

海绵钛直接轧制板材的组织性能分析

王亚铮，张宇，韩盈，余伟

(北京科技大学 工程技术研究院，北京 100083)

摘要：钛材因制造工艺复杂、成本高昂，其应用受到一定程度的限制。本研究旨在通过探索海绵钛直接轧制板材过程中组织与性能的演变规律，从而为钛板材低成本制备提供新路径。将0_A级海绵钛压块、密封焊接后，在900 °C下进行多批次纵向热轧，分别制备出厚度为25、10、4 mm的轧板，并对其进行金相分析、拉伸性能测试及断口分析。结果表明，第一道次热轧后，海绵钛压块中部密实，边部存在孔隙。随着累计压下量的增加，轧板硬度上升，致密度增大，孔隙面积减小，包套厚度变薄且部分区域包套与压块界面开始融合，同时晶粒细化，屈服强度和抗拉强度显著提高，断后伸长率先升后降。其中，4 mm厚轧板经590 °C/30 min/AC退火处理后，屈服强度为258 MPa，抗拉强度为309 MPa，断后伸长率达到30%，均达到GB/T 3621—2022标准要求。该工艺制备的板材与传统熔炼-轧制板材力学性能相近。本研究为海绵钛直接轧制技术提供了理论依据，但在提高成材率和实现批量生产方面，仍有待进一步研究。

关键词：海绵钛；热轧；压下量；力学性能；微观组织；断口形貌

中图分类号：TG336；TG146.23

文献标识码：A

文章编号：1009-9964(2025)05-001-06

Analysis of Microstructure and Properties of Directly Rolled Plates of Titanium Sponge

Wang Yazheng, Zhang Yu, Han Ying, Yu Wei

(Institute of Engineering Technology, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: The applications of titanium materials are limited due to their complex manufacturing processes and high costs. In order to provide a new pathway for the low-cost production of titanium plates, this study investigates the evolution laws of microstructure and properties during the direct rolling of sponge titanium plates. The grade 0_A titanium sponge was compacted and sealed-welded, and then subjected to multiple-pass longitudinally hot rolling at 900 °C to prepare rolled plates with thickness of 25 mm, 10 mm, and 4 mm, and metallographic analysis, tensile properties testing, and fracture analysis were carried out. The results show that after the first hot-rolling pass, the central part of the titanium sponge compact is dense while voids remain at the edges. As the cumulative reduction increases, the hardness and density of the rolled plate increase, the pore area decreases, the cladding thickness becomes thinner and the interface between the cladding and the compact begins to bond in some areas. Meanwhile, the grains are refined, the yield strength and tensile strength increase significantly. The elongation after fracture first increases and then decreases. After annealing treatment at 590 °C for 30 minutes, the yield strength of the 4 mm rolled plate reaches 258 MPa, the tensile strength reaches 309 MPa, and the elongation after fracture reaches 30%, all meeting the requirements of GB/T 3621—2022 standard. The mechanical properties of the plates prepared by this process are similar to those of plates made by the traditional melting-rolling process. This research provides a theoretical basis for the direct rolling technology of titanium sponge, yet further research is needed to improve the yield rate and achieve mass production.

Keywords: titanium sponge; hot rolling; reduction amount; mechanical properties; microstructures; fracture morphology

钛及钛合金具有强度高、密度小、耐高温、耐

腐蚀等优异性能^[1-2]，被用于制造与海水或腐蚀性介质接触的部件、喷气发动机零件和飞机起落架等，也可应用于汽车或其他运输设备，以实现轻量化，从而降低能源消耗与CO₂排放^[3-4]。然而，传统的钛

收稿日期：2025-02-13

基金项目：国家自然科学基金资助项目（52201059）

通信作者：余伟（1968—），男，研究员。

材制备存在生产周期长、工艺流程复杂、能量消耗高的缺点^[5]，其具体过程为：海绵钛首先需经过2~3次铸锭熔炼，再经热锻造、热变形和冷变形等过程加工成板材、棒材、型材等钛制品。

