

固溶时效对海绵钛/电解钛熔炼 TC4 钛合金 热轧板材组织与性能的影响

谭 聪¹, 肖 寒¹, 张宏宇¹, 黄海广^{1,2}, 余 堃², 周荣锋¹, 李志敏²

(1. 昆明理工大学 材料科学与工程学院, 云南 昆明 650093)

(2. 云南钛业股份有限公司, 云南 楚雄 651209)

摘 要: 以海绵钛和电解钛作为熔炼 TC4 钛合金的原材料, 采用工业化电子束冷床炉 (EB 炉) 熔炼为扁锭并直接进行热轧, 随后进行固溶时效处理, 研究不同原材料铸锭和固溶时效处理工艺对 TC4 钛合金板材微观组织与性能的影响规律。结果表明: 海绵钛 TC4 和电解钛 TC4 钛合金的 $\alpha \rightarrow \beta$ 转变都是一个吸热过程, 电解钛 TC4 钛合金 $\alpha \rightarrow \beta$ 转变温度明显高于海绵钛 TC4 钛合金。海绵钛 TC4 钛合金在超过相变点温度进行固溶时效处理后, 其组织为魏氏组织, 其余固溶时效条件下的组织皆为双态组织。随固溶温度的升高, 海绵钛 TC4 钛合金板材的抗拉强度先增加后降低, 延伸率持续降低, 而电解钛 TC4 钛合金板材的抗拉强度随固溶温度的升高而增加, 延伸率一直降低。二者均在 890 °C 保温 30 min 固溶与 550 °C 保温 3 h 时效后获得最佳的综合力学性能。与海绵钛 TC4 钛合金板材相比, 电解钛 TC4 钛合金板材在经过固溶时效处理后, 合金的强度、硬度提升更为显著。

关键词: 海绵钛; 电解钛; TC4; 电子束冷床熔炼; 固溶时效; 显微组织; 力学性能

中图分类号: TG146.23

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2020)12-4290-07

作为典型的 $\alpha+\beta$ 型两相钛合金, Ti-6Al-4V(TC4) 钛合金因其密度小、比强度高、良好的耐腐蚀性、热稳定性和生物相容性等优异的综合性能, 广泛应用于航空航天、舰船等军用领域以及石油、生物医学、化工等民用领域^[1-7]。但较高的生产制造成本, 在很大程度上限制了其应用。美、日、俄、中国等国家都在积极寻找降低其成本的方法和工艺^[8,9]。工业上一般采用海绵钛为原料进行 TC4 钛合金熔炼, 但采用 Kroll 法制备海绵钛的生产周期长、工艺复杂, 而且生产成本和能耗较高, 对环境的污染也较大。此外, 海绵钛蓬松多孔的结构特征, 易导致钛合金熔炼过程中形成各类冶金缺陷, 影响钛合金的综合性能^[10]。研究人员在开发低成本、低污染、连续化提取金属钛的工艺上, 进行了大量的实验和研究工作^[11]。熔盐电解还原法被广泛认为是最可能替代 Kroll 工艺的方法。通过熔盐电解精炼法生产电解钛具有低成本、连续性、去除重金属和非金属杂质的效果显著等优点^[12], 而且电解钛致密的结构有助于促进后期熔炼钛合金的质量。

闫蓓蕾^[13]研究了熔盐电解法制备金属钛的电化学理论及其电解工艺, 在 NaCl-KCl 中添加海绵钛和

TiCl₄ 得到的 TiCl₃ 体系, 经过熔盐电解得到的金属钛粉呈现海绵状, 比表面积和松装密度均比 NaCl-KCl-TiCl₂ 熔盐体系得到的钛粉结构要差。Patil^[14]等人对 Ti-6Al-4V 中 α 和 β 相的体积分数对其机械加工性能的影响进行了讨论, 采用不同固溶时效热处理, 研究了不同的微观结构形态和相体积分数的变化对机械加工中热软化和摩擦现象的影响, 结果表明: 淬火延迟时间从 30 s 增加到 70 s, α 相含量随之增加, 导致固溶处理的钛合金 Ti-6Al-4V 的机械强度和硬度降低。 α 相和 β 相体积分数之差的减小导致硬切削和软切削交替产生, 从而在切削面上产生热冲击和摩擦冲击, 导致剪切角减小等。高鹏^[15]等人开展了不同相区以及同一相区内不同固溶温度和时间的固溶处理, 研究了固溶时效处理对 TC4 钛合金微观组织和力学性能的影响。结果表明: 在两相区进行的固溶 2 h 处理得到细片层状组织, 比在 β 相区固溶处理得到网篮组织的强度高 8%~12%。齐立春^[16]等人研究了不同热处理制度对 TC4 钛合金厚板显微组织和力学性能的影响。结果表明: 固溶温度对钛合金显微组织、强度、塑性和断裂韧性具有很大的影响。Liu^[17]等研究了不同固溶时效

