

引用格式: 赵锋, 王啸, 郭树祥.  $\alpha+\beta$  两相型钛合金 TC4 低成本制备及防护性能研究[J]. 中国材料进展, 2024, 43(11): 1030-1034.  
ZHAO F, WANG X, GUO S X. Low Cost Preparation and Protective Properties of  $\alpha+\beta$  Two-Phase Titanium Alloy TC4[J]. Materials China, 2024, 43(11): 1030-1034.

# $\alpha+\beta$ 两相型钛合金 TC4 低成本制备及防护性能研究

赵 锋<sup>1</sup>, 王 啸<sup>1</sup>, 郭树祥<sup>2</sup>

(1. 清华大学航天航空学院, 北京 100084)

(2. 宝色科技(深圳)有限公司, 广东 深圳 518066)

**摘 要:**  $\alpha+\beta$  两相型钛合金 TC4 综合性能优良, 本研究旨在针对装甲防护领域提供低成本高防护性能的 TC4 钛合金。采用电子束 (electron beam, EB) 冷床炉熔炼+真空自耗熔炼 (vacuum arc remelting, VAR) 工艺, 降低 TC4 生产制备成本; 采用两种热加工工艺调控靶板的显微组织, 对不同组织和厚度的靶板进行防护性能测试、弹坑显微组织观察、靶板失效分析, 确定获得具有优异防护性能的 TC4 合金靶板的热加工工艺。结果表明: EB+VAR 熔炼工艺在保证高均质 TC4 铸锭的前提下, 实现成本降低约 20%~30%; 通过高韧性热加工工艺:  $T_{\beta}+30$  °C 单相区开坯轧制, 后在  $T_{\beta}-15$  °C 两相区较高温度二火轧制, 再进行 800 °C 退火 1 h+空冷, 获得双态组织, 此组织状态 TC4 靶板防护性能最优。

**关键词:** 钛合金; 低成本; 显微组织; 防护性能

**中图分类号:** TG146.23 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2024)11-1030-05

## Low Cost Preparation and Protective Properties of $\alpha+\beta$ Two-Phase Titanium Alloy TC4

ZHAO Feng<sup>1</sup>, WANG Xiao<sup>1</sup>, GUO Shuxiang<sup>2</sup>

(1. School of Aerospace Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

(2. Baose Technology (Shenzhen) Co., Ltd., Shenzhen 518066, China)

**Abstract:** TC4 alpha+beta two-phase titanium alloy has excellent comprehensive properties. This study aims to provide low-cost highly-protective TC4 titanium alloy for armor protection applications. Electron beam (EB) cold bed furnace melting + vacuum arc remelting (VAR) process is used to reduce the production and preparation cost of TC4. The microstructure of the target plate is regulated by two kind of heat treatment processes, and the protective performance, microstructure of the bullet crater, and failure analysis of the target plate with different microstructures and thicknesses are tested, to determine the optimal heat treatment process for obtaining excellent protective performance of the TC4 alloy target plate. The results show that the EB+VAR melting process achieves a cost reduction of about 20% to 30% while ensuring high homogeneity of TC4 ingots; through high toughness hot processing technology: billet rolling at  $T_{\beta}+30$  °C single-phase zone, followed by two fire rolling at  $T_{\beta}-15$  °C high-temperature point of two-phase zone, and then annealing at 800 °C for 1 hour+air cooling, a dual state microstructure is obtained. This dual microstructure state has the best protective performance for TC4 target plate.

**Key words:** titanium alloy; low cost; microstructure; protective performance

### 1 前 言

钛合金具有比强度高、耐腐蚀性能好及综合力学性能优良等诸多优点, 广泛应用于航空航天、船舶、化工

及兵器工业等领域。 $\alpha+\beta$  两相型钛合金 Ti-6Al-4V, 国标牌号 TC4, 是钛合金中用量最多, 也是研究最广泛的合金之一。TC4 钛合金兼具良好的强塑性匹配、优异的冷热加工性能、良好的焊接性能, 综合性能优良<sup>[1,2]</sup>。

