

热加工及热处理工艺对 TC21 钛合金板材 微观组织和力学性能的影响

秦海旭^{1,2}, 耿乃涛^{1,2}, 杨柳^{1,2}, 郑友平^{1,2}, 王立亚^{1,2}

(1. 成都先进金属材料产业技术研究院股份有限公司, 四川 成都 610300)

(2. 钒钛资源综合利用国家重点实验室, 四川 攀枝花 617000)

摘要: 对 TC21 钛合金板材进行不同工艺的热轧制及热处理试验, 阐明了不同工艺条件下微观组织的演变规律, 明确了板材强塑性、冲击功以及断裂行为与不同显微组织之间的对应关系。研究表明, 随着轧制温度从 930 °C 升高至 1060 °C, 板材显微组织依次由板条组织变为等轴组织再变为双态组织, 该过程中板材强度降低, 塑性变化不大, 冲击韧性无明显的规律性, 960 °C 和 1060 °C 轧制时板材冲击韧性较高; 通过热处理同样可以有效调控显微组织, 随着固溶温度从 900 °C 升高至 960 °C, 再经相同工艺时效处理后, 原始的 α 相向 β 相转变, 并在固溶温度为 960 °C 时析出细小的 α 板条, 该过程中强度先升高后降低, 塑性和冲击韧性则先降低后升高。960 °C 轧制得到的 TC21 钛合金板材经过 960 °C \times 2 h/AC + 590 °C \times 4 h/AC 热处理后, 可获得较好的强韧匹配。

关键词: TC21 钛合金; 热轧; 固溶时效; 显微组织; 力学性能

中图分类号: TG146.23

文献标识码: A

文章编号: 1009-9964(2023)03-006-08

DOI:10.13567/j.cnki.issn1009-9964.2023.03.011

Effect of Rolling and Heat Treatment Processes on Microstructure and Mechanical Properties of TC21 Titanium Alloy Plate

Qin Haixu^{1,2}, Geng Naitao^{1,2}, Yang Liu^{1,2}, Zheng Youping^{1,2}, Wang Liya^{1,2}

(1. Chengdu Advanced Metal Materials Industrial Technology Research Institute Co., Ltd., Chengdu 610300, China)

(2. State Key Laboratory of Vanadium and Titanium Resources Comprehensive Utilization, Panzhihua 617000, China)

Abstract: Through the hot-rolling and heat treatment experiments of TC21 titanium alloy plate under different process conditions, the microstructure evolution rules were studied. Meanwhile, the corresponding relationships between the strength plasticity, impact energy, and fracture behavior of the plate and the different microstructures were clarified. The results show that with the increase of rolling temperature from 930 °C to 1060 °C, the microstructure of plate changes from lath structure to equiaxed structure and then to duplex structure. During this process, the strength of plate decreases, while the plasticity changes little, and the impact toughness has no obvious regularity. But the impact toughness of the plate is higher when rolled at 960 °C and 1060 °C. Heat treatment can also effectively regulate the microstructure. As the solution temperature increases from 900 °C to 960 °C, the original α phase transformed into β phase after aging at the same temperature, especially at 960 °C, the fine α lath is precipitated. In this process, the strength first increases and then decreases, and the plasticity and impact toughness first decreases and then increases. Finally, the TC21 titanium alloy plate rolled at 960 °C and after heat treatment with 960 °C \times 2 h/AC + 590 °C \times 4 h/AC presents good strength and toughness matching.

Key words: TC21 titanium alloy; hot-rolling; solution and aging; microstructure; mechanical properties

得益于自身轻质、高强的特性, 钛合金在航空

结构材料更新换代过程中的作用得到彰显, 高的用钛量甚至成为先进飞机的标志^[1-2]。诸如 TC4、TC11 等典型牌号的钛合金先后被用于 F-16 战斗机

收稿日期: 2023-03-27

通信作者: 秦海旭(1993—), 男, 研究员。

的水平尾翼转轴, UH60A“黑鹰”、SH60B“海鹰”、CH53E“超级种马”等直升机的主旋翼、尾旋翼转动部件, B-767 客机第一号驾驶舱挡风玻璃骨架等关键部件, 美国第 4 代战机 F22 的用钛量甚至高达 41%^[3-7]。随着航空工业的发展, 飞机结构件由单纯静强度设计概念转变到损伤容限设计准则。作为航空飞机的关键结构材料, 钛合金也逐渐向高损伤容限型方向发展。目前, 损伤容限型钛合金主要有 Ti-6Al-4V(β -ELI)、Ti-6-22-22S(Ti-6Al-2Sn-2Zr-2Mo-2Cr-0.2Si) 和 TC11DT, 分别为 900 MPa、900 MPa 和 1000 MPa 强度级别的钛合金, 并已在一些重要的飞机部件上得到应用。而飞机结构件用钛合金也正向着 1100 MPa 强度级别的高强度高韧损伤容限钛合金快速发展。

