问题,严重影响产品的使用性能^[6-8]。

以原始组织分别为等轴组织和魏氏组织的 Ti80 合金为研究对象,通过热模拟压缩试验,开展变形温度 850~1000 °C、应变速率 0.01~10 s⁻¹、变形量 20%~60% 条件下的热变形行为研究,分析不同热变形参数下 Ti80 合金的组织演变规律,期望为优化其加工工艺提供参考。

1 实验

实验材料为经 3 次真空自耗电弧熔炼的规格为 $\phi 220$ mm 的 Ti80 合金铸锭,其相变点为 990~995 °C。铸锭经多火次锻造加工,得到 $\phi 100$ mm 的棒材,再经不同工艺热处理后,分别获得等轴组织和魏氏组织,如图 1 所示。

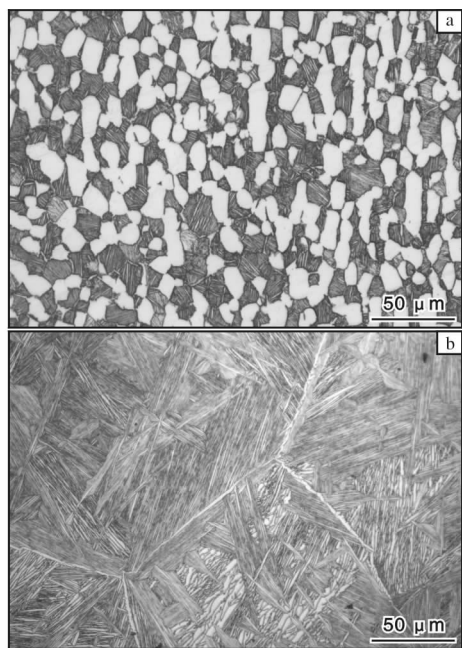


图 1 Ti80 合金棒材的显微组织

Fig. 1 Microstructures of Ti80 alloy bar: (a) equiaxed structure; (b) widmanstatten structure

采用线切割从 2 种组织的 Ti80 合金棒材上切取 $\phi 15$ mm 小圆棒,机加工成规格为 $\phi 10$ mm \times 15 mm 的热压缩试样。热压缩试验在 Gleeble-3500 型热模拟试验机上进行,变形温度为 850、900、950、1000 °C,变形速率为 0.01、1、10 s⁻¹,最大变形量为 60%。

压缩试样以 10 °C/s 的升温速度升至设定温度后,保温 5 min,以消除温差。压缩完成后立即将试样进行水淬,以保留高温变形组织。沿压缩试样轴向将其从中间剖开,切取金相试样。金相试样经机械抛光和化学腐蚀(腐蚀溶液为 HF、HNO₃、H₂O 按体积比 5:10:85 混合而成)后,采用 OLYMPUS GX71 金相显微镜进行显微组织观察。

2 结果与分析

2.1 真应力-真应变曲线

图 2 为等轴组织和魏氏组织 Ti80 合金在不同热变形条件下的真应力-真应变曲线。从图 2 可以看出, Ti80 合金流变应力随温度的升高而降低,随应变速率的增大而增大,属于温度敏感型和应变速率敏感型材料。在变形初期,由于位错密度迅速增加,加工硬化效果明显,流变应力在小应变量($\epsilon < 0.1$)条件下迅速达到峰值。在两相区(≤ 990 °C)变形时,随着应变量的增大,流变应力显著下降,说明发生了动态再结晶,引起的软化作用超过了加工硬化,当应变量继续增加时,动态再结晶引起的软化与加工硬化趋于平衡,流变应力趋于稳定;在单相区(1000 °C)变形时,流变应力随应变量的增加呈现稳态特征,材料发生动态回复,软化作用与加工硬化相互抵消。这是由于 Ti80 合金在相变点以下为密排六方结构,层错能较低,不容易发生位错的交滑移,动态再结晶成为软化的主要方式;而温度达到 1000 °C 时,发生 $\alpha \rightarrow \beta$ 相变, Ti80 合金呈现体心立方结构,层错能较高,容易发生位错的交滑移及攀移,所以超过相变点后合金更容易发生动态回复^[9,10]。

