

TA15 钛合金薄板组织与拉伸性能

Microstructure and Tensile Properties of TA15 Titanium Alloy Sheet

供稿|杨铮, 张明玉, 赵小龙, 王田, 景亚婷 / YANG Zheng, ZHANG Mingyu, ZHAO Xiaolong,
WANG Tian, JING Yating

内容导读

使用 2450 mm 轧机对 TA15 钛合金进行薄复叠轧制加工, 使用光学显微镜、扫描电子显微镜以及拉伸性能试验, 对薄板进行微观组织和拉伸性能研究。结果表明: 薄板的组织主要由 α 晶粒组成, 在各 α 晶粒之间存在黑色的残余 β 相, α 晶粒的形貌以等轴状与细长条状为主, 存在一定的轧制加工形貌。薄板的轧制方向 (TD) 与薄板的横向 (RD) 方向的拉伸性能十分接近, 断口微观形貌均由大量等轴状韧窝构成, 具有明显的韧性断裂特征, 除包含大量韧窝外, 还包含少量的小平面, 小平面十分光滑且圆润, 同时发现一定数量的二次裂纹。

钛及钛合金具有耐腐蚀性好、耐低温、密度低、比强度高十分众多的优异特性, 使其在化工、低温发动机、海洋工程、航天航空等领域均有大量的应用^[1-3]。TA15 钛合金 (名义成分为 Ti-6.5Al-2Zr-1Mo-1V) 是一种十分典型近 α 型合金, 该合金具有优异的可加工性、良好的焊接性能以及热稳定性、同时具备较好室温以及高温力学性能, 在海洋工程、航天航空、发动机叶片等领域均有广泛的使用, 因其应用领域越来越多, 对其研究也十分多元化^[4-5]。

目前, 马庆等^[6]研究了 TA15 钛合金双道次热压缩变形软化行为及等轴 α 相组织演变规律, 结果表明: 合金在双道次热压缩加工工程中, 降低应变速率、提高变形温度都会减小变形时的流动应力, 而在保温过程中, 合金会产生静态软化效应, 该效应受到应变速率、变形温度以及间隙保温时间等因素

影响, 此外, 发现组织中的 α 晶粒细化明显, 静态软化效应越好, 细化越明显。刘航等人^[7]对 TA15 钛合金双重热处理三态组织中的片层 α 尺寸进行了研究, 结果表明: 获得三态组织的方法为合金经两相区加热后空冷, 组织中片层 α 的厚度随着热处理温度的升高而增加, 但其长度减小。当加热温度在近 β 区间时, 随着保温时间的增加, 片层 α 长度随之增加。

虽然目前对 TA15 钛合金的研究较多, 但鉴于工程化应用, 新型的生产工艺仍是重要的研究方向, 本文研究薄复叠轧工艺生产大规格 TA15 钛合金薄板的组织与力学性能关系, 为实际生产提供参考。

试验材料与方法

包复叠轧工艺制备薄板通常由两部分构成, 首

先是将板材轧制到最终厚度的 3~4 倍, 期间需进行换向轧制, 换向轧制能够使得板材横、纵向的组织与力学性能更加均匀。其次是将板材通过类似三明治的方式, 将 2~4 层板材叠放于双层钢套中, 随后进行轧制, 直至加工到成品板材尺寸。使用 2450 mm 轧机对 TA15 钛合金进行薄复叠轧轧制加工, 将 TA15 钛合金板坯轧制成厚度为 2.5 mm 的薄板, 随后对薄板进行 850 °C/2 h 退火热处理, 制成成品薄板, 使用 ICP 测定薄板的具体化学成分为 $w(\text{Al})=6.61\%$ 、 $w(\text{V})=1.21\%$ 、 $w(\text{Mo})=1.17\%$ 、 $w(\text{Zr})=1.93\%$ 、 $w(\text{O})=0.089\%$ 、 $w(\text{Fe})=0.035\%$ 、Ti 余量。与传统 TA15 钛合金锻件与板材相比, 通过薄复叠轧工艺生产的 TA15 钛合金薄板, 其厚度更薄, 退火均匀性更好, 可使得 TA15 钛合金的使用领域更加广泛, 并增加该合金的工程应用价值。