熔炼是钛材加工过程中能耗最高的环节。工业纯钛的熔炼一般采用真空熔炼法，包括真空自耗电弧炉熔炼法（VAR）、电子束冷床炉熔炼法（EBCHM）、等离子体冷床炉熔炼法（PCHM）等。采用EBCHM或PCHM可以将重熔次数减为1次，但依然能耗较大，熔炼后需在结晶器中凝固成所需尺寸与形状的圆锭或扁锭，冷却后再机加工为所需尺寸的钛锭^[6]。以上方法生产周期长，成本高，CO₂排放量大。粉末冶金是钛材制备的另一种常见方法^[7]。其中，等静压烧结法是以钛粉或氢化钛粉为原料，将其与合金元素粉末机械混合均匀，然后对粉末混合体进行压坯，最终在真空或保护气氛条件下，通过热机械固结方式完成钛的合金化和致密化。相较于传统熔炼法，该过程不经过熔炼即可制备钛制品，降低了能耗，从而降低了成本，但仍然存在其他不足，如制粉过程困难、成本仍然偏高、需要保护气氛以及生产周期长等^[8]。快速烧结-挤压法则以海绵钛颗粒为原料，将海绵钛压制坯，在保护气氛下，预先快速升温获得烧结坯，之后置于挤压模具中进行挤压^[9]。此方法为经传统烧结法后再加热挤压，仍属于传统流程，整体能耗大，对烧结设备要求高，无法用于大尺寸钛材加工。金属粉末轧制法通过轧机将金属粉末轧制成具有一定强度和密度的连续带坯，再经过烧结、冷轧等后续处理，最终得到致密的金属带材^[10]。该方法工艺流程短，能耗相对较低，但由于粉末流动性强，在喂入轧辊时难以形成稳定、均匀的料堆，对设备要求高，生产效率也较低。

有研究表明^[11]，用不锈钢包覆铁屑轧制，可将铁屑加工成半成品或成品，且不锈钢与铁屑间达到冶金结合。据此提出以下研究思路：在海绵钛预压坯上包覆一层纯钛后直接轧制，一方面可以有效约束被包覆海绵钛预压坯的变形行为，使得包覆层与被包覆的海绵钛预压坯在轧制过程中协同变形；另一方面，由于使用同种材料进行包覆，包覆层在成形后会成为材料的一部分。为此，本研究探索了以海绵钛为原料，将其用纯钛包覆后直接轧制制备板材的可行性，该工艺省去熔炼和锻造环节，有望实现钛板材的低成本制备。

1 实验

实验材料为工业0_A级海绵钛，其化学成分（质量分数，%）为：Ti≥99.8，Fe≤0.03，Si≤0.01，Cl≤0.06，C≤0.01，N≤0.01，O≤0.05，Mn≤0.01，Mg≤0.01，

H≤0.003，Ni≤0.01，Cr≤0.01，其他杂质总和≤0.02。首先用压机将海绵钛压制成如图1所示的压块，再将海绵钛块切割后装入图2所示的纯钛盒子，经抽真空处理（极限真空度<10⁻²Pa）后，采用氩气保护焊接技术进行封装。采用多功能热轧机进行板材轧制，轧制过程分为3个轧程，第一轧程加热温度为900℃，保温时间为100min，终轧温度为740~760℃，经4道次轧制后板材厚度由75mm减薄至25mm（记为Step 1）；第二轧程加热温度为860℃，保温时间为25min，终轧温度为740~760℃，经2道次轧制后板材厚度由25mm减薄至10mm（记为Step 2）；第三轧程加热温度为880℃，保温时间为50min，终轧温度为740~760℃，经4道次轧制后厚度由25mm减薄至4mm（记为Step 3）。