进一步对比等轴组织和魏氏组织 Ti80 合金真应力-真应变曲线可以发现,在低应变速率下(0.01 s⁻¹),等轴组织不同温度下流变应力峰值均高于魏氏组织;而在高应变速率下(1~10 s⁻¹),等轴组织流变应力峰值均低于魏氏组织。在高应变速率下(1~10 s⁻¹),魏氏组织流变应力随应变量增大而减小的幅度大于等轴组织。图 3 为等轴组织和魏氏组织 Ti80 合金在不同应变速率下的流变应力减小幅度随温度的变化曲线。以应变速率 10 s⁻¹ 为例,在 850~950 °C 温度区间,魏氏组织流变应力减小幅度分别为 175、120、78 MPa,而等轴组织流变应力减小幅度分别为 100、75、18 MPa,二者相差明显,说明魏氏组织动态再结晶的软化程度相比等轴组织更加

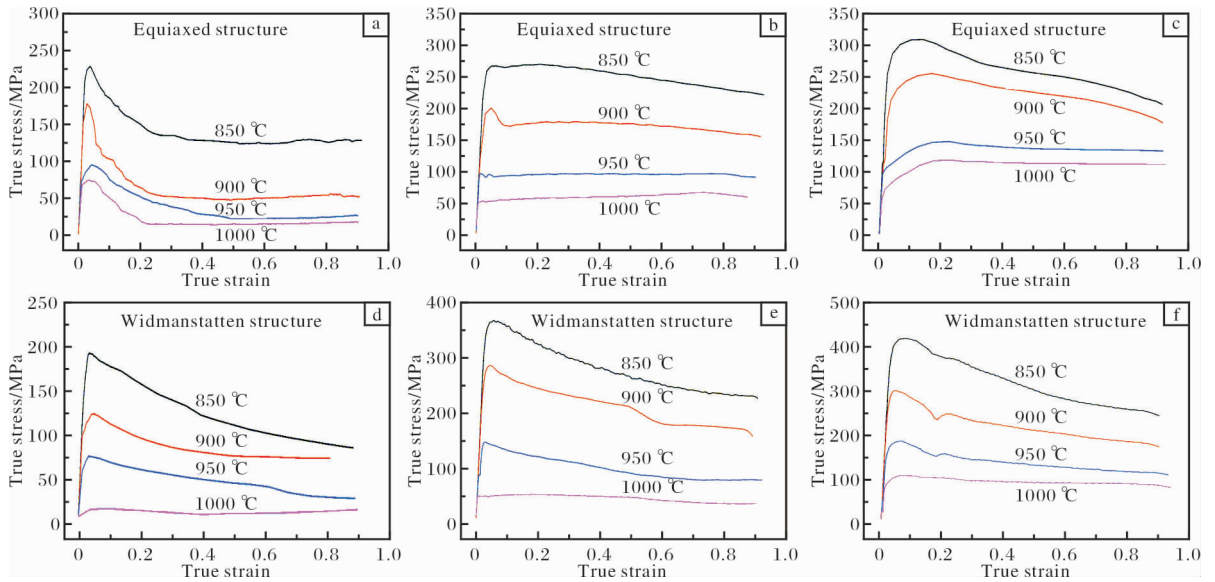


图2 等轴组织和魏氏组织 Ti80 合金在不同应变速率下的真应力-真应变曲线

Fig. 2 True stress-true strain curves of Ti80 alloy with equiaxed and widmanstatten structure at different strain rates: (a, d) 0.01 s^{-1} ; (b, e) 1 s^{-1} ; (c, f) 10 s^{-1}

