

低成本 XRF001 钛合金抗弹性能研究

王幸运, 雷文光, 岳旭, 高文柱, 季红军, 杨铮, 赵小龙

(新疆湘润新材料科技有限公司, 新疆 哈密 839000)

摘要: 研究了一种新型装甲用低成本钛合金 XRF001 的组织与性能, 重点对其抗弹性能进行了测试, 分析了抗弹机理。结果表明: 普通退火态 XRF001 钛合金板材的强度、塑性、硬度和冲击韧性匹配良好, 抗弹性能与 ATI425-MOD 钛合金相当, 优于 ATI425 钛合金。XRF001 钛合金在不同热处理状态下的组织不同, 抗弹性能也不同, 普通退火态下的抗弹性能优于双重退火态。经普通退火后, XRF001 钛合金中形成的细小板条及片层状组织能够改变绝热剪切带走向, 改变裂纹扩展路径, 消耗更多的能量, 有利于提高抗弹性能。

关键词: 钛合金; 低成本; 退火处理; 抗弹性能

中图分类号: TG146.23

文献标识码: A

文章编号: 1009-9964(2022)03-007-04

Research on Anti-bullet Property of Low Cost XRF001 Titanium Alloy

Wang Xingyun, Lei Wenguang, Yue Xu, Gao Wenzhu, Ji Hongjun, Yang Zheng, Zhao Xiaolong

(Xinjiang Xiangrun New Material Technology Co., Ltd., Hami 839000, China)

Abstract: The microstructure and properties of a new low-cost titanium alloy XRF001 for armor were studied, its anti-bullet property was tested, and ballistic resistance mechanism was analyzed. The results show that XRF001 titanium alloy has good matching strength, plasticity, hardness and impact properties, the anti-bullet property is equivalent to that of ATI425-MOD titanium alloy and better than that of ATI425 titanium alloy. XRF001 titanium alloy has different structures and anti-bullet property after different heat treatments. The anti-bullet property of conventional annealing state is better than that of double annealing state. The thin strip and layered structure can change the direction of adiabatic shear band and the crack propagation path, consume more energy, helps to improve the anti-bullet property.

Key words: titanium alloy; low cost; annealing treatment; anti-bullet property

钛及钛合金具有强度高、耐高温、耐腐蚀等优良特性, 且密度仅为钢材密度的 60%, 是一种较好的减重材料^[1,2]。除航空航天领域外, 兵器、舰船等领域也充分发挥钛合金轻质高强的特性设计制造相关部件^[3-5]。例如, 美国 M1“艾布拉姆斯”主战坦克、M2“布雷德利”步兵战车以及“斯特赖克”轮式装甲车等装甲车辆上都大量使用了 Ti6Al4V 合金, 实现了较好的减重效果^[6]; 美国 M1A2 主战坦克通过使用低成本 ATI425 钛合金替代钢制结构件、钢制炮塔等, 亦获得了非常好的减重效果^[6]; 俄罗斯在

T-90A、T-95 主战坦克炮塔中采用模块化钛合金装甲框架等, 使其装甲防护能力得到大幅度提高^[7,8]。

然而, 目前我国在装甲防护领域尚没有成熟应用的钛合金材料。为此, 新疆湘润新材料科技有限公司自主研发了一种新型装甲用低成本钛合金 XRF001。本研究对该合金进行了不同制度的热处理, 并与 ATI425、ATI425-MOD(ATI425 改进型)钛合金的组织 and 性能进行了对比, 重点研究了 XRF001 钛合金的抗弹性能, 并对其抗弹机理进行了初步探索。

1 实验

实验材料为新疆湘润新材料科技有限公司自主研发的 XRF001 钛合金。与常规 TC4 钛合金相比,

收稿日期: 2022-05-17

基金项目: 新疆钛基新材料重点实验室, 2021 年度自治区创新环境(人才、基地)建设专项(XJQY2009)

