

加工工艺对高品质阳极板用纯钛 卷带性能的影响

范晓杰*, 杨嘉晶, 卢金武, 王宁波, 师明杰, 张洪飞

(西部金属材料股份有限公司, 陕西 西安 710018)

摘 要:以低氧、低氢 OA 级海绵钛为原料, 采用 EB+VAR 双联熔炼工艺制备铸锭, 通过不同工艺路径轧制获得阳极板用纯钛卷带。利用表检仪、金相显微镜及万能力学试验机对卷带的表面质量、显微组织和力学性能进行系统表征。结果表明, 通过调整工艺路径可有效调控卷带的表面状态与力学性能。当采用两轧程工艺并结合 560 °C, (10+8) h 的罩式退火处理时, 所得钛卷带表面质量良好, 力学性能优异, 晶粒度达到 9 级以上, 满足钛阳极用卷带的技术要求。

关键词:海绵钛; 阳极板; 钛卷带; 晶粒度

中图分类号: TF823, TG146

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2026)03-0101-06

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2026.03.011

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



听语音
与作者互动
聊科研

Effect of processing technology on the properties of pure titanium coil for high-quality anode sheets

FAN Xiaojie*, YANG Jiajing, LU Jinwu, WANG Ningbo, SHI Mingjie, ZHANG Hongfei

(Western Metal Materials Co., Ltd., Xi'an, 710018, Shaanxi, China)

Abstract: This study utilized low-oxygen, low-hydrogen OA-grade sponge titanium as the raw material. The ingot was prepared via the EB + VAR dual melting process, and pure titanium coils for anode sheets were obtained through different processing routes. The surface quality, microstructure, and mechanical properties of the coils were systematically characterized using a surface inspection system, optical microscope, and universal mechanical testing machine. The results indicate that adjusting the processing route can effectively control the surface condition and mechanical properties of the coils. When employing a two rolling procedure combined with bell annealing at 560 °C × (10+8) h, the resulting titanium coils exhibited good surface quality and excellent mechanical properties, with a grain size rating reaching Grade 9 or higher, meeting the technical requirements for titanium anode coils.

Key words: sponge titanium; anode sheets; titanium coil; grain size

0 引言

钛阳极作为一种节能、高效的不溶性阳极材料, 具有尺寸稳定、工作电压低和使用寿命长等优点, 可替代传统石墨阳极, 经过六十余年的发展, 已广泛应用于电镀、有机合成、氯碱工业及阴极保护等领

域^[1-3]。钛属于过渡金属, 不仅具备良好的耐腐蚀性能, 还具有单向导电特性。作为阳极材料时, 钛能够承受较高的电流密度, 电极损耗速率低, 便于维护更换^[4-5]; 在电解过程中, 电极间距保持不变, 有助于维持槽电压的稳定性, 因此纯钛是理想的阳极基板材料。

收稿日期: 2025-11-14; 修回日期: 2025-12-19; 接受日期: 2025-12-29

作者简介: 范晓杰, 1988 年出生, 陕西宝鸡人, 工学硕士, 工程师, 主要从事钛、锆、镍及其合金板、带材的生产及工艺研究, E-mail: 513154651@qq.com。

目前,钛阳极的研究重点多集中于提升表面涂层的催化活性与稳定性。主流涂层体系为贵金属钌系与铱系氧化物 RuO_2 和 IrO_2 因催化活性高、阳离子呈同晶结构,易于形成稳定结合的氧化物涂层。近年来, MnO_2 、 PbO_2 、 SnO_2 等非贵金属氧化物涂层也逐渐受到关注^[6-8],并呈现出多元化发展趋势。作为贵金属涂层的载体,钛阳极基板的性能对涂层的制备工艺、使用性能及服役寿命具有重要影响。然而,针对钛阳极基材的研究仍相对缺乏,尤其是对其表面质量与晶粒度等关键参数的系统研究尚不充分,现有研究多聚焦于退火工艺对组织与性能的影响^[9-11]。

笔者以宽幅冷轧钛卷带为研究对象,系统设计并实施了不同轧制与退火工艺试验,重点分析工艺参数对钛阳极基材表面质量、力学性能及微观组织的影响规律,以期为高性能阳极板用钛材的开发提供理论依据与试验支持。

