

退火温度对不同厚度 Zr702 热轧板显微组织和力学性能的影响

闫新成, 王晨曦, 谢英杰, 侯智敏

(西部钛业有限责任公司, 陕西 西安 710201)

摘要: 以 8、18、20 mm 厚工业级纯锆 Zr702 热轧板为研究对象, 分别在 500、530、560 °C 进行 1 h 的成品退火热处理实验, 研究热轧态及各退火温度下热轧板显微组织、硬度和拉伸性能的演变规律。结果表明, 随着退火温度升高, 显微组织由变形纤维状条带组织逐渐转变为等轴晶, 且晶粒尺寸增大。相同退火温度下, 8 mm 厚热轧板较 20 mm 厚热轧板的再结晶程度显著增加, 热轧时高变形储能提供了更大的再结晶驱动力。20 mm 厚热轧板晶粒内先出现变形孪晶, 后随着变形量增加, 孪晶消失, 晶粒进一步细化, 板材变形方式由孪晶转变为位错滑移, 再结晶后强化方式由孪晶强化转变为细晶强化。20 mm 厚热轧板为 T 织构, 8 mm 厚热轧板主要为基面 B 织构/双峰 B 织构, 横向与纵向屈服强度差从 20 mm 厚热轧板的 70 MPa 以上降低至 8 mm 厚热轧板的 20 MPa 以下。

关键词: Zr702 合金; 热轧板; 退火温度; 再结晶; 织构

中图分类号: TG146.4⁺14

文献标识码: A

文章编号: 1009-9964(2025)05-035-08

Effect of Annealing Temperature on Microstructure and Mechanical Properties of Zr702 Hot-rolled Plates with Different Thickness

Yan Xincheng, Wang Chenxi, Xie Yingjie, Hou Zhimin

(Western Titanium Technologies Co., Ltd., Xi'an 710201, China)

Abstract: This study conducts annealing heat treatments on finished products with the thickness of 8 mm, 18 mm, and 20 mm at 500 °C, 530 °C, and 560 °C for one hour, respectively, to study the evolution of microstructure, hardness, and tensile properties of hot-rolled industrial-grade pure zirconium Zr702 plates before and after annealing. The results indicate that as the annealing temperature increases, the microstructure gradually transforms from deformed fibrous strip structures into equiaxed grains, accompanied by grain size increases. At the same annealing temperature, the recrystallization degree of the 8 mm hot-rolled plate is significantly improves compared to the 20 mm hot-rolled plate. The high deformation energy storage during hot rolling provides a greater driving force for recrystallization. Deformation twins initially form in the microstructure of 20 mm hot-rolled plate, and then with the increase of deformation, the twins disappear and the grains are further refined. The deformation mode of the plate changes from twinning to dislocation slip, and the strengthening mode changes from twin strengthening to fine grain strengthening. The texture of the 20 mm hot-rolled plate is T-texture, while the 8 mm hot-rolled plate is mainly basal B-texture/bimodal B-texture. When the thickness of the plate decreases from 20 mm to 8 mm, the difference in transverse and longitudinal yield strength decreases from above 70 MPa to below 20 MPa.

Keywords: Zr702 alloy; hot-rolled plate; annealing temperature; recrystallization; texture

收稿日期: 2025-07-03

基金项目: 陕西省稀有金属装备制造共性技术研发平台项目 (2024ZG-GXPT-02); 钛合金管材高效短流程制备关键技术研发项目 (2022YFB3705604)

通信作者: 闫新成 (1991—), 男, 工程师。

锆及锆合金具有熔点高、热中子穿透力强 (热中子吸收截面小)、比强度高、耐腐蚀性好等一系列优点^[1-4], 被广泛应用于航空航天、核工业、医疗等领域。近年来, 锆及锆合金作为设备关键部位的结构材料逐步进入化工行业, 在一些腐蚀条件较为苛刻的环境中

得到应用^[5-7]。

金属板材制备是通过冶金和物理方法得到满足目标需求几何外形和力学性能板材的过程。板材的力学性能取决于轧制和热处理过程,通过改变工艺参数调控组织形貌、晶粒尺寸、相比例和织构类型,以实现对其力学性能的定量调控^[8]。学者们针对轧制方式、轧制工艺对锆及锆合金板材显微组织及力学性能的影响开展了大量研究^[9-12]。Chen 等人^[10]研究了轧制温度和退火工艺对商用 Zr702 板材组织与力学性能的影响。结果表明,与室温轧制相比,在液氮温度下轧制会导致更多的不均匀变形和更高的位错密度,从而显著影响退火后板材的组织与性能。对于给定的轧制压下量,在液氮温度下轧制的试样位错密度较高,回复和再结晶速度较快,退火后板材的平均晶粒尺寸较大。Zimmermann 等人^[11]研究了轧制工艺对纯锆和 Zr-4 合金组织与性能的影响,发现在室温下轧制,纯锆表现出良好的塑性,而 Zr-4 合金的延展性较低,产生的裂纹较多;在 300~500 °C 范围内轧制,随着温度的升高,两种材料的延展性都显著增加。Shan 等人^[12]通过传统的室温轧制变形获得了典型纳米结构的纯锆,平均粒径为 90 nm,其形成可归因于初始(002)织构减弱,增强了晶粒细化作用。