通信作者: 王幸运(1985—), 男, 工程师。

XRF001 钛合金中去掉了昂贵的 V 元素, 加入了 Mo、Fe、O 等低成本元素, 合金元素总质量分数 $< 10\%$, 是一种典型的 $\alpha + \beta$ 钛合金, 相变温度 T_{β} 为 $995\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。XRF001 钛合金铸锭经开坯锻造、两相区轧制后, 得到厚度为 7.5 mm 的板材。经不同制度热处理和表面处理, 切割成 $7.5\text{ mm} \times 500\text{ mm} \times 600\text{ mm}$ 的标准靶板。表 1 为 XRF001 钛合金板材的热处理制度。

表 1 XRF001 钛合金板材的热处理制度

Table 1 Heat treatment processes of XRF001 titanium alloy plate

No.	Name	Heat treatment process
HT1	Conventional annealing	$650\text{ }^{\circ}\text{C} \times 1\text{ h/AC}$
HT2	Double annealing	$960\text{ }^{\circ}\text{C}/1\text{ h/AC} + 530\text{ }^{\circ}\text{C}/6\text{ h/AC}$
HT3	Solution + Aging	$960\text{ }^{\circ}\text{C}/1\text{ h/WC} + 530\text{ }^{\circ}\text{C}/6\text{ h/AC}$

由于 ATI425 钛合金和 ATI425-MOD 钛合金的相变点与 XRF001 钛合金较为接近, 故采用相同的熔炼、锻造及轧制工艺分别制备 ATI425 和 ATI425-MOD 钛合金板材。表 2 为 ATI425 和 ATI425-MOD 钛合金板材的化学成分。

采用 CMT5205 电子万能试验机、ZBC2302-BE 摆锤式冲击试验机、NEXUS3001XLM-IMP 硬度计进行力学性能测试。采用 ICX41M 光学显微镜进行显微组织观察。按照 GJB 59. 18—1988《装甲车辆实验

表 2 ATI425 和 ATI425-MOD 钛合金板材的化学成分 ($w/\%$)

Table 2 Chemical composition of ATI425 and ATI425-MOD titanium alloy plates

Alloy	Al	V	Fe	Cr	O
ATI425	3.5~4.5	2.0~3.0	1.2~1.8	—	0.2~0.3
ATI425-MOD	4.5~5.5	1.0~2.0	1.0~2.0	0.5~1.5	0.2~0.3

规程《装甲板抗枪弹性能试验》进行弹道侵彻试验, 测试靶板抗弹性能, 测试条件为 53 式 7.62 mm 普通钢芯弹垂直入射, 射击距离 100 m 。

2 结果与分析

2.1 显微组织

图 1 为 ATI425、ATI425-MOD 及 XRF001 钛合金板材经不同热处理后的显微组织。由图 1 可以看出, 3 种钛合金热处理后为双态组织。XRF001 钛合金经普通退火 (HT1) 后, 组织由拉长的初生 α 相和片层 α 相组成 (图 1c); 经双重退火 (HT2) 后, 由于一次退火温度较高, 初生 α 相明显减少, 经二次退火后保留了部分等轴 α 相, 其余为针状 α 相 (图 1d)。