1 试验材料及方案

1.1 试验材料

试验采用同一批次 OA 级海绵钛为原料,并严格控制主元素的质量百分数,经色选处理后,通过电子束熔炼(EB)与真空自耗电弧熔炼(VAR)两联工艺制备铸锭。铸锭经锻造及表面铣削,制成尺寸为 $(200\pm 5)\text{mm} \times (1\,275\pm 5)\text{mm} \times L\text{mm}$ 的光面板坯。随后对板坯进行粗轧、热线酸洗,得到厚度为 $(3.8\pm 0.2)\text{mm}$ 的热轧白皮卷,作为冷轧母材。最终采用精密二十辊轧机将其冷轧至目标厚度。各试验铸锭的具体化学成分见表1。

表1 纯钛铸锭的化学成分

Table 1 Chemical compositions of pure titanium ingots %

Serial number	O	Fe	C	N	H
Nominal value	≤ 0.05	≤ 0.03	≤ 0.01	≤ 0.01	≤ 0.001
1 [#]	0.035	0.016	0.007	0.003	0.000 6
2 [#]	0.042	0.019	0.006	0.004	0.000 6
3 [#]	0.038	0.017	0.007	0.004	0.000 6
4 [#]	0.037	0.016	0.006	0.003	0.000 6

1.2 试验方案

将厚度为 3.8 mm 的白皮热卷分别通过两种冷轧工艺路径轧制至成品厚度 1.0 mm 的钛卷带:①一轧程工艺:来料 3.8 mm 热卷 → 冷轧至 1.0 mm → 脱脂 → 退火 → 精整,每轧程 11 道次,轧制变形总量 74%;②两轧程工艺:来料 3.8 mm 热卷 → 冷轧至 1.8 mm → 热洗 → 冷轧至 1.0 mm → 脱脂 → 退火 → 精整,第一轧程 5 道次+第二轧程 7 道次,轧制变形量为 53%+44%。

轧硬态钛卷带在罩式退火炉(残氧量 $\leq 50 \times 10^{-6}$,露点 $\leq -40\text{ }^\circ\text{C}$)中进行热处理。退火过程采用三段阶梯式升温程序,升温至预设温度后执行相应保温工艺,保温结束后随炉缓冷至 $100\text{ }^\circ\text{C}$ 以下出炉空冷。将退火并精整矫平后的卷带于头尾成品段截取 $300\text{ mm} \times 300\text{ mm}$ 试样,并机加工制成若干室温拉伸标准试样。具体工艺流程如图1所示。采用表检仪对卷带表面进行检测记录,采用 CS-600、TC-600、RH-600 碳氧氮分析仪分别按照 GB/T 4698.7-2011、GB/T 4698.14-2011 进行氧、氮、碳元素含量测定;拉伸性能在 UTMS205 万能力学试验机上按照 ASTM B265-2015 标准测定,晶粒度评定在 Ax-over 40MAT 金相显微镜上按照 GB/T 6394-2017 标准进行。