随着反装甲弹药的发展, 防护装甲越来越厚, 各种战车的重量近十年来增加了 15%~20%, 这严重影响其运输能力及机动性, 用钛合金替代轧制均质装甲钢是装甲减重的一个有效途径。美国陆军研究实验室编写的标准《MIL-A-46077G 2006》指定 Ti-6Al-4V 作为钛合金装

收稿日期: 2022-11-28 修回日期: 2023-04-27

第一作者: 赵 锋, 男, 1980 年生, 博士研究生

通讯作者: 王 啸, 男, 1998 年生, 博士研究生,

Email: wang-x20@mails.tsinghua.edu.cn

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.202211017

甲防护材料<sup>[3]</sup>。美国 M1A2“艾布拉姆斯”主战坦克在回转炮塔板、指挥舱盖等多个零部件应用钛合金,实现减重 475 kg。美国和加拿大现役 M777 型 155 mm 榴弹炮是英国研制的一型超轻型榴弹炮,采用大量钛合金结构,全重 3745 kg,是常规 155 mm 火炮重量的一半,其中钛合金用量为 1000 kg。

20 世纪 50 年代,国际上即开始了钛合金在装甲防护领域的应用<sup>[4,5]</sup>。国外将钛合金在各种装甲车辆上进行试验,在保证防弹性能不降低的同时,相应钛合金装甲的重量比钢的轻 25%。然而钛合金高昂的成本是其推广应用过程中最大的“拦路虎”。

降低钛合金成本的途径主要有两个方向:低成本材料技术和低成本工艺技术<sup>[6-10]</sup>。低成本材料技术方面,主要包括海绵钛工业化生产工艺改进、降低纯度要求及电子束(electron beam, EB)冷床炉熔炼技术,以及添加廉价元素的成分设计 3 个方面。低成本工艺技术方面,主要包括缩短加工流程,采用连铸连轧的低成本工艺,采用精密铸造、精密锻造、增材制造、塑性成形-扩散连接等通过一次加热实现成形和连接两道工序的成型工艺,提高合金冷成形性能,以及开发药芯焊丝等高效焊接技术。

为了提高钛合金的冶金质量,从 20 世纪 80 年代末,EB 冷床熔炼技术开始用于钛合金优质铸锭的熔炼。EB 冷床熔炼技术可以解决低密度夹杂和钛返回料问题,已经成为生产优质钛合金铸锭和降低钛合金铸锭生产成本的关键技术,在美国、日本和中国等钛生产大国占有越来越重要的地位<sup>[11]</sup>。

本文采用先进的 EB 冷床炉熔炼+真空自耗熔炼(vacuum arc remelting, VAR)技术制备 TC4 铸锭,旨在通过添加回收料和减少熔炼次数制备低成本高均质铸锭。轧制工艺及热处理制度影响 TC4 成品板材的微观显微组织,组织类型、组织中  $\alpha$  和  $\beta$  相含量、相形貌、相尺寸、相分布等组织特征决定 TC4 宏观力学性能及装甲防护性能。本文采用不同的轧制工艺和热处理制度,获取具有不同显微组织的 TC4 靶板。对不同组织的 TC4 靶板的装甲防护性能进行测试,观察弹孔周边显微组织,分析组织特征对靶板失效形式的影响规律,得到防护性能优异的轧制工艺和热处理制度。

## 2 实验材料及方法

### 2.1 铸锭制备

本研究目标材料及成分是《GB 3620.1—2016 钛及钛合金牌号和化学成分》标准中的 TC4 钛合金。选用以下合金料进行配料:TC4 回收料、海绵钛、金属铝豆、铝钒合金。合金配料后,采用国际上先进的一次 EB 冷床

炉熔炼+一次 VAR 的熔炼工艺。铸锭经扒皮、车冒口后,得到 1500 kg 成品锭,成品锭的实际化学成分列于表 1。

表 1 TC4 铸锭的实测化学成分

Table 1 Chemical composition of TC4 ingot (w/%)

	Al	V	Fe	C	H	O	N
Upper	6.19	4.04	0.04	0.022	0.0025	0.062	0.013
Middle	6.06	4.12	0.04	0.023	0.0025	0.061	0.014
Bottom	6.08	4.02	0.06	0.020	0.0025	0.066	0.015

