一种新型近 β 钛合金 Ti684 动态力学性能 与抗弹性能的研究

李荣婷,范群波,王富耻,高瑞华

(北京理工大学,北京 100081)

摘 要:以北京理工大学自主研发的新型近 β 型钛合金 Ti684 为研究对象,以 Ti-6Al-4V 为参比,研究了 Ti684 合金的 微观组织、动态力学性能以及其作为装甲材料的抗弹性能。结果表明:经 900 /15 min/WQ 处理后的 Ti684 组织由尺 寸为 150 µm 左右的等轴 β 相大晶粒组成;经应变率为 2600 s⁻¹ 的动态压缩测试后,900 /15 min/WQ 处理的 Ti684 较 T_{β} 以下固溶时效处理的 Ti-6Al-4V 具有更高的动态强度 1870 MPa 和断裂失效应变 0.20。具有较好动态力学性能的同时,900 /15 min/WQ 处理的 Ti684 在靶试抗冲击过程中产生了应力诱发马氏体,延缓了绝热剪切带的形成,表现出了比 Ti-6Al-4V 试样更好的抗弹性能。

关键词:新型近 β 型钛合金;动态力学性能;抗弹性能;应力诱发马氏体

中图法分类号:TG146.2⁺3 文献标识码:A 文章编号:1002-185X(2015)08-1937-05

钛合金由于低密度,高比强度、高断裂韧性以及 良好的耐腐蚀性等特性,被广泛运用于飞机关键零部 件及装甲车辆防护结构^[1]。目前用于装甲材料的钛合 金主要为 Ti-6Al-4V,关于其抗弹性能的研究已较为成 熟^[2,3]。近来装甲钢的抗冲击防护研究表明,在抗击穿 甲弹时,材料抗弹性能随材料强度和硬度的增加而增 加^[4]。基于此规律,国内外学者开始将具有更高强度 的近 β 型钛合金用于装甲材料的研发^[5]。

本工作针对北京理工大学自主研发的 β 型新型钛 合金 Ti684 进行了动态力学性能及抗弹能力研究,并 与 TC4 进行了对比,以期为该合金在装甲领域的应用 提供依据。

1 实 验

试验材料由真空自耗电弧炉熔炼,经锻造后获得方 形钛合金锻件,合金主要成分见表 1。切取试样,对其 进行相变温度 T_{β} 上的固溶处理:900 固溶处理保温 15 min 水冷;试验对比用 Ti-6Al-4V 为宝鸡有色金属加 工厂提供 经近相变温度 T_{β} 以下固溶加时效处理(表 2)。

动态力学性能测试:运用北京理工大学实验室的 分离式霍普金森压杆(SHPB)系统进行动态压缩试验, 试样尺寸为 Φ 5 mm×5 mm 的圆柱形试样,应变率控制 在 10³ s⁻¹,计算获得试样在动态轴向压缩加载条件下 的真应力-真应变曲线。

表 1 试验用 Ti684 钛合金成分

Table 1	Chemic	al compo	sition of	the Ti684	Γi684 alloy (ω/%)		
Al	Mo	Cr	Fe	Si	0	Ν	
6.04	8.02	3.99	0.59	0.35	-	-	

表 2 热处理工艺参数

Fable 2	Heat treatment	conditions	used in	the	present stu	ıdy
---------	----------------	------------	---------	-----	-------------	-----

No.	Material	T_{eta}	Heat treatment
1	Ti684	855 ± 5	900 /15 min/WQ
2	Ti-6Al-4V	975 ± 5	Supplied

靶场试验:在中科院力学所穿甲试验室室内靶道 进行钛合金装甲板弹道试验(图1),采用 7.62 mm 穿 甲弹侵彻靶板。靶板尺寸为 Φ50 mm×7.5 mm,垂直布 置,后方装有验证板(基准靶板),验证板材料为 A3 钢,厚度为 21 mm。本试验通过测量基准靶板的残余 穿深 DOP(Depth of Penetration)和计算靶板的质量 防护系数 N 来评定装甲单元之间的相对防护性能,质 量防护系数的计算过程如图 2 所示。