锆板材常规的生产流程为先将锆板坯经热轧和冷轧至规定的厚度,再进行成品退火热处理,通过调控热处理的温度和时间,进而调节板材的强度和塑性^[13-15]。在这一过程中,热轧是制备冷轧薄板必要的成形过程,但目前关于热轧工艺对板材力学性能影响的研究仍不全面。工业生产中,考虑到生产效率的问题,退火时间往往是根据板材厚度制定的,所以一般通过调节退火温度来调控板材的组织与性能。此外,退火温度对于轧态组织的影响处于热力学层面,相对于退火时间的动力学参数而言,其影响更大。但目前热处理温度对不同厚度热轧板组织与力学性能的影响仍不清晰。

根据具体的使用要求,板材轧制后的退火工艺可分为去应力退火和再结晶退火。根据合金种类、冷加工变形量以及对性能的要求,再结晶退火温度一般选择 500~580 °C,而去应力退火温度通常选择 500 °C 以下^[9]。退火工艺参数会影响轧制板材的再结晶行为和晶粒尺寸,因而探究热轧板退火工艺参数,尤其是热处理温度对性能的影响对于热轧板材的应用及后续冷轧板的制备至关重要。研究人员大多关注的是变形后材料的显微组织和力学性能。对于热轧薄板和冷轧板而言,随着变形量的增加,晶粒尺寸减小,强化机制为细晶强化,大的变形量对应着退火处理后更小的晶粒。

纯锆 Zr702 具有较好的加工性能和耐腐蚀性能,广泛应用于石油化工领域。针对退火工艺参数对不同厚度工业级 Zr702 热轧板显微组织、力学性能的影响规律和内在机理仍不清晰的问题,本研究以不同厚度的工业级 Zr702 热轧板为研究对象,通过调控退火温度,从而获得退火温度与 Zr702 热轧板组织、性能间的定性定量关系,以期工业化生产纯锆热轧板提供理论依据。

1 实验

实验材料为商用 Zr702 板坯,其化学成分(质量分数,%)为: Hf 2.5, Fe 0.087, O 0.102, C<0.03, N<0.01, H<0.003, 余量为 Zr。采用金相法测得 Zr702 相变点为 982 °C。将 Zr702 板坯先在 760 °C 开坯轧制至 70 mm 厚,随后分别轧制至 20、18、8 mm 厚,轧制温度保持不变。再将不同厚度的热轧态(HR) Zr702 板材分别在 500、530、560 °C 进行退火处理,保温 1 h,空冷。从热轧态和经不同温度退火后的 Zr702 板材上分别切取横向(T)、纵向(L)试样,进行显微组织观察以及硬度、室温拉伸性能检测。用板材厚度和退火温度标记试样,如经 560 °C 退火的 20 mm 厚试样标记为 20 mm-560 °C。金相试样经水砂纸打磨抛光后,在 HF+HNO₃+H₂O 溶液(体积比为 1:2:7)中腐蚀 10 s。采用金相显微镜进行组织观察,评估材料的再结晶行为。使用配备有电子背散射衍射(EBSD)分析系统(牛津仪器公司 AZtec)的 SU5000 扫描电子显微镜(SEM)对原始板材的轧制面进行微观结构观察,并对样品结构、晶粒尺寸、亚结构进行分析。按照 GB/T 228.1—2021 标准进行室温拉伸性能测试,并使用扫描电子显微镜观察拉伸试样的断口形貌,分析材料的断裂行为。使用数字显微硬度计测量材料的维氏硬度,载荷为 147.1 N。

2 结果与讨论

2.1 退火温度对显微组织及力学性能的影响

热轧态及不同温度退火态 Zr702 板材的显微组织如图 1 所示。从图 1a、1e 可以看出,退火处理前,Zr702 板材为轧态组织,呈不规则的长条纤维状并沿轧向分布;随着压下量的增加,组织细化程度增加,晶粒破碎更为明显。经退火处理后,不同厚度的 Zr702 板材组织中均出现再结晶现象,且 8 mm 厚板材的再结晶程度更高,特别是经 560 °C 退火后,对比尤为显著。由图 1d、1h 可以看出,8 mm 厚板材经 560 °C 退火后再结晶现象明显,晶粒尺寸较小(图 1d),而 20 mm 厚板材中仍存在大量变形组织(图 1h)。主要是由于