图1 海绵钛压块照片

Fig.1 Photo of titanium sponge briquette



图2 密封海绵钛压块的纯钛盒子

Fig.2 Pure titanium box for sealed titanium sponge

在不同厚度的热轧板上沿横向（TD）切取2个拉伸试样，并分别在边部、中心部位切取金相试样，取样位置如图3所示。金相试样用水砂纸从200目到2000目逐级打磨，经机械抛光后，用硝酸+氢氟酸+水组成的混酸（体积比为2:1:50）腐蚀。采用激光共聚焦显微镜进行显微组织观察及包套厚度测量，用ImageJ软件测量孔洞面积以表征不同压下量轧板不同位置的孔隙面积。依据GB/T 3850—2015《致密烧结金属材料与硬质合金密度测定方法》测试不同压下量轧板的致密度。对不同压下量轧板进行维氏硬度测试，每个样品测10个点，取平均值作为最终硬度值。采用CMT5105型微机控制电子万能试验机进行室温拉伸试验，拉伸速率为1.05 mm/min。采用ZEISS热场发射扫描电镜观察拉伸断口形貌。

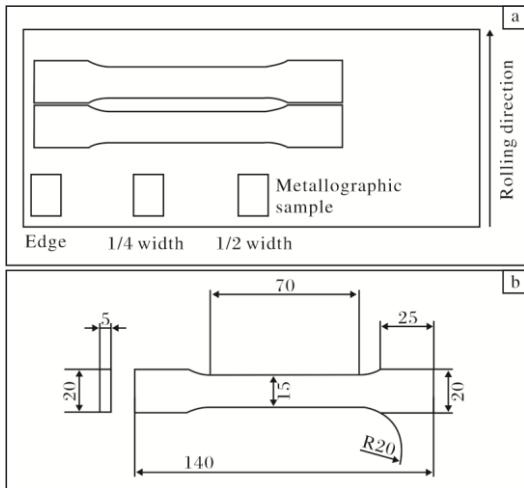


图3 取样位置及拉伸试样尺寸示意图

Fig.3 Diagram of sampling position (a) and dimensions of tensile specimen (b)

2 结果与讨论

2.1 宏观照片

包套海绵钛样品采用全纵轧，轧制过程中未采用立轧对宽度方向进行压缩。图4为经第一道次轧制后25 mm厚轧板的照片。从图4可以看出，由于包套弯折区域存在显著的应力集中及焊接残余应力，轧后包套的局部出现边裂，导致板材边部未密实区域发生吸氧现象。



图4 25 mm厚轧板照片

Fig.4 Photo of 25 mm thick rolled plate

2.2 压下量对硬度的影响

测量不同厚度轧板的维氏硬度，结果如图5所示。从图5可以看出，随着板材厚度减小，硬度增加，且轧板边部位置增加幅度最大，4 mm厚轧板与25 mm厚轧板相比硬度差值为29.36 HV，1/2位置（板宽中部）硬度增加幅度最小，差值仅为5.61 HV。

2.3 压下量对致密度的影响

图6为不同厚度轧板的致密度测试结果。由图6可知，随着压下量的增加，轧板厚度减小，致密度逐

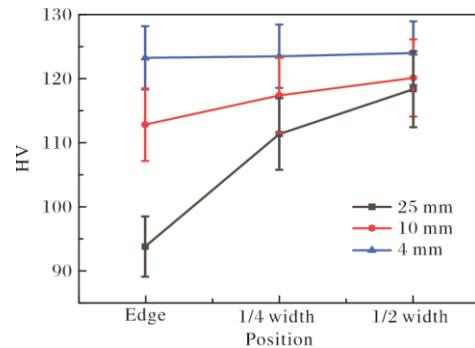


图5 不同厚度轧板的硬度分布

Fig.5 Hardness distribution of rolled plates with different thicknesses

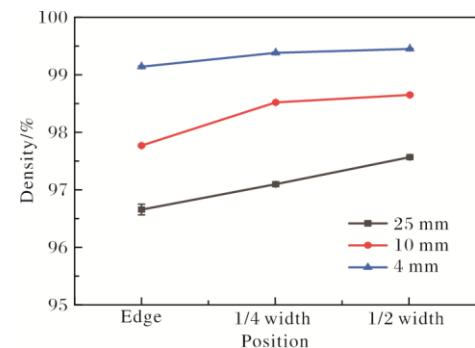


图6 不同厚度轧板的致密度分布

Fig.6 Density distribution of rolled plates with different thicknesses

渐增加，且同一轧板不同位置的致密度从边部到中部逐渐增大。当轧板厚度为4 mm时，致密度可达99%，且不同位置的致密度相差不大，仅为0.3%，说明4 mm厚轧板的致密度比较均匀。