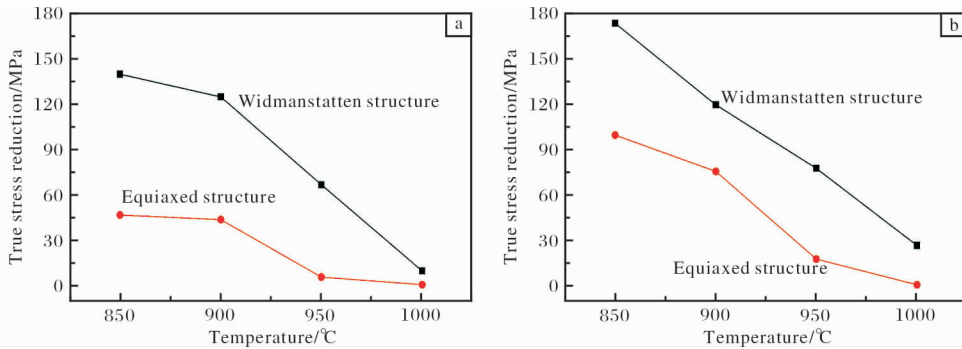


图3 等轴组织和魏氏组织 Ti80 合金在不同应变速率下的流变应力减小幅度随温度的变化曲线

Fig. 3 Variation curves of true stress reduction with temperature of Ti80 alloy with equiaxed and widmanstatten structure at different strain rates: (a) 1 s^{-1} ; (b) 10 s^{-1}

强烈。进入单相区后，等轴组织和魏氏组织软化机制均为动态回复，软化作用较弱。

2.2 变形温度对显微组织的影响

图4为在应变速率 0.01 s^{-1} 、变形量 60% 条件下，等轴组织 Ti80 合金在不同温度热变形后的显微组织。变形温度为 850 °C 时(图 4a)，原始等轴 α 相明显长大并被拉长，呈大块长条状， α 相晶界发生局部迁移变得曲折，转变 β 组织中的次生片状 α 相破碎，出现许多不规则的小颗粒状 α 相，说明 Ti80 合金发生了动态再结晶^[11,12]。变形温度为 900 °C 时(图 4b)，大块长条状 α 相数量减少，球状 α 相增多，同时小颗粒状 α 相轮廓更加清晰，数量进一步增加。变形温度为 950 °C 时(图 4c)，等轴 α 相的数

量明显减少，这是因为随着温度升高，溶质原子的扩散速率加快， α 相向 β 相转变增多。变形温度为 1000 °C 时(图 4d)，由于此时温度已超过 Ti80 合金的 α/β 相变点， α 相完全转变为 β 相，在随后的淬火中生成针状马氏体组织且 β 晶界清晰可见。

图5为在应变速率 0.01 s^{-1} 、变形量 60% 条件下，魏氏组织 Ti80 合金在不同温度热变形后的显微组织。变形温度为 850 °C 时(图 5a)，连续完整的原始 β 晶界已经消失，晶界 α 相完全变形破碎， β 晶粒内部大部分具有较大纵横比的片状 α 相破碎细化形成等轴颗粒，只保留少部分不同位向的集束状 α 相，表现出明显的动态再结晶特征。变形温度为 900 °C 时(图 5b)，残留的集束状 α 相进一步减少，颗粒状

