

# 典型钛合金静、动态性能和抗弹性能的关系

辛社伟<sup>1</sup>, 郝芳<sup>2,3</sup>, 周伟<sup>1</sup>, 张思远<sup>1</sup>, 毛友川<sup>2,3</sup>, 孙久平<sup>1,4</sup>, 李倩<sup>1</sup>, 刘向宏<sup>2</sup>

(1. 西北有色金属研究院, 陕西 西安 710016)

(2. 西部超导材料科技股份有限公司, 陕西 西安 710018)

(3. 西北工业大学, 陕西 西安 710072)

(4. 东北大学, 辽宁 沈阳 110819)

**摘要:** 对 TA15、Ti-6432、TC21、Ti-15Mo 4 种具有典型特征的合金进行了静态拉伸、冲击、动态压缩和抗弹性能的测试, 并分析了靶弹侵彻后合金的组织。结果表明, 4 种不同类别合金对应的冲击吸收功和合金静态拉伸性能没有直接的对应关系。对于静态拉伸和动态压缩性能, 高的抗拉强度对应较高的动态压缩流变应力, 高的延伸率对应高的均匀塑性应变, 这种对应关系只是一种趋势的反映, 具体数值没有对应的比例关系。对于动态压缩和抗弹性能, 4 种合金动态压缩性能的排序为 TC21>TA15>Ti-15Mo>Ti-6432, 抗弹性能的排序为 TC21>TA15>Ti-6432>Ti-15Mo。从具体数值看, TC21、TA15 和 Ti-6432 动态压缩性能差距明显, 而弹孔穿深差别并不明显, 可以认为抗弹性能处于同一水平。Ti-15Mo 合金弹孔穿深明显大于其它合金, 说明用动态压缩性能并不能完全反映材料具体抗弹性能。以上结果主要与不同合金显微组织类型和损伤过程中不同的形变损伤机制相关。

**关键词:** 钛合金; 拉伸性能; 冲击性能; 动态力学性能; 抗弹性能

**中图分类号:** TG146.23

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-185X(2022)01-0295-06

随着反装甲威胁的日益增加, 作战车辆的防护装甲也越来越厚。最近 20 年里, 为了提高作战车辆的安全性, 地面装甲车的质量提高了 15%~20%。如果这种势头继续下去, 装甲车质量的增加将严重影响其运输能力、对轻便桥梁的穿越能力以及其机动性。而未来高技术局部战争要求地面火力更快速、机动和灵活。尤其是要求装备要快速部署到世界各地。因此, 在保障作战车辆安全性的前提下, 作战车辆的轻量化技术研究也是各国武器装备发展的重点。针对作战车辆的轻量化需求, 选择经济可承受性的轻质材料来替代目前的钢制工件是最有效的途径。在轻质材料中, 钛合金因具有耐腐蚀、高比强度、高韧性和可焊接等性能特点, 成为最佳选择。近年来, 围绕钛合金抗弹性能和抗弹机理的研究越来越热, 研究最多的是 TC4 合金, 而且也正在被大量应用于陆军作战平台。研究主要集中于 TC4 作为钛合金本身的抗弹性能以及不同组织状态下合金在高速冲击条件下的损伤行为<sup>[1-5]</sup>。在此基础上, 出于较高的防护性能考虑, 也对航空通用的高强韧钛合金如 Ti1023(TB6)<sup>[6,7]</sup>、 $\beta$ -CEZ<sup>[8]</sup>、Ti5553<sup>[9]</sup>等合金在高速冲击下的变形行为和抗弹性能进行研究。除显微组织影响外,

