

退火温度对 Ti-0.3Mo-0.8Ni 钛合金板材组织和性能影响

陈 容

(攀钢集团研究院有限公司, 四川攀研检测技术有限公司, 四川 攀枝花 617000)

摘 要:研究了 6 mm 厚 Ti-0.3Mo-0.8Ni 钛合金板材不同退火温度对组织和力学性能的影响。结果表明, 600 ~ 700 °C 时 α 相主要发生回复再结晶过程, 同时沿晶界形成链状 Ti_2Ni 颗粒, 屈服强度、抗拉强度逐渐降低, 延伸率先增加后减少, 650 °C 时, 延伸率达到最大值 22.5%, 随着颗粒物的增加显著降低其力学性能; 750 ~ 850 °C 时 α 相由部分再结晶组织转变为完全再结晶组织, β 转变组织由条状转变为块状, 屈服强度、抗拉强度、断后伸长率均逐渐降低, 850 °C 时大幅下降至最低值, 远低于标准要求; 适用于 6 mm 厚 Ti-0.3Mo-0.8Ni 钛合金板材退火温度范围是 600 ~ 650 °C。

关键词: Ti-0.3Mo-0.8Ni; 退火温度; Ti_2Ni ; β 转变; 延伸率

中图分类号: TF823

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2021)04-0062-06

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2021.04.011

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 annealing temperature on microstructure and properties of Ti-0.3Mo-0.8Ni titanium alloy sheet

Chen Rong

(Pangang Group Research Institute Co., Ltd., Sichuan Panyan Testing Technology Co., Ltd., Panzhihua 617000, Sichuan, China)

Abstract: The effect of annealing temperature on microstructure and properties of 6 mm Ti-0.3Mo-0.8Ni titanium sheet was studied. The results show that at 600 ~ 700 °C, the recrystallization of α phase occurs and chain-like Ti_2Ni particles are formed along the grain boundary, accompanying a decrease in the yield strength and tensile strength, with the elongation increasing first and then decreasing. A maximum 22.5% of the elongation can be obtained at 650 °C, and the mechanical properties decrease significantly with the increase in amount of the particles. At 750 ~ 850 °C, α phase transforms from partial recrystallization structure to complete recrystallization structure, and the β phase changes from long strip to block structure, with the yield strength, tensile strength and elongation after fracture decreased gradually. And the worst mechanical properties far below the standard are obtained at 850 °C. The annealing temperature suitable for 6 mm Ti-0.3Mo-0.8Ni titanium sheet was determined at 600 ~ 650 °C.

Key words: Ti-0.3Mo-0.8Ni, annealing temperature, Ti_2Ni , β transformation, elongation

0 引言

钛合金具有优异的综合性能, 已广泛应用于航

空、航天、海洋工程等领域。Ti-0.3Mo-0.8Ni 为近 α 相钛合金, 国内牌号 TA10, 具有良好的工艺塑性和焊接性能, 且在高温、高浓度氯化物中有较好的

收稿日期: 2021-01-26

作者简介: 陈容 (1987-), 女, 四川攀枝花人, 工程师, 主要从事金属材料微观组织及性能研究, E-mail: 76274419@qq.com。

抗腐蚀能力,可替代成本较高的 Ti-0.2Pd 合金,其制品在化工行业中得到广泛应用^[1]。

目前部分学者对 TA10 钛合金热处理后组织和性能做出了较多研究,其中葛伟等^[2]研究了 3 mm 厚 TA10 钛合金热轧板材的热处理工艺;程帅朋等^[3]研究了两墩两拔以后热处理对 TA10 钛合金组织和性能的影响;陶欢等^[4]研究了固溶时效处理对 TA10 钛合金组织和性能的影响,但现有文献均未对 TA10 板材组织中 Ti₂Ni 颗粒及 β 转变进行阐述,笔者对 6 mm 厚板材进行退火处理,研究不同温度下组织对性能的影响。

