



板坯组织类型及热处理对 Ti6321 合金 板材力学性能各向异性的影响

杨胜利, 宋德军, 高福洋, 余 巍

(中国船舶重工集团公司 第七二五研究所, 洛阳 471039)

摘 要: 结合力学性能测试和 OM、SEM、EBSD 分析, 研究了 Ti6321 合金板材力学性能各向异性及其影响因素。结果表明: 板坯组织类型对板材平面各向异性具有显著影响, 等轴组织板坯和魏氏组织板坯制备的合金板材屈服强度、抗拉强度和冲击功均具有明显的平面各向异性, 且等轴组织板坯制备板材的屈服强度、抗拉强度和冲击功平面各向异性指数高于魏氏组织板坯制备板材相应指数。不同板坯组织类型制备的热轧态板材, 织构均主要为柱面织构($\{0002\} \perp$ 轧面), 织构的方向为 c 轴倾向于平行于 TD 方向排布; 经(980 °C, 80 min)热处理后板材织构主要为基面织构($\{0002\} //$ 轧面), 织构方向为 c 轴倾向于与 ND 平行。不同组织类型的板坯经相同的热变形和热处理, 对应板材的金相组织、织构组分、再结晶程度和裂纹扩展路径存在明显的差异, 这综合引起 Ti6321 合金板材力学性能的各向异性。

关键词: Ti6321 合金; 板坯组织; 织构; 各向异性

文章编号: 1004-0609(2020)-06-1358-10

中图分类号: TG146.2

文献标志码: A

Ti6321 合金是我国自主研发的 785 MPa 级的耐蚀可焊结构钛合金, 与 TC4 ELI 合金相比, Ti6321 合金具备更优的焊接性能、冲击韧性和断裂韧性, 其在深海承压装备和舰船结构件上应用广泛^[1-4]。深潜器、船舶的服役过程经常受到持续的动载和瞬时冲击, 如海浪、海上漂浮物和礁石等的冲击^[5-6], 因此对合金材料的使用性能要求严苛。Ti6321 钛合金板材作为深潜器、船舶用耐压结构件的重要组成部分, 其组织与性能的均匀性一定程度决定了其服役过程使用的可靠性。然而, 随着 Ti6321 板材规格的增加, 板材难免产生组织与性能的各向异性。钛合金板材由锻造板坯轧制而成, 为控制钛合金成品板材的组织与性能, 需对板坯的组织类型、尺寸规格提出合理的要求。锻造板坯的组织类型是否对合金后续轧制板材的各向异性具有“遗传性”的影响, 目前尚未明确。有关热处理对 Ti6321 合金板材力学性能各向异性的影响也鲜有报道, 各因素影响合金板材力学性能各向异性的内在作用机理尚未明确。

本研究通过对不同组织类型的 Ti6321 合金锻造板坯进行轧制及热处理, 结合拉伸性能和冲击性能测试, 以及 OM、SEM 和 EBSD 分析, 总结锻造板坯组

织类型和热处理对合金板材不同方向的拉伸性能和冲击性能的影响规律, 分析引起合金板材力学性能各向异性的微观机理, 为 Ti6321 合金板材工业化制备过程中组织与性能稳定性控制提供详实的理论依据。

1 实验

本试验用 Ti6321 合金采用三次真空自耗电弧炉熔炼而成。采用升温金相法测得合金铸锭的 $(\alpha+\beta)/\beta$ 相变点为 990~1000 °C。两铸锭经多次锻造成形锻造板坯, 经机加工后进行金相测试, 如图 1 所示, 1[#]和 2[#]板坯组织呈等轴组织和魏氏组织。对 1[#]和 2[#]板坯进行相同工艺的两火次单向热轧后均获得 20 mm 厚板材, 两火次轧制后板材的编号如表 1 所示。然后对板材进行分割, 分别在 900、920、940、960、980 和 1020 °C 下进行 80 min 热处理, 冷却方式为空冷。

合金板坯金相测试在 DSM-III-104 便携式金相显微镜上进行, 热处理试样金相测试在 ZEISS AxioObserver.Z1m 金相显微镜上进行, 金相腐蚀液成分分配比为: $V(\text{HF}):V(\text{HNO}_3):V(\text{H}_2\text{O})=5:12:83$ (高倍),

基金项目: 装备发展部领域基金资助项目(61400040404)

收稿日期: 2019-06-04; 修订日期: 2019-11-16

通信作者: 杨胜利, 高级工程师, 博士; 电话: 0379-67256994; E-mail: bravictors@126.com

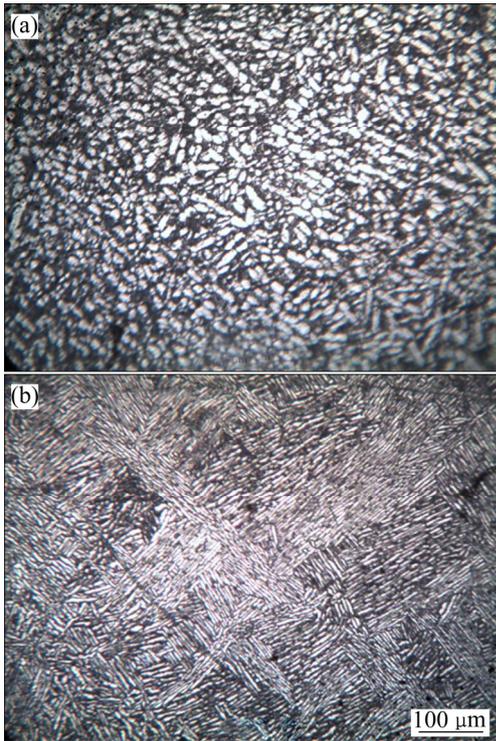


图 1 板坯金相组织
Fig. 1 Metallographic structures of slab: (a) Slab 1#, equiaxed structure; (b) Slab 2#, widmanstatten structure

表 1 试样编号

Original slab	After the first hot rolling	After the second hot rolling
1#	1-1#	1-2#
2#	2-1#	2-2#

$V(\text{HF}):V(\text{HNO}_3):V(\text{H}_2\text{O})=10:15:75$ (低倍)。室温拉伸试验在 SINTECH20/G 材料试验机上进行, 执行标准为 GB/T 228.1—2010。室温 V 型缺口冲击试验在 ZBC2302-B 摆锤式冲击试验机上进行, 执行标准为 GB/T 229—2007。断口分析在 Quanta650FEG 场发射扫描电子显微镜上进行。EBSD 测试在装配有 EBSD 探头的 JEOL JSM-7001F 型扫描电子显微镜上进行, 试样经机械研磨后进行电解抛光处理, 电解抛光后酒精清洗吹干, 采用 TSL-OIM Date-collection 5 软件进行数据处理, 获得晶体结构信息。