TC21 钛合金是北京航空材料研究院、西北有色金属研究院、西北工业大学和红原航空锻铸工业公司等单位联合研制的一款新型高强(强度高于 1100 MPa)、高韧(K_{IC} 达 70~902 $m^{1/2}$ ·MPa)、损伤容限型(较低的裂纹扩展速率)两相钛合金, 名义成分为 Ti-6Al-2Zr-2Sn-3Mo-1Cr-2Nb。设计该合金的目的是开发一种断裂韧性、裂纹扩展抗力、热稳定性等性能不低于 TC4 钛合金, 且强度比 TC4 钛合金高一个等级, 与美国的 Ti-6-22-22S 合金相当或更好的新型钛合金, 其应用形式主要是棒材、锻件和厚板^[8-10]。TC21 钛合金铸锭通常采用自由锻成形, 通过改变锻造温度可以获得不同类型的显微组织, 同时辅以特殊的热处理方法, 可以对其显微组织进行进一步调控, 从而获得优异的损伤容限性能^[11-15]。目前, 对 TC21 钛合金的研究主要集中在锻件开发, 而对于轧制板材的研究较少^[16-18]。TC21 钛合金板材的研发, 对航空工业的发展也具有积极的意义。因此, 选取 TC21 钛合金锻坯进行不同工艺制度下的热轧+热处理试验, 系统研究轧制及热处理工艺对其微观组织及力学性能的影响规律, 以期对 TC21 钛合金板材生产提供参考。

1 实验

实验原料选用规格为 90 mm × 150 mm × 230 mm 的 TC21 钛合金锻坯, 化学成分($w/\%$)为: Al 5.98, Cr 1.49, Fe 0.038, Mo 2.68, Nb 1.98, Zr 1.99, Sn 2.08, C 0.041, O 0.116, 其余为 Ti。采用差示扫描量热仪测得合金相变点为 975~985 °C。锻坯显

微组织如图 1 所示, 其 α 相呈板条状分布, 视野范围内仅存在少量的 β 转变组织。其中, α 相板条长度在 10~100 μm 之间, 厚度在 10 μm 以内。



图 1 TC21 钛合金锻坯显微组织

Fig. 1 Microstructure of TC21 titanium alloy forging billet

采用二辊热轧机组轧制 TC21 钛合金板材, 轧制生产线配备箱式电加热炉, 具体工艺如下: 锻坯加热温度分别为 930、960、1030、1060 °C, 加热时间为 90~100 min(到温计时), 经 8 道次轧制成 27 mm 厚板材, 单道次变形量控制在 10%~20%。从轧制后的板材上取样并加工成 15 mm × 15 mm × 85 mm 的拉伸坯料、8 mm × 12 mm × 60 mm 的冲击批料、10 mm × 10 mm × 20 mm 的金相坯料, 然后进行热处理试验。TC21 钛合金通常采用固溶时效的热处理工艺, 且固溶温度对其组织性能影响显著^[19-21], 故本实验设计了固溶温度分别为 900、930、960 °C 的 3 种不同热处理工艺:

- ① 900 °C × 2 h/AC + 590 °C × 4 h/AC
- ② 930 °C × 2 h/AC + 590 °C × 4 h/AC
- ③ 960 °C × 2 h/AC + 590 °C × 4 h/AC

按照测试要求将热处理后的坯料加工成试样, 采用 CMT5305 电子万能试验机进行室温拉伸性能测试, 采用 JBCDS-300 冲击试验机进行室温冲击性能测试, 采用 ZEISS 光学显微镜和 JSM-7900F 扫描电子显微镜进行显微组织观察和断口形貌分析。

2 结果与分析

2.1 显微组织

图 2 为不同温度轧制的 TC21 钛合金板材显微组织。从图 2 可知, 经过不同温度轧制的板材其显微组织中均没有明显的原始 β 晶界。当轧制温度为 930 °C 时, 显微组织仍为典型的两相区加工组织, 锻坯中的部分初生 α 相因轧制发生弯曲, 呈现出典型的热

加工变形特征。当轧制温度升高至 960 °C 时, 板条状初生 α 相发生动态球化, 球化相的直径在 6 ~ 10 μm 之间。当轧制温度上升至 1030 °C 时, 因加热及保温温度超过 $\alpha \rightarrow \beta$ 相转变点, 原有的板条状 α 相在出炉轧制前已全部转变为 β 相, 并随着后续轧制过程中温度下降, 坯料先后经历了 β 相区变形和 $\alpha + \beta$ 相区变形, 在 $\alpha + \beta$ 相区变形时开始析出一次 α 相并在变形过程中发生球化, 由于是再次析出, 故等轴 α 相尺寸相比于 960 °C 轧制时更加细小。但在该过程中, 仍有部分一次 α 相发生异常长大, 所以此时板材显微组织由尺寸不一的等轴 α 相和未发生转变的 β 相组成。当轧制温度进一步上升至 1060 °C 时, 终轧温度也相应升高, 导致仅有少量尺寸较大的一次 α 相出现, 其余 α 相皆以板条状二次 α 相析出, 此时板材的显微组织由少量等轴状 α 相 + 板条状 α 相 + β 相组成, 表现出双态组织特征。与锻态组织相比, 在 1060 °C 轧制过程中析出的 α 板条尺寸更加细小, 长度约 10 μm , 厚度仅 1 μm 。

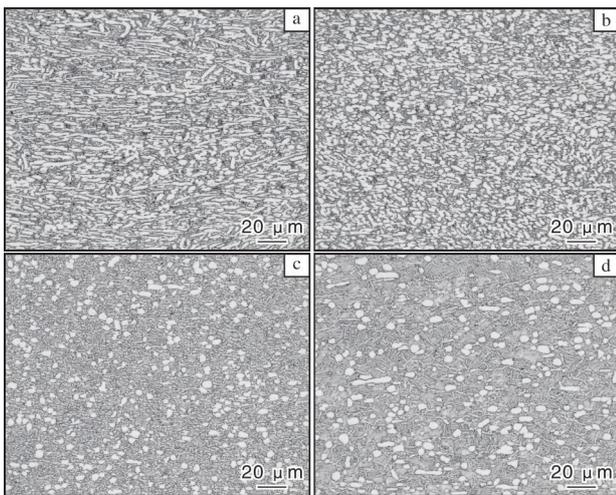


图 2 不同温度轧制的 TC21 钛合金板材显微组织

Fig. 2 Microstructures of TC21 titanium alloy plate rolled at different temperatures: (a) 930 °C; (b) 960 °C; (c) 1030 °C; (d) 1060 °C