### 2.2 靶板制备

经测定,本批次 TC4 铸锭的相变点温度  $T_{\beta}$  为  $(995\pm 5)$  °C,在  $\beta$  相区三镦三拔,在  $\alpha+\beta$  两相区锻造,锻合铸锭内部缺陷,得到芯表组织均一的 150 mm 厚锻坯。对锻坯采用两种轧制工艺,分别为高韧性工艺和高强度工艺。高韧性工艺:  $T_{\beta}+30$  °C 单相区开坯轧制,然后在  $T_{\beta}-15$  °C  $\alpha+\beta$  两相区较高温度二火轧制成 8, 12, 20 mm 3 种不同厚度规格的板材,成品板在 800 °C 进行普通工艺退火。高强度工艺: 1050 °C 开坯轧制,然后在  $T_{\beta}+15$  °C 单相区二火轧制成 8, 12, 20 mm 3 种不同厚度规格的板材,对成品板进行固溶时效热处理,热处理制度为 920 °C/1 h, WQ+540 °C/4 h, AC。

按 500 mm×600 mm 尺寸裁切取样,作为测试靶板。

### 2.3 防护性能测试

装甲防护性能测试于中国兵器工业集团第五十二研究所烟台分所完成,检测标准采用《GJB 59.18—1988 装甲车辆试验规程 装甲板抗枪弹性能试验》。弹药种类和射击参数分别为: 8 mm 靶板采用 53 式 7.62 mm 普通钢芯弹, 100 m 零度角射击,  $V_0$  等于  $828_{-8}^{+7}$  m/s; 12 mm 靶板采用 95 式 5.8 mm 普通钢芯弹, 20 m 零度角射击,  $V_0$  等于  $930_{-5}^{+5}$  m/s; 20 mm 靶板采用 53 式 7.62 mm 穿甲燃烧弹, 100 m 零度角射击,  $V_0$  等于  $808_{-8}^{+7}$  m/s。

测试完成后对靶板进行回收,对弹孔显微组织形貌和靶板失效形式进行观察与分析。

### 2.4 显微组织观察

将靶板的弹孔沿弹孔中轴线剖开,对剖面进行打磨、抛光、腐蚀后,利用光学电子显微镜 Leica DMi8M 进行显微组织观察。

利用 JSM-7001F 型场发射扫描电子显微镜观察弹孔局部碎块崩落后的断口形貌。

### 2.5 拉伸性能测试

室温拉伸试验在 CMT5205 型电子万能试验机上进行,按照《GB/T 228.1 金属材料拉伸试验 第 1 部分: 室温试验方法》进行试验。沿轧板轧制方向(rolling, R)和轧板横向(transverse, T)取样。将试样加工成 R7 的标准

拉伸试样, 拉伸速率约 0.0067 mm/min。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 低成本熔炼

EB 冷床炉熔炼的直接优势是能够使用回收料熔炼, 并且能完成 100% 回收料的熔炼, 使原材料成本大幅降低。

VAR 熔炼过程在真空环境下进行, 熔炼温度远高于钛的熔点 (1668 °C), 熔池在磁场作用下对熔融金属有强烈的搅拌作用, 熔炼过程可排出气体和杂质, 对铸锭起到精炼作用, 保证铸锭化学成分达到标准。

波音公司对钛材成本构成分析结果显示, 海绵钛原材料成本占钛板材总成本的比例高达 40%。本文采用 EB 冷床炉进行一次熔炼, 使用回收料作为原材料, 减少了海绵钛的用量。EB 冷床炉熔炼可有效去除回收料中的高、低密度夹杂物; VAR 熔炼完成精炼。因此 EB+VAR 的熔炼新工艺, 相比于 3 次 VAR 熔炼工艺, 保证高均质铸锭的同时减少 1 次熔炼工序, 可实现钛板成本 20%~30% 的降低。

对于杂质元素含量要求低、服役环境中无周期应力载荷工况、无疲劳性能需求的钛合金零部件, 可适当降低原材料品质, 以换取成本的大幅下降。另外, 可建立废料生产链, 控制返回料品质, 以获得严格可控的低成本生产流程。