1 试验材料和方法

1.1 试验材料

采用真空冶炼钛合金铸锭,经高温锻造低温轧制形成 6 mm 厚 TA10 板材,组织为变形的纤维状组织,如图 1 所示,其主要化学成分(%): 0.24 Mo, 0.62 Ni, 0.03 Fe, 0.01 C, 其余为 Ti, 符合 GB/T 3620.1—2007《钛及钛合金牌号和化学成分》要求。

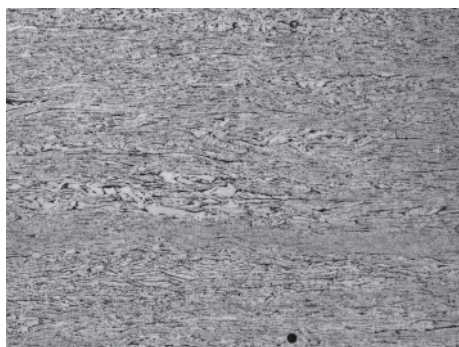


图 1 原始板材组织
Fig. 1 Microstructure of initial sheet

1.2 试验方法

采用箱式电阻炉进行退火处理,TA10 为近 α 型钛合金,退火温度一般选择在相变点以下 120 ~ 200 °C,选取退火温度为 600、650、700、750、800、850 °C,保温时间为 1 h。

采用 AXIOVERT A1m 显微镜对显微组织进行观察,使用 Kroll 试剂(1 mL HF + 3 mL HNO₃ + 96 mL H₂O)进行腐蚀,腐蚀时间 10 ~ 15 s;采用 ZEISS sigma500 扫描电镜观察显微组织和拉伸断口形貌,AZEC 能谱仪进行成分分析;采用 INNOVATEST FALCON 500 显微硬度计进行显微硬度测试,基体组织加载载荷为 500 g,第二相加载载荷为 10 g;采

用 WEW-600 万能试验机在室温下进行试样拉伸试验,拉伸速率采用应变速率为 0.45 mm/min;采用 Empyrean X 射线衍射分析组织物相,射线管为 CuK α ,电压为 40 kV,管电流 40 mA。