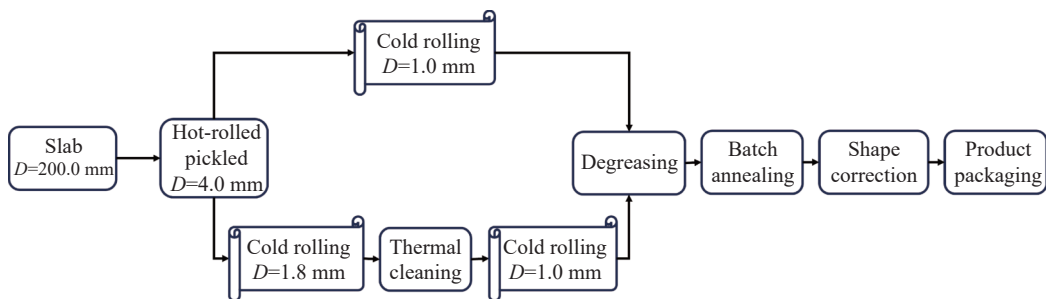


图1 轧制工艺流程

Fig. 1 Rolling process flow diagram

2 结果与分析

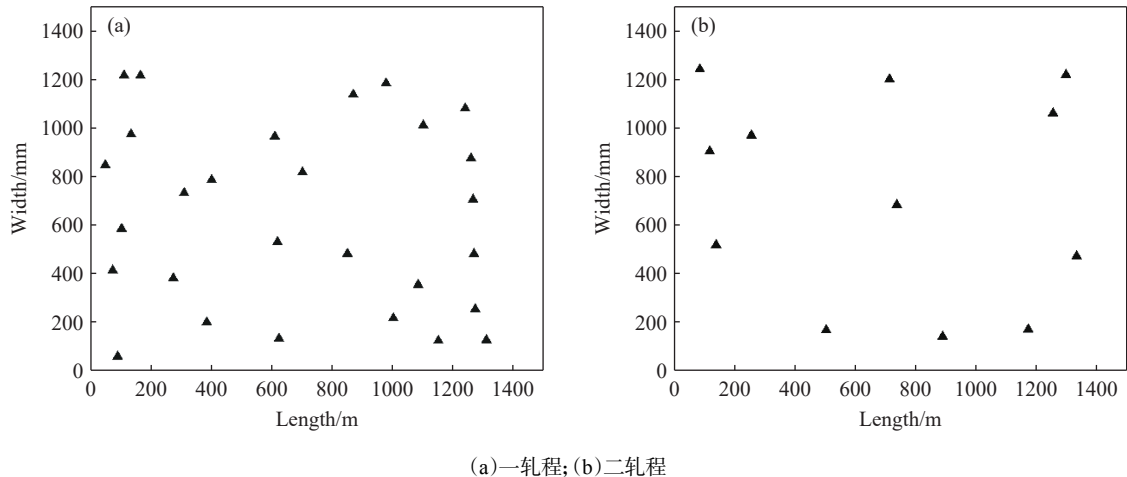
2.1 不同轧制工艺对卷带的影响

纯钛具有耐蚀性好、密度低及比强度高等特点,

其晶体结构为密排六方,表现出明显的各向异性、较低的弹性模量以及较大的轧制回弹^[12-13]。基于上述特性,通过不同轧程工艺均成功制备出厚度

为 1.0 mm 的宽幅钛卷带,但其表面质量存在显著差异,其缺陷分布如图 2 所示。统计结果表明,一轧程工艺所得卷带的表面缺陷率高达 10.17%,其主要

缺陷类型包括起皮、线鳞与黑斑;而采用两轧程工艺制备的卷带,其表面缺陷率显著降低至 3.2%,缺陷形态以小尺寸、短线状线鳞为主。



(a)一轧程;(b)二轧程

图 2 不同轧程工艺表检缺陷分布

Fig. 2 Surface defect maps for different rolling procedures

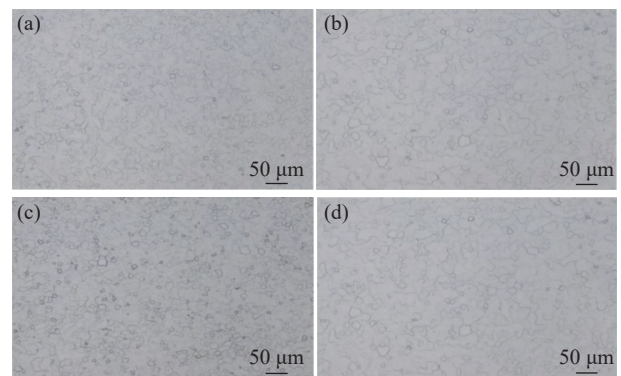
通过不同轧程工艺均成功制备出厚度为 1.0 mm 的宽幅钛卷带,但其表面质量存在显著差异,其缺陷分布如图 2 所示。统计结果表明,一轧程工艺所得卷带的表面缺陷率高达 10.17%,其主要缺陷类型包括起皮、线鳞与黑斑;而采用两轧程工艺制备的卷带表面的缺陷率显著降低至 3.2%,缺陷形态以小尺寸、短线状线鳞为主。

分析认为,上述缺陷主要源于原材料及板坯制备过程中所引入的初始不均匀性。在采用两轧程工艺时,第一道冷轧后的中间坯料表面会与空气中的氧反应,形成一层薄氧化层^[14]。该氧化层在后续轧制过程中可能因压延效应而被暴露于带卷表面,成为潜在的缺陷源。然而,在两轧程工艺路径中,中间坯料需经过热线酸洗工段,该工序整合了退火、抛丸、破鳞与酸洗等多个子工序。退火处理有助于释放轧制应力、均匀化组织;抛丸与破鳞工序可有效破碎并去除表面氧化皮;随后的酸洗工序则进一步清除微观区域的污染层与轻微线鳞。此外,在最终成品轧制阶段,毛化轧辊的使用亦对带材表面具有一定的“修整”作用,通过局部微塑性变形填补或弱化微小缺陷,从而显著改善表面状态。