轧制过程中强烈的塑性变形会增加再结晶的形核位点，促进新晶粒的形成，故大压下量板材的再结晶晶粒数目显著增加。对于压下量较大的 8 mm 厚 Zr702

板材，其畸变能大，再结晶趋势强，在相对较低的退火温度下就能够发生再结晶，而 20 mm 厚 Zr702 板材畸变能小，再结晶不充分。

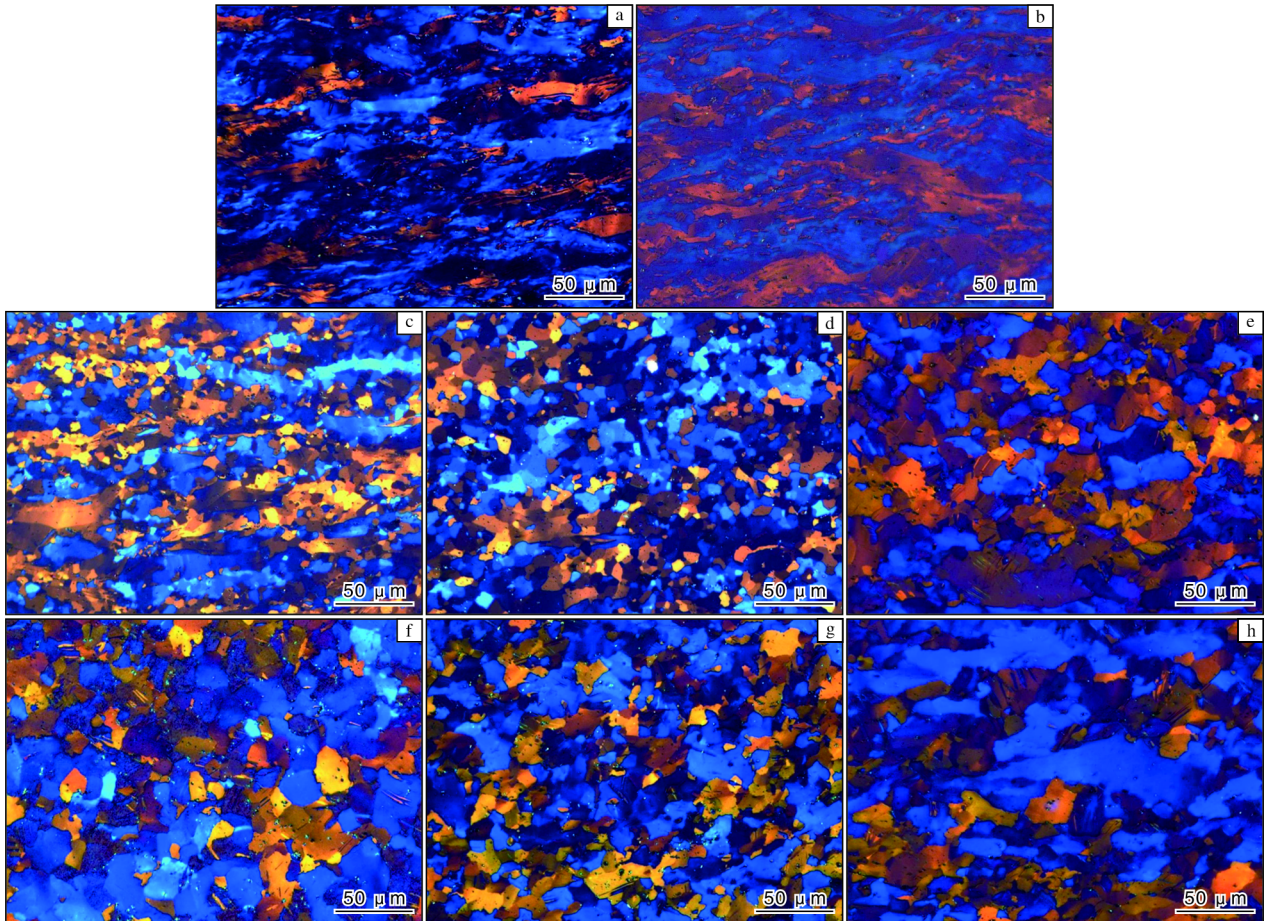


图1 热轧态及不同温度退火后 Zr702 板材的金相照片

Fig.1 Metallographic photographs of Zr702 plates as hot-rolled state and after annealing at different temperatures:
(a) 8 mm-HR; (b) 8 mm-500 °C; (c) 8 mm-530 °C; (d) 8 mm-560 °C; (e) 20 mm-HR; (f) 20 mm-500 °C;
(g) 20 mm-530 °C; (h) 20 mm-560 °C

采用 EBSD 得到热轧态及 560 °C 退火态 Zr702 板材的反极图 (IPF)，如图 2 所示。由图 2 可见，20 mm 厚热轧态和退火态板材中均存在孪晶 (图 2 白色圆圈内)。轧制过程中，20 mm 厚 Zr702 板材变形不充分，产生孪晶，而孪晶组织有较强的遗传性，最终保留在退火态板材中。而对于 8 mm 厚板材，由于变形量较大，在初始压下过程中产生孪晶以协调塑性变形，随着压下量的进一步增加，变形孪晶被破坏，最终形成轧态组织。经统计，20 mm 厚热轧态板材平均晶粒尺寸为 6.32 μm，经 560 °C 退火后，平均晶粒尺寸增加到 7.21 μm，而对于 8 mm 厚热轧态板材，因变形量较大无法统计晶粒尺寸，560 °C 退火后平均晶粒尺寸为 4.09 μm。热轧过程中除了晶粒破碎，也存在动态再结晶，但动态再结晶能力有限，这也是 20 mm 厚热轧态

板材晶粒较 8 mm 厚板材相对完整的主要原因。EBSD 晶粒形貌及尺寸变化表明，退火处理对 8 mm 厚板材组织演变过程的影响更大。

板材的力学性能取决于热机械过程，大的轧制变形量可以获得超细小的晶粒，显著提高材料强度，但不利于塑性^[16-18]。材料大变形后，需结合后续退火工艺来改善塑性。图 3 为不同厚度 Zr702 板材的维氏硬度。从图 3 可以看出，经不同温度退火后，20 mm 厚 Zr702 板材的维氏硬度均高于 8 mm 厚板材。这是由于 8 mm 厚板材的压下量大，晶粒破碎严重，退火处理中再结晶明显。此外，随着退火温度升高，8 mm 厚板材维氏硬度显著降低，由热轧态的 179 HV15 降低到 560 °C 退火态的 157 HV15，表现出较强的退火温度敏感性。

