

# 铸造态钛合金力学性能及抗弹性能研究

余东辉, 范群波, 王富耻, 夏雨萌, 穆啸楠

(北京理工大学, 北京 100081)

**摘要:**以铸造态钛合金 $\beta$ 20C、TC4、TA15和TA18为研究对象,开展了以钛合金为面板、A3钢为背板的复合装甲抗弹性能试验、基于分离式Hopkinson Bar技术的动态压缩试验和室温条件下的准静态压缩和准静态拉伸试验。并对铸造态钛合金 $\beta$ 20C、TC4、TA15和TA18抗弹性能的影响因素进行了对比与分析。结果发现:铸造态钛合金 $\beta$ 20C的A3钢背板具有最小残余穿深值4.7 mm,分别比铸造态钛合金TC4、TA15和TA18低22%、37%和23%,且 $\beta$ 20C的质量防护系数也相应具有最大值2.61,表明 $\beta$ 20C具有最佳抗弹性能;铸造态钛合金 $\beta$ 20C的动态压缩强度、准静态抗压强度、准静态拉伸屈服强度和准静态抗拉强度值分别达1578、1474、1052和1101 MPa,各强度值在4种钛合金中均是最高的,表明动态强度及准静态强度对铸造态钛合金的抗弹性能的影响是决定性的;4种铸造态钛合金的冲击吸收功、动态塑性、临界断裂应变和断后伸长率则与抗弹性能呈现出一定的波动关系,表明冲击吸收功、动态塑性和准静态塑性对抗弹性能的影响是非决定性的;铸造态钛合金 $\beta$ 20C靶板正面出现了尺寸为10 mm×12 mm的开坑现象,在4种铸造态钛合金中最明显的,同时没有发现明显的剪切冲塞破坏现象。

**关键词:**铸造态钛合金;抗弹性能;动态力学性能;准静态力学性能

中图分类号: TG146.2+3

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2017)08-2234-06

钛合金具有强度高、塑韧性好、密度低及抗冲击等良好的综合性能<sup>[1]</sup>。钛合金装甲与装甲钢相比,同等防护力条件下使结构质量减轻30%以上;与铝合金装甲相比,同等质量可以提高防护力30%以上,因而成为世界各装甲强国为减轻整车质量和提高防护能力所竞相采用的装甲材料<sup>[2]</sup>。针对M1主战坦克,美国陆军研究了许多可应用钛合金的部件,如设计了钛合金坦克炮塔,该部件可使坦克减重4 t,设计了钛合金回转炮塔板、炮塔枢轴架和指挥舱盖等一系列部件,这些部件可使坦克减重475 kg。在M2战车上,钛合金主要用于指挥舱盖和顶部装甲的改进,上述改进可使原部件质量减轻35%并极大提高防弹能力<sup>[3]</sup>。此外,铸造态钛合金应用在装甲车上具有独特的优势。以铸造炮塔为例,铸造炮塔具有生产工艺简单、容易成型、结构完整等优点。因铸造炮塔为整体铸造成型,故能形成良好的防弹外形且装甲利用率较高。

事实上,铸造态钛合金也具有优良的力学性能从而有望应用在装甲防护领域。这是由于钛合金的 $\alpha+\beta$ 相向 $\beta$ 相转变温度一般在1040~705℃范围内,该温度区间远低于钛合金的凝固温度,因此钛合金在固态相变过程中避开了树枝状 $\beta$ 晶的形成并且能够形成薄片状的 $\alpha+\beta$ 结构。此外,铸造态钛合金的显微组织可

通过适当的铸造工艺进一步得到改善、铸造态钛合金的性能也能进一步得到优化。美军现役战机F-22上使用了大量的铸造态钛合金作为机身结构件,这表明了铸造态钛合金具有优良的力学性能并可获得实际的军事应用<sup>[4]</sup>。