图 3 ~ 5 为不同温度轧制的 TC21 钛合金板材经热处理后的显微组织。由图 3 ~ 5 可知, 经历相同工艺热处理后, 不同温度轧制板材的显微组织特征趋于相同。热处理后, 板材中 β 相占比增加, α 相形态也发生改变。当固溶温度为 900 °C 时, 除 β 相比例变化, 930 °C 和 960 °C 轧制板材中的板条状 α 相进一步发生静态球化, 1030 °C 轧制板材中等轴 α 相尺寸增加, 1060 °C 轧制板材中细小板条状 α 相

粗化, 且与轧制态相比, β 相内部没有板条状 α 相析出, 是过饱和固溶体状态。当固溶温度升高至 930 °C 时, β 相占比进一步增加, α 相占比进一步减少。随着固溶温度升高至 960 °C, 不仅 β 相数量进一步增加, 而且 β 相内部析出了细小的板条状 α 相, 此时板条尺寸相较于 1060 °C 轧制态中的更为细小。

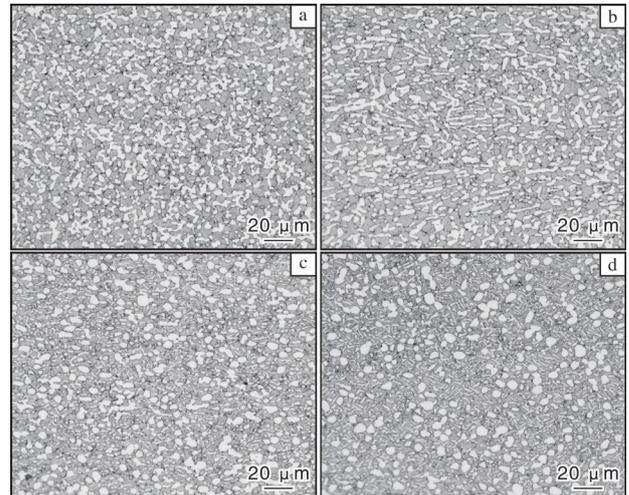


图 3 不同温度轧制的 TC21 钛合金板材经 900 °C × 2 h/AC + 590 °C × 4 h/AC 热处理后的显微组织

Fig. 3 Microstructures of TC21 titanium alloy plate rolled at different temperatures and after heat treatment with 900 °C × 2 h/AC + 590 °C × 4 h/AC: (a) 930 °C; (b) 960 °C; (c) 1030 °C; (d) 1060 °C

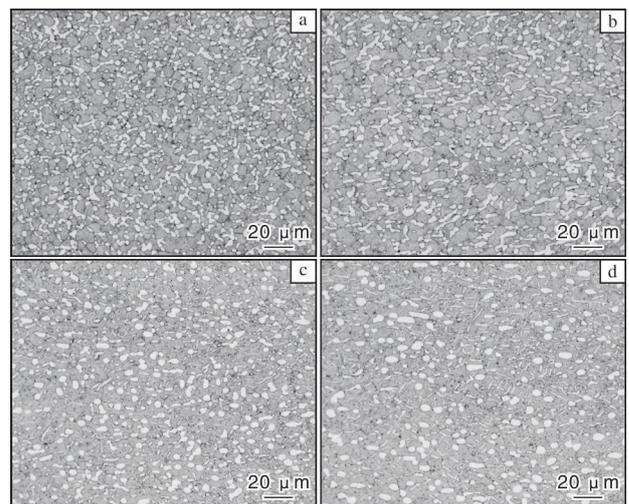


图 4 不同温度轧制的 TC21 钛合金板材经 930 °C × 2 h/AC + 590 °C × 4 h/AC 热处理后的显微组织

Fig. 4 Microstructures of TC21 titanium alloy plate rolled at different temperatures and after heat treatment with 930 °C × 2 h/AC + 590 °C × 4 h/AC: (a) 930 °C; (b) 960 °C; (c) 1030 °C; (d) 1060 °C

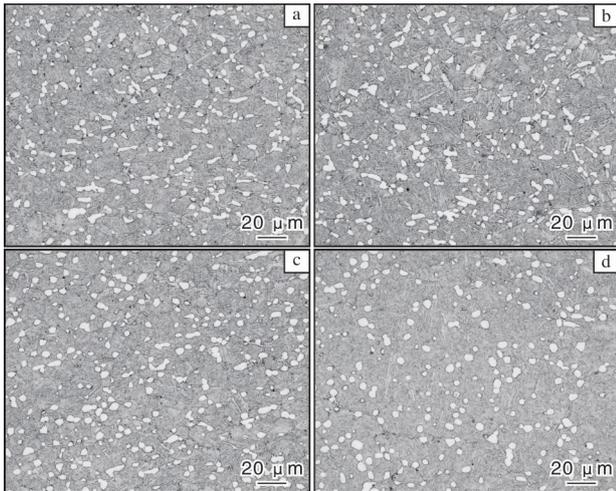


图 5 不同温度轧制的 TC21 钛合金板材经 960 °C × 2 h/AC + 590 °C × 4 h/AC 热处理后的显微组织

Fig. 5 Microstructures of TC21 titanium alloy plate rolled at different temperatures and after heat treatment with 960 °C × 2 h/AC + 590 °C × 4 h/AC: (a) 930 °C; (b) 960 °C; (c) 1030 °C; (d) 1060 °C