2.2 力学性能

XRF001、ATI425 及 ATI425-MOD 钛合金板材不同状态下的力学性能见表 3。由表 3 可知, 3 种板材

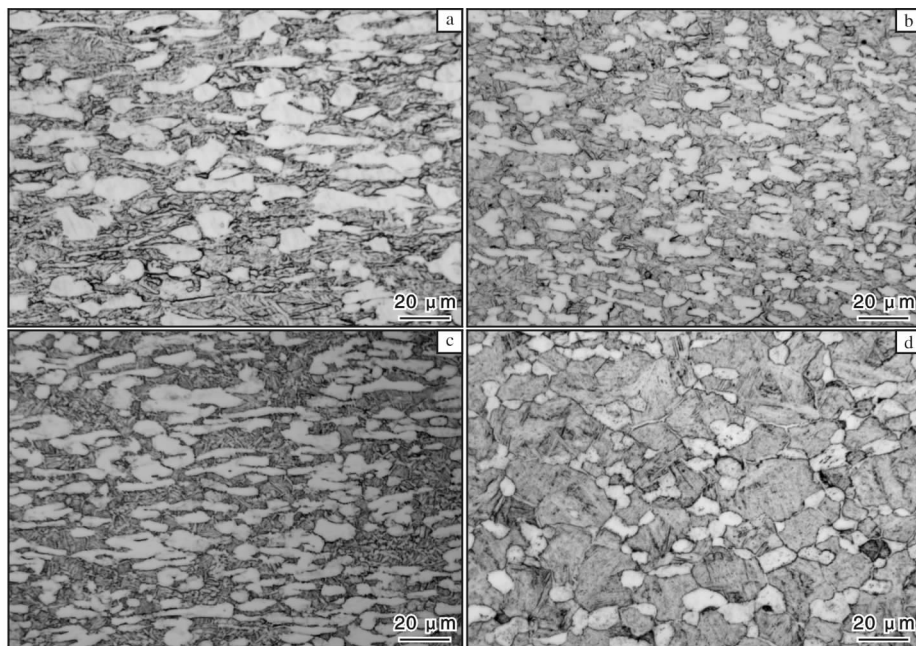


图 1 ATI425、ATI425-MOD 及 XRF001 钛合金板材经不同热处理后的显微组织

Fig. 1 Microstructures of titanium alloy plates after different heat treatments: (a) ATI425, conventional annealing; (b) ATI425-MOD, conventional annealing; (c) XRF001, conventional annealing; (d) XRF001, double annealing

轧制态(*R*)的力学性能相当, XRF001 钛合金板材的硬度相对略高。经普通退火后, XRF001 钛合金的综合性能相对更好。经双重退火后, XRF001 钛合金板材的抗拉强度较普通退火后有所升高, 表面硬度较高, 但塑性明显降低, 延伸率仅为 12.5%; 经固溶时效处理后, XRF001 钛合金的抗拉强度达到 1356 MPa, 并拥有较高的表面硬度, 但固溶处理后板型较差, 低温时效难以校平, 且塑性、冲击性能明显下降。考虑到工程化应用的便捷性, 推荐选择普通退火和双重退火工艺。

表 3 3 种钛合金板材不同状态下的力学性能

Table 3 Mechanical properties of three titanium alloy plates under different states

Alloy	State	R_m /MPa	A /%	KU_2 /J	HBW/MPa
XRF001	<i>R</i>	1115	16.0	29.0	3420
	HT1	1110	18.5	28.0	3361
	HT2	1255	12.5	16.0	3793
	HT3	1356	9.0	14.0	4028
ATI425	<i>R</i>	1105	18.0	31.0	3185
	HT1	1089	17.5	26.8	3244
ATI425-MOD	<i>R</i>	1123	18.0	30.0	3273
	HT1	1093	16.0	24.0	3273

2.3 抗弹性能

在相同测试条件下, 对经普通退火后的 3 种钛合金板材进行抗弹性能测试, 结果见表 4。由表 4 可知, XRF001 与 ATI425-MOD 钛合金板材的抗弹性能明显优于 ATI425 钛合金板材, 均达到 GJB 59.18—1988 标准 2 级防护要求。

表 4 3 种钛合金板材的抗弹性能对比

Table 4 Comparison of anti-bullet property of three different titanium alloy plates

Alloy	Thickness/mm	Target test	Damage rank
ATI425	7.5	3 protected 2 breakdown	5
ATI425-MOD	7.6	All protected	2
XRF001	7.5	All protected	2