目前,国内外学者已开展了大量关于锻造态钛合金抗弹性能的研究工作。如Wang等人研究了Ti-55531合金在不同热处理制度下所得不同性能板材的抗弹行为和动态性能,并通过不同侵彻速度下组织演化探讨了合金板的失效机制<sup>[5]</sup>。又如,Sukumar等人研究了一种锻造态高强亚稳近 $\beta$ 钛合金 $\beta$ -CEZ在不同热处理条件下的抗弹性能,结果表明其抗弹性能不如锻造态TC4钛合金<sup>[6]</sup>。再如,美国Allegheny技术公司专门开发了一种具有良好冷作、热作能力和良好的综合力学性能的新型装甲用钛合金ATI425,且美国陆军实验室对其进行了20 mm子弹侵彻模拟实验,结果表明其抗弹性能明显优于锻造态TC4钛合金<sup>[7]</sup>。然而关于铸造态钛合金的相关研究却鲜有报道。因此本实验针对4种铸造态钛合金 $\beta$ 20C、TC4、TA15和TA18开展了力学性能及抗弹性能的研究。

## 1 实验

收稿日期: 2016-08-25

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: 余东辉,男,1992年生,硕士生,北京理工大学材料学院,北京100081,电话:010-68911144,E-mail:eyewind163@163.com

$\beta$ 20C 是由北京理工大学自行设计的一种近  $\beta$  型钛合金, TC4、TA15 和 TA18 来自宝钛集团。所用钛合金靶板规格为 100 mm×100 mm×11.5 mm, 所用钢背板均为 A3 钢, 其尺寸为 300 mm×100 mm×23 mm, 各材料成分如表 1 所示。

钛合金装甲板抗弹试验在中科院力学所进行, 采用 56 式 7.62 mm 穿甲弹侵彻靶板。弹体速度通过装药量来控制, 利用电子测速仪测得子弹穿甲速度约为 730 m s<sup>-1</sup>, 钛合金靶板垂直布置, 后方装有 A3 钢背板以作为基准靶板, 质量防护系数计算见公式(1):

$$N = \rho_1(L_1 - L_2) / \rho_2 d \quad (1)$$

其中,  $\rho_1$ 、 $\rho_2$  分别为 A3 钢背板和钛合金面板的密度,  $L_1$  为穿甲弹侵彻基准靶的穿深,  $L_2$  为穿甲弹侵彻复合板时背板的残余穿深,  $d$  为钛合金面板厚度。质量防护系数  $N$  越大则材料的抗弹能力越好, 由于 4 种钛合金的密度在 4.434 到 4.56 g/cm<sup>3</sup> 之间, 且钢背板均为 A3 钢, 若忽略钛合金密度差异这一影响因素, 则也可用 A3 钢残余穿深 (depth of penetration, DOP) 值来表征抗弹能力, 且残余穿深值越小则材料的抗弹能力就越好。

动态压缩实验是在  $\Phi$ 14.5 mm 分离式 Hopkinson Bar 上进行的, 其实验装置示意图如图 1 所示, 文献[8-10]

中的相关内容详细介绍了该实验的实验原理。在实验用钛合金板材上沿着厚度方向取  $\Phi$ 5 mm×5 mm 的圆柱体试样, 进行动态压缩实验。采用 200 mm 撞击杆, 打击气压在 3~5 MPa 之间, 通过控制打击气压使样品的应变率维持在 4000 s<sup>-1</sup>, 计算获得试样在动态轴向压缩加载条件下的动态真 ( $\sigma$ - $\epsilon$ ) 曲线。并基于动态真 ( $\sigma$ - $\epsilon$ ) 曲线, 计算出均匀塑性变形阶段 (应力值变化较为平稳、变化幅度不超过 10% 的区间) 的平均应力值以表征动态压缩强度  $\sigma_d$ ; 以动态真 ( $\sigma$ - $\epsilon$ ) 曲线上应力陡然上升和下降的点分别为试样发生塑性变形和剪切破坏的临界点, 且两者对应的应变值分别记为  $\epsilon_0$  和  $\epsilon_1$ , 并以  $(\epsilon_1 - \epsilon_0)$  来表征动态塑性  $\epsilon_{cr}$  的大小; 在应变范围  $\epsilon_0 \sim \epsilon_1$  内进行应力和应变的积分以作为冲击吸收功  $E$  值, 计算公式如式 (2) 所示。并用动态压缩强度  $\sigma_d$ 、动态塑性  $\epsilon_{cr}$  和冲击吸收功  $E$  作为表征材料动态力学性能指标<sup>[11]</sup>。