2 结果与讨论

2.1 力学性能各向异性

板坯组织类型对制备板材的组织 and 性能具有一定

“遗传性”, 轧制和热处理影响合金板材金相组织形貌、组织和再结晶等, 进而影响合金力学性能各向异性^[7-8]。图 2 所示为 1-2#、2-2# 板材经不同温度热处理后沿纵向、横向的拉伸和冲击性能。由图 2(a)和(b)可以看出, 热轧态和热处理后, 魏氏板坯制备板材(2-2#)的屈服强度和抗拉强度均高于等轴板坯制备板材(1-2#)对应取向的屈服强度和抗拉强度, 伸长率差值较小。另外, 对比两种板材热轧态和热处理后(相变点以

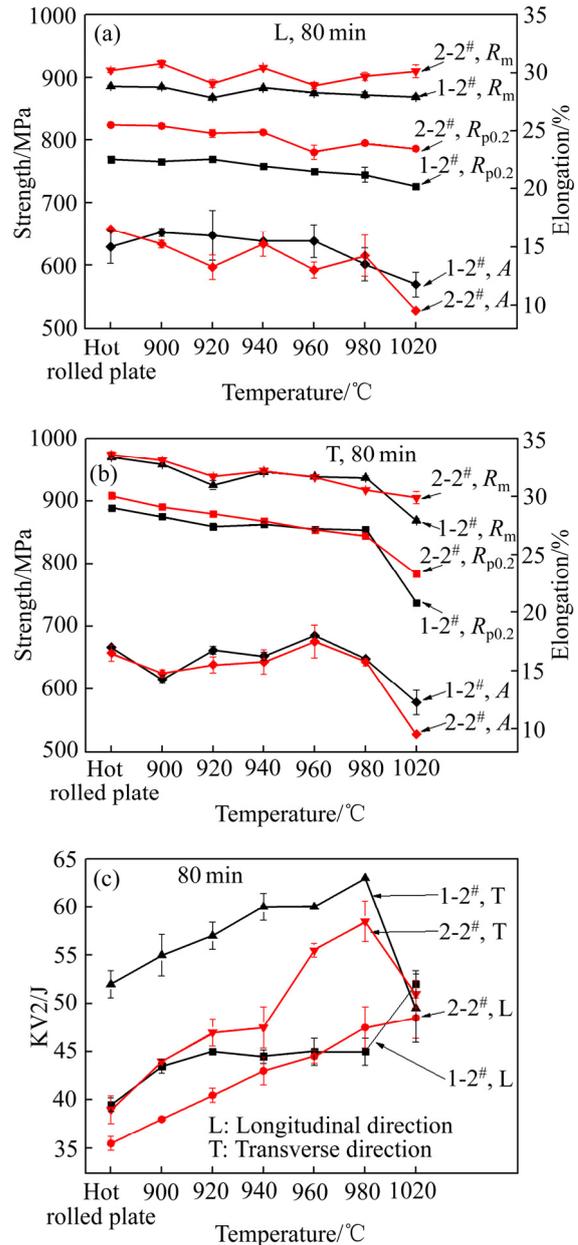


图 2 退火温度对 1-2#、2-2# 板材拉伸性能和冲击韧性的影响

Fig. 2 Effects of annealing temperature on tensile properties and impact toughness of 1-2# and 2-2# plates: (a) L-tensile properties; (b) T-tensile properties; (c) L and T impact toughness

下)的纵、横向抗拉强度和屈服强度(见图 2(a)和(b))、冲击功(见图 2(c)),可以看出,两板材横向的屈服强度、抗拉强度和冲击功高于纵向的对应强度和冲击功。

采用 JATA 等^[9]提出的各向异性指标 I_{PA} (I_{PA}) 计算合金两合金板材热处理前后其拉伸和冲击性能平面各向异性指数,结果如图 3 所示,其中 I_{PA} 定义为:

$$I_{PA} = \frac{2X_{\max} - X_{\text{mid}} - X_{\min}}{2X_{\max}} \times 100\% \quad (1)$$

由图 3 可以看出,热轧态板材均具有较高的屈服强度、抗拉强度和冲击功各向异性指数。在 $(\alpha+\beta)/\beta$ 相变点以下,经(900~980 °C, 80 min)热处理,两板材的屈服强度、抗拉强度、冲击功的各向异性指数变化并不显著。在 $(\alpha+\beta)/\beta$ 相变点以上,经(1020 °C, 80 min)热处理,两板材的屈服强度、抗拉强度和冲击功各向异性指数均急剧降低,各向异性基本消除。此外,由图 3 可以看出,热轧态和热处理的板材,1-2[#]合金的屈服强度、抗拉强度和冲击功各向异性指数均高于 2-2[#]合金板材对应的指数,说明板坯的组织类型对板材的各向异性具有一定影响。

2.2 各向异性影响因素分析

2.2.1 金相分析

引起材料各向异性的因素很多,主要有织构、组织形貌、亚结构等^[7],因此需对这些因素进行综合讨论。图 4 所示为不同组织板坯经第二火次轧制后,热轧态和经(980 °C, 80 min)热处理后的板材横、纵截面的金相组织。可以看出,1[#]板坯经二火次轧制后形成双态组织,为初生 α +含次生 α 的转变 β +少量晶界 α 相。2[#]板坯经二火次轧制后形成变形的等轴组织,即初生的等轴 α 相、拉长 α 相和含片状 α 相的转变 β 相。图 4(a')和(b')所示为合金热轧态纵向金相组织,可以看出,热轧态板材具有明显的纤维组织,其中 1-2[#]合金热轧态板材晶界清晰可见,晶界 α 相沿晶界成纤维状。2-2[#]合金热轧态板材的初生 α 相沿轧制方向显著拉长,板材各向异性明显。两合金板材经(980 °C, 80 min)热处理后,如图 4(c)、(d)、(c')和(d')所示,可以看出,相比热轧态组织,退火处理后两合金的纤维状组织消失,金相组织均呈现为初生 α +含次生 α 的转变 β 组织,初生 α 相含量均有所减少, β 转变组织增加,板材屈服强度和抗拉强度各向异性指数略有降低。

图 5 所示为两合金板材经(980 °C, 80 min)处理后,其纵、横向冲击断口裂纹扩展路径的金相组织,由图

5(a)和(b)可以看出,1-2[#]合金纵向冲击试样断口裂纹主要沿初生 α 相界和次生 α 相界扩展(见图 5(a)),而横向冲击试样断口裂纹主要切过次生 α 相(见图 5(b))。由图 5(c)可以看出,2-2[#]合金纵向冲击试样断口裂纹扩展与 1-2[#]合金纵向冲击试样断口裂纹扩展相似,也