#### 3.2 靶板力学性能

高韧性工艺和高强度工艺制备的不同厚度的靶板的室温拉伸力学性能如表 2 所示。性能数据显示, 高韧性

表 2 高韧性和高强度靶板室温力学性能

Table 2 Room temperature mechanical properties of high toughness (HT) and high strength (HS) target plate

No.	Heat treatment	$R_m$ /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	$A$ /%	$Z$ /%
HT-8mm-T	800 °C/ 1 h, AC	1095	1035	17.0	41
HT-8mm-R		1090	1005	19.0	42
HT-12mm-T		1085	995	18.5	41
HT-12mm-R		1075	990	18.5	39
HT-20mm-T	920 °C/1 h, WQ+540 °C/ 4 h, AC	1075	1010	21.5	45
HT-20mm-R		1060	965	20.0	45
HS-8mm-T		1250	1145	9	27
HS-8mm-R		1225	1100	10	29
HS-12mm-T	920 °C/1 h, WQ+540 °C/ 4 h, AC	1280	1190	9.5	27
HS-12mm-R		1285	1180	9	25
HS-20mm-T		1290	1180	9	28
HS-20mm-R		1270	1165	9.5	30

工艺靶板的抗拉强度在 1060~1095 MPa 范围, 断后延伸率在 17%~21.5% 范围内, 靶板塑性较好。高强度工艺靶板的抗拉强度在 1225~1290 MPa 范围, 较高韧性工艺靶板强度提高约 200 MPa, 断后延伸率在 9%~10% 范围内, 较高韧性工艺靶板的降低约 50%。

#### 3.3 显微组织

8 mm 厚度高韧性靶板和高强度靶板的典型显微组织如图 1 所示。高韧性靶板具有已完全球化的等轴初生  $\alpha$  相和片层状初生  $\alpha$  相, 为双态组织。高强度靶板的二次加工温度在相变点以上, 因此  $\beta$  晶粒的原始晶界保留,  $\beta$  晶粒内部为  $\alpha+\beta$  片层组成的粗大集束, 片层组织的长径比大于 10, 为典型魏氏组织。

含有等轴状  $\alpha$  相的双态组织, 塑性变形以滑移的方式起始于  $\alpha$  相,  $\alpha$  晶粒中滑移线的密度和滑距随塑性变形的增加而增多, 发生滑移的  $\alpha$  晶粒也逐渐增多并扩展到  $\beta$  相, 并激活  $\beta$  相的滑移系。由于某些晶粒变形不均匀而在晶间产生变形, 在变形区域的衔接处或断裂区会出现空洞或微孔, 空洞和微孔在晶粒之间沿着滑移带合并, 形成曲折的裂纹, 合金表现出良好的宏观塑性, 与表 2 中高韧性靶板较高的断后延伸率相呼应。魏氏组织在变形初期, 滑移带沿着整个平行的  $\alpha$  集束扩展, 阻碍较小, 滑移带较长。这种较长的滑移带是空洞和微孔优先形成并迅速增加与合并的优选位置, 从而导致试样过早断裂, 表现出较差的宏观塑性。因此表 2 中高强度靶板显示出较低的断后延伸率。

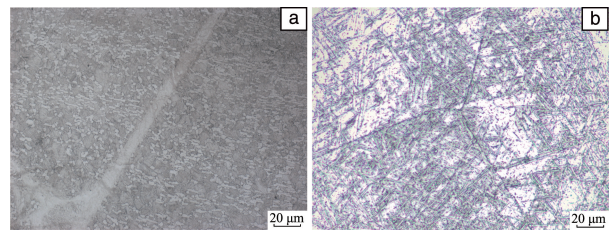


图 1 8 mm 厚度高韧性靶板 (a) 和高强度靶板 (b) 的显微组织

Fig. 1 Microstructures of 8 mm thick high toughness target plate (a) and high strength target plate (b)

#### 3.4 靶板失效分析

打靶试验中靶板常见的破坏形式如图 2 所示<sup>[12]</sup>。本研究 TC4 合金靶板打靶试验结果总结于表 3。

对 8 mm 高强度靶板、12 mm 高强度靶板和 20 mm 高韧性靶板的弹孔进行宏观形貌和显微组织观察。8 mm 高强度靶板弹孔宏观形貌如图 3 所示, 呈挤凿式破坏。由于魏氏组织整体协调变形能力较差, 在子弹高速冲击下, 靶板未发生整体协调变形, 沿子弹冲击方向发生挤凿式破坏。发生挤凿型破坏时, 靶板几乎没有塑性变形, 是较低能的失效形式。