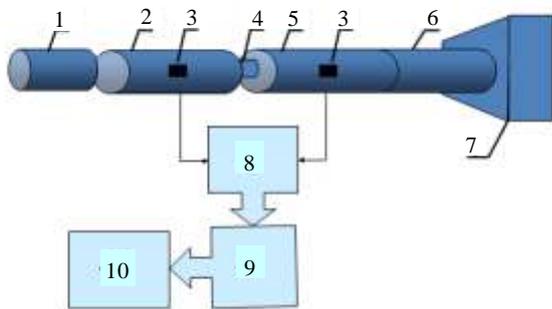
$$E = \int_{\epsilon_0}^{\epsilon_1} \sigma d\epsilon \quad (2)$$

室温准静态压缩和拉伸试验是在型号为 INSTRON 5985 的电子式万能材料试验机上进行的, 该仪器可分别进行室温准静态压缩及拉伸试验。压缩试验参照国标“金属材料室温压缩试验方法 GB-T7314-2005”进行, 测试所用样品尺寸为  $\Phi$ 8 mm×12 mm, 应变率为 1×10<sup>-3</sup> s<sup>-1</sup>,

表 1 TC4、TA15、TA18、 $\beta$ 20C 化学成分

Table 1 Chemical composition of TC4, TA15, TA18 and  $\beta$ 20C (wt%)

Alloys	Al	V	Mo	Zr	Fe	Si	C	O	N	H	Sn	Zn	Cr	Ti
TC4	6.1	4.2	-	-	0.14	-	<0.01	0.16	0.01	0.001	-	-	-	Bal.
TA15	6.4	1.9	1.5	2.0	0.02	0.02	0.01	0.07	<0.01	<0.001	-	-	-	Bal.
TA18	3.0	2.84	-	-	0.12	-	0.02	0.09	0.02	0.002	1.8	-	-	Bal.
$\beta$ 20C	5.12	-	4.48	1.8	0.52	-	0.01	0.08	0.02	0.002	1.1	2.9	2.5	Bal.



1-impact bar; 2-input bar; 3-strain gauge; 4-sample; 5-output bar; 6-absorbing bar; 7-damper; 8-strain measuring device; 9-waveform storage device; 10-data processing system

图 1 Hopkinson Bar 装置示意图

Fig.1 Scheme diagram of Hopkinson Bar

加载直至试样发生失效变形, 测得样品的准静态抗压强度及临界断裂应变作为反映材料准静态压缩性能指标。拉伸试验是参照国标“金属材料室温拉伸试验方法 GB-T 228-2002”进行的, 所用样品的标距  $\Phi$ 5 mm×25 mm, 应变率为 10<sup>-3</sup> s<sup>-1</sup>, 加载直至试样发生失效变形或者断裂, 测得样品的准静态拉伸屈服强度、准静态抗拉强度及断后伸长率作为反映材料准静态拉伸性能指标, 拉伸试样尺寸及形状如图 2 所示。

## 2 结果及分析

### 2.1 靶试试验

靶试试验结果如表 2 所示。由表 2 可知, 在铸造态钛合金  $\beta$ 20C、TA18、TC4 和 TA15 中,  $\beta$ 20C 的 A3 钢背板具有最小残余穿深 (DOP) 值 4.7 mm, 分别比铸造态钛合金 TC4、TA15 和 TA18 低 22%、37% 和 23%,