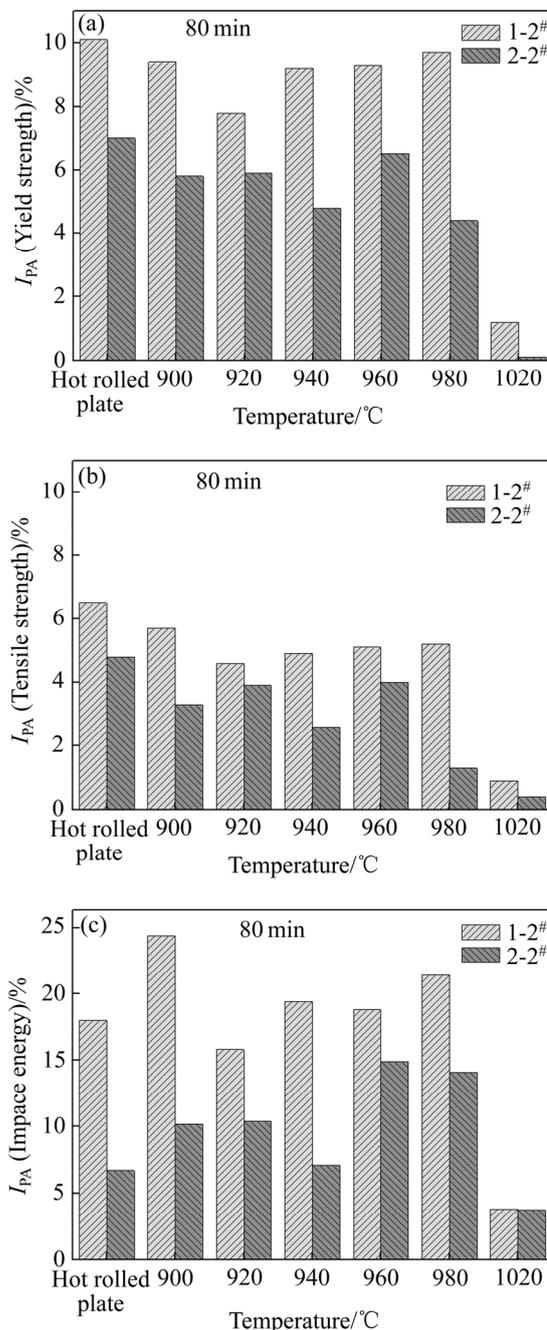


图 3 1-2[#]和 2-2[#]板材经不同温度热处理 80 min 的力学性能平面向异性指数(I_{PA} , %)

Fig. 3 Planar anisotropy indexes (I_{PA} , %) of mechanical properties of 1-2[#] and 2-2[#] plates treated at different temperatures for 80 min: (a) Yield strength; (b) Tensile strength; (c) Impact energy

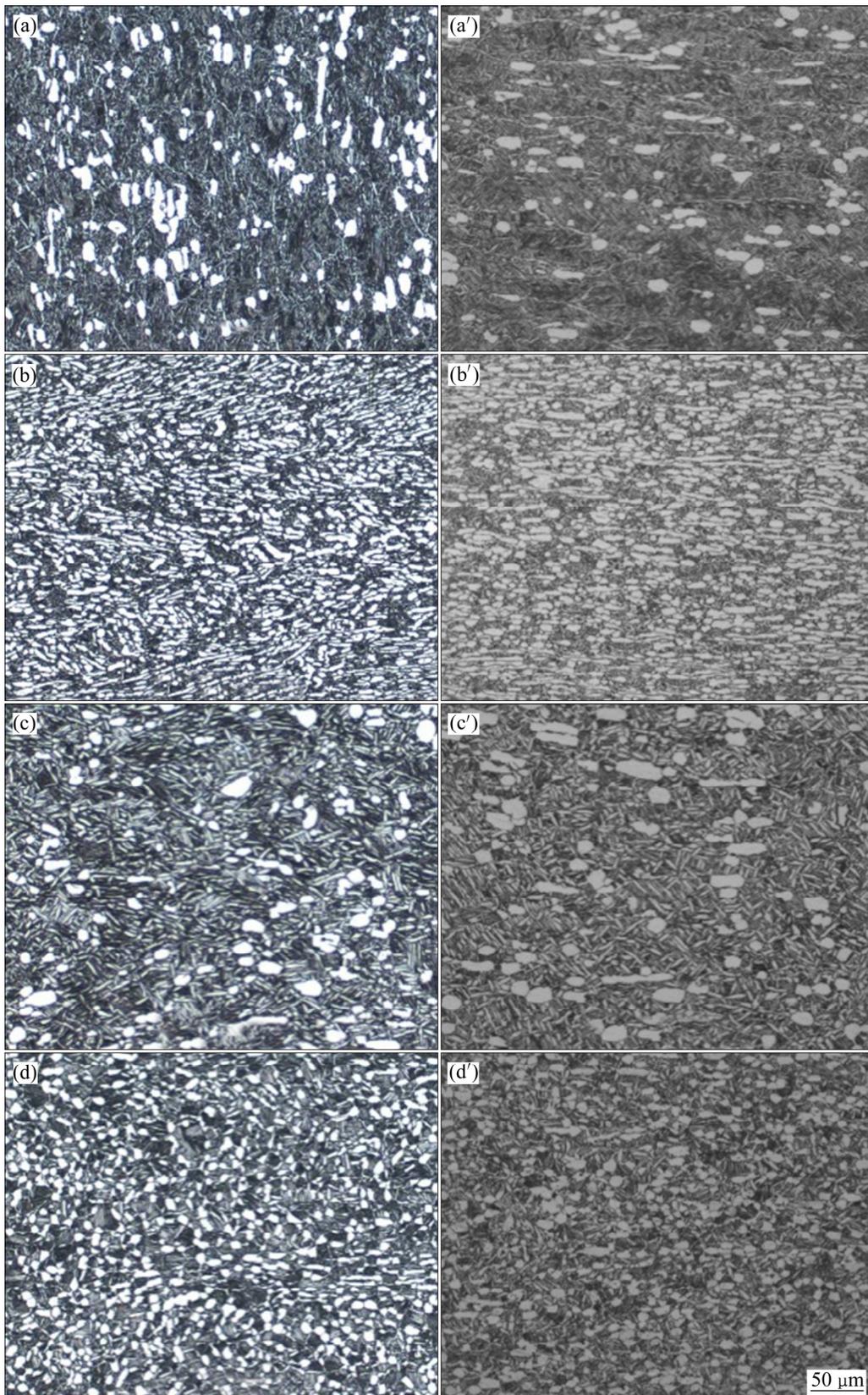


图 4 不同组织板坯经第二火次轧制后金相组织

Fig. 4 Metallographic structures of slab with different structure after the second hot rolling: (a), (b), (c), (d) Transversal section; (a'), (b'), (c'), (d') Longitudinal section; (a), (a') 1-2[#], hot rolling plate; (b), (b') 2-2[#], hot rolling plate; (c), (c') 1-2[#], 980 °C, 80 min; (d), (d') 2-2[#], 980 °C, 80 min