2.2 拉伸性能

表 1 为不同温度轧制的 TC21 钛合金板材的室温拉伸性能。从表 1 可以看出，随着轧制温度的升高，

屈服强度和抗拉强度逐渐降低。这是因为在 930 °C 轧制时，α 相板条具有明显的方向性，滑移系沿不同方向启动难度不同；而在 960 °C 轧制时，板条状 α 相转变为等轴状，滑移系启动不再受方向影响，因而更易启动，导致强度降低，塑性升高^[22]。当轧制温度升高至相变点以上时，因大量 β 转变组织的出现引起强度下降。对于材料的塑性而言，960 °C 轧制板材的显微组织为尺寸均匀的等轴组织，且等轴晶粒尺寸较大，故表现出最大的断后延伸率和断面收缩率。

表 1 不同温度轧制的 TC21 钛合金板材室温拉伸性能

Table 1 Room temperature tensile properties of TC21 titanium alloy plate rolled at different temperatures

Temperature/°C	R_m /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	A /%	Z /%
930	1226.5	1154.0	13.7	25.5
960	1212.5	1120.0	15.5	31.0
1030	1152.5	1061.5	15.0	24.5
1060	1121.0	1031.0	14.3	31.0

图 6 为不同温度轧制的 TC21 钛合金板材经不同温度固溶及相同工艺时效处理后的室温拉伸性能。经

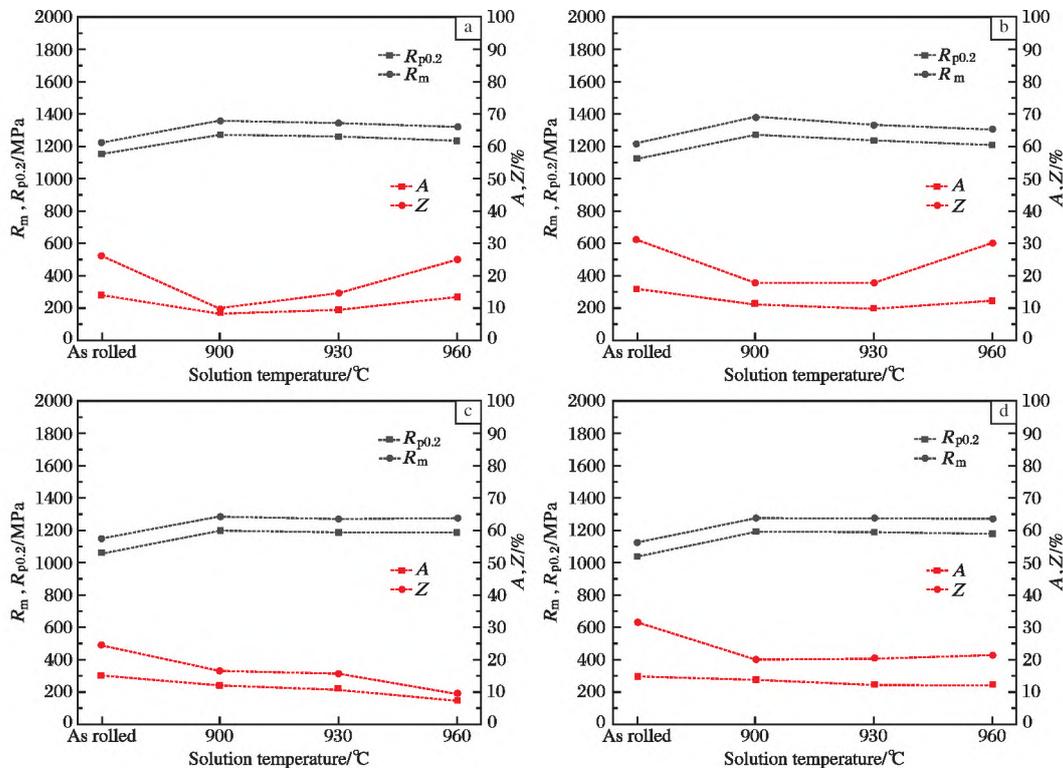


图 6 不同温度轧制的 TC21 钛合金板材室温拉伸性能随固溶温度的变化曲线

Fig. 6 Curves of room temperature tensile properties of TC21 titanium alloy plates rolled at different temperatures vs. solution temperatures: (a) 930 °C; (b) 960 °C; (c) 1030 °C; (d) 1060 °C

过固溶时效处理后, 板材强度均升高, 塑性降低。以 960 °C 轧制的 TC21 钛合金板材为例, 经过固溶时效处理后, 屈服强度升高至 1220 MPa, 抗拉强度更是达到 1317 MPa。且板材强度并未随着固溶温度改变而表现出明显变化, 仅在固溶温度为 960 °C 时略有下降。从板材热处理后的显微组织可以看出, 固溶时效后 β 相占比增加, 且固溶温度为 900 °C 和 930 °C 时, β 相中并未观察到板条状的二次 α 相, 为一种过饱和状态, 因显著的固溶强化作用而表现出高的强度; 而当固溶温度为 960 °C 时, β 相中析出了细小的板条状二次 α 相, 虽然固溶强化作用减弱, 但细小的板条状 α 相同样可以阻碍位错移动, 起到强化效果。与强度变化相反, 板材塑性在固溶时效之后显著降低, 尤其当固溶温度为 900 °C 和 930 °C 时, 因为大量过饱和 β 相的存在, 导致材料脆性增加, 塑性快速下降; 直至固溶温度升高至 960 °C 时, 板条状二次 α 相的析出将材料的塑性提高至热处理前水平。综上所述, 960 °C 轧制的 TC21 钛合金板材经过 960 °C \times 2 h/AC + 590 °C \times 4 h/AC 热处理后, 可以在保持高塑性(断后延伸率 12%, 断面收缩率 30%)的同时, 获得高达 1300 MPa 的抗拉强度。