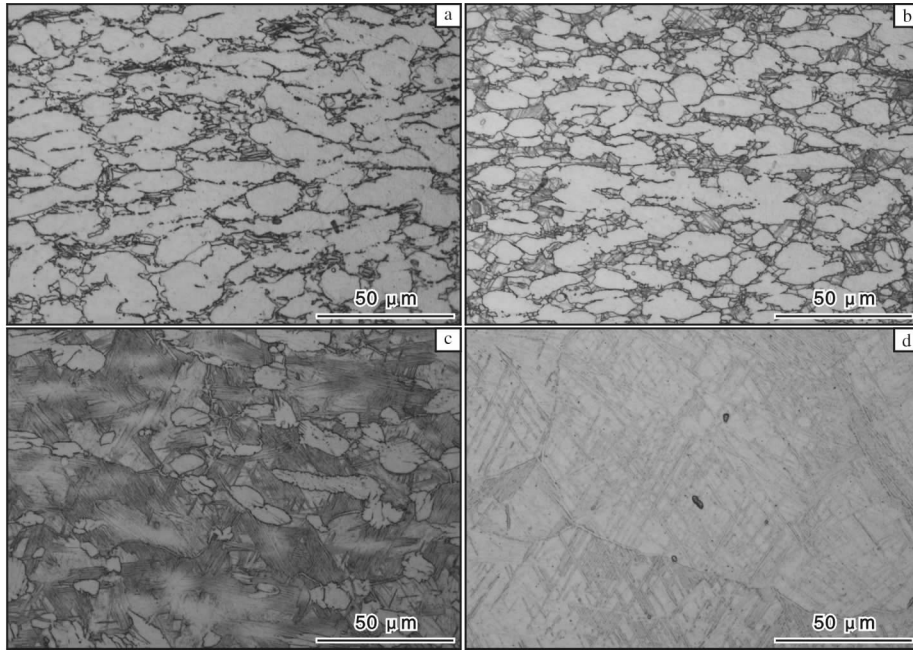


图4 等轴组织 Ti80 合金在不同温度下热变形后的显微组织

Fig. 4 Microstructures of Ti80 alloy with equiaxed structure hot deformed at different temperatures; (a) 850 °C; (b) 900 °C; (c) 950 °C; (d) 1000 °C

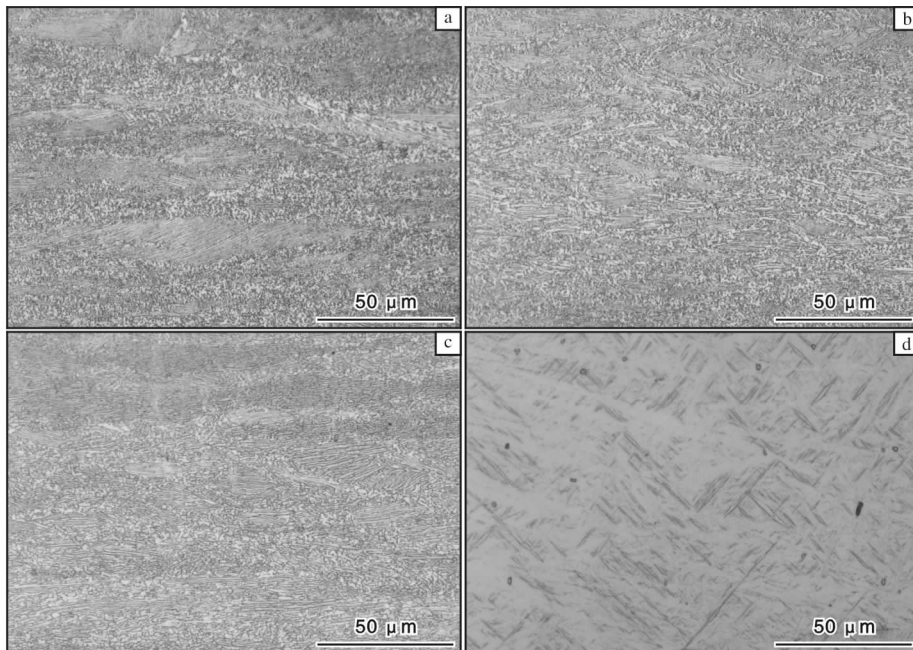


图5 魏氏组织 Ti80 合金在不同温度下热变形后的显微组织

Fig. 5 Microstructures of Ti80 alloy with widmanstatten structure hot deformed at different temperatures; (a) 850 °C; (b) 900 °C; (c) 950 °C; (d) 1000 °C