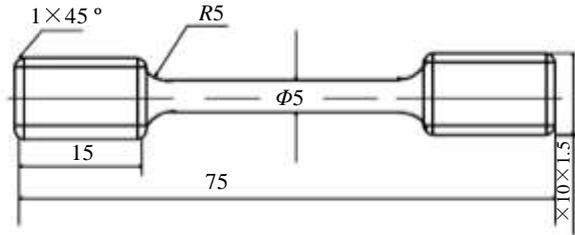


图 2 室温准静态拉伸试样尺寸

Fig.2 Sample size of quasi static tensile tests

表 2 靶试试验结果

Table 2 Results of ballistic experiments

Alloys	A3 steel	TC4	TA15	TA18	$\beta$ 20C
DOP/mm	22.2	6.2	7.5	6.1	4.7
<i>N</i>	-	2.42	2.19	2.42	2.61

且其质量防护系数为最高值 2.61, 这表明铸造态钛合金  $\beta$ 20C 的抗弹性能最好; 相比之下, TA15 的 A3 钢板具有最大残余穿深值 7.5 mm, 同时其质量防护系数为最小值 2.19, 这表明铸造态钛合金 TA15 的抗弹性能最差。TA18 的质量防护系数则为 2.42, 其质量防护系数与铸造态 TC4 钛合金相当, 均比  $\beta$ 20C 钛合金的小, 表明铸造态钛合金 TA18 的抗弹性能处于中间水平。

### 2.2 动态压缩试验

编号为 TC4、TA15、TA18 和  $\beta$ 20C 的动态压缩回收试样宏观照片如图 3 所示。由图 3 可知, 在  $4000\text{ s}^{-1}$  应变率条件下, 试样沿着最大剪应力方向断裂失效, 即与圆柱试样轴线成  $45^\circ$  方向, 该断裂类型属于典型的剪切断裂。

各试样动态真 ( $\sigma$ - $\epsilon$ ) 曲线如图 4 所示。从图 4 可以看出, 动态真 ( $\sigma$ - $\epsilon$ ) 曲线大致可分为弹性变形阶段和塑性流变阶段, 以上两阶段各试样的曲线均未出现明显的屈服平台。试样发生屈服以后, 随着试样塑性变形的增加, 4 种试样的动态流变应力均无明显增加, 说明这 4 种试样在高应变率条件下的应变强化效应都不明显。

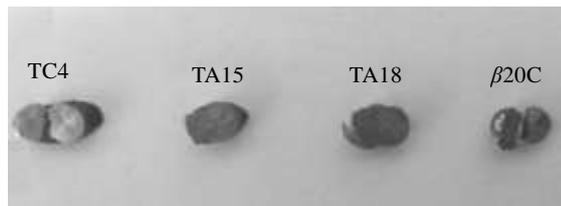


图 3 4 个试样在应变率为  $4000\text{ s}^{-1}$  下的变形与断裂

Fig.3 Plastic deformation and fracture of four species at  $4000\text{ s}^{-1}$  strain rate

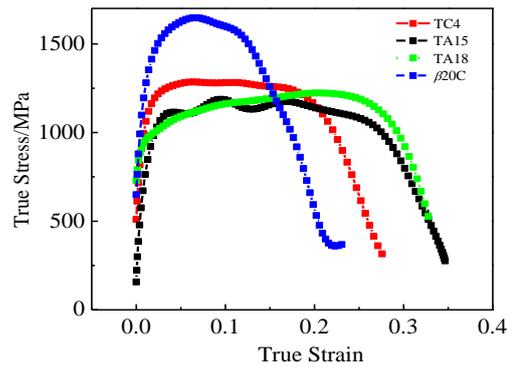


图 4 TC4、TA15、TA18、 $\beta$ 20C 试样的动态真应力-应变曲线  
Fig.4 True stress-strain ( $\sigma$ - $\epsilon$ ) curves at  $4000\text{ s}^{-1}$  strain rate of TC4, TA15, TA18 and  $\beta$ 20C

结合图4的应力应变曲线, 计算4种试样在 $4000\text{ s}^{-1}$ 应变率加载条件下的动态强度( $\sigma_d$ )、临界断裂应变( $\epsilon_{cr}$ )和冲击吸收功 ( $E$ ), 将以上各值及靶试试验中A3钢的残余穿深 (DOP) 的值列于图5a~5d。