2.3 冲击韧性

表 2 为不同温度轧制的 TC21 钛合金板材的室温冲击吸收能量。当轧制温度从 930 °C 升高至 960 °C 时, 板条组织在动态再结晶作用下充分球化, 这些等轴 α 相与基体之间的取向是任意的, 变形时位错容易找到可开动的滑移面, 有利于滑移变形^[23-25]。而滑移变形抑制了微裂纹的形成和扩展, 材料的冲击韧性得到明显改善, 因此冲击吸收能量显著提高。当轧制温度进一步提升至 1030 °C 时, 粗大的等轴晶粒减少, 材料韧性变差, 冲击吸收能量略有下降。当轧制温度进一步提升至 1060 °C 时, 材料显微组织为双态组织, 此时板条状二次 α 相的存在能有效阻碍裂纹扩展, 提高材料的韧性, 因此冲击吸收能量增大。

表 2 不同温度轧制的 TC21 钛合金板材室温冲击吸收能量

Table 2 Room temperature impact absorption energy of TC21 titanium alloy plate rolled at different temperatures

Temperature/°C	KV ₂ /J	Temperature/°C	KV ₂ /J
930	18.4, 16.6	1030	20.1, 19.8
960	23.3, 22.7	1060	22.7, 26.6

图 7 为不同温度轧制的 TC21 钛合金板材的冲击断口宏观形貌。从图 7 可以看出, 相比于 930 °C 轧制, 960 ~ 1060 °C 轧制板材的断口形貌更加崎岖不平, 说明随着轧制温度升高, 板材的塑韧性得到了改善。

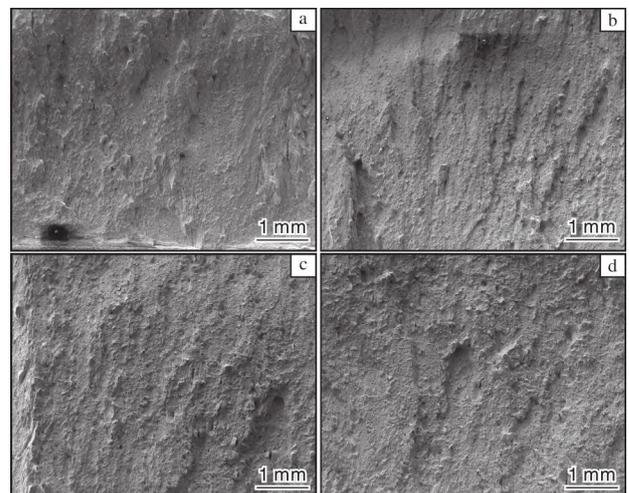


图 7 不同温度轧制的 TC21 钛合金板材的冲击断口宏观形貌

Fig. 7 Macro-morphologies of impact fracture surface of TC21 titanium alloy plate rolled at different temperatures: (a) 930 °C; (b) 960 °C; (c) 1030 °C; (d) 1060 °C

图 8 为不同温度轧制的 TC21 钛合金板材的冲击断口微观形貌。从图 8 可以看出, TC21 钛合金板材的断裂机制以韧性断裂为主, 同时可以观察到少量的断裂平台, 说明也存在解理断裂。对比不同温度轧制板材的断口形貌可以看出, 相较于 960 ~ 1060 °C 轧制板材的断口形貌, 930 °C 轧制板材断口中的韧窝尺寸更小, 深度也更浅, 与其较低的冲击韧性测试结果相对应, 说明粗大的板条组织并不能有效阻碍裂纹扩展。而等轴组织和双态组织均表现出更强的阻碍裂纹扩展的能力, 因此断口形貌更为崎岖不平, 撕裂棱也更加凸出。

图 9 为 1060 °C 轧制的 TC21 钛合金板材经不同温度固溶 + 相同工艺时效后的冲击断口微观形貌。与轧制态相比, 固溶温度为 900 °C 和 930 °C 时冲击断口形貌变得平坦, 且出现大量解理断裂平面。这是因为过饱和 β 相脆性较大, 从而在断口形貌中表现出明显的解理断裂特征。同时, 断口韧窝中可以观察到一些小颗粒存在, 颗粒尺寸与图 3 ~ 5 中等轴 α 相尺寸接近。这可能是由于 α 相与脆性的过饱和 β 相的塑韧性差别过大, 裂纹从二者界面处萌生, 导致