采用连续升温金相法, 测试 TA15 钛合金薄板的相转变温度为 1010~1015 °C, 将 TA15 钛合金薄板进行加工取样, 分别测试该合金的微观组织与室温拉伸性能, 随后观察拉伸试样的断口微观形貌。其中取样方向分别为薄板的轧制方向 (RD) 与薄板的横向方向 (TD)。薄板的微观组织使用型号为 ICX41M 的金相显微镜观察并拍照, 使用型号为 INSTRON 的万能电子试验机进行室温拉伸性能测试, 拉伸断口微观形貌使用 Quanta 型扫描电镜进行观察拍照, 其中拉伸性能测试每组测量两个试样, 最后取其平均值, 拉伸性能测试项目为抗拉强度 (R_m)、屈服强度 ($R_{p0.2}$)、断后伸长率 (A), 室温拉伸加工试样如图 1 所示。

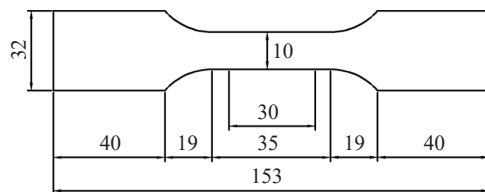


图 1 室温拉伸试样 (单位: mm)

结果与讨论

金相组织

图 2 为 TA15 钛合金薄板的微观组织, 由图 2 可知, 经薄复叠轧以及退火处理后, 薄板的组织主要由 α 晶粒组成, 在各 α 晶粒之间存在黑色的残余 β 相, 薄板的 RD 与 TD 方向微观组织接近, 无明显差异, 组织中 α 晶粒的形貌以等轴状与细长条状为主, 存在一定的轧制加工形貌。TA15 合金板坯在轧制过程中, 板坯中的原始 α 晶粒受到外应力作用发生变形, 其中变形后的 α 晶粒形貌主要受到变形程度、板坯成分以及变形温度等因素影响, 板坯在轧制过程中, 随着变形量的增加, 组织中的原始 α 晶粒会被压扁, 进而发生破碎, 并且沿着轧制的方向发生扭曲、拉长^[8]。随着轧制不断进行, 当变形程度达到一定程度后, 薄板的组织中会有细长条状组织形成, 这是由于在塑性变形过程中, 板坯的基面以及柱面在滑移时, α 晶粒的取向并未改变, 仅绕着 c 轴旋转, 此时, 锥面产生的滑移与基面和柱面不同, 使得 α 晶粒产生一定倾斜, 倾斜会使 α 晶粒产生旋转, 进而形成长条状组织, 在随后的退火处理中, 组织中发生再结晶现象, 最终形成等轴 α 晶粒^[9]。