由图 5a~5c 可知, 在  $4000\text{ s}^{-1}$  应变率加载条件下, 在 4 种铸造态钛合金  $\beta$ 20C、TC4、TA15 和 TA18 中,  $\beta$ 20C 具有最高的动态强度, 其值为 1578 MPa, 同时具有最低动态塑性及冲击吸收功, 分别为 10.1% 和  $130\text{ MJ m}^{-3}$ ; 而其残余穿深 DOP 值最小仅为 4.7 mm, 其抗弹性能最佳。TA15 具有最小的动态强度, 其值为 1128 MPa, 同时具有最高动态塑性和最大冲击吸收功, 分别为 24% 和  $271\text{ MJ m}^{-3}$ , 而其残余穿深 DOP 值为最大值 7.5 mm, 其抗弹性能最差。值得注意的是, TA15 的动态塑性最高, 但其残余穿深值并非最小,  $\beta$ 20C 动态塑性最低但残余穿深值却最小。由此可见动态塑性不能较好地反映抗弹性能; 同样地, 随着背板残余穿深值的减小, 冲击吸收功  $E$  并非单调递增, 这表明冲击吸收功也不能较好反映抗弹性能。综上分析可知, 动态强度、动态塑性及冲击吸收功与铸造态钛合金抗弹性能密切相关; 以上 3 个参量中, 动态强度能够相对较好地反映铸造态钛合金的抗弹性能。

同时分析了钛合金面板的正面及背面宏观损伤形貌。如图6所示, 发现在7.62 mm穿甲弹以 $730\text{ m s}^{-1}$ 的速度侵彻条件下, 钛合金面板均被完全穿透。所有材料中,  $\beta$ 20C的钛合金靶板正面开坑较大, 尺寸为 $12\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ , 弹坑内壁因出现崩落而造成孔壁凹凸不平, 并且靶板未造成严重的冲塞破坏, 同时背面没有出现翻层现象, 虽出现了背凸现象但并不明显, 上述现象使得弹体在侵彻靶板的过程中消耗较多的能量, 有利于靶板抗弹性能的提高。TC4、TA15及TA18钛合金正面开坑都