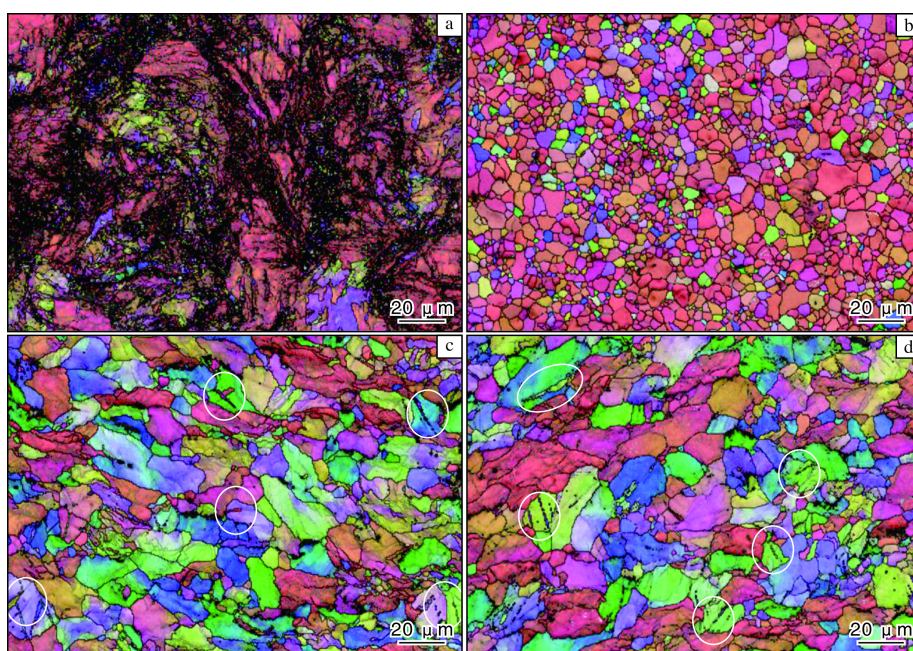


图2 热轧态及 560 °C退火后 Zr702 板材的 IPF 图

Fig.2 IPF diagrams of Zr702 plates as hot-rolled state and after annealing at 560 °C:

(a) 8 mm-HR; (b) 8 mm-560 °C; (c) 20 mm-HR; (d) 20 mm-560 °C

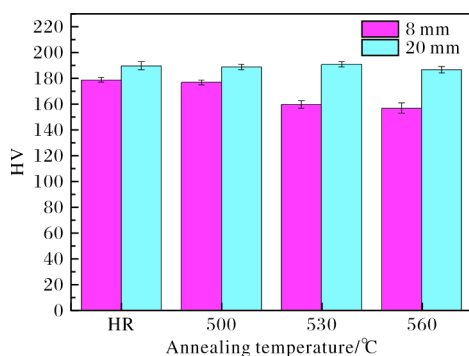


图3 热轧态及不同温度退火后 Zr702 板材的维氏硬度

Fig.3 Vickers hardness of Zr702 plates as hot-rolled state and after annealing at different temperatures

图4为热轧态及不同温度退火后 Zr702 板材的室温拉伸性能。从图4可知,随着退火温度升高,8 mm 厚 Zr702 板材强度与延伸率的变化更为明显,这与其较强的再结晶趋势及较快的晶粒长大速度有关。与 8 mm 厚板材相比,20 mm 厚板材的力学性能并没有表现出强烈的退火温度敏感性:一方面,压下量较低时,材料内在的形变储能较低,再结晶驱动力有限;另一方面,热轧后 20 mm 厚板材的晶粒尺寸较大,一定程度上抑制了退火过程中晶粒的长大,最终导致其力学性能变化较慢。此外,20 mm 厚 Zr702 板材中存在的变形孪晶也是导致其经 560 °C 退火后强度高于 8 mm 厚板材的重要原因。

由图3和图4还可以看出,热轧态 Zr702 板材的硬度和强度最大。这是由于经总变形量大于 30% 的轧制成形后,材料组织沿加工方向被拉长,造成晶格畸变,相当于经历了形变强化处理,导致位错密度增大,进一步阻碍了位错运动,变形抗力增加,故强度和硬度增大^[19-20],表现出明显的加工硬化。经 500 °C 退火后硬度变化不明显,这是由于变形后的内应力未完全消除。随着退火温度升高,内应力被消除,并且材料发生再结晶以及晶粒长大,强度和硬度随之降低。

锆合金的力学性能除了与晶粒形貌、尺寸相关外,织构也是重要影响因素。为此,分别对 8 mm 和 20 mm 厚热轧态及 560 °C 退火态 Zr702 板材进行 EBSD 表征,得到如图5所示极图。从图5可知,8 mm 厚热轧态板材为基面 B 织构,经 560 °C 退火后为基面双峰 B 织构,极点从 ND 方向逐渐向 TD 两端偏移。对于 20 mm 厚 Zr702 板材,其热轧态和退火态均为 T 织构。

为进一步明晰织构对 Zr702 板材力学性能的影响规律,分别计算了 8 mm 和 20 mm 厚 Zr702 板材横向与纵向力学性能的差值,结果如图6所示。从图6可以看出,Zr702 板材横向与纵向屈服强度差异明显,这种差异与热处理工艺相关性不大,但与板材厚度密切相关。当板材厚度从 20 mm 降低至 8 mm 时,横向与纵向屈服强度差从 70 MPa 以上减小至 20 MPa 以下。结合图5可知,8 mm 厚板材织构为基面 B 织构/双峰 B 织构,也就是说大部分晶粒的 C 轴与 ND 方向平