收稿日期: 2019-12-25

基金项目: 云南省重大科技专项计划 (2018ZE002); 国家重点研发计划 (2016YFB0301202)

作者简介: 谭 聪, 男, 1995 年生, 硕士, 昆明理工大学材料科学与工程学院, 云南 昆明 650093, E-mail: 1392054911@qq.com

处理制度对 Ti-6Al-4V 钛合金组织和性能的影响，结果表明：固溶时效后 Ti-6Al-4V 屈服强度和极限抗拉强度显著提高，延展性呈现先增加后减小规律。

针对目前工业生产中海绵钛熔炼 TC4 钛合金存在的问题，本研究提出以低污染、低成本、低能耗，且结构更加致密的电解钛，替代海绵钛作为熔炼 TC4 钛合金的原材料。将 2 种原材料熔炼得到的 TC4 钛合金铸锭经相同的热轧工艺轧制成板材，并进行固溶时效处理，比较 2 种 TC4 钛合金板材固溶时效处理后的组织和性能，以期找到制备低成本、高性能的 TC4 钛合金的热加工和热处理方法。

1 实 验

实验采用的主要原材料是电解钛和海绵钛，表 1 为原料化学成分，其含量均在国标 0A 级海绵钛范围以内，成分符合要求。首先将海绵钛/电解钛、铝钒合金、高纯铝(99.99%)按一定比例配好，然后在真空水冷铜坩埚非自耗电弧炉中进行熔炼，全程采用氩气保护和电磁搅拌。熔炼结束后，分别在 2 种 TC4 钛合金圆锭锭头处，切取一块 80 mm×80 mm×50 mm 的坯料。将坯料加热至 1050 ℃并保温 1 h，然后采用两辊可逆式轧机进行换向轧制，轧制速度 1.3 m/s。首先，沿长度方向轧制 4 道次，一火总变形量为 60%，开轧温度为 1025±10 ℃，终轧温度为 920±5 ℃。然后，将板料回炉加热至 950 ℃并保温 30 min，将坯料长宽方向换向后再轧制 5 道次至最终厚度 6 mm，随后空冷至室温。二火轧制总变形量为 70%，开轧温度为 940±5 ℃，终轧温度为 800±10 ℃。将海绵钛与电解钛熔炼并轧制后的 TC4 钛合金板材分别标记为 S-TC4 和 E-TC4，2 种钛合金热轧板材的化学成分如表 2 所示。

从热轧板材上取屑状试样，通过差示扫描量热法(differential scanning calorimetry, DSC)表征钛合金在加热过程中的相变过程，施加 20 K/min 的加热速率，

表 1 原料化学成分

Table 1 Chemical composition of raw materials (ω/%)

Raw material	O	N	H	C	Fe
Sponge titanium 0	0.040	0.004	0.001	-	-
Electrolytic titanium	0.020	0.003	0.006	0.007	0.03
Sponge titanium 0A	0.050	0.010	0.003	0.010	0.04

表 2 热轧 TC4 钛合金板材的化学成分

Table 2 Chemical composition of hot rolled TC4 titanium alloy sheet (ω/%)

Sheet	Al	V	C	O	N	H	Ti
S-TC4	6.03	4.07	0.016	0.071	0.007	0.001	Bal.
E-TC4	5.88	4.37	0.012	0.090	0.009	0.001	Bal.

并进行氩气保护以防止它们氧化，通过 DSC 曲线来观察相变引起的热容变化。根据 DSC 曲线结果，制定固溶时效工艺参数，如表 3 所示，并按照表 3 的工艺参数进行热处理实验。

在固溶时效后的 TC4 钛合金板材中取金相试样，金相试样经过 400#、600#、800#、1000#的砂纸打磨并机械抛光，然后放入 HF:HNO₃:H₂O(体积比)=1:2:7 的 Kroll 试剂进行腐蚀，使用 Nikon ECLIPSE MA200 金相显微镜表征固溶时效 S-TC4 和 E-TC4 钛合金板材的微观组织。将固溶时效 S-TC4 和 E-TC4 钛合金板材取样制成图 1 所示拉伸试样，以 5 mm/min 的拉伸速率在 SHT4605 微机控制电液伺服万能试验机上，进行室温单向拉伸实验，并使用 ZEISS EVO18 扫描电子显微镜分析试样断口形貌。对板材取样测试洛氏硬度，将试样表面打磨至无明显划痕，使用金刚石压头的 TH320 型洛氏硬度计进行测试，加载 150 kg，保持时间 10 s，每个试样测试 5 个点，取平均值作为其洛氏硬度值，以确保数据的可靠性。