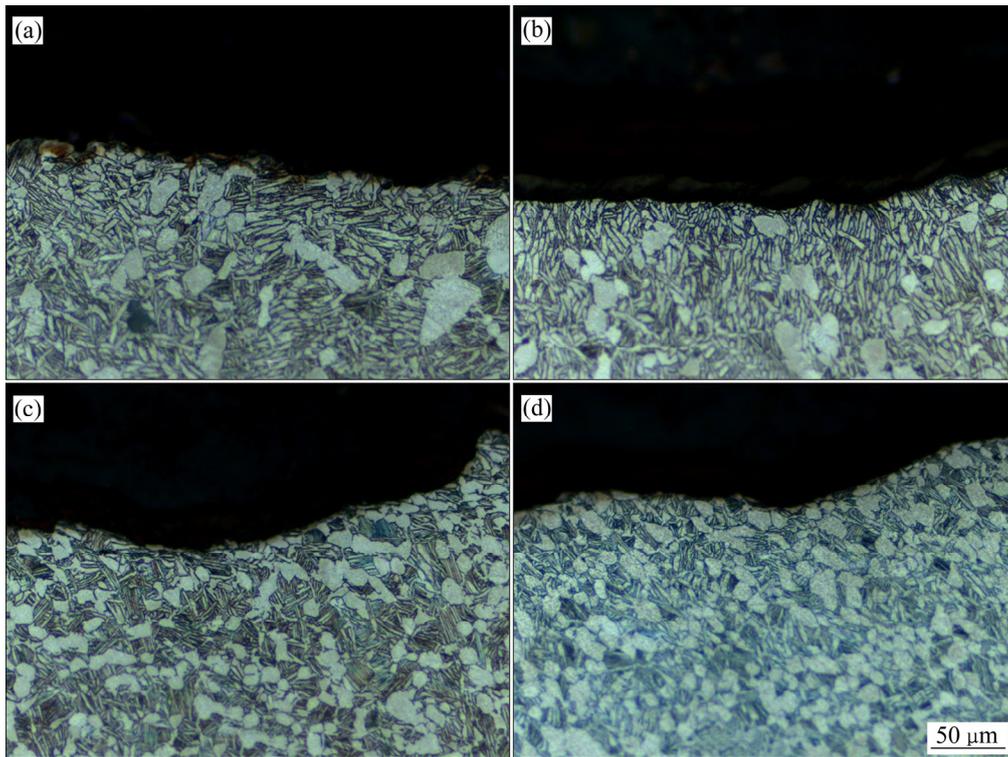


图5 1-2[#]和2-2[#]合金板材经(980 °C, 80 min)处理后冲击断口裂纹金相组织

Fig. 5 Metallographic structures of impact fracture crack of 1-2[#] and 2-2[#] alloy plate after (980 °C, 80 min) treatment: (a) 1-2[#], L direction; (b) 1-2[#], T direction; (c) 2-2[#], L direction; (d) 2-2[#], T direction

主要沿初生 α 相界或次生 α 相界扩展(见图 5(c)), 而横向冲击试样断口裂纹主要切过初生 α 相和次生界扩展(见图 5(d))。当裂纹扩展方向近似垂直于次生 α 相片层束集时, 由于阻力增加, 提高了裂纹扩展所需的能量^[10], 引起两合金板材纵、横向冲击功韧性的差异。上述表明, 不同组织的板坯经相同工艺热变形和热处理后, 其金相组织存在明显差异, 进而引起合金裂纹扩展路径的不同, 这是导致两合金板拉伸性能和冲击韧性各向异性的主要原因之一。

2.2.2 织构分析

采用 EBSD 对(980 °C, 80 min)热处理后的 1-2[#]和 2-2[#]合金板材热处理前后进行织构分析, 结果如图 6 所示。由图 6(a)和(b)可以看出, 两合金热轧态板材织构主要为柱面织构($\{0002\} \perp$ 轧面), 织构的方向为晶胞倾向于 c 轴平行于 TD 方向排布, 沿 TD 方向转动一定角度。由图 6(c)和(d)可以看出, 经(980 °C, 80 min)热处理后织构主要为基面织构($\{0002\} //$ 轧面), 织构方向为 c 轴倾向于与 ND 平行, 沿 ND 方向转动一定角度。Ti6321 合金为近 α 型钛合金, 其三个 a 型滑移面 $\{10\bar{1}0\}$ 、 $\{10\bar{1}1\}$ 、 $\{0001\}$ 的滑移方向均为 $\langle 11\bar{2}0 \rangle$ 方

向^[11-15]。当沿 TD 方向拉伸变形时, 加载的正应力与 c 轴方向接近平行, 所有 a 型滑移系的 Schmid 因子接近于 0 而不易开动, 此时需要开动滑移方向为 $(11\bar{2}3)$ 的 $a+c$ 型滑移系, 从而满足 Von Mises 定律中要求的 5 个独立滑移系^[10], 而 $a+c$ 型滑移系的临界分切应力 (CRSS) 大于 a 型滑移系的临界分切应力。由此可推测, 当加载变形过程中倾向于平行于 c 轴的 a 型滑移系的比例较高时, 合金的屈服强度则偏高, 反之屈服强度偏低。如图 6(a)和(b)所示, 热轧态板材织构主要为晶胞倾向于 c 轴平行于 TD 方向排布, 且与 RD 方向存在较大差别; 而热处理态板材形成的主要为基面织构方向为 c 轴倾向于与 ND 平行, TD 和 RD 方向的织构强度差别较小, 这引起热轧态板材的屈服强度各向异性指数高于热处理态的对应指数。而热轧态和热处理态的 1-2[#]合金板材的各向异性指数均高于 2-2[#]板材的对应各向异性指数, 是前者沿 TD 和 RD 方向织构强度的差别高于后者而引起的。

此外, 图 7 所示为 1-2[#]和 2-2[#]板材热处理前后晶界取向差分布图。对比图 7(a)、(b)、(c)和(d)可知, 1-2[#]和 2-2[#]热轧态板材的小角度晶粒(小角度晶界, $< 15^\circ$;