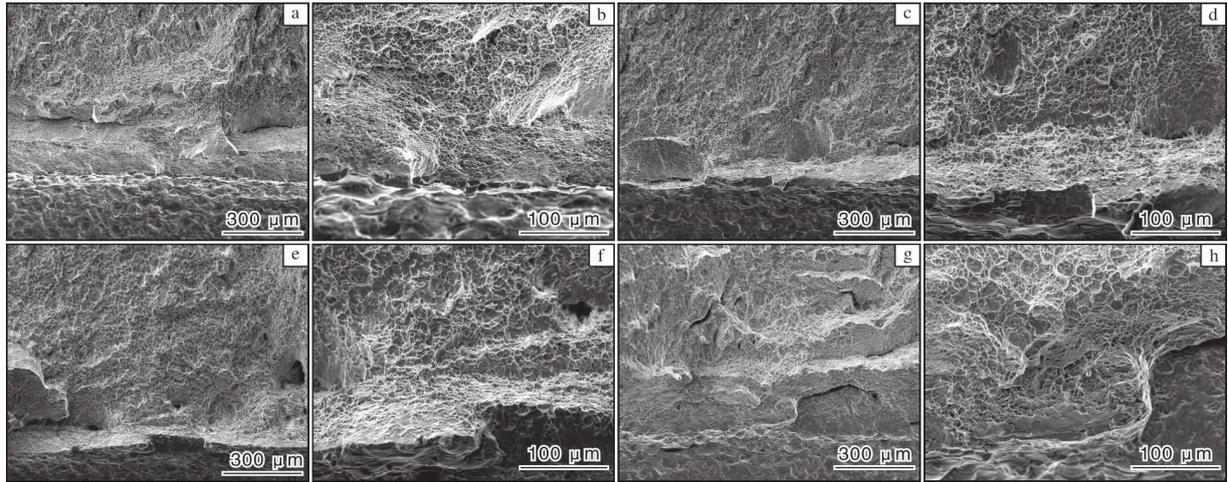


图 8 不同温度轧制的 TC21 钛合金板材的冲击断口微观形貌

Fig. 8 Mico-morphologies of impact fracture surface of TC21 titanium alloy plate rolled at different temperatures ; (a, b) 930 °C ; (c, d) 960 °C ; (e, f) 1030 °C ; (g, h) 1060 °C

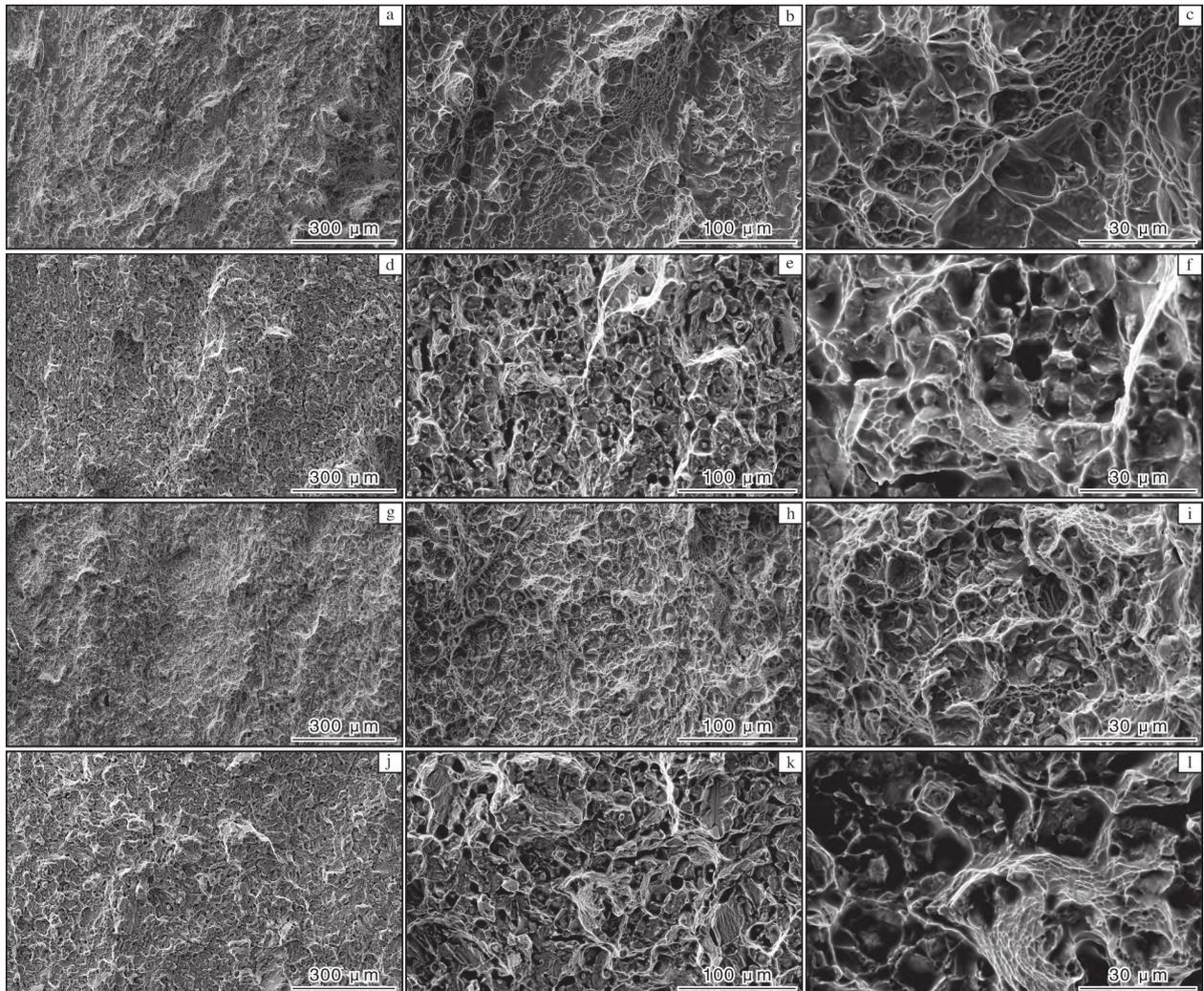


图 9 1060 °C 轧制的 TC21 钛合金板材经不同温度固溶 + 相同工艺时效后的冲击断口微观形貌

Fig. 9 Micro-morphologies of fracture surface of TC21 titanium alloy plate rolled at 1060 °C after solid solution at different temperatures and aging with same process ; (a~c) as rolled ; (d~f) 900 °C ; (g~i) 930 °C ; (j~l) 960 °C