2 结果与讨论

2.1 TC4 钛合金 α→β 相变点

图 2 为 TC4 钛合金热轧板材的 DSC 曲线。由图 2 可知，S-TC4 和 E-TC4 钛合金的 α→β 转变都是一个吸热过程。E-TC4 钛合金的 α→β 开始转变温度为 888.4 ℃，明显高于 S-TC4 钛合金的 α→β 开始转变温度 862.7 ℃。E-TC4 钛合金的(α+β)相全部转化为 β 相的温度，即(α+β)/β 相变点温度为 979.2 ℃，远高于 S-TC4 钛合金的(α+β)/β 相变点温度 946.0 ℃。由于 TC4 钛合金是(α+β)双相合金，并且 α 相的体积分数（在室温下约为 90%）随着温度升高而降低，直至温度达到 β 转变温度

表 3 TC4 钛合金热处理制度

Table 3 Heat treatments of TC4 titanium alloy

Sample	Heat treatment
1	890 ℃/30 min, WC+550 ℃/3 h, FC
2	920 ℃/30 min, WC+550 ℃/3 h, FC
3	950 ℃/30 min, WC+550 ℃/3 h, FC

Note: FC-furnace cooling; WC-water cooling

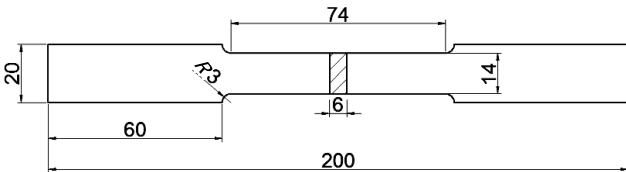


图 1 拉伸试样示意图

Fig.1 Schematic diagram of tensile specimen

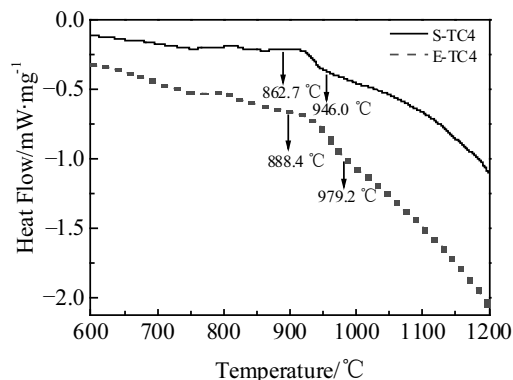


图 2 TC4 钛合金热轧板材的 DSC 曲线

Fig.2 DSC curves of hot rolled TC4 titanium alloy sheets

时完全转变为 β 相^[18]。根据文献[18,19], TC4 钛合金的 β 转变温度约为 970 ± 50 °C。因此, S-TC4 和 E-TC4 钛合金的 β 转变温度与文献相吻合。

2.2 微观组织

图 3 为固溶时效 S-TC4 钛合金板材显微组织。由图 3 可知, 890 和 920 °C 固溶时效后的组织为双态组织, 原始的片状 α 相都已消失, 在晶界处析出了互不相连的球状和长条状的初生 α 相, 而晶内为 β 转变组织, 其中分布着少量的次生片状 α 相, 片状 α 相具有一定的方向性。随着固溶温度由 890 °C 升高到 920

°C, β 转变组织减少, 初生 α 相增大, β 相含量增多。S-TC4 在 950 °C 固溶处理时, 由于超过了相变点温度 946.0 °C, 是在 β 相区进行的固溶处理, 其组织发生了明显的变化, 如图 3c。组织中的初生 α 相已经消失, 其组织为魏氏组织, 由针状 α 相和 β 转变组织构成, 长短不一的针状 α 相相互混在一起, 使得 α 相的取向变得极为复杂。针状 α 相可能是由于从 β 相冷却而形核长大的, 且由于冷速快, 抑制了晶间 β 相的生成。

图 4 为 E-TC4 钛合金在不同固溶时效后的显微组织。由于 E-TC4 钛合金在 890、920 和 950 °C 固溶时效时, 温度均未超过其相变点温度 979.2 °C, 因此是在 $(\alpha+\beta)$ 相区的固溶处理。由图 4 可以看出, E-TC4 钛合金在 890、920 和 950 °C 固溶时效后的组织皆为双态组织, 组织形貌相似, 组织中有 2 种形态的 α 相存在, 即等轴状的初生 α 相和 β 转变组织中的片状 α 相。随着固溶温度的升高, β 转变组织减少, 等轴状的初生 α 相增多, β 亚稳相含量增多, 晶界和晶内少量的 α 相呈不均匀分布。