首先进行基准试验,用高速弹丸侵彻基准靶板 (A3 钢),弹丸在基准靶板中的侵彻深度为 L;后用 相同条件的高速弹丸侵彻待研究的钛合金板与均质钢 板组成的复合靶,弹丸在基准靶板中的残余侵彻深度 为 DOP。比较 2 次背板穿深,以此评估装甲材料的抗 弹性能,靶板质量防护系数 N 的表达式如式(1),其

收稿日期:2014-08-12

基金项目:教育部"新世纪优秀人才支持计划"(NCET-12-0051)

作者简介:李荣婷,女,1989年生,博士,北京理工大学材料科学与工程学院,北京100081,电话:010-68911144,E-mail:fanqunbo@bit.edu.cn



图1 靶板结构示意图

Fig.1 Configuration of ballistic impact test



图 2 质量防护系数的计算方法示意图

Fig.2 Configuration of calculation of the quality protection factor: (a) depth of penetration in backing plate and (b) depth of penetration in composite target plate

中 ρ_1 、 ρ_2 分别为基准靶板及试验钛合金靶板的密度(A3 钢: 7.8 kg/cm³; Ti684: 4.6 kg/cm³; Ti-6Al-4V: 4.5 kg/cm³), *d* 为钛合金靶材厚度。

$$N = \frac{\rho_1 (L_1 - L_2)}{\rho_2 d}$$
(1)

2 结果及讨论

2.1 微观组织

图 3 为 900 /15 min/WQ Ti684 和 Ti-6Al-4V 试 样的 SEM 微观组织金相图。由于 Ti684 试样的 β 等轴 状晶粒尺寸较大,为了能完整观察到晶粒晶界,Ti684 试样微观组织标尺为 100 μ m,从图 3a 可看出 Ti-6Al-4V主要由片层状的初生 α 相和针状次生 α 相组 成的近网篮组织构成;由图 3b 可看出 900 /15 min/WQ Ti684 试样微观组织主要由尺寸为 150 μ m 左 右的等轴状 β 相构成。

图 4 为 900 /15 min/WQ Ti684 靶板弹坑截面处 组织金相图。可以看出在 β 等轴晶粒内有不同位向的 针状马氏体,初步可以判断 900 /15 min/WQ Ti684 靶板在抗冲击后产生了应力诱发马氏体 *α*"。



图 3 SEM 微观组织形貌

Fig.3 SEM microstructure of Ti-6Al-4V (a) and 900 /15 min/WQ Ti684 (b)



图 4 900 /15 min/WQ Ti684 试样弹坑截面处组织金相组织 Fig.4 Optical microstructure of the crater cross section of 900 /15 min/WQ Ti684

为了进一步确认应力诱发马氏体的产生,本研究对 靶板经靶试冲击前后的弹坑处组织进行了 XRD 物相鉴 定。图 5a 为 900 /15 min/WQ Ti684 靶板未经子弹冲 击前的 XRD 图谱;图 5b 为 900 /15 min/WQ Ti684 靶 板受冲击后弹坑位置处试样的 XRD 图谱,谱峰中显示 出斜方马氏体 a"峰,确认了应力诱发马氏体的产生。 2.2 动态力学性能

靶板的实际服役环境为抗击高速弹体的侵彻,因 此钛合金在高应变率加载条件下的动态力学行为值得 关注。本工作对两类不同材料试样进行高应变率下的 动态压缩,获得不同材料试样的动态压缩真实应力-应变曲线。图 6 为 900 /15 min/WQ 处理后的 Ti684 和 Ti-6Al-4V 试样在应变率为 2600 s⁻¹时的动态压缩应 力应变曲线。从曲线可 以看出,900 /15 min/WQ 处理的 Ti684 动态强度为 1870 MPa, 断裂失效应变为 0.2, Ti-6Al-4V 试样的动态强度为 1370 MPa, 断裂失 效应变为 0.16,900 /15 min/WQ 处理后 Ti684 动态 强度和断裂失效应变分别高出试验用 Ti-6Al-4V 约 36%和 25%,一方面是因为近 β 型钛合金 Ti684 具有 较高的 Mo 当量, [Mo]eq=10, 较高的 β 稳定元素形成 的固溶强化效应;另一方面是因为900 /15 min/WQ 处理后的 Ti684 合金在受高应变率冲击后,由于外界