因此,从表面质量控制的角度出发,为满足高性能钛阳极基板对表面均匀性及涂层结合力的严格要求,建议在宽幅钛卷带的制备中优先选用两轧程轧制工艺。该工艺通过多次道次变形与中间热处理及表面处理的协同作用,有效降低了由原料遗传及轧程

引入的缺陷比例,更适用于对表面品质具有较高要求的阳极应用场景。

在相同的退火工艺(560 °C, (10+8) h)下,不同轧程工艺所制备钛卷带的显微组织如图 3 所示。观察可知,两种工艺均促使材料发生完全再结晶,形成等轴状再结晶组织,晶粒度均达到 9 级及以上。具体而言,一轧程工艺所制备卷带的头尾部晶粒度分别为 9 级与 10 级;而两轧程工艺所得头尾卷晶粒度均匀度较高,均为 10 级。



(a)一轧程卷头部;(b)一轧程卷尾部;(c)二轧程卷头部;(d)二轧程卷尾部

图 3 不同轧程的钛卷带在相同退火工艺下的金相组织

Fig. 3 Microstructure of titanium coils from different rolling procedures under the same annealing process

分析认为,晶粒尺寸及其均匀性主要受轧制路径及道次变形量的影响。轧程数量增多、道次变形量适度减小时,更有利于实现晶粒的均匀破碎与后

续再结晶行为。在两轧程工艺中,第一轧程采用 52.6% 的大变形量,有效破碎原始粗大晶粒;第二轧程则采用 44.4% 的变形量,通过多道次、小压下率的轧制策略,进一步促进晶粒均匀细化与组织均质化。这种分阶段、差异化的变形路径为后续再结晶过程提供了均匀的形变储能与晶粒形核条件,从而在退火后获得更高尺寸均匀性的细晶组织。

综上所述,在满足钛阳极板对基材晶粒度(≥ 9 级)及力学性能要求的前提下,两轧程工艺因其更优的晶粒控制能力更适合用于高性能钛卷带的制备。

图 4 展示了不同轧程钛卷带在相同退火工艺(560 °C, (10+8) h)处理后的力学性能对比。结果表明,两种工艺所得卷带的力学性能总体相近,但仍存在一定差异。具体而言,一轧程工艺制备的卷

带在横向上表现出略高的强度,其抗拉强度较两轧程高约 10 MPa,屈服强度高出约 12 MPa;而在塑性方面,两轧程工艺的延伸率则优于一轧程,高出约 5%。

结合图 3 中的金相组织分析可知,上述性能差异主要源于不同轧制路径对微观组织演变的影响。两轧程工艺由于轧程较多、道次变形量相对较小,轧制过程中晶粒破碎更为均匀,储存的畸变能较低。在后续退火过程中,再结晶形核与长大行为更为协调,最终形成尺寸更为均匀的等轴晶组织。这种均匀的微观结构有助于提高材料的塑性变形能力,因此两轧程试样表现出更优的延伸率,同时强度略有降低^[15]。该结果说明,通过调控轧制工艺可在较宽范围内对钛卷带的力学性能进行适度调整。