2.4 压下量对孔隙面积的影响

不同厚度轧板的孔隙面积分布如图7所示。从图7可知，25 mm厚轧板边部孔隙面积较大，约为72 μm^2 ，而1/4、1/2位置孔隙面积大幅减小，在10 μm^2 以内，说明此阶段边部孔隙因变形约束弱未充分压缩，内部

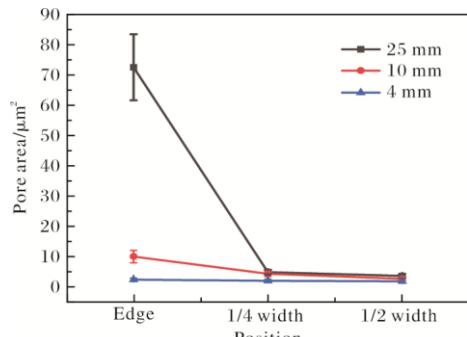


图7 不同厚度轧板的孔隙面积分布

Fig.7 Pore area distribution of rolled plates with different thicknesses

孔隙受应力作用压缩明显；10 mm 厚轧板边部孔隙面积降至约 $10 \mu\text{m}^2$ ， $1/4$ 、 $1/2$ 位置处进一步减小且更接近，表明随着轧制的进行，压缩作用增强，边部孔隙也得到一定程度的压缩；4 mm 厚轧板不同位置的孔隙面积均在 $5 \mu\text{m}^2$ 以内且差异极小，表明大变形量轧制后，孔隙被充分压缩，板材各部位变形均匀性大幅提升，致密化程度高。

2.5 压下量对包套厚度的影响

测量不同厚度轧板的包套厚度，结果如图 8 所示。轧制之前包套的厚度为 3 mm，经轧制后，25 mm 厚轧板的包套厚度约为 1.6 mm，此时轧板压下量为 66.7%，而包套变形量仅为 46.7%。这是因为海绵钛压块存在大量孔隙，在轧制过程中，压块变形量大于包套，导致包套变形量与轧板变形量不一致。当轧板厚度为 4 mm 时，部分区域已经观察不到包套与海绵钛压块之间明显的界面，说明包套与压块已开始融合。

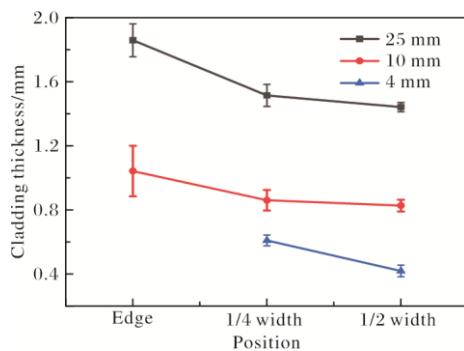


图 8 不同厚度轧板的包套厚度分布

Fig.8 Cladding thickness distribution of rolled plates with different thicknesses