还涉及动态应变诱发相变对抗高速冲击性能的影响<sup>[6,10,11]</sup>。近年来, 根据高冲击环境的服役条件, 北京理工大学等也针对性地设计了新型钛合金, 并对合金抗弹机理和抗弹性能进行了研究<sup>[12-14]</sup>。但是现有的研究大都是针对特定合金的某一方面性能或机理的研究, 很少全面对比分析不同类别合金静态性能、动态性能与抗弹性能的关系。本实验选择 TA15、Ti-6432、TC21、Ti-15Mo 4 种合金为研究对象, 其中 TA15 是目前航空应用最广泛的近  $\alpha$  钛合金, Ti-6432 是西北有色金属研究院专门针对兵器应用设计的低成本高强韧钛合金, TC21 是目前中国新型战机主干损伤容限钛合金, Ti-15Mo 是具有强烈孪生诱发塑性 (TWIP) 效应的亚稳  $\beta$  钛合金, 这 4 种合金具有典型的特点和代表性, 对 4 种合金的准静态拉伸性能、动态压缩性能和抗弹性能进行分析和研究。研究结果将为不同类别装甲钛合金的选择和设计提供理论和实验基础, 同时, 也为探索装甲材料评价准则提供参考。

## 1 实验

本研究选择 TA15、Ti-6432、TC21 和 Ti-15Mo 4 种

收稿日期: 2021-01-19

基金项目: 装备预研冲击环境材料技术重点实验室基金 (61429020101)

作者简介: 辛社伟, 男, 1978 年生, 博士, 教授, 西北有色金属研究院钛合金研究所, 陕西 西安 710016, 电话: 029-86231078, E-mail: nwpu\_xsw@126.com

合金作为研究对象,其中 TA15 和 TC21 来自西部超导材料科技股份有限公司, Ti-6432 和 Ti-15Mo 来自西北有色金属研究院。合金经过充分锻造后, TA15、Ti-6432、TC21 轧制成厚度 22 mm 的板材, Ti-15Mo 合金轧制成 30 mm 厚的板材, 然后对 TA15、Ti-6432、TC21 3 种合金进行其对应成熟工艺的热处理, 即双相区固溶+低温时效。Ti-15Mo 合金为了充分实现其 TWIP 效应, 热处理采用  $\beta$  相区固溶+水淬。热处理后的板材沿轧制方向切取拉伸试样、U 型冲击试样和压缩试样, 分别进行拉伸性能、冲击性能和动态压缩性能的测试。动态压缩试验在北京理工大学冲击环境材料技术国防重点实验室的分离式霍普金森压杆 (SHPB) 装置上进行, 测试方法和原理参考北京理工大学的相关文献<sup>[14,15]</sup>, 样品尺寸为  $\Phi 3 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$ 。通过对多个试样进行动态压缩, 获得材料临界剪切的动态压缩性能数据, 即平均流变应力 ( $\sigma$ )、均匀塑性应变 ( $\epsilon$ )、试样失效前的动态压缩吸收功 ( $E$ ) 和最大应变速率。合金的打靶试验在北京 208 所进行。将热处理后的 4 种合金板材切取 400 mm $\times$ 400 mm 正方形靶板, 将靶板分为 4 个象限, 对每一个象限在 100 m 距离各打一发 53 式 7.62 mm 穿甲燃烧弹, 入射角为 0°, 然后对弹孔进行切割, 测试靶板穿深情况, 根据靶板的穿深情况评定材料的实际抗弹性能。同时, 对靶板弹孔周围进行 OM 组织分析, 研究在靶弹动态冲击下靶板材料的形变行为。

## 2 结果及分析

### 2.1 合金热处理后的显微组织

图 1 显示 4 种合金热处理后的显微组织。从图 1a~1c 可以看到, TA15、Ti-6432 和 TC21 热处理后都呈典型的双态组织, 其中 TA15 近  $\alpha$  钛合金的初生  $\alpha$  相最为粗大, Ti-6432 次之, TC21 初生  $\alpha$  相最细小, 这主要与 3 种合金的合金类型相关。从 TA15 到 Ti-6432、TC21, 合金 Mo 当量依次增高, 热加工保温过程中  $\alpha$  相的析出行为依次降低, 有利于  $\alpha$  相的细化, 从而获得更高的强度。图 1d 显示 Ti-15Mo 合金  $\beta$  相区固溶后的组织, 为等轴  $\beta$  晶粒, 没有可见的  $\alpha$  相析出。