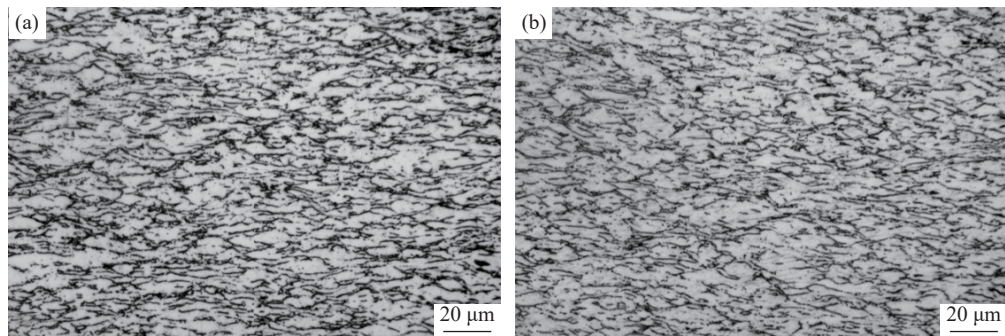


图 2 薄板微观组织: (a) TD; (b) RD

拉伸性能

图 3 为 TA15 钛合金薄板的室温拉伸性能, 由

图 3 可知, 薄板 TD 与 RD 方向的抗拉强度 (R_m) 分别为 1064 与 1071 MPa, 屈服强度 ($R_{p0.2}$) 分别

为 1022 与 1033 MPa，而两个方向的断后伸长率 (A) 分别为 14.5% 与 15%。经对比发现，薄板 TD

与 RD 方向的拉伸性能十分接近，说明薄板组织十分均匀无明显的各向异性。

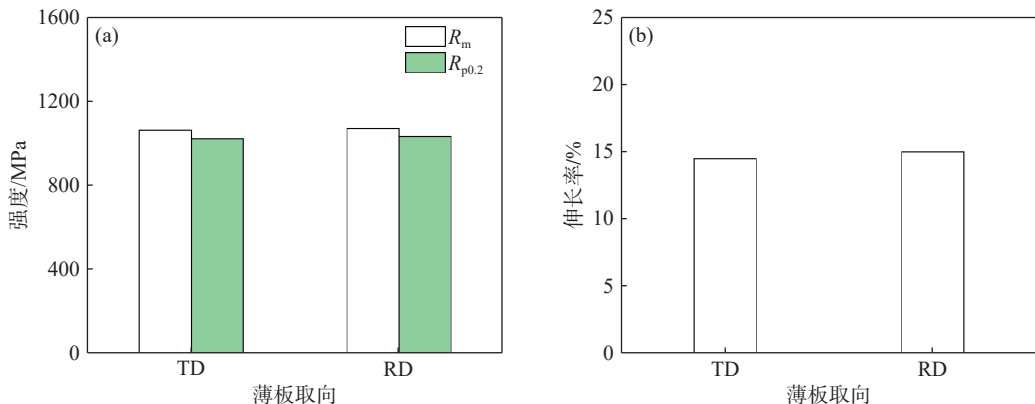


图3 薄板的室温拉伸性能: (a) 抗拉强度与屈服强度; (b) 伸长率

在强度方面，薄板具有较高的强度，这是因为板坯在轧制过程中，组织会产生巨大的变形，在点阵内部产生较大的畸变能，增加组织中的储存能，原始晶粒破碎过程中，在晶界位置会有再结晶产生，在退火过程中形成十分细小均匀的组织，室温拉伸时，位错在滑移，细小的晶粒形成较大的阻碍作用，同时细小的晶粒更加容易形成位错塞积，位错若要继续滑移，则需要更大的外应力，导致薄板具有较高的强度^[10]。薄板在具有较高强度同时，其具有较高塑性，这是因为组织中的 α 晶粒主要以等轴状为主，等轴 α 相的协调性好，同时存在较多可开动滑移系，在拉伸过程中，滑移率先在具有较大位向因子的等轴 α 相中进行开动，等轴 α 相含量越多，拉伸时形成的变形会快速分散到等轴 α 晶粒中，避免在极少数的晶粒中发生应力集中，而导致薄板发生断裂，故薄板具有较高的塑性^[11]。

断口形貌

图4为薄板的室温拉伸微观断口形貌，由图4可知，薄板 TD 与 RD 方向的断口微观形貌几乎一致，二者均由大量等轴状韧窝构成，在尺寸较大的韧窝中包含众多小韧窝，此断口形貌具有明显的韧性断裂特征，断口形貌中韧窝的数量与尺寸代表薄板塑性的高低，当韧窝数量多，尺寸大时，其塑性高，而韧窝数量少，且尺寸小，其塑性低。在图4的断口形貌中，除包含大量韧窝外，还包含少量的小平面，小平面十分光滑且圆润，同时发现一定数量的二次裂纹，二次裂纹与小平面的出现，表示薄板具有高塑性的同时，还具有较高的强度，这是因为组织中除具有大量等轴晶粒外，还有少量的长条状晶粒以及残余 β 相，位错在受到阻碍的同时，还会导致位错的运动方向发生少量的偏移所致，这与薄板的实际拉伸性能一致。