2.6 压下量对拉伸性能的影响

图 9 为不同厚度轧板的力学性能。从图 9 可以看出，随着板材压下量的增加，屈服强度和抗拉强度均升高，断后伸长率先升高后下降。4 mm 厚轧板的屈服强

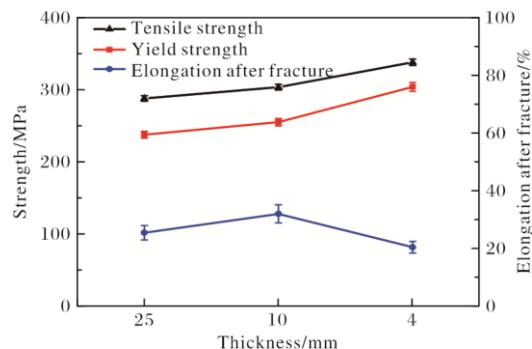


图 9 不同厚度轧板的力学性能

Fig.9 Mechanical properties of rolled plates with different thicknesses

度和抗拉强度最大，分别为 304、338 MPa，10 mm 厚轧板的断后伸长率最高，为 32%。

根据 GB/T 3621—2022《钛及钛合金板材》，TA0 板材横向的室温屈服强度 $R_{p0.2} \geq 170$ MPa，抗拉强度 R_m 为 280~420 MPa，厚度为 2.0~10.0 mm 时断后伸长率 $A \geq 30\%$ ，厚度为 10.0~30.0 mm 时断后伸长率 $A \geq 25\%$ 。由此可见，不同厚度轧制钛板的强度均符合国家标准要求，而除 4 mm 厚轧板以外，其他轧板的断后伸长率均达标。

4 mm 厚轧板的断后伸长率未达到国标要求，这可能与轧板残留的加工硬化所导致的残余应力有关。为改善其塑性，进行补充实验：从 4 mm 厚轧板上切取拉伸试样，经 $590^\circ\text{C}/30\text{ min}/\text{AC}$ 退火处理后，再进行拉伸性能测试。结果显示，试样屈服强度为 258 MPa，抗拉强度为 309 MPa，断后伸长率达到 30%，均符合 GB/T 3621—2022 中对 TA0 板材性能的要求，表明退火处理可有效提升 4 mm 厚轧板的塑性，使其达到国标要求。

拉伸断裂后的试样如图 10 所示。从图 10 可以看出，拉伸试样大多出现非均匀颈缩，即样品直径/板宽不均匀减小。这是因为海绵钛成分不均匀（O、N 含量有差异）会导致材料加工硬化率不同，在拉伸过程中内部应变分布不均匀，加工硬化率高的区域会承受更高的应力，发生小应变，而加工硬化率低的区域容易应变，从而引发颈缩。颈缩区域的应力集中可能诱发金属微结构的变化（如位错滑移以及晶格畸变产生孪生带等），产生局部强化的效果，当颈缩区域产生的局部强化大于因截面积减小所引起的承载能力下降

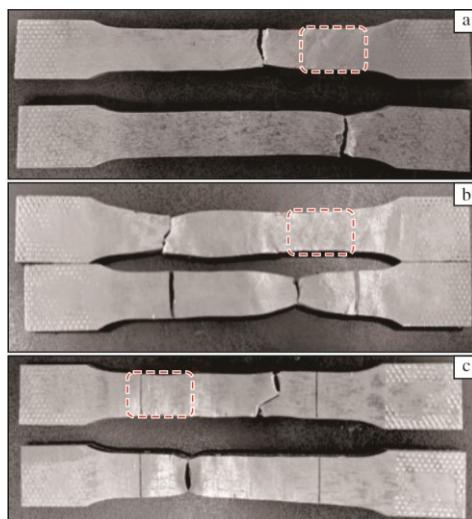


图 10 不同厚度拉伸试样断裂后的照片

Fig.10 Photos of fractured tensile specimens with different thicknesses: (a) 25 mm; (b) 10 mm; (c) 4 mm

时, 颈缩区域的截面积不再减小, 拉伸试样的进一步变形只能由未发生颈缩的区域均匀承担, 直至发生下一次颈缩, 最后拉伸试样在最薄弱的颈缩区域发生断裂^[12]。

2.7 压下量对微观组织的影响

不同厚度轧板的金相照片如图 11 所示。由图 11a~11c 可知, 25 mm 厚轧板边部存在着明显的裂纹和空洞, 板宽中部裂纹及空洞区域面积显著减小, 密

实度相对边部增加, 说明整个过程中存在未压实区域, 裂纹及空洞等缺陷未完全愈合; 由图 11d~11f 可知, 相较于 25 mm 厚轧板, 10 mm 厚轧板边部未愈合区域面积下降, 板宽中部仍有小范围的裂纹区, 晶粒尺寸变小; 由图 11g~11i 可知, 4 mm 厚轧板基本没有裂纹和空洞, 晶粒沿着轧向被明显拉长。随着累计压下量的增加, 晶粒尺寸减小, 且轧板内部缺陷逐渐减少。