综上, 由于 S-TC4 钛合金的相变点温度比 E-TC4 钛合金的低, 在 950 °C 固溶 30 min 后时效处理, S-TC4 的组织发生明显变化, 为魏氏组织。其余 S-TC4 固溶时效条件下的组织和全部 E-TC4 的固溶时效组织皆为双态组织。

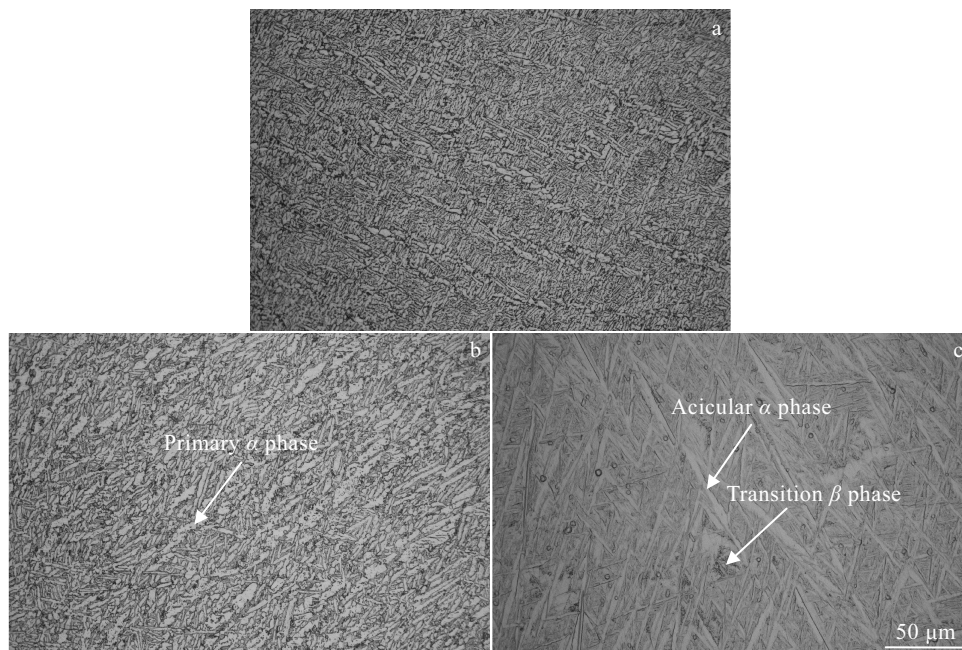


图 3 不同固溶温度 S-TC4 钛合金板材显微组织

Fig.3 Microstructures of S-TC4 titanium alloy sheet at different solution temperatures: (a) 890 °C, (b) 920 °C, and (c) 950 °C