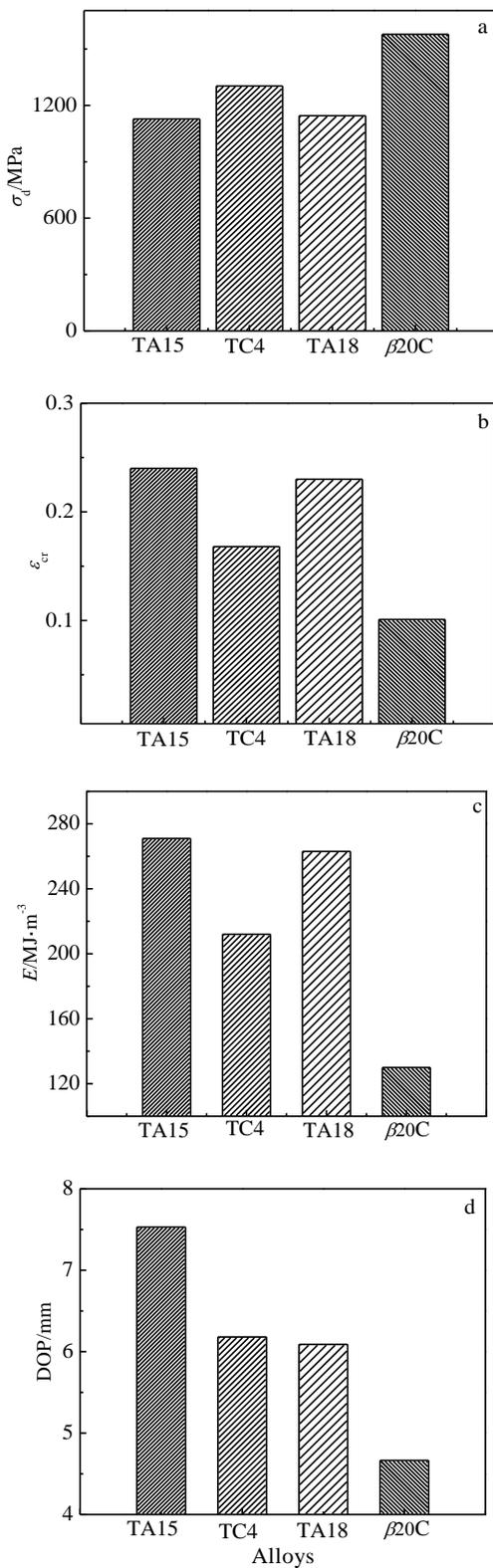


图 5 不同试样对应的动态强度  $\sigma_d$ 、动态塑性  $\epsilon_{cr}$ 、冲击吸收功  $E$  和残余穿深 DOP

Fig.5 Dynamic strength (a), ductility (b), impact absorbing energy (c) and DOP (d) of TC4, TA15, TA18 and  $\beta$ 20C alloys

没有  $\beta$ 20C 明显，同时靶板背面都出现不同程度的背凸和翻唇现象，TA18 的翻唇现象表现得最为显著。TA15 和 TC4 靶板的孔壁光滑，为典型的绝热剪切冲塞破坏，当出现绝热剪切冲塞破坏现象时，装甲吸收弹丸的能量远低于其被塑性破坏时所吸收的能量，装甲对弹丸的阻力大大减小，绝热剪切冲塞的形成往往意味着靶材防护性能的彻底丧失。因此，TA15 钛合金靶板的残余穿深最大，其抗弹性能最差， $\beta$ 20C 钛合金靶板的残余穿深最小，其抗弹性能最好。结合上述对图 5a~5c 和对图 6 的分析可知，钛合金靶板具有高的动态强度可以增加靶板的正面开坑现象、增大塑性扩孔的困难程度及减少绝热剪切冲塞破坏的发生，从而能够有效降低弹体速度进而提高其抗弹性能。

### 2.3 室温准静态压缩和拉伸试验

室温准静态压缩试验及拉伸试验结果分别如表 3 和表 4 所示。

由表 3 可知在室温准静态试验条件下  $\beta$ 20C 具有最高的准静态抗压强度，其值约为 1474 MPa，但其临界断裂应变在所有钛合金中却是最小的，仅为 0.20；TC4、TA15 及 TA18 钛合金的准静态抗压强度均低于 1220 MPa，TC4 和 TA15 的临界断裂应变值分别为 0.24 和 0.26，TA18 值为 0.34。

与准静态压缩试验结果类似，由表 4 可知在室温准静态拉伸试验条件下， $\beta$ 20C 具有最高的屈服强度及抗拉强度值，但具有最小的断后伸长率，仅为 2.14%；TC4 和 TA15 及 TA18 钛合金的准静态拉伸屈服强度及准静态抗拉强度相对较低，在 562 MPa 到 837 MPa 之间。

图 7 同时给出了 4 种铸造态钛合金的准静态抗压强度值、准静态拉伸屈服强度值、准静态抗拉强度值与动

表 3 室温准静态压缩试验结果

Alloys	Compression strength, $R_m$ /MPa	Fracture strain, $\epsilon_{cr}$
TC4	1211	0.24
TA15	1156	0.26
TA18	1160	0.34
$\beta$ 20C	1474	0.20

表 4 室温准静态拉伸试验结果

Alloys	Yield strength, $R_p$ /MPa	Tensile strength, $R_m$ /MPa	Elongation, $A$ /%
TC4	796	837	3.57
TA15	752	807	2.88
TA18	562	601	13.57
$\beta$ 20C	1052	1101	2.14