韧窝底部出现此类小颗粒。板条状 α 相有利于增强材料韧性, 因而韧窝尺寸增加, 深度增大, 同时解理断裂平面消失, 但出现了一些从域导致的平面。

图 10 为不同温度轧制的 TC21 钛合金板材经不同温度固溶 + 相同工艺时效处理后的冲击功测试结果。从图 10 可以看出, 随着固溶温度的升高, 所有板材的冲击吸收能量均表现出先降低后升高的趋势。以 960 °C 轧制板材为例, 未经热处理时 KV_2 约为 23 J, 经 900 °C/2 h/AC + 550 °C/4 h/AC 固溶时效处理后, KV_2 减小为 13.4 J; 当固溶温度升高至 930 °C, KV_2 进一步降低至 8.8 J; 之后, 进一步提高固溶温度至 960 °C, KV_2 开始回升, 从 8.8 J 增大至 11.6 J。结合图 3 可知, 固溶温度为 900 °C 和 930 °C 时, α 相转变为过饱和 β 相, 使得材料脆性增加, 引发冲击吸收能量的急剧下降; 而当固溶温度升高至 960 °C, β 相中析出了板条状二次 α 相, 一定程度上改善了材料的脆性, 故此时冲击吸收能量开始回升, 但仍未恢复到热处理前的状态。对比不同温度轧制板材热处理后冲击功的变化, 可以看出轧制温度为 1060 °C 时板材的冲击韧性整体水平较高。

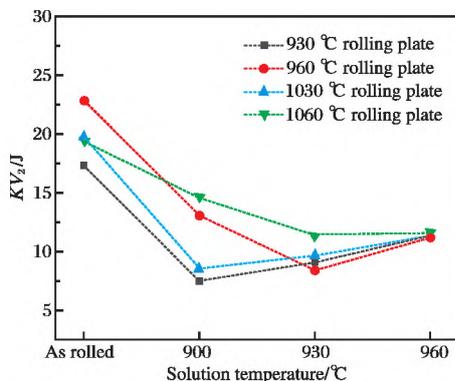


图 10 不同温度轧制的 TC21 钛合金板材冲击吸收能量随固溶温度的变化曲线

Fig. 10 Curves of impact absorption energy vs. solution temperature of TC21 titanium alloy plate rolled at different temperatures

3 结论

(1) 提升 TC21 钛合金板材轧制温度, 有利于促进板条状 α 相发生等轴化, 当轧制温度达到 1060 °C 时, 除少量粗大等轴 α 相外, 其余均为板条 α 相 + β 转变组织。

(2) TC21 钛合金板材经 900 ~ 960 °C 固溶 + 590 °C 时效处理后, β 相组织占比增加, 且随着固溶温度

的升高, 过饱和的 β 相逐渐析出细小的板条状二次 α 相。

(3) 960 °C 轧制的 TC21 钛合金板材为典型的等轴组织, 表现出最佳的冲击韧性和较高的强塑性, 此时板材屈服强度 1120 MPa、抗拉强度 1212.5 MPa、断后延伸率 15.5%、断面收缩率 31.0%、冲击吸收能量 23.3 J。

(4) 960 °C 轧制的 TC21 钛合金板材经过 960 °C × 2 h/AC + 590 °C × 4 h/AC 的固溶时效处理后, 获得最佳的强塑匹配度, 此时板材屈服强度 1220 MPa、抗拉强度 1317 MPa、断后延伸率 12%、断面收缩率 30%, 但板材冲击韧性较低, 冲击吸收能量仅为 11.6 J。

参考文献 References

- [1] 史小云, 张晓园, 毛友川, 等. 锻造温度对 TC21 钛合金锻板组织和力学性能的影响[J]. 锻压技术, 2015, 40(1): 14 - 16.
- [2] 马少俊, 吴学仁, 刘建中, 等. TC21 钛合金的微观组织对力学性能的影响[J]. 航空材料学报, 2006, 26(5): 22 - 25.
- [3] Fan R L, Wu Y, Chen M H, et al. Relationship among microstructure, mechanical properties and texture of TA32 titanium alloy sheets during hot tensile deformation [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2020, 30(4): 928 - 943.
- [4] 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, 24.
- [5] 曹春晓. 钛合金在大型运输机上的应用[J]. 稀有金属快报, 2006(1): 17 - 21.
- [6] 刘全明, 张朝晖, 刘世峰, 等. 钛合金在航空航天及武器装备领域的应用与发展[J]. 钢铁研究学报, 2015, 27(3): 1 - 4.
- [7] 牛蓉蓉. 热处理冷却速率对 TC21 钛合金组织与性能的影响[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2010.
- [8] 刘莹, 曲周德, 王本贤. 钛合金 TC4 的研究开发与应用[J]. 兵器材料科学与工程, 2005, 28(1): 47 - 50.
- [9] 冯亮, 赵永庆, 曲恒磊, 等. Ti-6-22-22S 合金大棒的显微组织与力学性能[J]. 材料工程, 2003(8): 10 - 12.
- [10] 张颖楠, 李辉, 曲恒磊, 等. Ti-6-22-22S 合金的研究进展[J]. 金属热处理, 2002, 27(12): 14 - 16.
- [11] 周晓虎, 刘卫, 郝芳, 等. 准 β 锻造工艺对 TC21 钛合金大型锻件组织及性能的影响[J]. 锻压技术, 2020, 45(6): 29 - 34, 44.
- [12] 朱红, 温鑫, 万明攀, 等. TC21 钛合金的全片层组织和