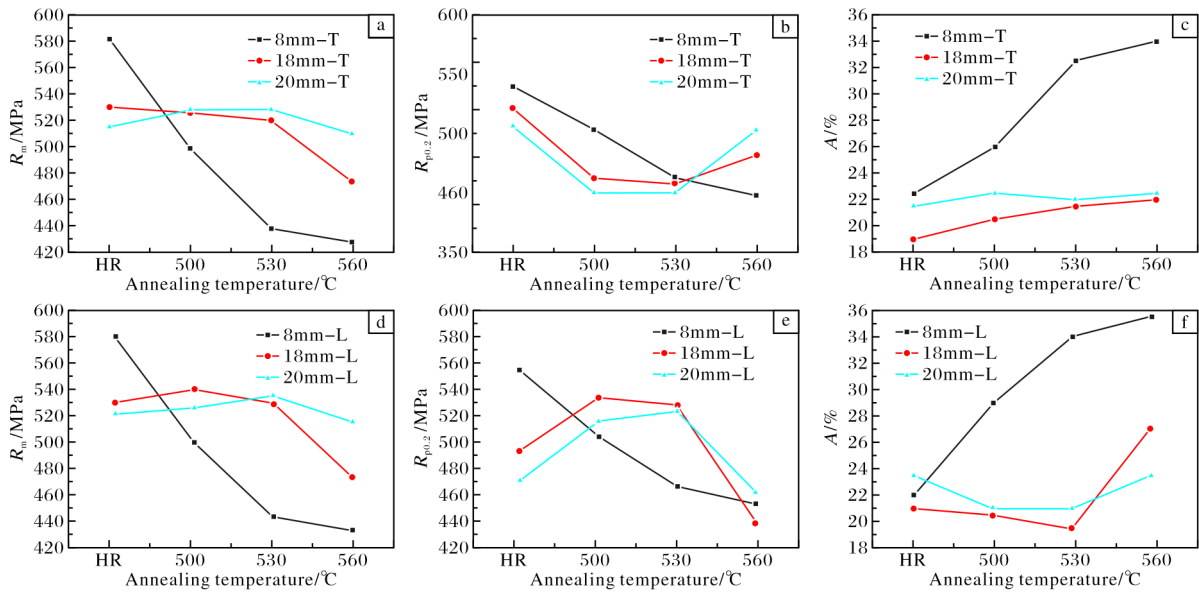


图 4 热轧态及不同温度退火后 Zr702 板材的室温拉伸性能

Fig.4 Room temperature tensile strength of Zr702 plates in both transverse and longitudinal directions as hot-rolled state and after different heat treatments: (a) R_m in transverse direction; (b) $R_{p0.2}$ in transverse direction; (c) A in transverse direction; (d) R_m in longitudinal direction; (e) $R_{p0.2}$ in longitudinal direction; (f) A in longitudinal direction

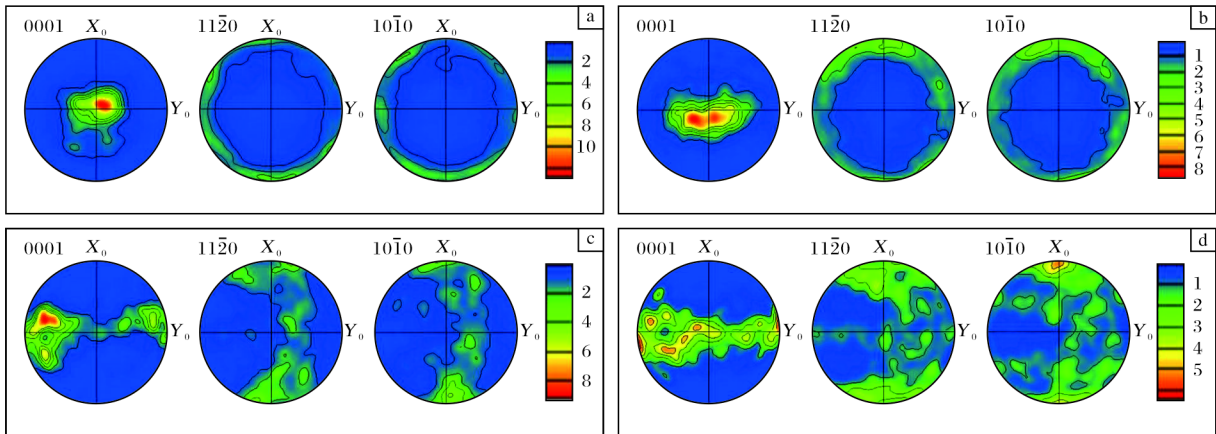


图 5 热轧态及 560 °C退火后 Zr702 板材的极图

Fig.5 Pole figures of Zr702 plates as hot-rolled state and after annealing at 560 °C: (a) 8 mm-HR; (b) 8 mm-560 °C; (c) 20 mm-HR; (d) 20 mm-560 °C

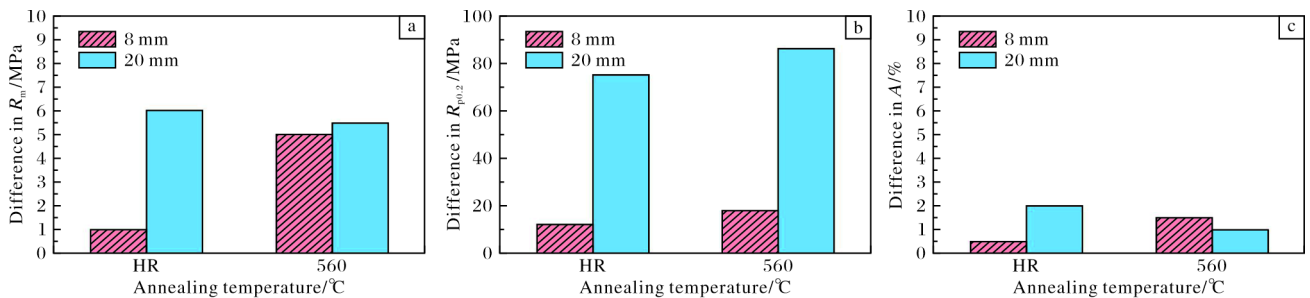


图 6 热轧态及 560 °C退火后 Zr702 板材横向与纵向屈服强度差异

Fig.6 Differences in transverse and longitudinal tensile properties of Zr702 plates as hot-rolled state and after annealing at 560 °C: (a) tensile strength; (b) yield strength; (c) elongation