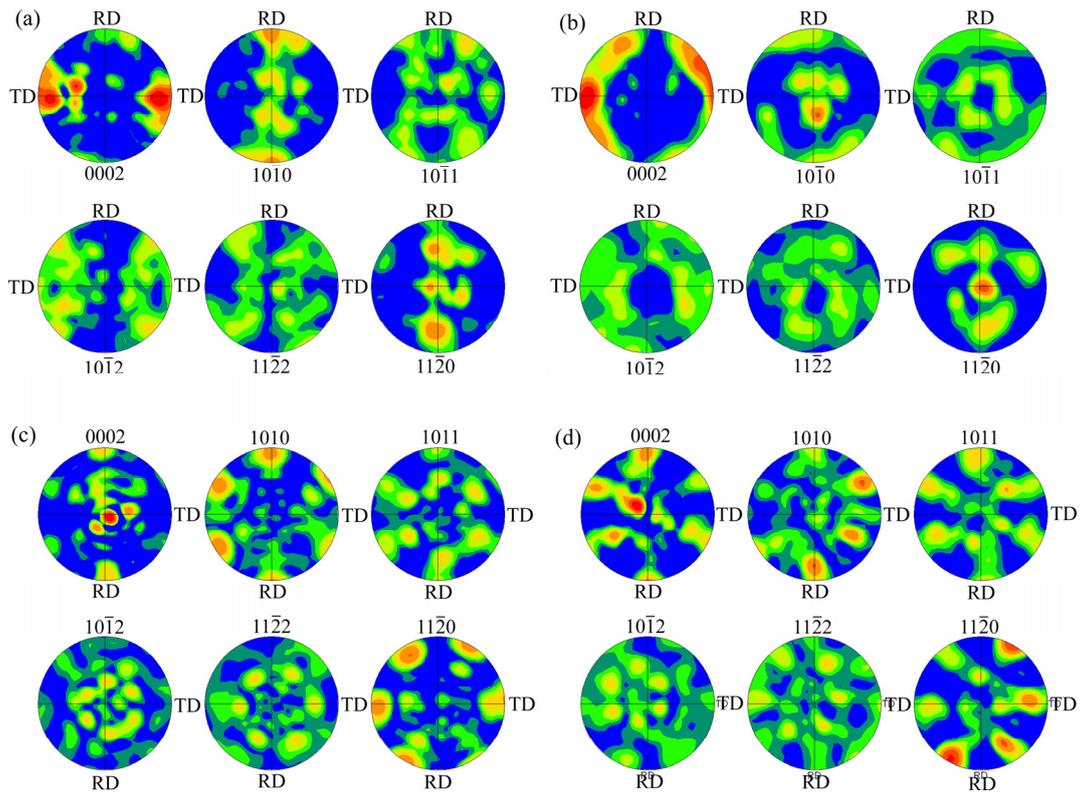


图 6 1-2[#]、2-2[#]合金板材热轧态和热处理后极图

Fig. 6 Pole diagrams of 1-2[#] and 2-2[#] alloy plates in hot rolling state and after heat treatment: (a) 1-2[#], hot rolling plate; (b) 2-2[#], hot rolling plate; (c) 1-2[#], 980 °C, 80 min; (d) 2-2[#], 980 °C, 80 min

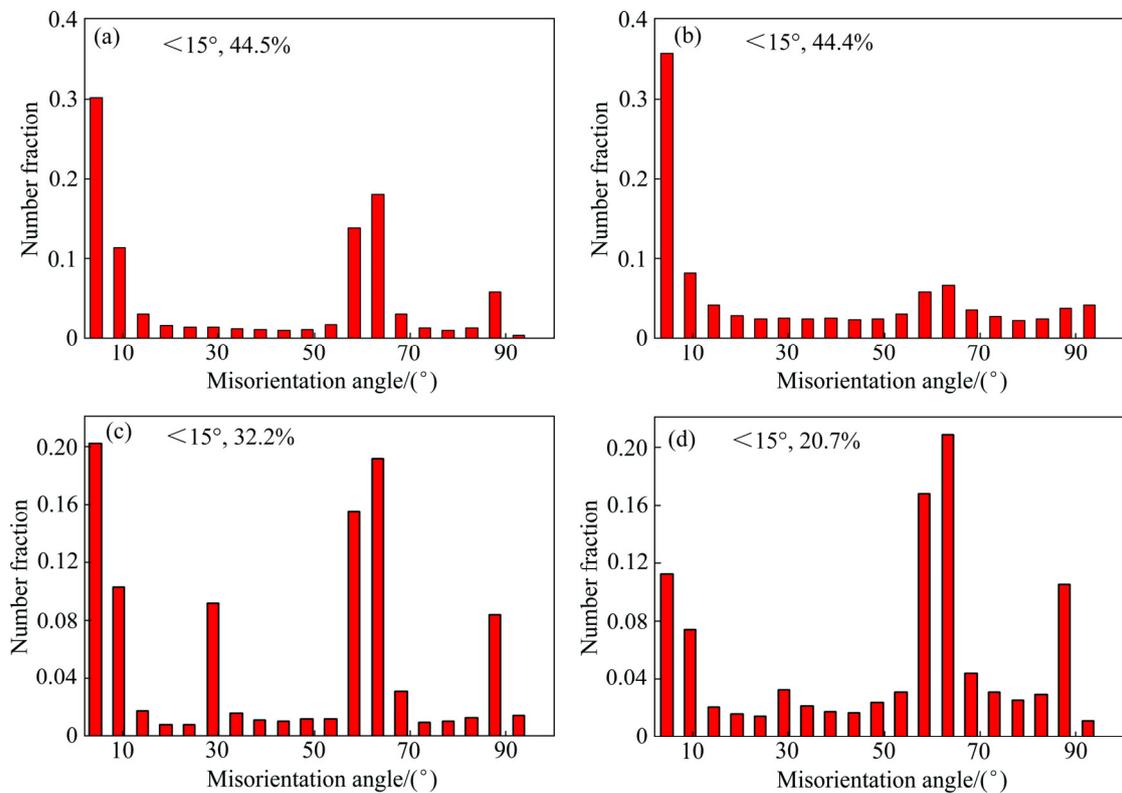


图 7 1-2[#]、2-2[#]合金板材热轧态和热处理后取向差分布图

Fig. 7 Distributions of orientation difference of 1-2[#] and 2-2[#] alloy plates after hot rolling and heat treatment: (a) 1-2[#], hot rolling plate; (b) 2-2[#], hot rolling plate; (c) 1-2[#], 980 °C, 80 min; (d) 2-2[#], 980 °C, 80 min

大角度晶界, $>15^\circ$ 占比分别为 44.5%和 44.4%, 经 (980 °C, 80 min) 热处理后小角度晶粒占比分别下降至 32.2%和 20.7%, 即两板材产生了一定程度的再结晶, 1-2[#]板材再结晶程度高于 2-2[#]板材的再结晶程度。上述表明, 不同组织的板坯经相同工艺热变形和热处理后, 其组织组分和再结晶程度存在明显差异, 是引起两合金板材拉伸性能各向异性的主要原因之一。