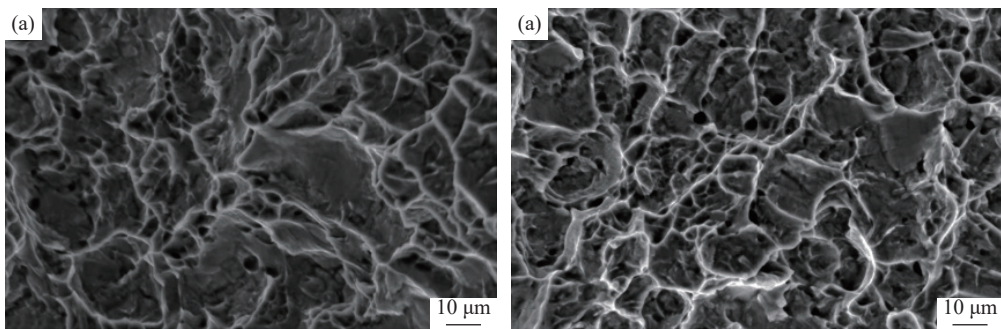


图4 室温拉伸微观断口形貌: (a) TD; (b) RD

结束语

(1) 薄板的组织主要由 α 晶粒组成, 在各 α 晶粒之间存在残余 β 相, α 晶粒的形貌以等轴状与细长条状为主, 存在一定的轧制加工形貌。

(2) TD 与 RD 方向的拉伸性能十分接近, 说明薄板组织十分均匀无明显的各向异性。

(3) 断口微观形貌均由大量等轴状韧窝构成, 具有明显的韧性断裂特征, 除包含大量韧窝外, 还包含少量的小平面, 小平面十分光滑且圆润, 同时发现一定数量的二次裂纹。

参考文献

- [1] 黄艳华, 冯继才, 彭晖, 等. 减少 TA12A 钛合金锻造过程表面开裂工艺研究. 锻压装备与制造技术, 2022, 57(2): 85
- [2] 王珏, 张晓巍, 张英伟, 等. TA32 钛合金双层结构零件超塑成形/扩散连接工艺. 塑性工程学报, 2022, 29(3): 53
- [3] 海敏娜, 黄帆, 王永梅. 浅析钛及钛合金在海洋装备上的应用. 金属世界, 2021(5): 16
- [4] Li Y X, Gao P F, Yu J Y, et al. Mesoscale deformation mechanisms in relation with slip and grain boundary sliding in TA15 titanium alloy during tensile deformation. *J Mater Sci Technol*, 2022, 98(3): 72
- [5] 王哲, 何健, 张帅, 等. 锻造设备对 TA15 钛合金显微组织及性能的影响研究. 钢铁钒钛, 2022, 43(1): 80
- [6] 马庆, 魏科, 唐海兵, 等. TA15 钛合金双道次热压缩变形软化行为及等轴 α 相组织演变规律. 材料热处理学报, 2021, 42(8): 40
- [7] 刘航, 李伟, 张镜斌. TA15 钛合金双重热处理三态组织中的片层 α 尺寸研究. 热加工工艺, 2021, 50(14): 142
- [8] 张世进, 李凯, 易丹青, 等. 冷轧 TA5 钛合金退火过程的再结晶行为及织构演变. 金属热处理, 2022, 47(2): 1
- [9] Rizwan M, Lu J X, Chen F, et al. Microstructure evolution and mechanical behavior of laser melting deposited TA15 alloy at 500 °C under *in-situ* tension in SEM. *Acta Metall Sin Engl Lett*, 2021, 34(9): 1201
- [10] 朱新杰, 范群波, 余洪, 等. Ti-4.5Mo-5.1Al-1.8Zr-1.1Sn-2.5Cr-2.9Zn 钛合金的动态力学性能及失效研究. 稀有金属材料与工程, 2020, 49(4): 1235
- [11] 李敏娜, 吴晨, 马保飞, 等. 大规格 TC11 钛合金棒材热处理后组织与性能分布规律性研究. 钛工业进展, 2022, 39(1): 12

基金项目: 自治区重点研发计划资助项目 (2022B01029); 自治区创新环境 (人才、基地) 建设专项资助项目 (2020D14041)。

作者简介: 杨铮 (1995—), 男, 陕西商洛人, 本科, 钛合金加工助理工程师, 主要从事钛及钛合金塑性成型工作。通信地址: 新疆湘润新材料科技有限公司, E-mail: 2271236647@qq.com。