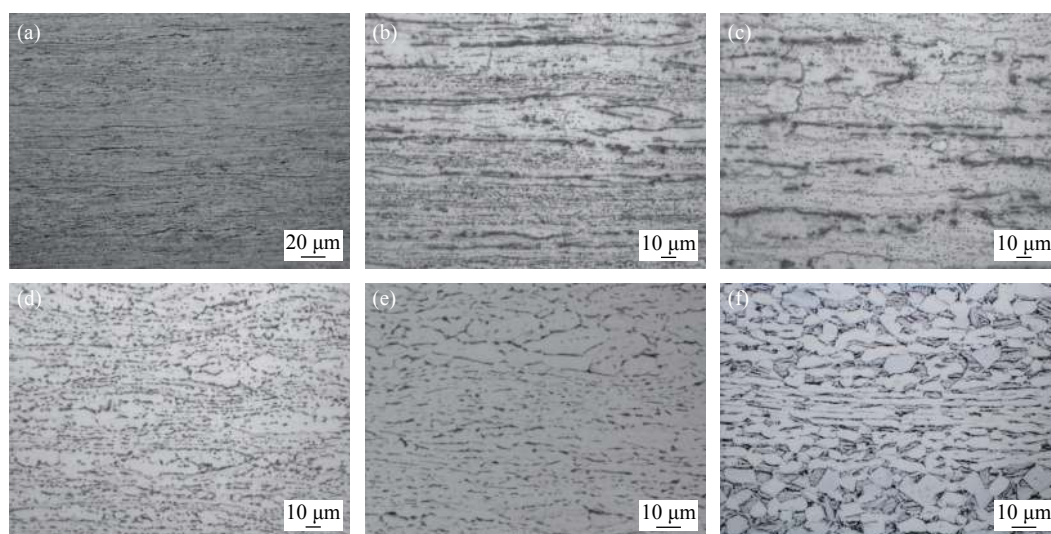
2 结果与分析

2.1 组织分析

图 2 为不同退火温度下显微组织照片,600 °C 时组织为深色条带与白色条带交替分布的纤维组织,该温度下退火处于回复阶段,随着原子迁移扩散,点缺陷、位错发生运动消失,组织无明显变化;650 °C 时拉长的晶粒发生了回复、再结晶,但是由于退火温度较低,再结晶晶粒才刚形成^[5],且细小的深色颗粒弥散分布于基体上,晶界处可见颗粒物的聚集及长大;700 °C 时随着退火温度的升高,新品核进一步形成,已形成的晶粒自发稳定的生长,形成更多更大的再结晶晶粒,弥散分布的深色颗粒物减少,但沿晶分布的颗粒物进一步增加;750 °C 时退火温度的进一步提高,晶界处可见条状 β 转变组织+极微量深色颗粒;800 °C 时再结晶晶粒继续长大,可见 α 相+条状 β 转变组织,深色颗粒物已完全消失;850 °C 时组织主要有等轴的初生 α 相+ β 转变组织,但依然可见带状分布的条状 α 相组织,说明 TA10 原始板材组织不均匀,该温度下退火无法完全等轴化, β 转变组织所占比例及尺寸明显增大,且组织内可见深色的针状 α + β 相。

2.2 能谱成分分析

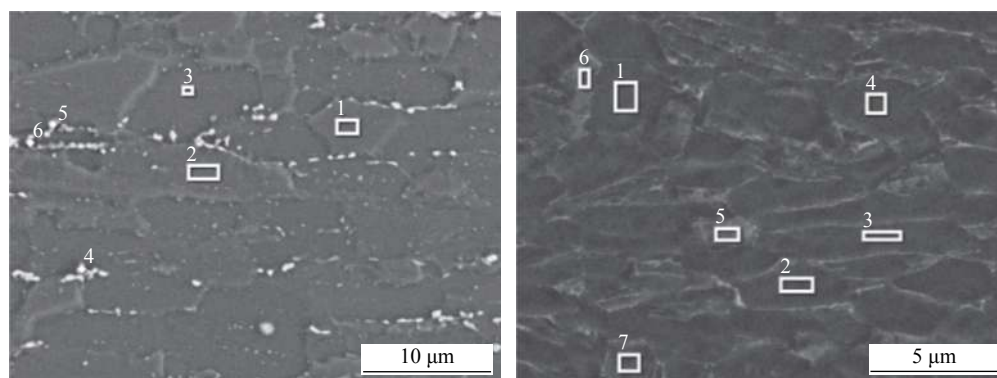
图 3 可见,两种组织差异明显,700 °C 白色颗粒物主要在晶界呈链状分布,850 °C 时 β 转变组织呈条块状分布。表 1 为能谱分析结果,由表 1 可知,Ni、Mo 元素在白色颗粒物中含量明显高于基体,且 Ni 元素在 α 相中平均含量为 0.3%,白色颗粒中 Ni 最高可达 23%,可见白色颗粒为 Ni 含量较高的金属间化合物;850 °C 时 Mo、Ni 元素在 β 转变组织中含量同样高于基体,但 Mo 为体心立方结构, α -Ti 为密排六方结构,不同的晶格类型组员间的溶解度只能是有限的,但随着温度的升高, β 相区的形成,Mo 可无限固溶于同为体心立方结构的 β -Ti 中,故 850 °C 时 Mo 在 α 相中含量降低;Ni 为共析型 β 稳定元素,具有较强稳定 β -Ti 的能力,Ni 高温扩散后不能无限固溶于 β -Ti 中,在随后的冷却过程中形成细小弥散的中间相颗粒,因此 β 转变组织中还有高于化学配比的镍元素^[6]。