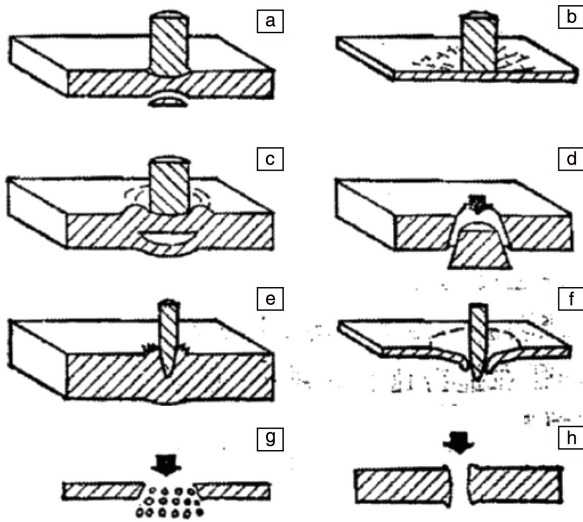


图 2 穿孔破坏的形式<sup>[12]</sup>: (a) 背侧断裂型, (b) 径向断裂型, (c) 层裂型, (d) 挤凿型, (e) 正面花瓣型, (f) 背面花瓣型, (g) 碎块型, (h) 孔口扩展型

Fig. 2 Types of perforation failure<sup>[12]</sup>: (a) backside fracture type, (b) radial fracture type, (c) delamination type, (d) extrusion type, (e) front petal type, (f) back petal type, (g) fragment type, (h) orifice expansion type

表 3 高韧性和高强度靶板防护性能测试结果

Table 3 Test results of protective performance of high toughness and high-strength target plates

State/Index	Bullet type	Speed/(m/s)	Distance/m	Results
HT $\delta$ 8 mm	Type 53, 7.62 mm, steel core	$828^{+7}_{-8}$	100	Undestroyed
HS $\delta$ 8 mm	Type 53, 7.62 mm, steel core	$828^{+7}_{-8}$	100	Extrusion destruction
HT $\delta$ 12 mm	Type 95, 5.8 mm, steel core	$930^{+5}_{-5}$	20	Undestroyed
HS $\delta$ 12 mm	Type 95, 5.8 mm, steel core	$930^{+5}_{-5}$	20	Orifice expansion
HT $\delta$ 20 mm	Type 53, 7.62 mm, armor piercing incendiary	$808^{+7}_{-8}$	100	Undestroyed
HS $\delta$ 20 mm	Type 53, 7.62 mm, armor piercing incendiary	$808^{+7}_{-8}$	100	Extrusion destruction

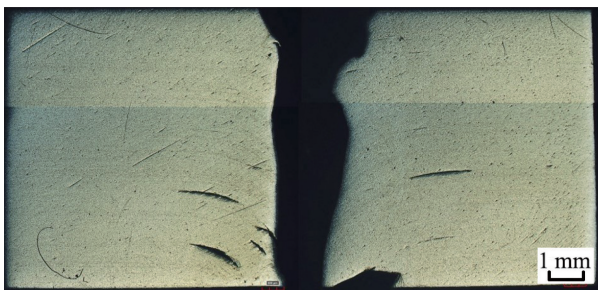


图 3 8 mm 高强度靶板挤凿型破坏形貌

Fig. 3 Damage morphology of 8 mm high-strength target plate by squeezing and chiseling

12 mm 高强度靶板在 930 m/s 更高的弹速侵彻过程中发生孔口扩展型破坏, 如图 4 所示。子弹侵彻靶板时, 入射压缩应力波在靶板迎弹自由面反射与入射压缩波叠加形成拉伸应力波, 当拉伸应力波幅值高于材料动态拉伸强度极限, 靶板内部某一位置将发生动态断裂, 即图 4 所示的靶板背部部分崩落的碎块。