α 相无明显变化, 说明此时仍处于再结晶软化阶段。变形温度为 950 °C 时(图 5c), 集束状 α 相与 900 °C 时相比变化不明显, 而颗粒状 α 相有所长大, 动态再结晶趋势减弱。变形温度为 1000 °C 时(图 5d),

$\alpha \rightarrow \beta$ 相变已经完成, 在快速冷却过程中, β 相转变为马氏体组织, β 晶界不明显。

2.3 变形量对显微组织的影响

图 6 是等轴组织 Ti80 合金在应变速率 1 s^{-1} 、变

形温度 950 °C 条件下, 变形量分别为 20%、40%、60% 时的显微组织。当变形量为 20% 时(图 6a), 原始态长条状 α 相基本被破碎, 初生等轴 α 相数量明显减少, 靠近晶界处发生了 α 相的动态再结晶, 形成新的细小等轴晶粒。变形量增大至 40% 时(图

6b), 残留的长条状 α 相完全破碎, 细小等轴晶粒尺寸增大, 等轴化趋势明显。当变形量达到 60% 时(图 6c), α 相明显粗化。这可能是由于变形程度增大使得形变热效应提升, 试样温度升高, 金属原子快速扩散, 导致晶粒明显长大。

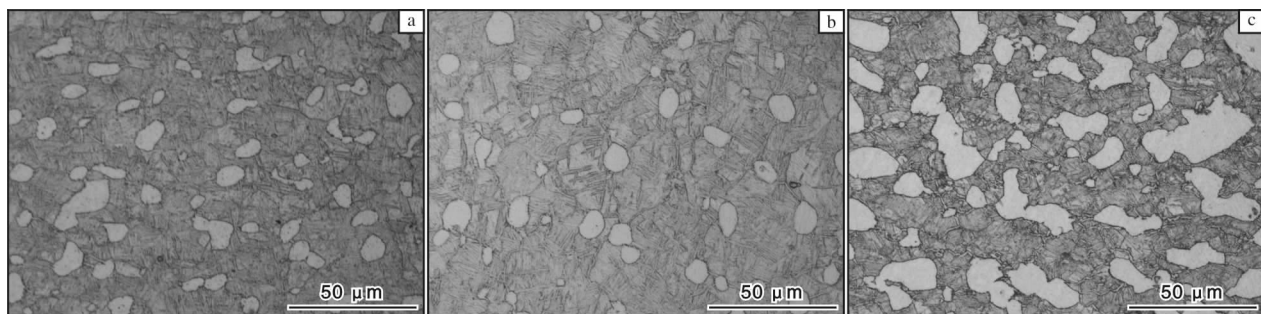


图 6 等轴组织 Ti80 合金经不同变形量热变形后的显微组织

Fig. 6 Microstructures of Ti80 alloy with equiaxed structure hot deformed at different deformation degrees:
(a) 20%; (b) 40%; (c) 60%

图 7 是魏氏组织 Ti80 合金在应变速率 1 s^{-1} 、变形温度 950 °C 条件下, 变形量分别为 20%、40%、60% 时的显微组织。当变形量为 20% 时(图 7a), 初始状态 β 晶界仍清晰可见, 晶界 α 相局部被打断和破碎, 可以观察到晶界处有少量细小的再结晶晶粒, 晶内集束片状 α 相出现了一定程度的扭曲。变形量为 40% 时(图 7b), β 晶界完全消失, 晶界 α 相被进

一步破碎和细化, 一部分晶内 α 相拉长并破碎形成短棒状 α 相和等轴 α 相, 不再是连续的整体形态分布, 同时晶内可观察到明显的 α 相动态再结晶现象。当变形量进一步增大至 60% 时(图 7c), 再结晶程度也逐渐增大, 组织中晶界 α 相和片状 α 相被进一步破碎, 形成大量细小的短条状再结晶 α 晶粒, 尺寸细小的等轴 α 相数量也显著增多。