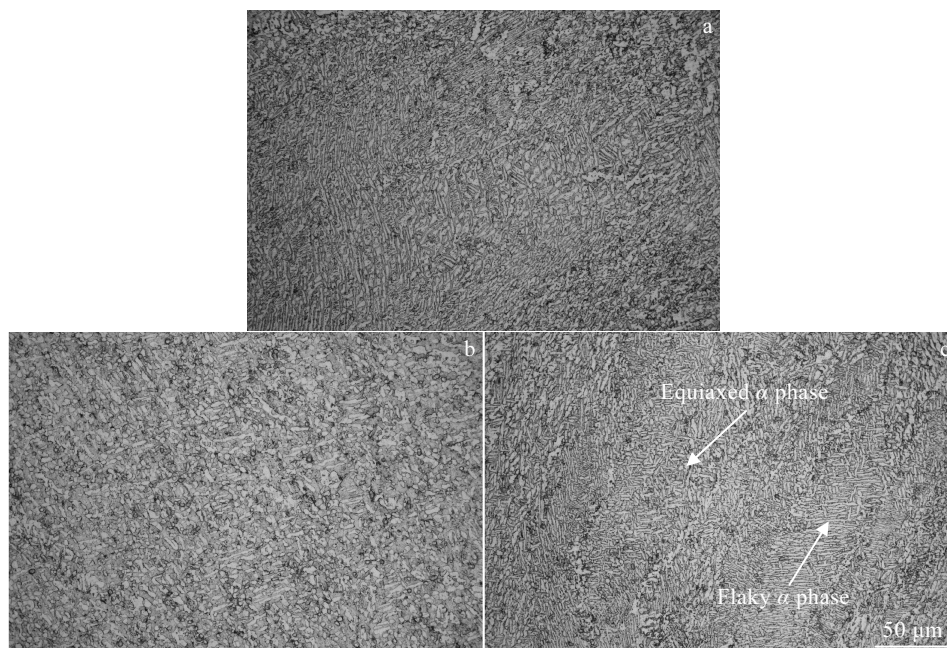


图 4 不同固溶温度 E-TC4 钛合金板材显微组织

Fig.4 Microstructures of E-TC4 titanium alloy sheet at different solution temperatures: (a) 890 °C, (b) 920 °C, and (c) 950 °C

2.3 TC4 钛合金板材力学性能

不同固溶时效处理后 S-TC4 和 E-TC4 钛合金板材的拉伸性能如图 5 所示。S-TC4 板材在经过固溶时效处理后，强度得到提高，而塑性出现降低。在相同时效处理条件下，经过 890、920、950 °C 固溶处理后，S-TC4 的抗拉强度分别为 887、977、893 MPa，延伸率分别为 6.0%、4.0%、3.5%。随着固溶温度的升高，S-TC4 的抗拉强度先增加后降低，延伸率持续降低。其原因可能是 S-TC4 在 950 °C 固溶处理时超过了相变点温度 946.0 °C，针状 α 相的产生导致其抗拉强度出现一定的降低。

在相同时效处理条件下，经过 890、920、950 °C 固溶处理 E-TC4 的抗拉强度分别为 815、888、977 MPa，延伸率分别为 6.5%、5.0%、4.5%。E-TC4 板材在经过固溶时效处理后，抗拉强度持续提高，而延伸率持续降低。抗拉强度持续提升的原因可能是等轴状的初生 α 相和 β 亚稳相增多。

S-TC4 钛合金轧后板材在固溶时效后，最低抗拉强度从 887 MPa 增加到 920 °C 固溶时效处理后获得的最大抗拉强度 977 MPa，增幅 9.21%。而 E-TC4 钛合金在固溶时效后，最低抗拉强度从 815 MPa 增加到 950 °C 固溶时效处理后获得的最大抗拉强度 977 MPa，增

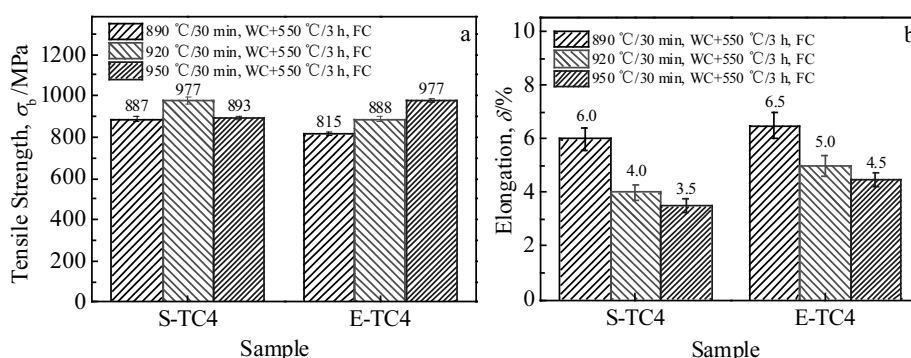


图 5 不同固溶时效处理后 S-TC4 和 E-TC4 钛合金的拉伸性能

Fig.5 Tensile strength (a) and elongation (b) of S-TC4 and E-TC4 titanium alloys after different solution aging treatments

幅 16.58%。由此可见, E-TC4 在经过固溶时效处理后, 材料的强度提升更为显著。

S-TC4 和 E-TC4 在 890 °C 固溶时效后, 均具有最高的强塑积 (抗拉强度与断后延伸率的乘积), 据此认为, 二者在此热处理条件下可以获得最佳的综合力学性能。

2.4 TC4 钛合金板材拉伸断口形貌分析

图 6 为 S-TC4 钛合金热轧板材固溶时效后拉伸断口形貌。在 890 °C 固溶时效后, S-TC4 钛合金试样断口微观形貌主要由大小不等的韧窝组成, 韧窝轮廓明显, 且韧窝较大较深, 为典型的韧性断裂形貌, 如图 6a 所示。在拉应力作用下, 位错产生运动导致显微空洞形成与长大, 并形成大小不等的韧窝, 其大小和深度主要受材料的内部夹杂和第二相颗粒大小的影响, 韧窝大小、深浅、密集程度反映了材料塑性的优劣。在 920 °C 固溶时效后, S-TC4 钛合金试样韧窝变浅变小, 有一些撕裂棱和解理状小平面分布其中, 为韧性和准解理混合型断裂, 如图 6b 所示。而在 950 °C 固溶时效后, S-TC4 钛合金试样断口呈现明显的河流状花样, 韧窝基本消失, 且拉伸过程中没有明显的塑性变形阶段, 为脆性断裂, 如图 6c 所示, 其原因可能是针状 α 相的断裂形成河流状花样。