(a) 600 °C; (b) 650 °C; (c) 700 °C; (d) 750 °C; (e) 800 °C; (f) 850 °C

图2 不同温度退火后显微组织

Fig. 2 Microstructure of samples at different annealing temperatures



(左)700 °C; (右)850 °C

图3 电镜组织形貌及能谱位置

Fig. 3 SEM images and EDS positions of samples

表1 能谱分析结果

Table 1 Chemical compositions of the selected positions in Fig. 3

%

退火温度/°C	位置	Ti	Ni	Mo	Fe
700	基体	99.30	0.29	0.41	0
	白色颗粒	77.53	21.76	0.71	0.5
850	基体	99.67	0.19	0.14	0
	β转变组织	97.08	2.07	0.75	0.1

2.3 X衍射分析

图4为700 °C退火试样衍射谱,将测定的x射线谱与标准卡对照,可发现在41.42°, 38.95°, 45.28°处有Ti₂Ni化合物特征峰存在,与电镜能谱测定结果高Ni颗粒物吻合,由钛-镍二元合金相图^[7-8]可知,

当镍质量百分比为5%,温度为765 °C时可发生平衡共析转变,即 $\beta \rightleftharpoons \alpha + \text{Ti}_2\text{Ni}$, 700 °C以下退火不可能发生共析转变成Ti₂Ni颗粒,因此,TA10原始板材在经过较大压下变形后形成纤维状α组织+破碎的Ti₂Ni颗粒,在随后退火过程中Ti₂Ni在晶界聚集

长大, 形成链状颗粒。

2.4 显微硬度分析

对采用不同退火工艺的 TA10 板材进行显微硬度测定, 结果见表 2。600 ~ 700 ℃ 时组织发生回复、部分再结晶, 加工硬化消失, 硬度降低, 700 ~ 800 ℃ 时, 合金元素在基体中的溶解度增大, 基体硬度 (HV_{0.5}) 增加, 表现为随着退火温度的增加, 硬度值先降低后增加; 但 850 ℃ 硬度值明显降低, 达到 142; β 转变组织硬度 (HV_{0.01}) 均较高, 800 ℃ 为 207, 850 ℃ 为 217, 随着温度的升高, TA10 主要合金元素 MO、Ni 向 β 转变区域扩散、偏聚, 在随后的冷却过程中形成硬度较高的 β 转变组织。

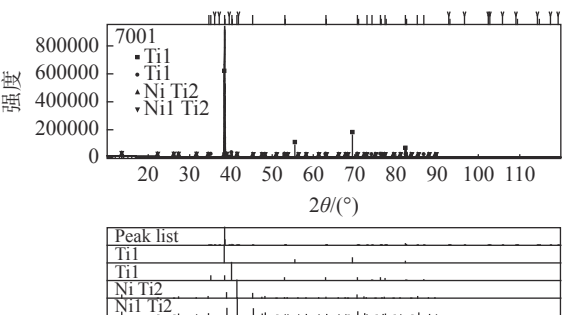


图 4 试样 XRD 图谱
Fig. 4 XRD pattern of the sample

表 2 试样显微硬度结果
Table 2 Hardness of the samples

试样温度/℃	硬度(HV _{0.5})	β转变组织硬度(HV _{0.01})
600	160	
650	157	
700	153	
750	160	
800	161	207
850	142	217

2.5 拉伸性能分析

不同温度退火处理后 TA10 板材的力学性能见表 3, 对比可以发现, 不同温度的退火处理, 试样力学性能差异较大, 在 600 ~ 700 ℃ 范围内, 随着退火温度的升高, 材料屈服强度、抗拉强度逐渐降低, 伸长率先增加后降低, 该温度范围内主要发生回复、再结晶过程, 延伸率应该随着强度的降低逐渐增加, 但 700 ℃ 沿晶分布的脆性 Ti₂Ni 颗粒物达到最大值, 拉应力作用下颗粒物周围易形成应力集中, 降低了基体间结合力, 使延伸率下降, 且 650 ℃ 时达到最大值 22.5%, 故《国内外 Ti-Mo-Ni 合金带材差异分