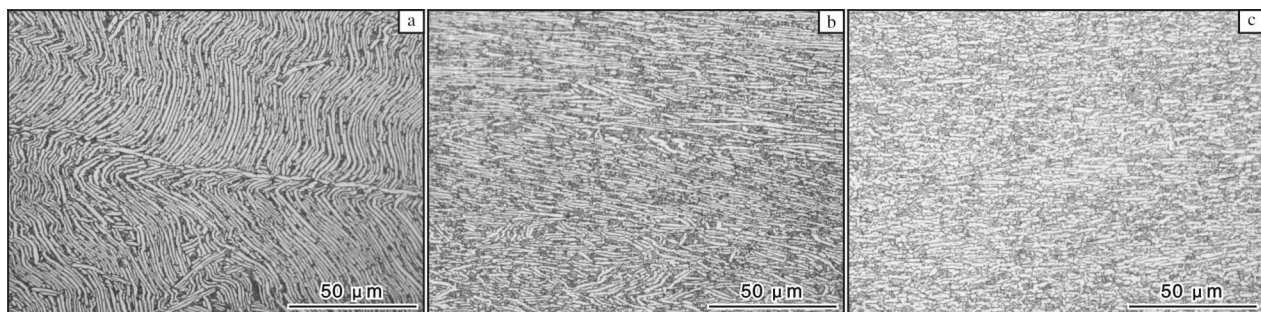


图 7 魏氏组织 Ti80 合金经不同变形量热变形后的显微组织

Fig. 7 Microstructures of Ti80 alloy with widmanstatten structure hot deformed at different deformation degrees:
(a) 20%; (b) 40%; (c) 60%

通过上述分析可知, 在相同变形参数下, 变形量对等轴组织和魏氏组织 Ti80 合金组织演变的影响是不同的。对于等轴组织而言, α 相再结晶晶粒尺寸随变形量的增加而增大, 变形量为 60% 时组织粗化明显。而对于魏氏组织 Ti80 合金, 随着变形量增大, 集束片状 α 相逐渐被破碎、打断, 由于动态再结晶作用形成细小的短条状和等轴 α 相, 晶粒长大

趋势不明显。

3 结 论

(1) Ti80 合金为温度敏感型和应变速率敏感型材料, 在两相区变形时软化机制以动态再结晶为主, 在单相区变形时以动态回复为主。低应变速率条件下(0.01 s^{-1}), 等轴组织流变应力峰值高于魏氏组

织; 高应变速率条件下($1 \sim 10 \text{ s}^{-1}$)则相反, 且魏氏组织动态再结晶的软化程度大于等轴组织。

(2) 在两相区变形时, 随着温度升高, 等轴组织基体中初生 α 相逐渐减少, 次生片状 α 相由于动态再结晶作用破碎形成不规则小颗粒; 魏氏组织晶界 α 相完全被破碎, β 晶粒内部大部分片状 α 相破碎细化形成等轴颗粒, 只保留少量不同位向的集束状 α 相。

(3) 变形量对 Ti80 合金组织影响显著。随着变形量增加, 等轴组织中再结晶 α 晶粒尺寸增大, 变形量为 60% 时组织粗化明显; 魏氏组织中集束片状 α 相被逐渐破碎, 形成细小的短条状和等轴再结晶 α 晶粒。