行或夹角较小,但 20 mm 厚板材为 T 织构,晶粒 C 轴垂直 ND 方向,导致材料各向异性增加,横向与纵向屈服强度差值增加。因此,Zr702 热轧板横、纵向屈服强度差异与材料织构类型密切相关。

图 7 为热轧态及 560 °C 退火后 Zr702 板材的局部取向差分布(KAM)图。从图 7 可知,8 mm 厚板材的晶粒平均取向差为 1.9°,经 560 °C 退火后降低至 0.36°,

表明热处理过程中再结晶使得组织内部的变形程度大幅度降低,而 20 mm 厚板材的平均取向差仅从 1.5°降低至 1.24°,说明热轧过程中产生的加工硬化效应并没有在退火过程中被大幅度削弱。这也是除变形孪晶强化外,20 mm 厚板材性能对温度敏感性低的另一个重要原因。正是由于热轧过程中产生的加工硬化,导致 20 mm 厚板材经 560 °C 退火后,强度高于 8 mm 厚板材。

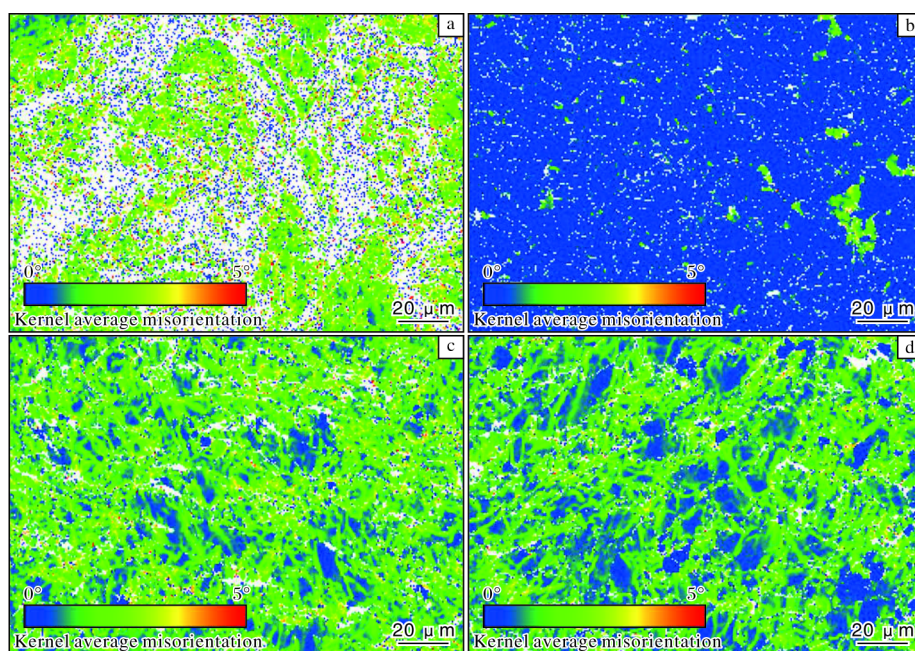


图 7 热轧态及 560 °C 退火后 Zr702 板材的 KAM 图

Fig.7 KAM diagrams of Zr702 plates as hot-rolled state and after annealing at 560 °C: (a) 8 mm-HR; (b) 8 mm-560 °C; (c) 20 mm-HR; (d) 20 mm-560 °C

图 8 为热轧态及 560 °C 退火后 Zr702 板材纵向拉伸试样的断口形貌。从图 8 可以看出,热轧态及 560 °C 退火后试样的断口形貌均以韧窝为主,呈现出韧性断裂特征;与热轧态相比,经退火处理后的韧窝尺寸和深度增加,表明材料在断裂前经历了更多的塑性变形,材料塑性得到了改善,这与拉伸试验结果一致。8 mm 厚 Zr702 板材经 560 °C 退火后,其拉伸试样断口表面与 20 mm 厚板材相比更粗糙,且呈现出较大起伏,韧窝深度明显增大,表明 8 mm 厚板材塑性更优。

2.2 再结晶行为和强塑性机理分析

Zr702 板材经退火后,显微组织均匀性得到有效改善,实现了不同厚度板材高强度与良好塑性的匹配。不同压下量和退火工艺提供的驱动力不同,导致再结晶程度存在差异,进而得到不同的力学性能。分析不同退火工艺与显微组织演变、再结晶行为和强塑性机理的关联性对于揭示退火工艺对力学性能影响的内在原因十分关键。

8 mm 厚 Zr702 板材的变形量较大,随着退火温度

增加,晶粒长大速度更快,这与材料较大的变形储能有关。在热轧过程中,晶粒得以细化,晶界数量增加,在降温过程中,大量位错得以保留,这种储存的能量(如位错)会促进后续退火过程中的回复和晶粒长大^[21]。晶粒尺寸也是影响再结晶行为的一个因素,晶粒细化程度越大,再结晶所需的驱动力越低。因此,相同热处理温度下,8 mm 厚板材的晶粒长大更迅速,晶粒尺寸表现出高度的温度敏感性。在退火过程中,主要涉及粗晶粒的球化、长大和细晶粒的消失,这与初始显微组织状态和退火工艺密切相关^[22-24]。对于 20 mm 厚 Zr702 板材而言,轧制过程中变形不充分,导致变形孪晶在各个热处理状态下均得以保留,组织有较强的遗传性,最终保留在退火态的板材中。相较于 8 mm 厚板材而言,由于再结晶驱动力不足,20 mm 厚板材再结晶不充分。