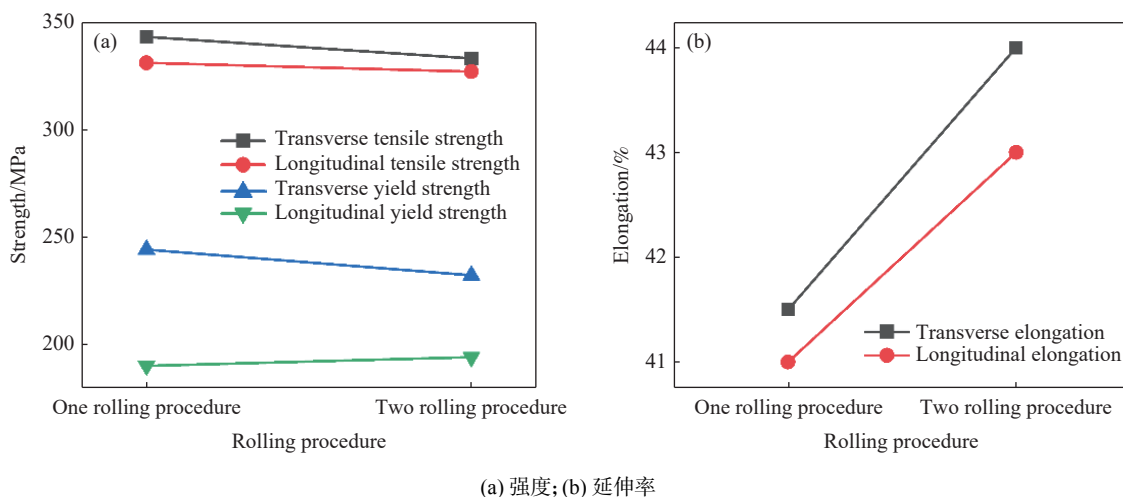


图 4 不同轧程的钛带在相同退火工艺下的力学性能

Fig. 4 Mechanical properties of titanium strips from different rolling procedures under the same annealing process

2.2 不同退火制度对卷带的影响

在确定轧程工艺的基础上探索退火温度对卷带的影响。图 5、6 分别展示了两轧程工艺轧制钛卷带在不同退火工艺下的力学性能与金相组织演变规律。从图 5 可以看出,随着退火温度的升高,材料的强度指标(抗拉强度、屈服强度)呈现逐渐下降趋势,而塑性指标(延伸率)则相应提高。具体而言,横向试样的抗拉强度与屈服强度分别稳定在 340 MPa 与 260 MPa 左右,纵向试样的抗拉强度与屈服强度分别约为 320 MPa 与 190 MPa,所有数值均满足国家标准 GB/T 3621-2022 中对工业纯钛带材的技术要求。从图 6 所示的显微组织可以看出,随着退火温度的升高,钛卷带的晶粒尺寸逐渐增大,组织形态由轧制态纤维状逐渐演变

为均匀等轴状。在 560 °C 退火条件下,材料已完成完全再结晶,晶粒度达到 10 级;随着温度进一步升高至 580 °C 与 600 °C,晶粒明显粗化,晶粒度分别约为 8 级与 6.5 级。这一结果符合金属再结晶与晶粒长大的一般规律,即退火温度越高,原子扩散能力越强,晶界迁移速率加快,导致晶粒显著长大。

综合分析表明,不同轧程所对应的变形程度显著影响钛带在冷轧过程中的微观组织演化。在轧制初期,晶粒内部孪晶数量增多,形变孪生相互交割,促使原始晶粒初步破碎;随着变形量的进一步增加,滑移系逐步启动,塑性变形机制由孪生主导过渡为滑移主导,晶粒沿轧制方向被拉长,晶界逐渐模糊,最终形成典型的冷轧纤维组织。在后续退火过程