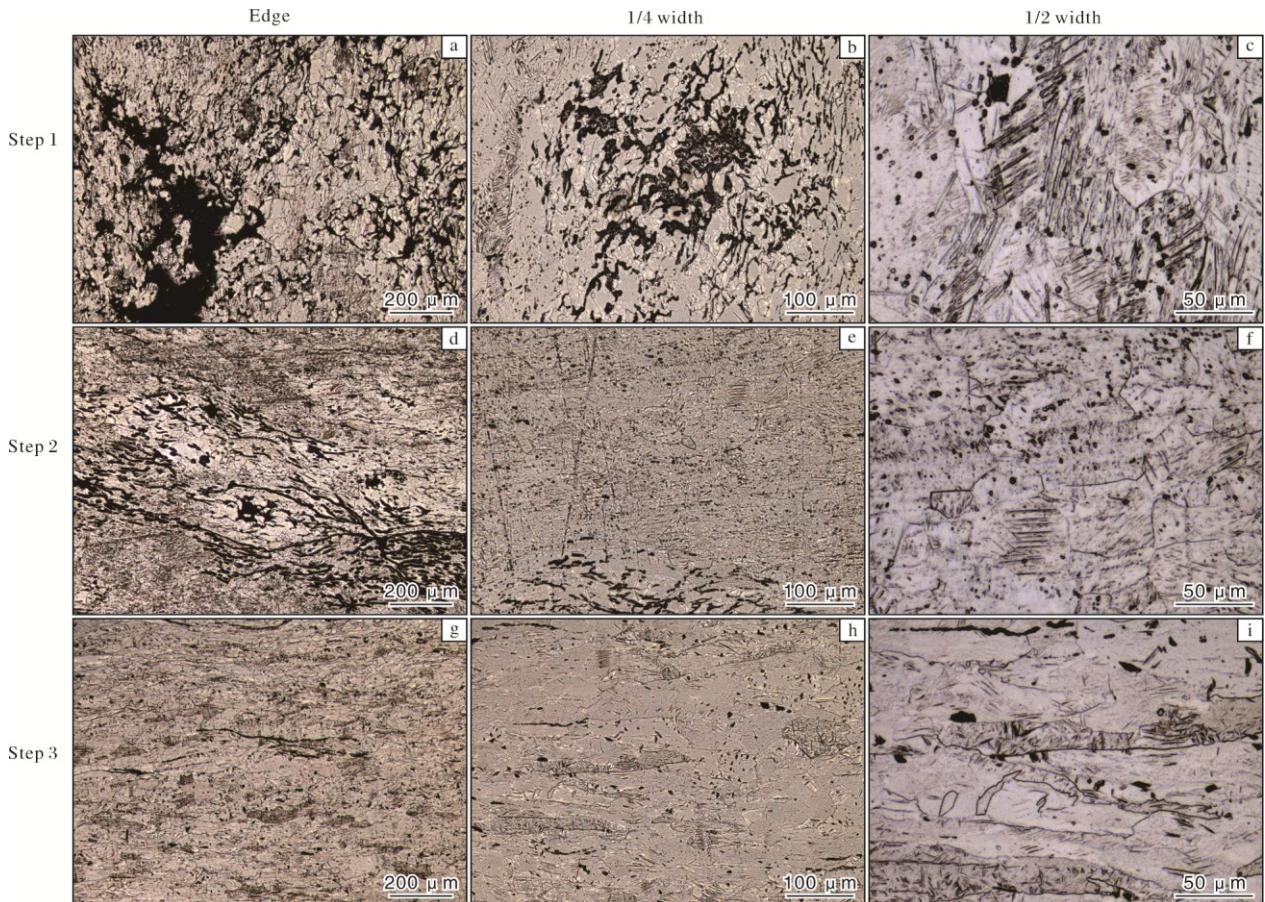


图 11 不同厚度轧板的金相照片

Fig.11 Metallographic photographs of rolled plates with different thicknesses: (a-c) 25 mm; (d-f) 10 mm; (g-i) 4 mm