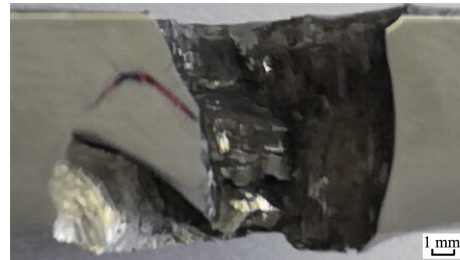


图 4 12 mm 高强度靶板孔口扩展型破坏形貌

Fig. 4 Morphology of orifice expansion type damage of 12 mm high-strength target plate

对图 4 中弹孔最下方崩落碎块的位置进行 SEM 断口观察, 结果如图 5 所示。图 5a 和 5b 显示断口有沿晶断裂产生的解理台阶。靶板在拉应力作用下, 各晶粒在结合力相对较弱的晶界处产生裂纹, 晶粒间的解理导致金属不再连续, 靶板表现出脆性破坏形式。解理断口形貌与粗大魏氏组织相吻合。

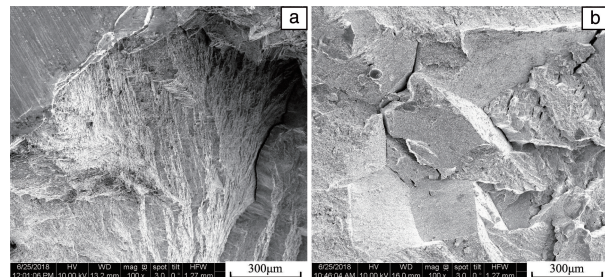


图 5 12 mm 高强度靶板弹孔局部断口形貌

Fig. 5 Local fracture morphology of 12 mm high-strength target plate bullet hole

20 mm 高韧性靶板的弹孔形貌如图 6 所示, 图 6a 为弹孔宏观形貌, 图 6b 和 6c 为图 6a 中左上侧红色选线框的放大图。从图 6c 的弹孔形貌中可观察到与子弹冲击方向相垂直的角度, 与靶板平面近似平行的方向出现形变带和“白色亮带”。对“白色亮带”作进一步观察, 如图 7 所示。

图 7 显示, 20 mm 高韧性靶板在 7.62 mm 穿甲燃烧弹侵彻后弹孔出现绝热剪切现象, 绝热剪切带 (adiabatic shear band, ASB) 的宽度可达 15  $\mu\text{m}$ 。双态组织的高韧性靶板在子弹高速侵彻过程中, 通过良好的协调变形能力可以产生更多的塑性变形, 通过塑性变形吸收子弹的冲击动能, 表现出更优的防护能力。

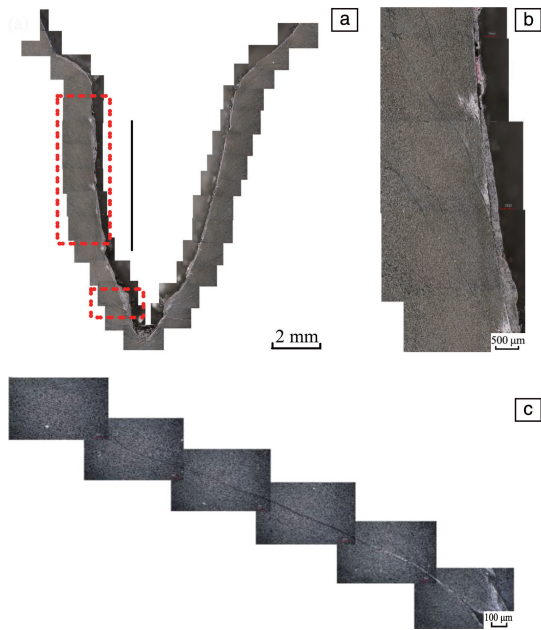


图 6 20 mm 高韧性靶板弹孔形貌: (a) 弹孔宏观形貌, (b, c) 上侧选线框放大图

Fig. 6 Morphology of bullet hole on 20 mm high toughness target plate: (a) macroscopic morphology of bullet hole, (b, c) enlarged microstructure image of upper wireframe