图 7 为 E-TC4 钛合金热轧板材固溶时效后拉伸断口形貌。3 种固溶时效处理后, 断口微观形貌都由大小不等的韧窝构成, 但随着固溶温度的增加, 明显可

以看出韧窝变小变浅。E-TC4 在 920 °C 固溶时效后, 断口形貌部分区域韧窝较浅较小, 分布不均匀, 其原因可能是由于 E-TC4 钛合金的固溶温度较高而时效温度较低, 导致组织中有大量的 β 亚稳相, 且 α 相分布于晶界和晶内不均匀所致。而 E-TC4 在 950 °C 固溶时效后, 大部分韧窝较浅较小, 少量的撕裂棱和解理状小平面分布其中, 为韧性和准解理混合型断裂, 塑性进一步降低, 与延伸率变化规律一致。

综上所述, 随着固溶温度的升高, S-TC4 钛合金热轧板材固溶时效后拉伸断口形貌由 890 °C 固溶时的韧性断裂, 变为 920 °C 固溶时的韧性和准解理混合型断裂, 到 950 °C 固溶时的脆性断裂。而 E-TC4 钛合金热轧板材固溶时效后拉伸断口形貌由 890 和 920 °C 固溶时的韧性断裂, 变为 950 °C 固溶时的韧性和准解理混合型断裂。

2.5 TC4 钛合金板材洛氏硬度

固溶时效 S-TC4 和 E-TC4 钛合金板材的洛氏硬度值如图 8 所示。经过固溶时效热处理后, S-TC4 和 E-TC4 的硬度都呈现不同程度的增加。随着固溶温度的上升, S-TC4 硬度呈现先增加后减小的趋势, 和其强度变化趋势一致。随着固溶温度的上升, E-TC4 硬度呈现持续增加的趋势, 亦和其强度变化趋势一致。S-TC4 轧后板材的硬度从 28.26 HRC 增加到 920 °C 固溶时效处理后获得的最大硬度 32.06 HRC, 增幅 13.45%。

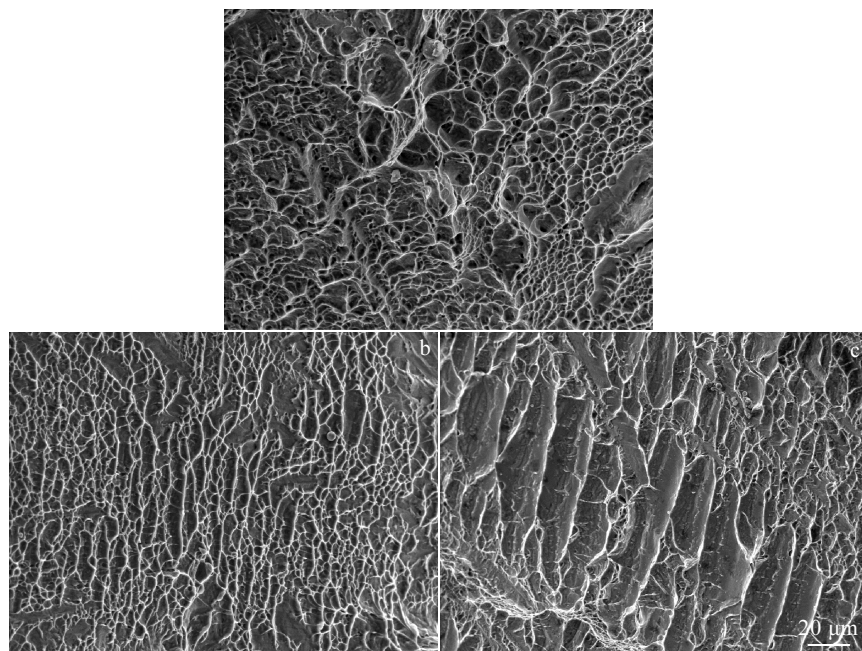


图 6 不同固溶温度 S-TC4 钛合金板材断口形貌

Fig.6 Fracture morphologies of S-TC4 titanium alloy sheet at different solution temperatures: (a) 890 °C, (b) 920 °C, and (c) 950 °C