2.8 压下量对断口形貌的影响

图 12 为不同厚度轧板拉伸试样的断口形貌。由图 12a、12d 可知, 25 mm 厚轧板拉伸试样断口呈蜂窝状, 为典型的微孔聚集型韧性断裂, 局部有垂直于断口的微小撕裂区。断口上大量大而浅的韧窝是在外力作用下, 位错运动产生弹性形变能, 当弹性形变能足以克服纯钛内杂质元素与基体间的界面结合力而形成新表面时, 便形成了显微空洞。当显微空洞形成后, 位错受到的排斥力大大降低, 在外力作用下大量位错向新形成的显微空洞运动, 使显微空洞长大, 同时导致空洞壁收缩变薄, 直至空洞间彼此相连而断裂, 形成韧窝^[13]。而对于缺陷处, 由于吸收了部分位错, 导致显微空洞成长相对不足, 所以缺陷处的韧窝相对小而浅。由图 12b、

12e 可知, 10 mm 厚轧板拉伸试样断口同样存在大量韧窝, 韧窝的深度和大小较 25 mm 厚轧板有明显提高, 且无局部微小撕裂区。因此, 10 mm 厚轧板表现出更优的延展性。由图 12c、12f 可知, 4 mm 厚轧板拉伸试样断口存在深浅不一、分布不均的韧窝, 且有少量河流状撕裂棱及解理台阶, 断裂方式为准解理断裂与韧性断裂的混合断裂^[5]。由于 4 mm 厚轧板断口存在少量的长条状撕裂棱即准解理断裂特征, 其塑性较差(断后伸长率仅为 20.5%), 可能与轧板残留的加工硬化有关。