图 5 900 /15 min/WQ Ti684 试样 XRD 图谱

Fig.5 XRD pattern of the 900 /15 min/WQ Ti684 sample before ballistic impact (a) and XRD pattern taken around the impact crater cross-section of 900 /15 min/WQ Ti684 condition showing presence α" orthorhombic martensite peaks (b)







机械诱导使亚稳态 β 转变为马氏体 α",相变提高应变 强化,放缓裂纹扩展和断裂,韧性通过这一机理大大 提高^[6-8]。

2.3 抗弹性能研究

图 7 为 Ti-6Al-4V 和 900 /15 min/WQ 处理后的 Ti684 试样靶板的损伤情况,实验所用靶板尺寸为 Φ50mm×7.5 mm,因尺寸较小,2种靶板均碎裂,可以看 出在弹坑位置处有一定程度的翻花现象。由表3 靶试







试验结果可知,Ti-6Al-4V 试样靶板背板的残余穿深为 11.9 mm,质量防护系数为2.1,而900 /15 min/WQ 处理后的Ti684 靶板背板的残余穿深为8.9 mm,质量 防护系数为2.7,优于Ti-6Al-4V 靶板的抗弹性能。

为了进一步分析两种不同组织和性能的钛合金靶 板的抗弹性能,本研究对不同靶板弹坑断裂面进行了 金相观测和 SEM 扫描观测。图 8a 为 Ti-6Al-4V 试样 靶板的弹坑断裂面 SEM 微观形貌,靶板的断口有大量 圆形或椭圆形韧窝,为明显的韧性断裂,证明其断裂 前产生明显的宏观塑性变形;图 8b 为 900 /15 min/ WQ 处理后的 Ti684 靶板弹坑断裂面的微观组织形貌, 断口同样有大量韧性断裂产生的圆形韧窝,但其韧窝 密度大于 Ti-6Al-4V。

图 9 为两种靶板弹坑断裂横截面的金相组织图, 从图中可以看出 900 /15 min/WQ 处理后的 Ti684 试 样和 Ti-6A1-4V 试样截面均出现绝热剪切,但 Ti-6A1-4V 靶板的绝热剪切带(图 9a)呈现亮白色,

表 3 靶试试验结果

 Table 3 Dynamic mechanical properties and the ballistic

	prop	oerties				
Matarial	Condition		DOP	Dynamic	Dynamic	N
Wraterrar			/mm	YS/MPa	strain/%	1 V
Ti684	900	/WQ	8.9	1870	20	2.7
Ti-6Al-4V			11.9	1370	16	2.1



图 8 靶板弹坑断口 SEM 微观形貌

Fig.8 SEM microstructure of the impact fracture surfaces of Ti-6Al-4V (a) and 900 /15 min/WQ Ti684 (b)



图 9 靶板断口横截面的微观组织金相图



数量大于 900 /15 min/WQ 处理后的 Ti684 靶板的灰 色绝热剪切带(图 9b)数量,同时 Ti684 靶板的断裂 面组织中出现了贯穿整个晶粒的不同位向的应变诱发 马氏体。近来关于钛合金动态变形过程的研究表明, 孪晶的产生会延迟绝热剪切带的产生,从而减小了绝 热剪切带的形成^[9];与此类似,应力诱发马氏体的产 生大幅减小了绝热剪切带的数量^[5],这主要是因为应 力诱发马氏体相变过程中的滑移消耗了存储的动能, 从而延迟了绝热剪切带的形成。