析》^[8]一文中指出国内 Ti-0.3Mo-0.8Ni 板材退火温度为 620 ℃; 在 750 ~ 850 ℃ 温度范围内, 随着退火温度的升高, 材料屈服强度、抗拉强度、延伸率均逐渐降低, 且在 850 ℃ 时大幅下降达到最低值, 远低于标准要求, β 转变组织对材料拉伸性能产生较大影响, 由硬度测试可知 β 转变组织与基体硬度差异较大, 尤其 850 ℃ 时两相硬度 (HV) 差距达到 75, 在拉应力作用两相组织不同同步变形, 硬度较大的区域首先开裂形成脆性断裂。

表 3 力学性能结果
Table 3 The mechanical properties of the samples

退火温度/℃	R _{p0.2} /MPa	R _m /MPa	A/%
600	512.0	547.1	18.0
650	438.2	500.1	22.5
700	379.1	490.0	17.5
750	412.8	499.3	21.0
800	398.9	495.2	17.5
850	229.6	388.8	12.0

2.6 断口分析

图 5 为各退火温度下拉伸断口形貌, 650 ~ 750 ℃ 时断口可见明显条带分布的撕裂棱, 650 ℃ 时断口撕裂棱较深且韧窝大小均匀; 700 ℃ 时断口时可见粗大的韧窝及少量解理刻面, 且韧窝内可见球形颗粒物, 图 6 的能谱成分显示镍含量较高, 为硬脆的 Ti₂Ni 金属间化合物, 尺寸较大的第二相颗粒作为韧窝的核形成显微空穴, 当显微空穴长大到一定尺寸后, 较小的第二相离子将形成显微空洞并随后长大, 与先形成的显微空穴在长大过程中发生联结, 产生了尺寸较大的韧窝形貌^[9], 显著降低材料性能; 750 ℃ 时撕裂棱及韧窝均较浅, 800 ℃ 时断口上无明显条带状撕裂棱, 韧窝较小且光滑圆润; 但 850 ℃ 时断口可见明显解理台阶及平整的片状撕裂断口, 为明显脆性断裂特征, 随着 β 转变组织的形成及长大, 材料由韧性断裂转变为脆性断裂。

2.7 分析与讨论

TA10 钛合金板材在前期轧制后, 获得了破碎的纤维状变形组织, 通过不同温度的退火处理, 变形组织发生回复、再结晶和相转变, 形成不同的组织类型, 力学性能也随着发生较大变化。随着退火温度的提高, 初生 α 相从变形组织中形核并长大, 温度低于 700 ℃ 时, 组织主要以 α 相的回复再结晶及

Ti_2Ni 颗粒的聚集长大为主, Ti_2Ni 为硬脆的金属间化合物, 当 Ti_2Ni 沿晶界呈链状分布时能显著降低其延伸率, 但颗粒对强度的影响不能抵消退火过程中位错、应力的消失引起的强度变化, 因此总体依然表现为抗拉强度、屈服强度逐渐降低; 750 °C 以后 α 相再结晶过程进一步完成, 同时 β 转变组织形成, 随着退火温度的升高, β 转变组织大小及形态

均发生较大改变, 由 800 °C 时的条状转变为 850 °C 时的块状组织形貌, 且 850 °C 时 β 转变组织中可见针状次生 α 相及 β 相, 显微硬度逐渐升高, 随着退火温度的升高, Mo、Ni 等元素在 β 转变区进一步扩散、富集, 并在随后的冷却过程中固溶、转变, 形成了与基体硬度差异较大的 β 转变组织, 因此材料的力学性能得到显著降低。