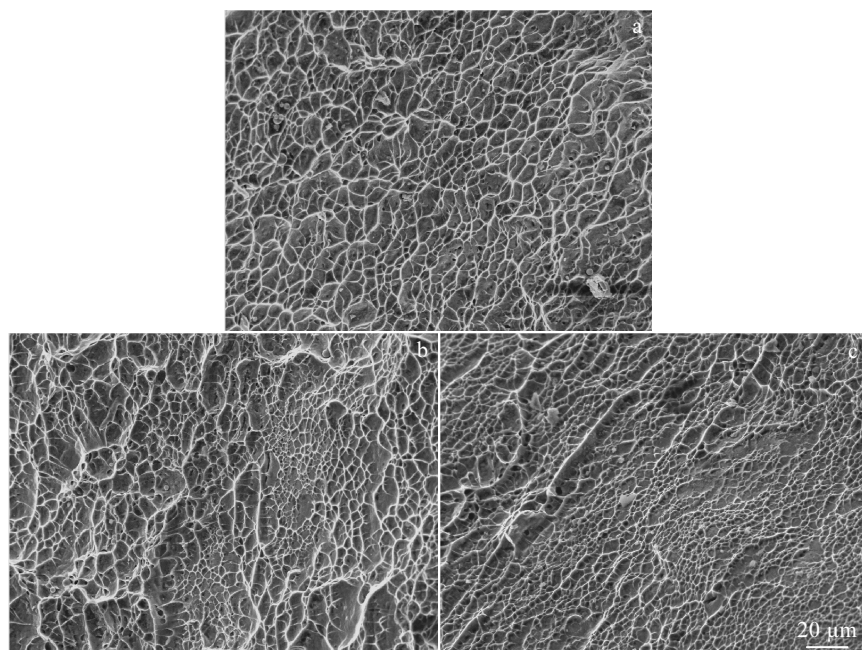


图 7 不同固溶温度 E-TC4 钛合金板材断口形貌

Fig.7 Fracture morphologies of E-TC4 titanium alloy sheet at different solution temperatures: (a) 890 °C, (b) 920 °C, and (c) 950 °C

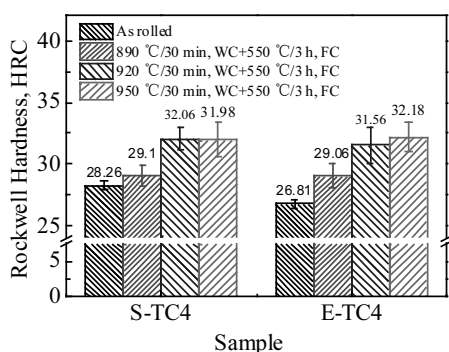


图 8 TC4 钛合金的洛氏硬度

Fig.8 Rockwell hardness of TC4 titanium alloys

而 E-TC4 轧后板材的硬度从 26.81 HRC 增加到 950 °C 固溶时效处理后获得的最大硬度 32.18 HRC, 增幅 20.07%。由此可见, E-TC4 在经过固溶时效处理后, 材料的硬度提升更为显著。

3 结 论

1) S-TC4 和 E-TC4 钛合金的 $\alpha \rightarrow \beta$ 转变是一个吸热过程。E-TC4 的 $(\alpha+\beta)/\beta$ 相变点温度为 979.2 °C, 远高于 S-TC4 的 $(\alpha+\beta)/\beta$ 相变点温度 946.0 °C。S-TC4 在超过相变点温度进行固溶时, 其组织为魏氏组织, 其

余固溶时效条件下的组织和 E-TC4 的固溶时效组织皆为双态组织。

2) S-TC4 钛合金在经过固溶时效处理后, 抗拉强度随固溶温度的升高, 呈现先增加后降低的趋势, 延伸率在持续降低, 并在 890 °C 固溶时效后获得最佳的综合力学性能。而 E-TC4 的抗拉强度随固溶温度的升高而增加, 而延伸率持续降低, 在 890 °C 固溶时效后获得最佳的综合力学性能。与 S-TC4 相比, E-TC4 在经过固溶时效处理后, 材料的强度、硬度提升更为显著。

3) S-TC4 钛合金随着固溶温度的增加, 其断裂方式依次为韧性断裂、韧性和准解理混合型断裂、脆性断裂。E-TC4 钛合金随着固溶温度的增加, 其断裂方式依次为韧性断裂、韧性断裂、韧性和准解理混合型断裂。