此外,经900 /15 min/WQ 处理后的 Ti684 试样 比 Ti-6Al-4V 试样具有较高的动态强度和动态塑性, 同时由于在抗冲击过程中产生的应力诱发马氏体延缓 了绝热剪切带的形成,因此表现出了比 Ti-6Al-4V 试 样更好的抗弹性能。 Ti-6Al-4V 试样和 900 /15 min/WQ 处理的 Ti684 的动态强度分别为 1370 和 1870 MPa,断裂失效 应变分别为 0.16 和 0.20; Ti684 试样较 Ti-6Al-4V 试 样具有更高的动态强度和断裂失效应变。靶试试验结 果表明,试验用 Ti-6Al-4V 靶板试样的残余穿深和质 量防护系数分别为 11.9 mm 和 2.1,经 900 /15 min/WQ 处理的 Ti684 靶板的残余穿深和质量防护系 数分别为 8.9 mm 和 2.7。

2) 900 /15 min/WQ 处理的 Ti684 靶板弹坑断口 出现应力诱发马氏体 a",马氏体相变提高应变强化, 放缓裂纹扩展和断裂,合金韧性得以提高;Ti684 和 Ti-6Al-4V 靶板均为韧性断裂,但 Ti684 试样断口的韧 窝密度明显大于 Ti-6Al-4V 试样,材料断裂前吸收了 更多的能量,所以 Ti684 比实验用 Ti-6Al-4V 具有更 高的动态强度和断裂失效应变。

3)两种靶板都出现绝热剪切带,但试验用 Ti-6AI-4V 靶板比900 /15 min/WQ处理的Ti684 靶 板绝热剪切数目多,这是由于Ti684 靶板在抗冲击过 程中产生了应力诱发马氏体,延迟了绝热剪切带的形 成,表现出较好的抗弹性能。

参考文献 References

- [1] Wen Jianhong(汶建宏), Yang Guanjun(杨冠军), Ge Peng(葛鹏) et al. Titanium Industry Progress(钛工业进展)[J], 2008, 25(1): 33
- [2] Lee Dong Geun, Lee You Hwan, Lee Sung Hakl et al. Metallurgical and Materials Transactions A[J], 2004, 35A: 112
- [3] Martinez F, Murr L E, Ramirez A et al. Materials Science and Engineering A[J], 2007, 454-455: 581
- [4] Deya S, Børvik T, Hopperstad O S et al. International Journal of Impact Engineering[J], 2004, 30: 1005
- [5] Sukumar G, Bhav Singh B, Mit Bhattacharjee A et al. International Journal of Impact Engineering[J], 2013, 54: 149
- [6] Grosdidier T, Philippe M J. Materials Science and Engineering A[J], 2000, 291: 218
- [7] Neelakantan S, San Martin D, Rivera-Dı'az-del-Castillo P E J et al. Materials Science and Technology[J], 2009, 25(11): 1358
- [8] Kharia K K, Rack H J. Metallurgical and Materials Transactions A(冶金与材料会刊)[J], 2001, 32A: 679
- [9] Rittel D, Landau P, Venkert A. *Physical Review Letters*[J], 2008, 101: 165 501

3 结 论

Dynamic Mechanical Properties and Ballistic Performance of a Newly Developed Near- β Titanium Alloy Ti684

Li Rongting, Fan Qunbo, Wang Fuchi, Gao Ruihua (Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: The present study was based on a newly developed near β titanium alloy Ti684 (Ti-6Al-8Mo-4Cr) of Beijing Institute of Technology, in comparison with Ti-6Al-4V. The microstructure, the dynamic mechanical property and the ballistic performance of the Ti684 alloy as armour material were investigated. The results show that the microstructure of 900 °C/15 min/WQ Ti684 consists of equiaxed β grains with the size of 150 µm. In the dynamic compression test, at the strain rate of 2600 s⁻¹, the Ti684 sample has the dynamic yield strength of 1870 MPa and the critical fracture strain of 0.2, both higher than Ti-6Al-4V sample. Meanwhile, the stress-induced martensite is found in the ballistic impact progress of the 900 °C/15 min/WQ Ti684 plate, which delays the formation of adiabatic shear bands, then improving the ballistic performance of material in some extent.

Key words: newly developed near- β titanium alloy; dynamic mechanical property; ballistic performance; stress-induced martensite

Corresponding author: Fan Qunbo, Associate Professor, School of Materials Science and Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, P. R. China, Tel: 0086-10-68911144, E-mail: fanqunbo@bit.edu.cn