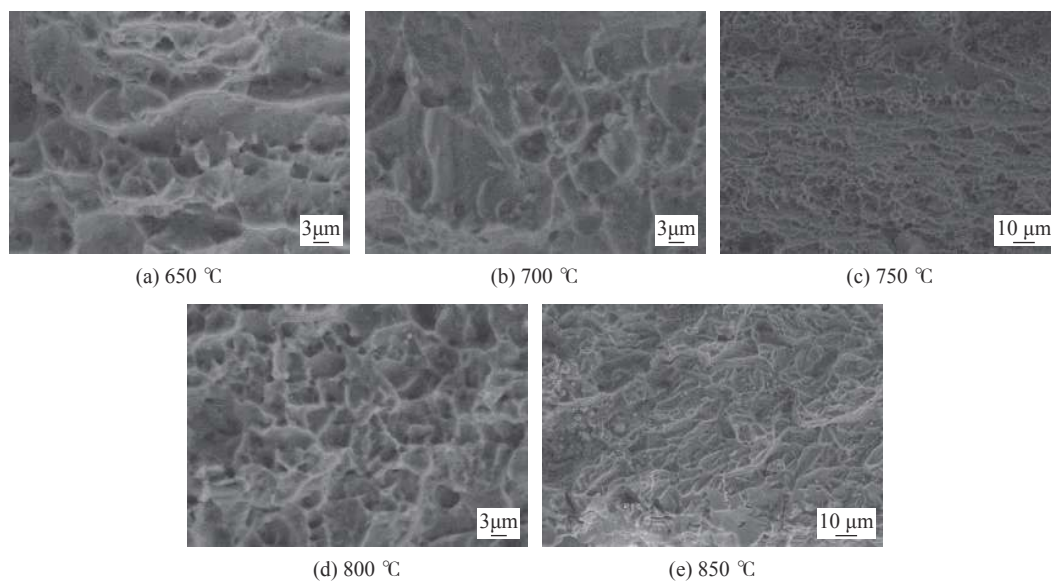


图 5 拉伸断口形貌

Fig. 5 Morphologies of tensile fracture

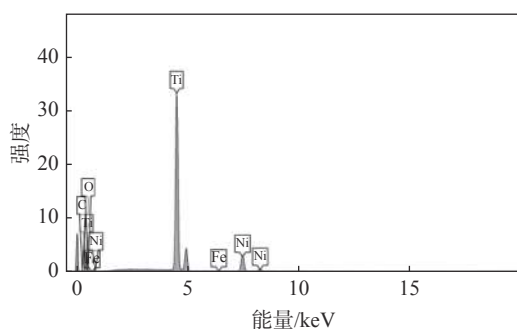


图 6 700 °C 韧窝内颗粒物能谱

Fig. 6 EDS of particles in dimples at 700 °C

3 结论

1) 6 mm 厚的 TA10 板材退火温度为 600 ~ 700 °C 时, α 相主要发生回复再结晶过程, 同时沿晶界形成

链状 Ti_2Ni 颗粒, 750 ~ 850 °C 时 α 相由部分再结晶组织转变为完全再结晶组织, β 转变组织逐渐长大并由条状转变为块状。

2) 6 mm 厚的 TA10 板材退火温度为 600 ~ 700 °C 时, 随着退火温度升高, 屈服强度、抗拉强度逐渐降低, 延伸率先减少后增加, 650 °C 时达到最大值 22.5%; 750 ~ 850 °C 时屈服强度、抗拉强度、延伸率均逐渐降低, 并在 850 °C 大幅下降至最低值, 适用于 6 mm 厚 Ti-0.3Mo-0.8Ni 钛合金板材退火温度范围是 600 ~ 650 °C。

3) Ti_2Ni 颗粒及 β 转变组织对材料力学性能有显著影响, 延伸率随着沿晶分布的 Ti_2Ni 颗粒物的增加而降低; 屈服强度、抗拉强度、延伸率均随着 β 转变组织的长大而降低。

参考文献

- [1] Su Juanhua, Shao Peng, Ren Fengzhang. Effect of forging temperature on microstructure and mechanical properties of TA10 titanium alloy[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2017, 38(4): 60-66.