中,钛带发生回复、再结晶与晶粒长大三个阶段。文献[16]指出,纯钛在450℃左右升温过程中即已

开始发生晶粒长大现象,因此退火温度的选择对最终组织形态具有决定性影响。

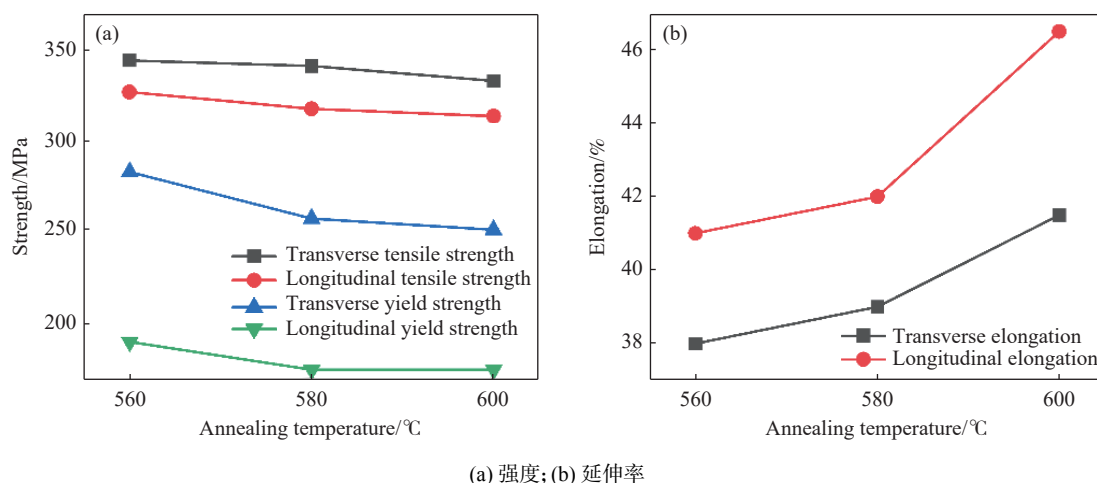
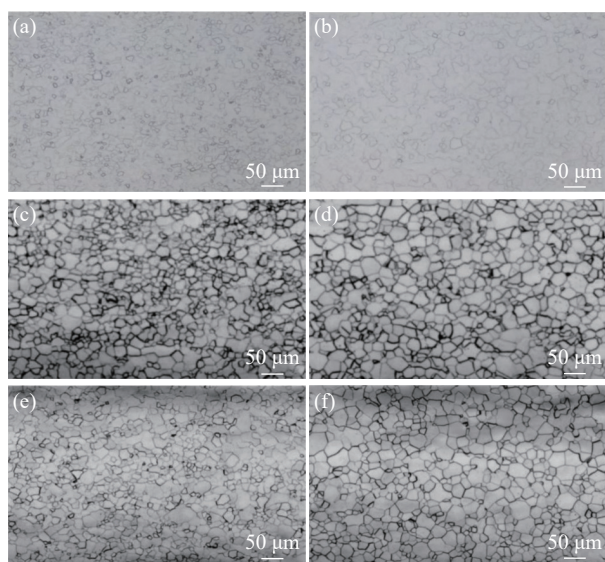


图5 相同轧程的钛带在不同退火工艺下的力学性能

Fig. 5 Mechanical properties of titanium strips from the same rolling procedure under different annealing processes



560℃:(a)头部,(b)尾部;580℃:(c)头部,(d)尾部;
600℃:(e)头部,(f)尾部

图6 相同轧程的钛带在不同退火工艺下的金相组织

Fig. 6 Microstructure of titanium strips from the same rolling procedure under different annealing processes

综合力学性能与显微组织要求,560℃×(10+8)h的罩式退火工艺能够在保证材料强度与塑性的同时,

获得均匀细小的等轴晶组织(晶粒度≥9级),满足钛阳极板对基材综合性能的需求。该工艺窗口的确立为高性能钛阳极用宽幅卷带的工业化生产提供了重要依据。

3 结论

1)基于对钛材轧制变形特性的系统研究,成功设计并制备出厚度为1.0mm的宽幅冷轧钛带。通过对比不同轧程工艺的组织与性能,确定两轧程轧制为最优工艺路线,所制备的钛卷带表面缺陷率低至约3%,具备优良的表面质量。

2)在罩式退火过程中,随着退火温度由560℃升高至580、600℃,宽幅冷轧钛带均形成完全再结晶的等轴组织,材料强度逐渐下降,延伸率相应提高,同时晶粒度等级逐步降低,表明再结晶与晶粒长大过程受退火温度显著调控。

3)综合组织与性能分析表明,采用560℃,(10+8)h的退火工艺时,所制备的1.0mm宽幅冷轧钛卷带在力学性能与晶粒度方面均满足钛阳极板的材料要求,为该类高端应用提供了可靠的工艺依据与材料基础。

参考文献

- [1] PAN H B. Current status of development and applications of Ti anodes in China[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 1999, 28(6): 1-5.
(潘会波. 我国钛阳极开发应用现状及水平[J]. 稀有金属材料与工程, 1999, 28(6): 1-5.)
- [2] ZHANG Z X. Application of titanium coated electrode for forty years[J]. Electroplating & Finishing, 2007, 26(1): 50-52.