- 冲击性能研究[J]. 钛工业进展, 2020, 37(3): 1-5.
- [13] 杨凯文. 锻造和热处理工艺对 TC21 钛合金静动态力学性能和抗弹性能影响的研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2016.
- [14] 史春玲, 王浩军, 石晓辉, 等. 双重退火制度对 TC21 钛合金断裂韧性的影响[J]. 钛工业进展, 2013, 30(1): 12-15.
- [15] 邹忠波, 董洪波, 朱深亮, 等. 三重热处理温度对 TC21 钛合金显微组织的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2016, 36(4): 438-441.
- [16] 蓝希鑫, 欧阳德来, 陈同彩, 等. 多向锻造对 TC21 钛合金 $\alpha + \beta$ 片层组织球化的影响[J]. 塑性工程学报, 2020, 27(12): 24-29.
- [17] 欧阳德来, 崔霞, 鲁世强, 等. 旋压参数对 TC21 钛合金筒形件旋压织构的影响[J]. 材料热处理学报, 2021, 42(5): 143-151.
- [18] 宋静雯, 谭长生, 孙巧艳, 等. 等温淬火对 TC21 钛合金微观组织和力学性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2019, 48(4): 1260-1266.
- [19] 胡生双, 孟晓川, 王清, 等. 双重退火工艺对 TC21 钛合金力学性能和断口形貌的影响[J]. 金属热处理, 2020, 45(5): 110-114.
- [20] 周建伟, 孙前江, 彭嘉豪, 等. 三重热处理对 TC21 钛合金网篮组织及拉伸性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2022, 51(9): 3353-3358.
- [21] 杨春林, 张松, 欧梅桂. 退火工艺对热变形 TC21 合金组织与性能的影响[J]. 金属热处理, 2020, 45(3): 133-139.
- [22] 张关梅, 黄海广, 张浩泽, 等. 轧制温度对 TA31 钛合金热轧板材组织与性能的影响[J]. 塑性工程学报, 2022, 29(11): 224-232.
- [23] 宗影影, 薛克敏, 单德彬, 等. 热处理对 BT14 钛合金显微组织和力学性能的影响[J]. 材料科学与工艺, 2004, 12(5): 546-548.
- [24] 刘广发, 张衡, 毛友川, 等. 轧制温度对 IMI550 钛合金棒材组织和力学性能的影响[J]. 材料开发与应用, 2015, 30(2): 42-47.
- [25] 蒋纪新, 张伟, 孙虎代, 等. 轧制温度对 TC8M-1 钛合金棒材组织和力学性能的影响[J]. 世界有色金属, 2021, 46(20): 6-7.

行业动态

日本大阪钛科技公司 2022 财年结算速报

日本大阪钛科技公司 2022 财年(2022 年 4 月 1 日至 2023 年 3 月 31 日)累计营业额为 431 亿日元, 较 2021 财年的 285 亿日元增长了 51.23%; 营业利润为 48 亿日元(2021 财年亏损 19 亿日元)。钛事业部 2022 财年销售额为 393 亿日元, 较 2021 财年的 250 亿日元增长了 57.2%。其中, 海绵钛出口销售额较 2021 财年增长约 60%, 日本国内销售额增长约 50%。为了应对海绵钛市场需求的增长, 公司将逐步提高海绵钛工厂的开工率, 预计 2022 年年底将达到 90%。

(何蕾编译自大阪钛科技公司官网)

日本东邦钛公司 2022 财年结算速报

日本东邦钛公司 2022 财年(2022 年 4 月 1 日至 2023 年 3 月 31 日)净销售额为 804 亿日元, 较 2021 财年的 555 亿日元增长了 44.9%; 营业收入为 107 亿日元, 较 2021 财年的 52 亿日元增长了 105.8%; 净利润为 75 亿日元, 较 2021 财年的 37 亿日元增长了 102.7%。其中, 钛金属事业部 2022 财年净销售额达到 544 亿日元, 产品在日本国内的销售价格较 2021 财年 1—3 季度增长 15%, 较第 4 季度增长 40%。2023 财年钛产品的出口价格也将有所增长, 预计涨幅达 20%。

(何蕾编译自东邦钛公司官网)

ATI 公司 2023 年第 1 季度经营状况

美国 ATI 公司 2023 年第 1 季度(2023 年 1 月 1 日至 3 月 31 日)销售额为 10.38 亿美元, 较 2022 年第 4 季度增长 3%, 较 2022 年第 1 季度增长 25%。其中, 高性能金属部销售额为 4.71 亿美元, 较 2022 年第 4 季度增长 5.65%, 航空航天及国防总体市场份额占到 56%; 先进合金 & 解决方案部销售额为 5.67 亿美元, 与 2022 年第 4 季度基本持平。ATI 公司第 1 季度销售额的增长主要源于航空航天市场的复苏, 预计后期该领域市场需求将继续增长。

(何蕾编译自美国 ATI 公司官网)