位错强化和细晶强化是试样退火强化的不同机制。由 Hall-Petch 公式可知,屈服强度随着晶粒细化而增加,晶粒细化会增大对位错运动的抵抗力,强度

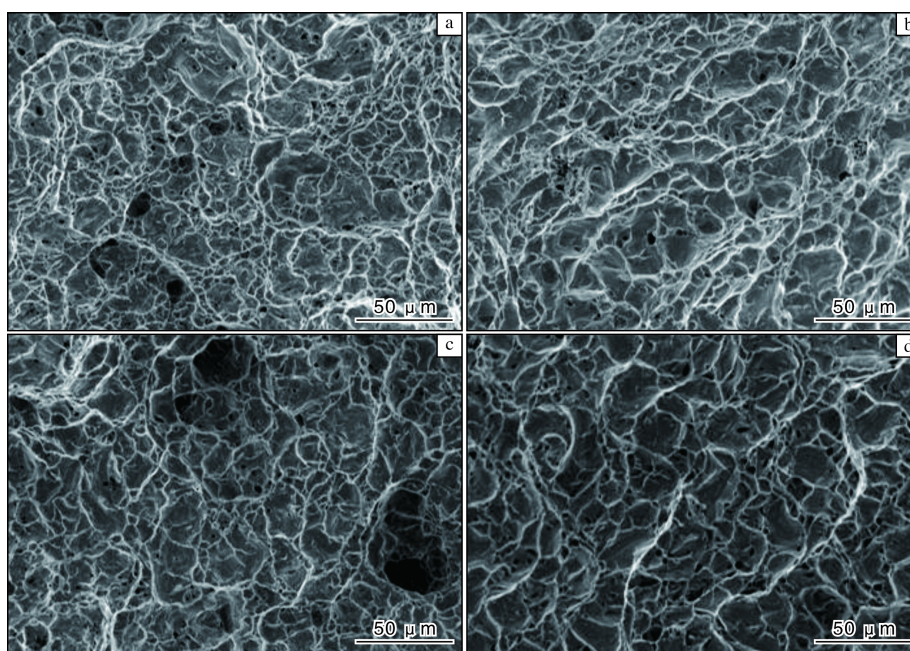


图8 热轧态及 560 °C退火后 Zr702 板材纵向拉伸试样的断口形貌

Fig.8 Fracture morphologies of longitudinal tensile specimens of Zr702 plates as hot-rolled state and after annealing at 560 °C:
(a) 8 mm-HR; (b) 8 mm-560 °C; (c) 20 mm-HR; (d) 20 mm-560 °C

提高。退火过程中再结晶和晶粒长大同时进行,再结晶在吸收位错的同时能改善塑性,但会降低位错的强化效果^[25]。晶粒长大会减少单位体积的晶界面积,促进位错滑移,从而降低强度,改善塑性^[21,26]。对于 20 mm 厚 Zr702 板材而言,由于组织中变形孪晶的存在,孪晶强化效应对其强塑性产生一定贡献。另外,由于晶粒的不充分再结晶,轧制过程中产生的加工硬化也要比 8 mm 厚板材大。因此,结合组织状态,兼顾再结晶和晶粒长大的影响,制定合理的退火工艺尤为关键。基于以上分析和讨论,8 mm 厚板材由于具有更大的压下量,因而原始晶粒更细小,热处理过程中细晶的钉扎效应以及晶粒之间的竞争机制抑制了晶粒粗化,得到了相对细小的等轴晶,超细等轴再结晶晶粒有利于材料强化和增韧。而对于 20 mm 厚 Zr702 板材而言,孪晶强化效应导致其强度随退火温度增加,保持在较高的水平。

3 结 论

(1) 不同厚度工业级纯锆 Zr702 热轧板在 500~560 °C 进行退火,随着退火温度的增加,板材由纤维状显微组织转变为等轴再结晶组织,晶粒尺寸逐渐增大。20 mm 厚热轧板中存在变形孪晶,具有组织遗传性,而 8 mm 厚热轧板变形量大,没有发现明显的变形孪晶。

(2) 在相同退火温度下,8 mm 厚 Zr702 板材再结

晶程度较 20 mm 厚板材显著增加。8 mm 厚板材结构主要为基面 B 织构/双峰 B 织构,20 mm 厚板材为 T 织构。Zr702 板材横向与纵向屈服强度差从 20 mm 厚板材的 70 MPa 以上降低至 8 mm 厚板材的 20 MPa 以下。

(3) 随着退火温度升高,8 mm 厚 Zr702 板材的强度降低,延伸率增加,硬度呈现递减趋势,由热轧态的 179 HV15 降低到 560 °C 退火后的 157 HV15,力学性能表现出退火温度敏感性。

(4) 轧制压下量较大时,拉伸试样表现出更明显的韧性断裂,韧窝数量显著增加,尺寸明显变小。经退火处理后,8 mm 厚 Zr702 板材具有最佳的塑性,但强度较低。

参考文献 References

- [1] Mallipudi V R, Valance S, Bertsch J. Meso-scale analysis of the creep behavior of hydrogenated Zircaloy-4[J]. *Mechanics of Materials*, 2012, 51(2): 15-28.
- [2] Lin J L, Li H L, Szpunar J A, et al. Analysis of zirconium oxide formed during oxidation at 623 K on Zr-2.5Nb and Zircaloy-4[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2004, 381(1/2): 104-112.
- [3] Rafique M, Chae S, Kim Y-S. Surface, structural and tensile properties of proton beam irradiated zirconium[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B*, 2016, 368: 120-128.