2.2.3 断口分析

图 8 和图 9 所示分别为 1-2[#]合金经 (980 °C, 80 min) 处理后纵、横向冲击试验的断口形貌, 图 10 和图 11 所示分别为 2-2[#]合金经 (980 °C, 80 min) 处理后纵、横向冲击试验的断口形貌, 其中 (a)、(b)、(c) 和 (d) 所示分别为各个断口的宏观断口、纤维区、放射区和剪切唇区形貌。由图 8(b)、(c) 和图 9(b)、(c) 可以看出, 1-2[#]合金纵、横向冲击断口的纤维区和放射区均由等轴的韧窝组成, 表明合金纵、横向均表现较好的塑性; 对比可以看出, 1-2[#]合金横向断口的韧窝尺寸小于纵向断口, 而韧窝深度则比纵向断口的深。图 8(d) 和图 9(d) 为合金断口的剪切唇区形貌, 结合图 8(a) 和图 9(a)

宏观断口可以看出, 剪切唇区裂纹扩展较快, 此时的裂纹在平面应力状态下产生失稳。由图 8(d) 和图 9(d) 可以看出, 合金纵、横向断口的剪切唇区韧窝均有一定的方向性, 表面明显的撕裂脊表明为韧性断裂; 对比纵、横向剪切唇区形貌看出, 横向断口的剪切唇区韧窝尺寸小而深, 且分布更加均匀。

图 10(a) 和图 11(a) 所示分别为 2-2[#]合金的纵、横向的宏观断口, 可以看出, 纵向断口有明显的块状物 (见图 10(a) 白色箭头所示)。由图 10(b)、(c) 和图 11(b)、(c) 可以看出, 2-2[#]合金纵、横向冲击断口的纤维区和放射区均由等轴的韧窝组成, 因为冲击断口在平面应变状态时, 裂纹达到临界尺寸后会快速扩展形成结晶区, 结晶区受正应力, 微观上呈等轴状韧窝, 有明显的韧性脊 (见图中白亮区域)。图 10(d) 和图 11(d) 所示分别为合金断口的剪切唇区形貌, 可以看出, 合金纵、横向断口的剪切唇区韧窝均有一定的方向性和明显的撕裂脊。综上可知, 两种合金纵、横向断口形貌的差异性一定程度揭示了两合金各向异性差异的原因。

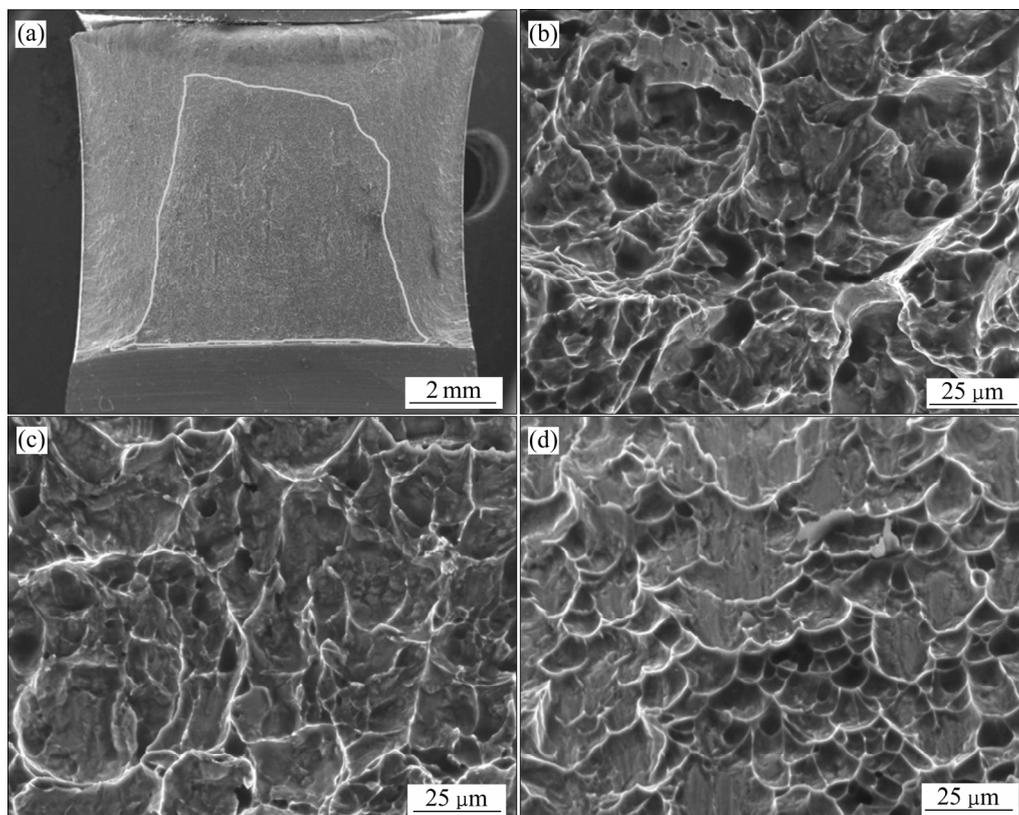


图 8 1-2[#]合金经 (980 °C, 80 min) 处理后纵向 (L) 冲击试样断口形貌

Fig. 8 L direction impact specimen fracture morphologies of 1-2[#] alloy after (980 °C, 80 min) heat treatment: (a) Macro-fracture; (b) Fibrous area; (c) Radiation area; (d) Shear lip