图 2 为经普通退火(HT1)和双重退火(HT2)后 XRF001 钛合金靶板经射击后正面和背面的宏观形貌。由图 2a、2b 可以看出, 经过 5 发子弹射击后, 普通退火态靶板正面弹坑完整, 背面无裂纹, 防护

等级达到 2 级(合格损伤), 正面平均弹坑深度约为 1.1 mm, 背凸为 0.4 mm, 防护效果较好。由图 2c、2d 可以看出, 双重退火态靶板正面弹坑完整, 但背面存在裂纹, 防护等级为 4 级(合格损伤), 正面平均弹坑深度小于退火态, 约为 0.8 mm, 背凸为 0.4 mm。与双重退火相比, 普通退火后 XRF001 钛合金板材的抗弹性能更为优异。

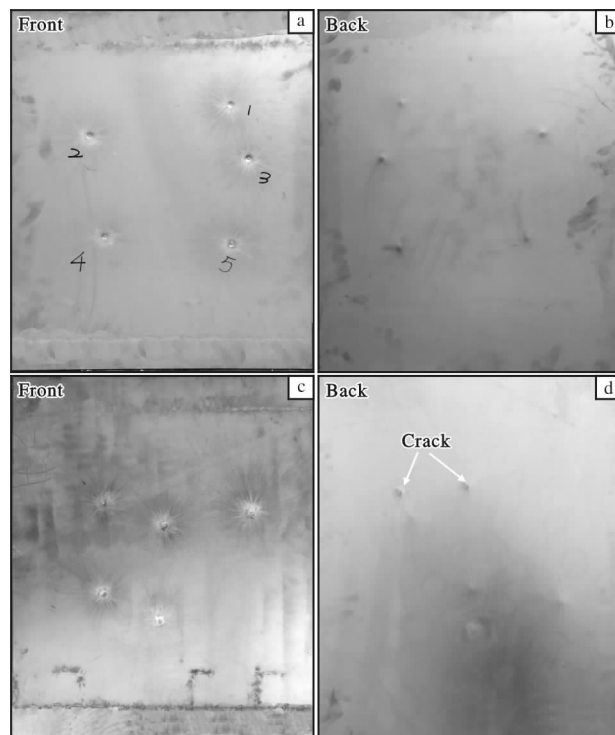


图 2 不同退火态 XRF001 钛合金靶板受子弹冲击后的宏观照片

Fig. 2 Macro photographs of XRF001 titanium alloy target plates under different annealing states after projectile impacted: (a,b) conventional annealing; (c,d) double annealing

为进一步测试 XRF001 钛合金的抗弹性能, 将普通退火态 7.5 mm 厚 XRF001 钛合金板材减薄至 7.0 mm 厚(实际测量的平均厚度约为 6.88 mm)进行靶试测试, 结果见图 3。从图 3 可知, XRF001 钛合金板材表面弹坑较深, 5 发弹坑平均深度约 2.0 mm, 接近测试板材厚度的 30%, 且背面无裂纹, 背凸约为 1.2 mm, 达到 GJB 59.18—1988 标准 3 级防护要求。

子弹高速侵彻靶板时, 弹芯被瞬间镦粗变成典型的“蘑菇头”状, 着弹部位的作用面积迅速增大, 侵彻阻力瞬间增加, 阻止了破坏的进一步发生。抗弹测试结果表明, 材料强度越高、硬度越大, 弹坑深度越小。这是由于材料强度提高增加了“蘑菇头”

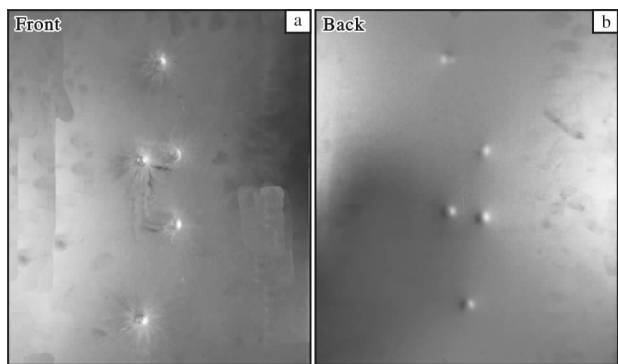


图3 普通退火态 XRF001 钛合金靶板抗弹极限测试结果
Fig. 3 Test results of ballistic limit of conventional annealed XRF001 titanium alloy target plate