参考文献 References

- [1] 赵永庆. 国内外钛合金研究的发展现状及趋势[J]. 中国材料进展, 2010, 29(5): 1 - 8.
- [2] 陈军, 王廷询, 周伟, 等. 国内外船用钛合金及其应用[J]. 钛工业进展, 2015, 32(6): 8 - 12.
- [3] 李梁, 宋德军. Ti80 合金热压缩变形组织与加工图[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(1): 738 - 742.
- [4] 沈立华, 刘彦昌, 李修勇, 等. 退火温度对 Ti80 合金棒材组织与性能的影响[J]. 钛工业进展, 2018, 35(1): 29 - 31.
- [5] 杨胜利, 孙二举, 刘向前, 等. 热处理工艺对不同组织类型的 Ti6321 合金板坯组织与性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2020, 49(3): 1002 - 1008.
- [6] 蒋鹏, 孟宪亮, 刘茵琪, 等. Ti80 合金锻造工艺对显微组织和性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2005, 34(3): 286 - 288.
- [7] 周建华, 王晓英, 徐斌, 等. TC17 钛合金热变形过程中片状组织演变规律[J]. 钛工业进展, 2012, 29(5): 15 - 18.
- [8] 王敬忠, 丁凯伦, 杨西荣, 等. Ti-62A 合金热变形过程中的流变应力特性及组织演变[J]. 稀有金属材料与工程, 2020, 49(9): 3107 - 3114.
- [9] 于辉, 刘帅帅, 刘利刚, 等. TA17 钛合金热力学行为及加工特性研究[J]. 稀有金属, 2017, 41(1): 4 - 10.
- [10] Huang K, Loge R E. A review of dynamic recrystallization phenomena in metallic materials[J]. Materials & Design, 2016, 111(5): 548 - 574.
- [11] 朱鸿昌, 罗军明, 朱知寿, 等. TB17 钛合金 β 相区动态再结晶行为及转变机理[J]. 材料工程, 2020, 48(2): 108 - 113.
- [12] 张慧芳, 张治民, 张星, 等. 热变形参数对 BTi-62421S 合金微观组织及性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(S1): 113 - 117.

行业动态

VSMPO-AVISMA 公司与波音公司就钛产品 供应和技术合作达成协议

据俄罗斯 VSMPO-AVISMA 公司官网报道, VSMPO-AVISMA 公司与波音公司在 2021 年 11 月举办的迪拜航展上签署了谅解备忘录。无论是当前还是未来, VSMPO-AVISMA 公司都是波音商用飞机最大的钛产品供应商。

备忘录中指出, 双方将进一步发挥乌拉尔波音制造公司(UBM)的作用, 提高工厂的开工率; 加强研发投入, 不断开发新的产品和技术; 探索新机遇, 扩大 VSMPO-AVISMA 公司的产品类型, 特别是开发新的用于波音商用飞机的钛零部件及组件。

俄罗斯工业和贸易部部长 Denis Manturov 表示, 此次签署的谅解备忘录不仅再一次肯定了 VSMPO-AVISMA 公司作为世界领先高科技产品制造商的地位, 而且其实施对于俄罗斯非资源非能源产品出口量的增加具有重要意义。俄罗斯在国家项目“国际合作与出口”框架中指出, 2030 年俄罗斯非资源非能源产品的出口量较 2020 年至少增加 70%。VSMPO-AVISMA 公司在经营中坚持可持续发展的原则, 这不仅提升了公司在全球市场的地位, 同时也向其他俄罗斯企业展示了现代化商业管理模式的优势。

VSMPO-AVISMA 公司首席执行官 Dmitry Osipov 表示, 此次备忘录的签署代表着波音公司对 VSMPO-AVISMA 公司钛产品的高度认可, 进一步巩固了双方的长期合作关系, 而这种稳固的长期合作将有助于 VSMPO-AVISMA 公司专注于扩大投资, 不断提升生产能力。波音商用飞机公司总裁兼首席执行官 Stan Deal 表示, 近 25 年来, VSMPO-AVISMA 公司一直是波音公司值得信赖的合作伙伴, 备忘录的签署让波音公司在扩大与 VSMPO-AVISMA 公司互利合作方面又迈出了重要的一步。

(何蕾编译自 VSMPO-AVISMA 公司官网)