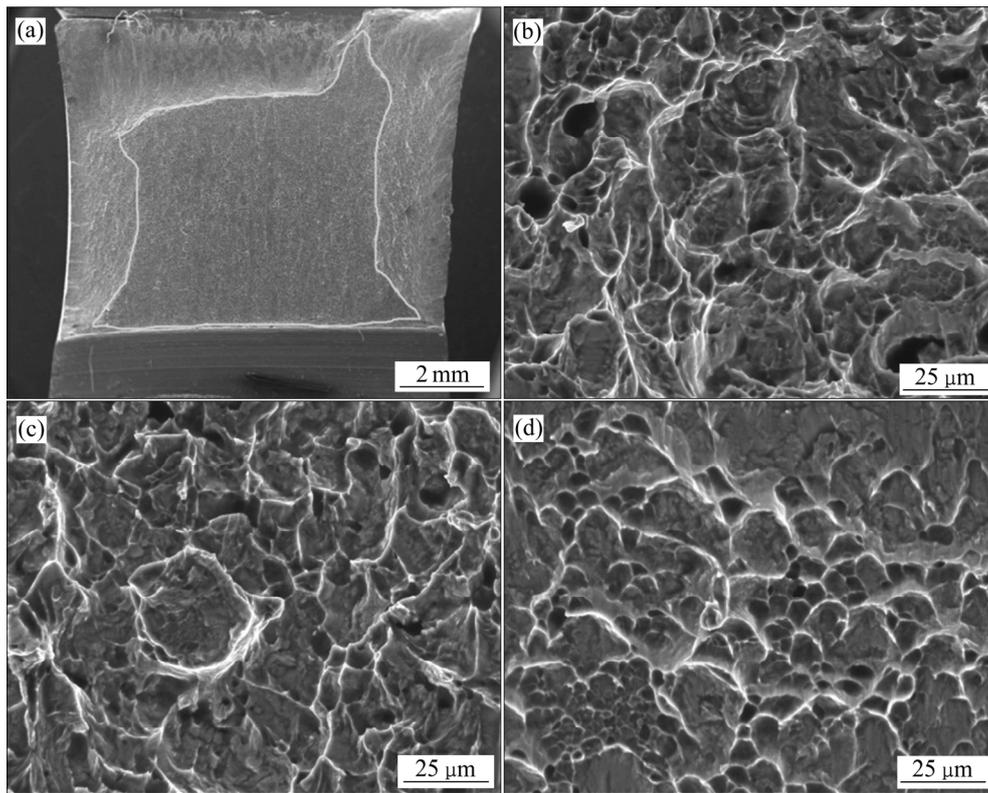


图 9 1-2#合金经(980 °C, 80 min)处理后横向(T)冲击试样断口形貌

Fig. 9 T direction impact specimen fracture morphologies of 1-2# alloy after (980 °C, 80 min) heat treatment: (a) Macro-fracture; (b) Fibrous area; (c) Radiation area; (d) Shear lip

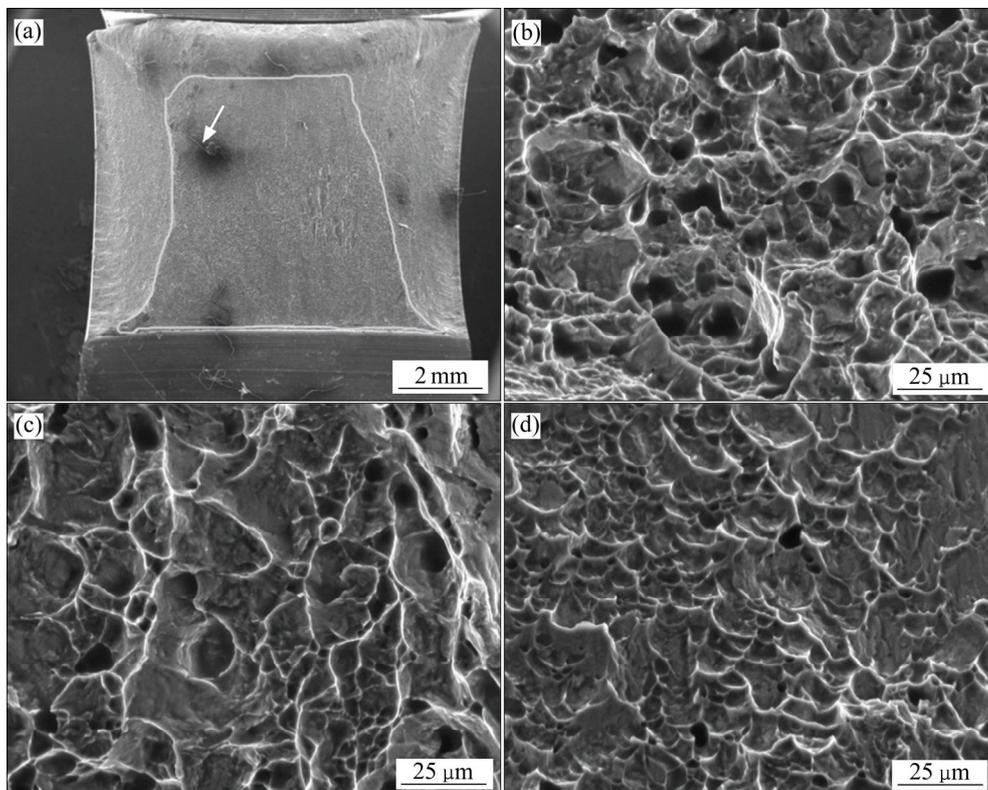


图 10 2-2#合金经(980 °C, 80 min)处理后纵向冲击试样断口形貌

Fig. 10 L direction impact specimen fracture morphologies of 2-2# alloy after (980 °C, 80 min) heat treatment: (a) Macro-fracture; (b) Fibrous area; (c) Radiation area; (d) Shear lip

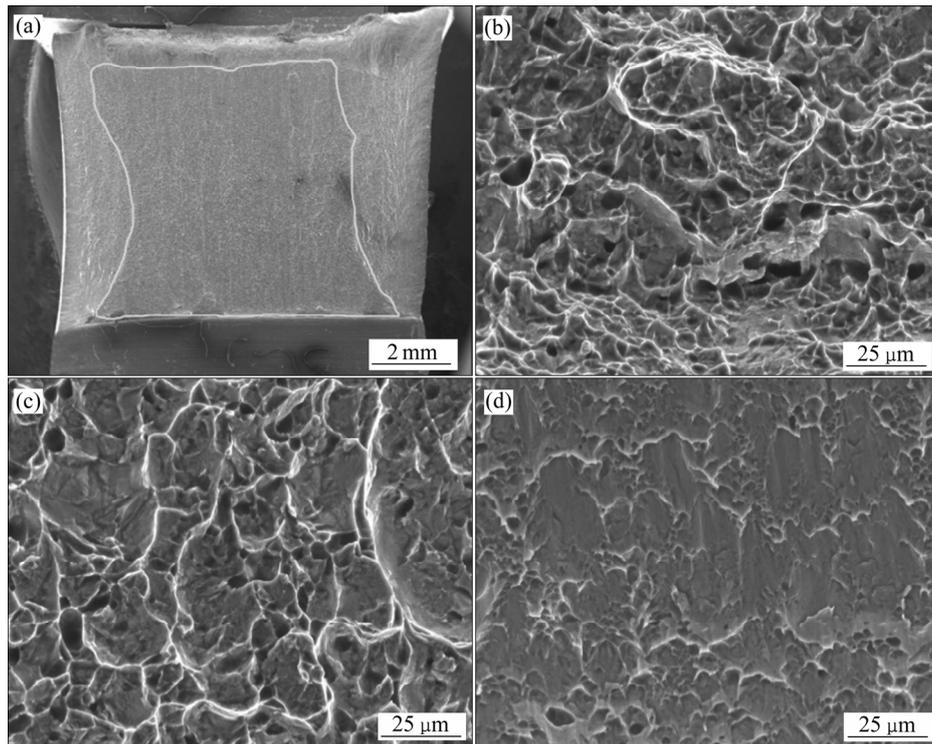


图 11 2-2[#]合金经(980 °C, 80 min)处理后横向冲击试样断口形貌

Fig. 11 T direction impact specimen fracture morphologies of 2-2[#] alloy after (980 °C, 80 min) heat treatment: (a) Macro-fracture; (b) Fibrous area; (c) Radiation area; (d) Shear lip

3 结论

1) 板坯组织类型对板材平面各向异性具有显著影响, 等轴组织板坯和魏氏组织板坯制备的合金板材屈服强度、抗拉强度和冲击功均具有明显的平面各向异性。前者的屈服强度、抗拉强度和冲击功各向异性指数高于后者的相应指数。

2) 两合金热轧态板材织构主要为柱面织构($\{0002\} \perp$ 轧面), 织构的方向为 c 轴倾向于平行于 TD 方向排布; 经(980 °C, 80 min)热处理后板材织构主要为基面织构($\{0002\} //$ 轧面), 织构方向为 c 轴倾向于与 ND 平行。不同组织类型的板坯经相同的热变形和热处理, 板材的金相组织、织构组分、再结晶程度和裂纹扩展路径存在明显的差异, 综合引起了板材力学性能的各向异性。

REFERENCES

[1] 孟祥军, 陈春和, 余巍, 刘茵琪. 几种海洋工程用钛合金及其应用[J]. 金属学报, 2002, 38(Z1): 33-36.
MENG Xiang-jun, CHEN Chun-he, YU Wei, LIU Yin-qi. Research, application and development of shipbuilding titanium alloy in China[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2002,

38(Z1): 33-36.