的宏观尺寸,增加了侵彻阻力^[9]。因此,双重退火态靶板的弹坑深度较普通退火态小(图2)。但由于材料强度提高的同时塑性下降,冲击韧性变差,最终导致双重退火态的抗弹性能反而不如普通退火态。由此可见,抗弹防护效果是材料强度、塑性、冲击韧性、硬度等综合性能共同作用的结果。

从普通退火态 XRF001 钛合金板材的最大弹坑深度处解剖观察其组织形态,解剖的3个弹坑仅1个出现绝热剪切带现象,如图4所示。绝热剪切带角度与侵彻方向呈接近45°,起始于弹坑表面,在多次穿过片层 α 组织后末端逐渐与靶板平行,延伸方向与拉长的初生 α 相平行。由此可见,片层状组织可以改变 XRF001 钛合金的绝热剪切带走向及裂纹扩展路径,消耗更多的能量^[10,11],有利于提高抗弹性能。



图4 XRF001 钛合金靶板着弹点的绝热剪切带形貌
Fig. 4 Morphology of adiabatic shear band at elastic point of XRF001 titanium alloy target plate

3 结论

(1) ATI425-MOD 和 XRF001 钛合金具备较好的防 7.62 mm 钢芯弹的抗弹性能,均明显优于 ATI425 钛合金。

(2) 普通退火态 XRF001 钛合金板材的强度、塑性、冲击韧性和硬度匹配良好,抗弹性能优于双重退火态。

(3) 普通退火态 XRF001 钛合金组织中拉长的片层状 α 组织能够改变绝热剪切带的延伸路径,有助于提高合金的抗弹防护等级。

参考文献 References

- [1] 房凌晖,郑翔玉,马丽,等. 坦克装甲车辆装甲护发展研究[J]. 四川兵工学报, 2014(2): 23-26.
- [2] 郑超,朱秀荣,辛海鹰,等. 高强度低成本 Ti5322 合金的抗弹性能及其抗弹机理研究[J]. 钛工业进展, 2020, 37(2): 14-20.
- [3] 胡嘉蓉,陶春虎,邬冠华,等. 钛合金穿甲侵彻损伤行为研究现状[J]. 失效分析与预防, 2017, 12(6): 392-397.
- [4] 刘强,王永勤,汪宇. 特种材料在装甲车辆上的应用[J]. 国防制造技术, 2021(3): 19-23.
- [5] 郑超,朱秀荣,王军,等. 装甲钛合金的研究与应用现状[J]. 钛工业进展, 2020, 37(4): 41-48.
- [6] 陈京生,孙葆森,安康. 钛合金在兵器装备上的应用[J]. 兵器装备工程学报, 2020, 41(12): 14-20.
- [7] 郝芳,辛社伟,毛友川,等. 钛合金在装甲领域的应用综述[J]. 材料导报, 2020, 34(Z1): 293-296.
- [8] 郑超. 微观组织对 Ti-6Al-4V 钛合金动态力学性能和抗弹性能影响规律的研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2015.
- [9] 翟景,信文君,郭安振,等. 一类装甲钛合金材料的防护性能与抗弹机理探索[J]. 兵器材料科学与工程, 2014, 37(5): 106-109.
- [10] 杨凯文. 锻造和热处理工艺对 TC21 钛合金静动态力学性能和抗弹性能影响的研究. 北京: 北京理工大学, 2016.
- [11] 彭美旗. 组织细节对双态组织 TC4 钛合金静动态力学性能及绝热剪切行为影响规律研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2016.