- [4] 郭春芳, 董云会. 金属锆制备方法的研究进展[J]. 稀有金属与硬质合金, 2008, 36(2): 63-67.
- [5] 左小涛, 王国平, 雍文佳, 等. 锆 R60702 焊接接头在有机酸中的腐蚀性研究[J]. 金属功能材料, 2011, 18(4): 47-50.
- [6] 海敏娜, 王文, 黄帆, 等. 工业级锆及锆合金焊接研究进展[J]. 电焊机, 2018, 48(6): 87-91.
- [7] 张宏鹏. 带电粒子辐照对 Zr-702 组织和性能的影响[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
- [8] 张智鑫, 樊江昆, 李瑞锋, 等. 钛合金板材制备技术的现状及展望(上)——薄板制备技术[J]. 航空制造技术, 2023, 66(10): 22-33.
- [9] 肖洋洋. 不同变形方式对 Zr702 组织及力学性能的影响研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2012.
- [10] Chen X, He W J, Chen W H, et al. Microstructures and mechanical properties of a commercial pure zirconium during rolling and annealing at different temperatures[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2021, 23(3): 2001039.
- [11] Zimmermann A J O, Padilha A F. Rolling and recrystallization behavior of pure zirconium and zircaloy-4[J]. *Matéria (Rio de Janeiro)*, 2019, 24(3): 0767.
- [12] Shan W K, Zhang G S, Li K F, et al. Nanocrystallization of pure Zr via room temperature rolling deformation[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2020, 819: 152955.
- [13] Guo D F, Li M, Shi Y D, et al. Effect of strain rate on microstructure evolutions and mechanical properties of cryorolled Zr upon annealing[J]. *Materials Letters*, 2012, 66(1): 305-307.
- [14] Yang Z N, Xiao Y Y, Zhang F C, et al. Effect of cold rolling on microstructure and mechanical properties of pure Zr[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2012, 556: 728-733.
- [15] Yang Z N, Liu F C, Zhang F C, et al. Microstructural evolution and mechanical properties in Zr705 during the rolling process[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2012, 544: 54-58.
- [16] Guo D F, Li M, Shi Y D, et al. Simultaneously enhancing the ductility and strength of cryorolled Zr via tailoring dislocation configurations[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2012, 558: 611-615.
- [17] Zhou Y K, Jing R, Ma M Z, et al. Tensile strength of Zr-Ti binary alloy[J]. *Chinese Physics Letters*, 2013, 30(11): 136-138.
- [18] Wang L N, Shi Y D, Zhang Y L, et al. High tensile ductility and strength in a gradient structured Zr[J]. *Materials Letters*, 2018, 228: 500-503.
- [19] Dinda G P, Rösner H, Wilde G. Synthesis of bulk nanostructured Ni, Ti and Zr by repeated cold-rolling[J]. *Scripta Materialia*, 2005, 52(7): 577-582.
- [20] Wu X L, Tao N, Hong Y S, et al. Microstructure and evolution of mechanically-induced ultrafine grain in surface layer of Al-alloy subjected to USSP[J]. *Acta Materialia*, 2002, 50(8): 2075-2084.
- [21] Humphreys F J, Hatherly M. *Recrystallization and Related Annealing Phenomena*[M]. Pergamon: Pergamon Press, 2004: 11-65.
- [22] Wei W, Wei K X, Fan G J. A new constitutive equation for strain hardening and softening of fcc metals during severe plastic deformation[J]. *Acta Materialia*, 2008, 56(17): 4771-4779.
- [23] Shih M H, Yu C Y, Kao P W, et al. Microstructure and flow stress of copper deformed to large plastic strains[J]. *Scripta Mater*, 2001 (45): 793-799.
- [24] Kim J H, Park W S, Chun M S, et al. Effect of pre-straining on low-temperature mechanical behavior of AISI 304L[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2012, 543: 50-57.
- [25] Yu C Y, Sun P L, Kao P W, et al. Mechanical properties of submicron-grained aluminum[J]. *Scripta Materialia*, 2005, 52(5): 359-363.
- [26] Nes E, Pettersen T, Marthinsen K. On the mechanisms of work hardening and flow-stress saturation[J]. *Scripta Materialia*, 2000, 43(1): 55-62.

专利信息

一种适用于钛钨铌锆系低温钛合金的专用焊丝

申请号: CN202310269053.2

申请日: 2023-03-20

公开(公告)日: 2025-08-29

公开(公告)号: CN116460480B

申请(专利权)人: 西北有色金属研究院

摘要: 本发明公开了一种适用于钛钨铌锆系低温钛合金的专用焊丝, 由以下质量百分比的成分组成: W 1.0%~1.5%, Nb 0.5%~1.0%, Zr 12%~13%, Fe≤0.08%, O≤0.06%, 余量为 Ti 和不可避免的杂质。该专用焊丝通过降低钛钨铌锆系低温钛合金中 β 稳定元素 W、Nb 的含量, 并适当增加中性元素 Zr 的含量, 同时严格控制杂质元素 Fe、O 的含量, 从而在不降低焊接后熔敷金属塑性的基础上增加其强度, 保证焊接后的熔敷金属室温及低温下的强塑性匹配。该专用焊丝用于钛钨铌锆系低温钛合金焊接后得到的焊接结构具有良好的低温综合性能, 应用前景广阔。