- [2] 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.
LI Liang, SONG De-jun. Microstructure and processing map of hot compressing deformation of Ti80 alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2010, 20(1): 738-742.
- [3] 黄瑜, 汤慧萍, 贾文鹏, 刘海燕, 贺卫卫. 元素添加方式对 Ti-6Al-3Nb-2Zr-1Mo 合金性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2011, 40(12): 2227-2231.
HUANG Yu, TANG Hui-ping, JIA Wen-peng, LIU Hai-yan, HE Wei-wei. Influence of element addition ways on the performance of Ti-6Al-3Nb-2Zr-1Mo alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2011, 40(12): 2227-2231.
- [4] 文志刚, 王伟琪, 王小翔, 李晓燕. 热处理温度对 Ti-6Al-3Nb-2Zr-1Mo 合金板材显微组织和性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(S1): 670-672.
WEN Zhi-gang, WANG Wei-qi, WANG Xiao-xiang, LI Xiao-yan. Effect of heat treatment temperature on microstructure and mechanical properties of Ti-6Al-3Nb-2Zr-1Mo alloy plate[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2010, 20(S1): 670-672.
- [5] 罗锦华, 朱燕丽, 孙小平, 陈海生, 和永刚. 热加工及热处理工艺对 Ti80 合金棒材组织和性能的影响[J]. 钛工业

- 进展, 2016, 33(2): 20–24.
- LUO Jin-hua, ZHU Li-yan, SUN Xiao-ping, CHEN Hai-sheng, HE Yong-gang. Effect of hot processing and heat treatment on microstructure and properties of Ti80 alloy bar[J]. Titanium Industry Progress, 2016, 33(2): 20–24.
- [6] 侯 鹏, 李进元, 李 维, 蒲 宣, 王宏权, 郭 征. 热处理工艺对 Ti80 合金棒材组织和性能的影响[J]. 机械工程与自动化, 2013, 4(2): 107–111.
- HOU Peng, LI Jin-yuan, LI Wei, PU Xuan, WANG Hong-quan, GUO Zheng. Effect of treatment process structure and properties of Ti80 alloy bars[J]. Mechanical Engineering & Automation, 2013, 4(2): 107–111.
- [7] 骆雨萌, 刘金旭, 李树奎. 热轧 TC4 钛合金力学性能各向异性及影响因素分析[J]. 稀有金属材料与工程, 2014, 43(11): 2692–2696.
- LUO Yu-meng, LIU Jin-xu, LI Shu-kui. Anisotropy of mechanical properties and influence factors of hot rolling TC4 titanium alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2014, 43(11): 2692–2696.
- [8] SONG J H, HONG K J, HA T K, JEONG H T. The effect of hot rolling condition on the anisotropy of mechanical properties in Ti-6Al-4V alloy[J]. Materials Science and Engineering A, 2007, 449/451: 144–148.
- [9] JATA K V, HOPKINS A K, RIOJA R J. The anisotropy and texture of Al-Li alloys[J]. Materials Science Forum, 1996, 217: 647–652.
- [10] JONS I P, HUTCHINSON W B. Stress-state dependence of slip in titanium-6Al-4V and other H.C.P metals[J]. Acta Metallurgica, 1981, 29(6): 951–968.
- [11] 刘翠萍. 钛的孪生变形及其塑性韧性的研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2005: 22–35.
- LIU Cui-ping. Twin deformation and plastic toughness of titanium[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2005: 22–35.
- [12] BACHE M R, EVANS W J, SUDELLE B, HERROUIN F R M. The effects of texture in titanium alloys for engineering components under fatigue. International Journal of Fatigue, 2001, 23: S153–S159.
- [13] WANG Y N, HUANG J C. Texture analysis in hexagonal materials[J]. Materials Chemistry and Physics, 2003, 81: 11–26.
- [14] WU J J, WANG B, LIU W P. Mechanical properties and planar anisotropy of TC1 titanium alloy sheet[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2017, 46(2): 363–369.
- [15] 刘定凯. 工业纯钛板材的成形性能及各向异性研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2016: 8–18.
- LIU Ding-kai. The study of formability and anisotropy in commercially pure titanium sheet[D]. Chongqing: Chongqing University, 2016: 8–18.

Effects of slab microstructure type and heat treatment on mechanical properties anisotropy of Ti6321 alloy plate

YANG Sheng-li, SONG De-jun, GAO Fu-yang, YU Wei

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

Abstract: Anisotropy of mechanical properties and its influencing factors of Ti6321 alloy plate were studied by means of mechanical properties testing and OM, SEM and EBSD analysis. The results show that the microstructure type of slab has a significant effect on the planar anisotropy of the plate. The yield strength, tensile strength and impact energy of the alloy plates produced by equiaxed and widmanstatten structure slab have obvious planar anisotropy. Moreover, the planar anisotropy indexes of yield strength, tensile strength and impact energy of equiaxed structure slab are higher than those of widmanstatten structure slab. The texture of hot rolled plates produced by different slab structure types is mainly cylindrical texture ($\{0002\} \perp$ rolling surface), and the direction of texture is c -axis which tends to be parallel to the direction of TD. After heat treatment at (980 °C, 80 min), the texture of the plate is mainly basal texture ($\{0002\} //$ rolling surface), and the direction of texture is c -axis, which tends to be parallel to ND. After the same heat deformation and heat treatment, there are obvious differences in the metallographic structure, texture composition, recrystallization degree and crack growth path of different structure types of slab, which results in the anisotropy of mechanical properties of Ti6321 alloy plate.

Key words: Ti6321 alloy; slab microstructure; texture; anisotropy

Foundation item: Project(61400040404) supported by the Field Fund of Equipment Development Department of China

Received date: 2019-06-04; **Accepted date:** 2019-11-16

Corresponding author: YANG Sheng-li; Tel: +86-379-67256994; E-mail: bravictors@126.com

(编辑 何学锋)