- (苏娟华, 邵鹏, 任风章. 锻造温度对TA10钛合金组织和性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2017, 38(4): 60-66.)
- [2] Ge Wei, Deng Xingjia, Ding Chuncong, *et al.* Study on heat treatment system of TA10 alloy sheet[J]. Titanium Industry Progress, 2015, 32(4): 25-28.
(葛伟, 邓宁嘉, 丁春聪, 等. TA10钛合金板材热处理工艺研究[J]. 钛工业进展, 2015, 32(4): 25-28.)
- [3] Cheng Shuaipeng, Su Juanhua, Ren Fengzhang. Effect of heat treatment temperature after forging on microstructure and properties of TA10 titanium alloy[J]. Heat Treatment of Metals, 2016, 41(10): 158-161.
(程帅朋, 苏娟华, 任风章. 锻后热处理温度对TA10钛合金组织和性能的影响[J]. 金属热处理, 2016, 41(10): 158-161.)
- [4] Tao Huan, Sun Erju, Song Dejun, *et al.* Effects of solution and aging on microstructure and mechanical properties of TA10 titanium alloy[J]. Hot Working Technology, 2019, 48(12): 153-155.
(陶欢, 孙二举, 宋德军, 等. 固溶时效对TA10钛合金组织和力学性能的影响[J]. 热加工工艺, 2019, 48(12): 153-155.)
- [5] Cui Zhongqi. Metallography and heat treatment[M]. Beijing: China Machine Press, 1988: 200-218.
(崔忠圻. 金属学与热处理[M]. 北京: 机械工业出版社, 1988: 200-218.)
- [6] Wei Beiling. Influence of magnetic field environment on distribution of nickel element in TA10 ingot[J]. Hot Working Technology, 2014, 43(19): 75-77.
(尉北玲. 磁场环境对TA10铸锭中镍成分的影响[J]. 热加工工艺, 2014, 43(19): 75-77.)
- [7] Zhang Zhu, Wang Qunjiao, Mo Wei, *et al.* Metallography and heat treatment of titanium[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2014: 17-23.
(张翥, 王群骄, 莫畏, 等. 钛的金属学与热处理[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2014: 17-23.)
- [8] Shi Wen. Analysis on the difference of Ti-Mo-Ni alloy strip in China and abroad[J]. Industrial Technology Research, 2016, (3): 20-22.
(史文. 国内外Ti-Mo-Ni合金带材差异分析[J]. 工艺技术研究, 2016, (3): 20-22.)
- [9] Zhong Qunpeng, Zhao Zihua. Fractography[M]. Beijing: Higher Education Press, 2005: 131-164.
(钟群鹏, 赵子华. 断口学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2005: 131-164.)

编辑 邓淑惠

龙佰集团攀枝花公司氯化钛渣厂水淬渣系统成功试车试产

2021年7月5日,从龙佰集团攀枝花公司传来喜讯:氯化钛渣厂水淬渣系统试车试产取得圆满成功。

水淬渣工艺是50万t攀西钛精矿升级转化氯化钛渣创新工程中渣处理的创新工艺,为确保此次渣水淬系统成功运行,该厂在试生产前针对水淬工艺易发生爆炸等多项不安全因素特点,专门采取了一系列措施确保安全出渣。一是超前制定《水淬渣系统热试运行方案》,从组织机构人员分工到各工种检查、异常情况下的应急预案都一一分工明确,措施到位;二是连续做好粒化塔、脱水器、大倾角皮带、水系统等试产前的不间断开车运行,确保期间系统设施运行正常;三是不断对工艺参数和数据进行细化和调整,确保渣铁分离良好,保障此次出渣成功进行水淬系统试生产。

据悉,钛渣生产采取水淬出渣生产一直是同行业难以攻克的难关,使用水淬式出渣不仅能减少出火渣带来的诸多繁琐工序,与火渣相比能大大降低制造成本,从而减轻员工劳动强度。此次水淬渣系统成功出渣生产,为公司全面推行新工艺、控降成本奠定了坚实基础。

摘自 <http://www.lomonbillions.com/newsinfo/10911/32274>