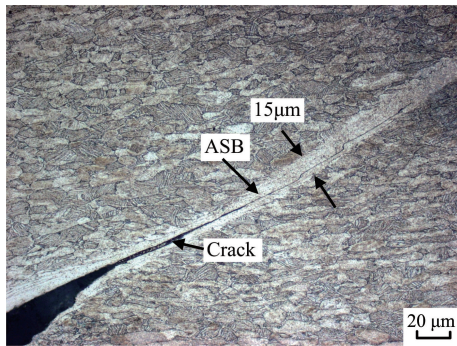


图 7 20 mm 高韧性靶板弹孔附近显微组织

Fig. 7 Microstructure near the bullet hole of 20 mm high toughness target plate

## 4 结 论

(1) 电子束 (electron beam, EB) 冷床炉熔炼可完成回收料的熔炼, 真空自耗熔炼 (vacuum arc remelting, VAR) 可以精炼合金, 去除杂质元素。EB+VAR 熔炼工艺可以实现 TC4 成本 20%~30% 的降低, 同时能够保证铸锭的高均质性。

(2) 采用高韧性热加工工艺:  $T_{\beta}+30$  °C 单相区开坯轧制, 随后  $T_{\beta}-15$  °C 两相区较高温度二火轧制, 800 °C/1 h+

空冷的退火制度, 得到双态组织 TC4 靶板。此状态靶板抗拉强度在 1060~1095 MPa 范围, 断后延伸率在 17%~21.5% 范围, 靶板塑性较好, 防护性能较优异。

## 参考文献 References

- [1] 莱茵斯 C, 皮特尔斯 M. 钛与钛合金[M]. 陈振华等译. 北京: 化学工业出版社, 2005: 1-31.  
LEYENS C, PETERS M. Titanium and Titanium Alloy[M]. Translated by CHEN Z H, *et al.* Beijing: Chemical Industry Press, 2005: 1-31.
- [2] 赵永庆. 中国材料进展[J], 2010, 29(5): 1-8.  
ZHAO Y Q. Materials China[J], 2010, 29(5): 1-8.
- [3] U. S. Army Research Laboratory. Armor Plate, Titanium Alloy, Weldable: MIL-A-46077G[S]. Washington D. C.: U. S. Department of Defense, 2006.
- [4] PITLER R K, HURLICH A. Some Mechanical and Ballistic Properties of Titanium and Titanium Alloys[R]. Massachusetts: Watertown Arsenal Laboratory, 1950.
- [5] BARTUS S D. Evaluation of Ti5553 Alloy Against Fragment and Armor-Piercing Projectiles[R]. U. S. Army Research Laboratory, 2009.
- [6] 常辉, 董月成, 淡振华, 等. 中国材料进展[J], 2020, 39(7/8): 585-590.  
CHANG H, DONG Y C, DAN Z H, *et al.* Materials China[J], 2020, 39(7/8): 585-590.
- [7] ASHRAF IMAM M, FROES F. The Journal of the Minerals, Metals & Materials Society[J], 2010, 62: 17-20.
- [8] 黄海广, 肖寒, 熊汉城, 等. 云南冶金[J], 2020, 49(6): 59-67.  
HUANG H G, XIAO H, XIONG H C, *et al.* Yunnan Metallurgy[J], 2020, 49(6): 59-67.
- [9] 许刚, 闫明, 张海涛. 化工管理[J], 2022(20): 10-12.  
XU G, YAN M, ZHANG H T. Chemical Engineering Management [J], 2022(20): 10-12.
- [10] 冯秋元, 佟学文, 王俭, 等. 材料导报[J], 2017, 31(9): 128-134.  
FENG Q Y, TONG X W, WANG J, *et al.* Materials Reports [J], 2017, 31(9): 128-134.
- [11] 雷文光, 赵永庆, 韩栋, 等. 材料导报[J], 2016, 30(5): 101-106.  
LEI W G, ZHAO Y Q, HAN D, *et al.* Materials Reports [J], 2016, 30(5): 101-106.
- [12] 钱伟长. 穿甲力学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1984: 1-30.  
QIAN W C. Armor Piercing Mechanics [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1984: 1-30.

(编辑 惠琼)