- (张招贤. 涂层电极的40年[J]. 电镀与涂饰, 2007, 26(1): 50-52.)
- [3] ZHANG Z X. Titanium-based coated electrode[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2014.
(张招贤. 涂层钛电极[M]. 北京: 冶金工业出版社. 2014.)
- [4] HUANG Y C. Advances in precious metal oxide-coated titanium anodes[J]. Corrosion & Protection, 2012, 33(12): 1108-1113.
(黄永昌. 贵金属氧化物涂层钛阳极的进展[J]. 腐蚀与防护, 2012, 33(12): 1108-1113.)
- [5] LU Y H, WANG W, LU D K, *et al.* Research on dimensionally stable anode used in electrowinning[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2020(11): 18-24.
(路雨禾, 王伟, 路殿坤, 等. 电解沉积用尺寸稳定型钛阳极的研究现状[J]. 有色金属 (冶炼部分), 2020(11): 18-24.)
- [6] ZHANG J Y, ZHANG J L, BAI Z B, *et al.* Research status of titanium anode coating for electrolytic copper foil[J]. Plating and Finishing, 2023, 45(12): 95-102.
(张锦园, 张菁丽, 白忠波, 等. 电解铜箔用钛阳极涂层的研究现状[J]. 电镀与精饰, 2023, 45(12): 95-102.)
- [7] ZHANG L, CHEN H M, WEI Z D. Recent advance in transition metal oxide-based materials for oxygen evolution reaction electrocatalysts[J]. CIESC Journal, 2020, 71(9): 3876-3904.
(张伶, 陈红梅, 魏子栋. 过渡金属氧化物催化析氧反应研究进展[J]. 化工学报, 2020, 71(9): 3876-3904.)
- [8] ZHUANG X D, LIN L, TIAN L, *et al.* Preparation and performance of coated titanium anodes for zinc electrodeposition[J]. Mining and Metallurgy, 2024, 33(5): 766-773.
(庄晓东, 林琳, 田林, 等. 锌电积用涂层钛阳极制备及性能[J]. 矿冶, 2024, 33(5): 766-773.)
- [9] ZHANG P P, WEI D D, NIU W Y, *et al.* Effect on microstructure and properties of annealing process for titanium anode with 1.0 mm TA1 titanium coil[J]. Metal World, 2022(4): 92-94.
(张平平, 魏东东, 牛文宇, 等. 退火工艺对钛阳极用1.0 mm TA1钛卷组织和性能的影响[J]. 金属世界, 2022(4): 92-94.)
- [10] WANG W, ZHAO W G, QU J B. Effect of heat treatment on microstructure and mechanical properties of 2.25Cr-1Mo steel[J]. Steel Research International, 2013, 84(2): 178-183.
- [11] JIANG X F, XIANG S H, CHEN N L, *et al.* Effect of annealing processes on recrystallization texture of cold rolling pure titanium strip[J]. Material & Heat Treatment, 2011(18): 167-169.
(江先锋, 向顺华, 陈乃录, 等. 退火工艺对冷轧纯钛带再结晶组织的影响[J]. 材料热处理技术, 2011(18): 167-169.)
- [12] ZHANG P P, LI J K, NIU W Y, *et al.* Study on the anisotropy of cold-rolled pure titanium strip[J]. Technology Innovation and Application, 2022(25): 53-56.
(张平平, 李建康, 牛文宇, 等. 冷轧纯钛带各向异性研究[J]. 科技创新与应用, 2022(25): 53-56.)
- [13] YU S L, ZHANG X J, KONG B, *et al.* Effect of annealing process on mechanical anisotropy of cold rolled commercial pure titanium coil[J]. Heat Treatment of Metals, 2022(47): 82-87.
(余世伦, 张孝军, 孔玢, 等. 退火工艺对冷轧工业纯钛带卷各向异性的影响[J]. 金属热处理, 2022(47): 82-87.)
- [14] ZHANG S H, LU J W, FAN X J, *et al.* Study on surface microcracks in pure titanium foil[J]. Hunan Nonferrous Metals, 2023, 39(2): 50-53.
(张少辉, 卢金武, 范晓杰, 等. 纯钛箔材表面微裂纹研究[J]. 湖南有色金属, 2023, 39(2): 50-53.)
- [15] KRIHANA C S, SRINATH J, ABHAY K J. Effect of heat treatment on microstructure and mechanical properties of 12Cr-10Ni-0.25Ti-0.7Mo stainless steel[J]. Metallography, Microstructure, and Analysis, 2013, 4(2): 234-241.
- [16] WANG Q B, LI X J, SHEN Y T, *et al.* Research on the process of preventing the Titanium coil annealing bonding[J]. Southern Metals, 2015(6): 10-12.
(王勤波, 李晓军, 沈彦婷, 等. 钛带卷退火预防粘结工艺研究[J]. 南方金属, 2015(6): 10-12.)

编辑 邓淑惠