综上所述, 通过将海绵钛直接热轧可以实现钛板的短流程制备。但如何提高海绵钛直接轧制板材的成材率以及实现工业化批量生产, 还存在许多问题亟需进一步探索研究。

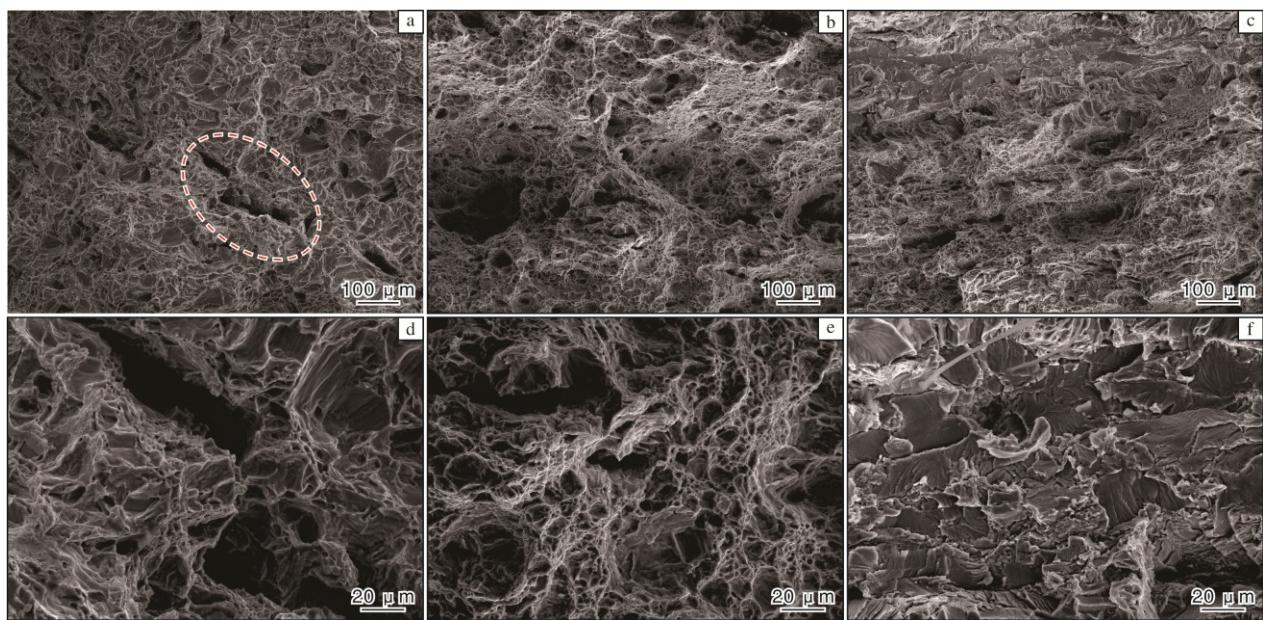


图 12 不同厚度轧板拉伸试样的断口形貌

Fig.12 Fracture morphologies of tensile specimens of rolled plates with different thicknesses: (a, d) 25 mm; (b, e) 10 mm; (c, f) 4 mm

3 结 论

(1) 用海绵钛直接轧制板材时, 随着压下量的增加, 轧制板材的硬度、屈服强度、抗拉强度上升, 边部硬度增幅最大, 断后伸长率先升后降。

(2) 随着压下量的增加, 轧板致密度增大, 4 mm 厚轧板致密度达到 99%且相对均匀; 孔隙面积减小, 4 mm 厚轧板不同位置孔洞面积基本相同; 包套厚度减小, 4 mm 厚轧板部分区域包套与压块界面开始融合; 晶粒尺寸变小, 内部缺陷逐渐减少。

(3) 海绵钛直接轧制板材工艺可行, 能短流程制备钛板。其中, 25 mm 和 10 mm 厚轧板强度和断后伸长率均符合 GB/T 3621—2022 要求, 4 mm 厚轧板断后伸长率略低。经退火处理后, 4 mm 厚轧板性能亦可达标。

参考文献 References

- [1] 王媛, 董健, 谢力, 等. 化学成分及热处理工艺对 TA5 合金棒材力学性能的影响[J]. 材料开发与应用, 2021, 36(2): 35-38.
- [2] Zhang Z B, Huang W W, Zhao W D, et al. Hot deformation behavior of TA1 prepared by electron beam cold hearth melting with a single pass[J]. Materials, 2022, 16(1): 369.
- [3] Okui T, Shirai Y. Development of manufacturing technology of commercially pure titanium sheets by titanium sponge direct rolling process[R]/No.128 Special Issue on Titanium. Japan: Nippon Steel Technical Report, 2022.
- [4] Du Z X, Xiao S L, Shen Y P, et al. Effect of hot rolling and heat treatment on microstructure and tensile properties of high strength beta titanium alloy sheets[J]. Materials Science and Engineering A, 2015, 631: 67-74.
- [5] 谭聰, 余堃, 肖寒, 等. 海绵钛/电解钛熔炼 TC4 钛合金铸锭直接轧制板材的组织及性能[J]. 特种铸造及有色合金, 2020, 40(1): 104-107.
- [6] 黄东亚. EB 炉熔炼残钛制备的 TA1 热变形行为及组织研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2022.
- [7] 谷树德. 钛基复合材料制备方法及性能研究进展[J]. 材料开发与应用, 2023, 38(1): 85-97.
- [8] 芦博昕. 高性能粉末冶金钛合金制备与研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2023.
- [9] 东北大学. 一种直接热挤压海绵钛颗粒制备纯钛的方法: CN202210007996.3[P]. 2022-04-28.
- [10] Cantin G M D, Gibson M A. Titanium Sheet Fabrication from Powder[M]//Qian M, Froes F H. Titanium Powder Metallurgy. Waltham: Butterworth-Heinemann, 2015: 383-403.
- [11] Zhang S K, Xiao H, Xie H B, et al. The preparation and property research of the stainless steel/iron scrap clad plate[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2014, 214(6): 1205-1210.
- [12] 张忠, 涂志华, 李来风, 等. 钛合金低温拉伸中的多处颈缩[J]. 低温物理学报, 1995(3): 238-241.
- [13] 苏娟华, 周铁柱, 任凤章, 等. 工业纯钛高温拉伸性能及断口形貌[J]. 中国有色金属学报, 2015, 25(6): 1471-1479.