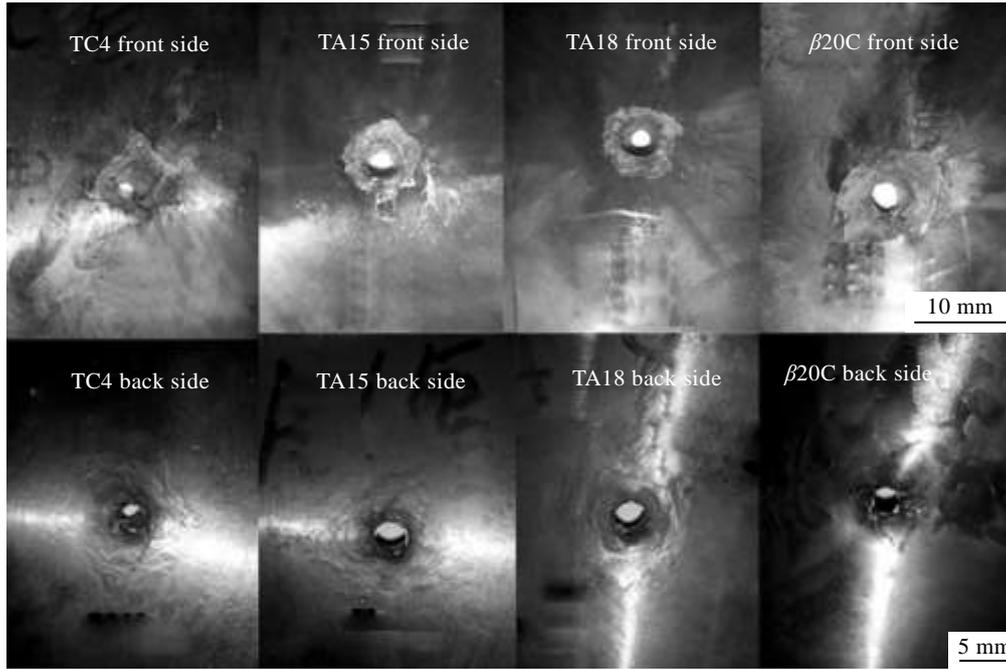


图 6 钛合金靶板正面和背面的损伤情况

Fig.6 Damage situation of the front side and back side of titanium alloy targets

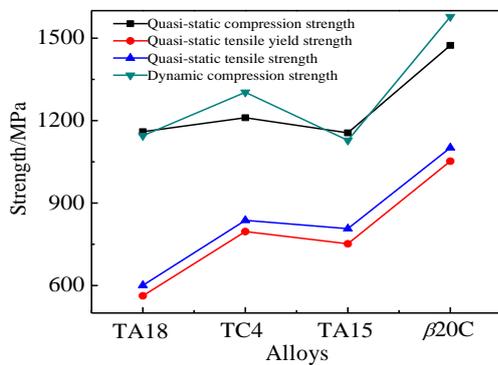


图 7 铸造态钛合金 TA18、TC4、TA15 和 beta20C 的准静态抗压强度值、准静态拉伸屈服强度值、准静态抗拉强度值与动态压缩强度值

Fig.7 Compression strength, yield strength, tensile strength and dynamic compression strength of cast titanium TA18, TC4, TA15, and beta20C

态压缩强度值，可以发现准静态抗压强度、准静态拉伸屈服强度和准静态抗拉强度值均与动态压缩强度值呈现出较好的正相关性。可见，准静态强度和动态强度均能用于表征抗弹性能，且强度越高抗弹性能越好。

### 3 结 论

1) 在铸造态钛合金 beta20C、TA18、TC4 和 TA15 中，beta20C 的 A3 钢背板具有最小残余穿深值 4.7 mm，分别比铸造态钛合金 TC4、TA15 和 TA18 的低 22%、37% 和 23%，且其质量防护系数也相应具有最大值 2.61，这反映出铸造态钛合金 beta20C 具有最优的抗弹性能。

2) 铸造态钛合金 beta20C 的动态压缩强度、准静态抗压强度、准静态拉伸屈服强度和准静态抗拉强度值分别达 1578、1474、1052 和 1101 MPa，各强度值在 4 种钛合金中均是最高的，表明动态压缩强度及准静态强度对铸造态钛合金的抗弹性能的影响是决定性的；4 种铸造态钛合金的冲击吸收功、动态塑性、临界断裂应变和断后伸长率则与抗弹性能呈现出一定的波动关系，表明冲击吸收功、动态塑性和准静态塑性对抗弹性能的影响是非决定性的。