参考文献 References

- [1] Banerjee D, Williams J C. *Acta Materialia*[J], 2013, 61(3): 844
- [2] Li N, Chen Y J, Kong D D. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*[J], 2019, 100(5-8): 1881
- [3] Costa B C, Tokuhara C K, Rocha L A et al. *Materials Science and Engineering C*[J], 2019, 96: 730
- [4] Küemmel D, Hamann-Schroer M, Hetzner H et al. *Wear*[J], 2019, 422-423: 261
- [5] İzmir M, Tufan Y, Tan G et al. *Surface and Interface Analysis* [J], 2019, 51(9): 954

- [6] Jones R, Singh R K S, Iliopoulos A P *et al.* *International Journal of Fatigue*[J], 2019, 124: 227
- [7] Zhao Yongqing(赵永庆). *Materials China*(中国材料进展)[J], 2010, 29(5): 1
- [8] Froes F H, Friedrich H, Kiese J *et al.* *JOM*[J], 2004, 56(2): 40
- [9] Kosaka Y, Fox S P, Faller K *et al.* *Journal of Materials Engineering and Performance*[J], 2005, 14(6): 792
- [10] Han Mingchen(韩明臣), Zhang Yingming(张英明), Zhou Yigang(周义刚) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering* (稀有金属材料与工程)[J], 2008, 37(4): 665
- [11] Liu Meifeng(刘美凤), Guo Zhancheng(郭占成). *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2003, 13(5): 1238
- [12] Li Jian(李健). *Thesis for Master*(硕士论文)[D]. Changsha: Central South University, 2012
- [13] Yan Beilei(闫蓓蕾). *Thesis for Doctorate*(博士论文)[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016
- [14] Patil S, Kekade S, Phapale K *et al.* *Procedia Manufacturing*[J], 2016, 6: 63
- [15] Gao Peng(高鹏), Liu Lingyu(刘玲玉). *Transactions of Materials and Heat Treatment*(材料热处理学报)[J], 2019, 40(231): 39
- [16] Qi Lichun(齐立春), Huang Lijun(黄利军), Zhao Xinqing(赵新青) *et al.* *Transactions of Materials and Heat Treatment*(材料热处理学报)[J], 2015, 36(S1): 78
- [17] Liu Wanying, Lin Yuanhua, Chen Yuhai *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*[J], 2017, 46(3): 634
- [18] Sallica-Leva E, Caram R, Jardini A L *et al.* *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*[J], 2016, 54: 149
- [19] Vrancken B, Thijs L, Kruth J P *et al.* *Journal of Alloys and Compounds*[J], 2012, 541: 177

Effect of Solution and Aging Treatment on Microstructure and Properties of TC4 Titanium Alloy Hot-Rolled Sheet by Sponge Titanium/Electrolytic Titanium Melting

Tan Cong¹, Xiao Han¹, Zhang Hongyu¹, Huang Haiguang^{1,2}, Yu Kun², Zhou Rongfeng¹, Li Zhimin²

(1. Faculty of Materials Science and Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China)

(2. Yunnan Titanium Industry Co., Ltd, Chuxiong 651209, China)

Abstract: Sponge titanium and electrolytic titanium were used as raw materials for melting TC4 titanium alloy. The smelted ingot was subjected to hot rolling and solution aging treatment. The microstructure and properties of TC4 titanium alloy sheet rolled from ingots of different raw materials after different solid solution aging treatments were studied. The results show that the $\alpha \rightarrow \beta$ transition of sponge titanium TC4 and electrolytic titanium TC4 alloys is an endothermic process. The transformation point temperature of electrolytic titanium TC4 is obviously higher than that of sponge titanium TC4. When the sponge titanium TC4 alloy is solid-solved at a temperature exceeding the transformation point temperature, its structure is Weiss-structure. Other structures under different solid-solution aging conditions are all bimorphic. After solid solution aging treatment, the tensile strength of sponge titanium TC4 increases at first and then decreases, while the elongation continues to decrease with the increase of the solution temperature. The tensile strength of electrolytic titanium TC4 increases with increasing solution temperature, while the elongation continues to decrease. Both of them obtain the best comprehensive mechanical properties after solid solution holding at 890 °C for 30 min and 550 °C for 3 h. Compared with sponge titanium TC4, the electrolytic titanium TC4 has a more significant improvement in strength and hardness after solid solution aging treatment.

Key words: sponge titanium; electrolytic titanium; TC4; electron beam cold hearth melting; solution aging treatment; microstructure; mechanical properties

Corresponding author: Xiao Han, Ph. D., Professor, Faculty of Materials Science and Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, P. R. China, Tel: 0086-871-65136755, E-mail: kmxh@kust.edu.cn