3) 铸造态钛合金 beta20C 靶板正面出现了尺寸为 10 mm x 12 mm 的开坑现象，在 4 种铸造态钛合金中是最明显的，同时没有发现明显的剪切冲塞破坏现象，因而其抗弹性能是最佳的。

#### 参考文献 References

[1] Zhou Wei(周 伟), Ge Peng(葛 鹏), Xin Haiying(辛海鹰) et al. Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程) [J], 2013, 42(4): 781

- [2] Zhang Ziqiang(张自强). *Armor Technology*(装甲防护技术基础)[M]. Beijing: Weapons Industry Press, 2000: 161
- [3] Gao Wa(高 娃), Zhang Cunxin(张存信). *Titanium Industry Progress*(钛工业进展)[J], 2008, 25(3): 6
- [4] Gonzalez Jorge F. *RTO AVT Specialists' Meeting on "Cost Effective Application of Titanium Alloys in Military Platforms"* [C]. Norway: RTO-MP-069(II), 2003
- [5] Wang Yanling, Hui Songxiao, Liu Rui *et al. Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2015, 25: 429
- [6] Sukumar G, Singh B B, Bhattacharjee A *et al. International Journal of Impact Engineering*[J], 2013, 54: 149
- [7] Mithun K. *Thesis for Master*[D]. Akron: The University of Akron, 2008
- [8] Yao Junchen(姚俊臣), Wen Lifang(文丽芳), Han Shoubo(韩寿波) *et al. Journal of Materials Engineering*(材料工程)[J], 2006, 6: 46
- [9] Zhao Shougen(赵寿根), He Zhu(何 著), Yang Jialing(杨嘉陵) *et al. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*(北京航空航天大学学报)[J], 2007, 33(8): 982
- [10] Lu Shouke(路守克), Shi Guochuan(史国川), Chen Xia(陈 侠). *Computer Development and Application*(电脑开发与应用)[J], 2010, 23(9): 47
- [11] Liu Qinghua(刘清华), Hui Songxiao(惠松晓), Ye Wenjun(叶文君) *et al. Chinese Journal of Rare Metals*(稀有金属)[J], 2012, 36(4): 520

## Mechanical Properties and Ballistic Performance of As-cast Titanium Alloys

Yu Donghui, Fan Qunbo, Wang Fuchi, Xia Yumeng, Mu Xiaonan

(Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract:** A series of experiments were conducted on as-cast titanium alloys  $\beta$ 20C, TC4, TA15 and TA18, including the ballistic test, the dynamic compression test, the quasi-static tensile test, as well as the quasi-static compression test. Based on the experiments, factors affecting the ballistic performance of as-cast titanium alloys were compared. Results show that as-cast titanium alloy  $\beta$ 20C has the minimum of DOP, which is 4.7 mm, about 22%, 37% and 23% less than that of as-cast titanium alloys TC4, TA15 and TA18, respectively. Besides, mass efficiency of  $\beta$ 20C is 2.61 which is the maximum among the four as-cast titanium alloys, indicating that  $\beta$ 20C has the best ballistic performance. Furthermore, dynamic compression strength, quasi-static compression strength and quasi-static tensile yield strength together with quasi-static tensile strength of  $\beta$ 20C are 1578, 1474, 1052 and 1101 MPa, respectively, larger than the corresponding values of the other three titanium alloys. While the impact absorbing energy, dynamic ductility and critical fracture strain and fracture elongation don't reflect the ballistic performance very well. In addition, the cratering size of the target frontage of  $\beta$ 20C is 10 mm $\times$ 12 mm, being the biggest one among the four as-cast titanium alloys, without obvious shearing plugging damage.

**Key words:** as-cast titanium alloy; ballistic performance; dynamic mechanical property; quasi-static mechanical property

---

Corresponding author: Fan Qunbo, Ph. D., 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