### 2.2 合金的拉伸、冲击和动态压缩性能

表 1 显示 4 种合金的拉伸、冲击和动态压缩性能。从表中可以看出, Ti-6432 和 TC21 合金强度相当, 都超过了 1150 MPa, 且延伸率都超过了 10%, 证明实验选取的 2 种合金热处理工艺较为合理, 合金处于较优的强塑匹配。TA15 合金强度接近 1000 MPa, 延伸率达 15%, 强塑性匹配良好。Ti-15Mo 合金由于进行了  $\beta$  淬火处理, 具有较低的强度, 特别是屈服强度很低, 证明拉伸变形过程中伴有 TWIP 效应的发生, 因此合金具有非常优异的延伸率。

从冲击性能看, Ti-15Mo 合金具有最优的冲击功, 是其它 3 种合金的近 10 倍。这主要是因为 Ti-15Mo 在

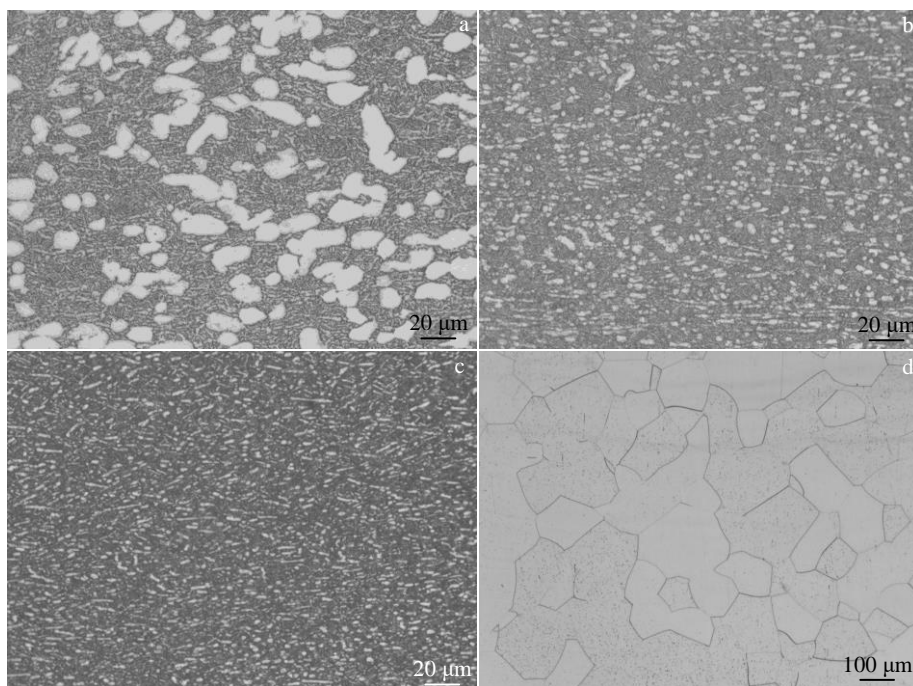


图 1 4 种合金在对应热处理后的显微组织

Fig.1 Microstructures of four alloys after corresponding heat treatments: (a) TA15, (b) Ti-6432, (c) TC21, and (d) Ti-15Mo

表 1 4 种合金拉伸、冲击与动态压缩性能

Table 1 Tensile, impact and dynamic compression properties of four alloys

Alloy	Tensile properties				Impact energy/J	Dynamic compression properties			
	$R_m$ /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	$A$ /%	$Z$ /%		$\epsilon$	$\sigma$ /MPa	$E$ /J cm <sup>-3</sup>	$\dot{\epsilon}_m$ /s <sup>-1</sup>
TA15	995	942	15.5	48	36.0	0.27	1530	420	3580
Ti6432	1171	1127	12.0	32	32.0	0.20	1821	270	2050
TC21	1164	1107	15.0	23	25.0	0.32	1558	504	3980
Ti-15Mo	718	536	36.0	84	262	0.34	1134	374	4060

冲击载荷下诱发大量的{332}<113>孪晶, 具有足够的塑性变形能力, 以及由{332}<113>孪晶带来显著的动态 Hall-Petch 效应, 应力集中获得释放, 裂纹萌生得以推迟, 使得 Ti-15Mo 合金具有优越的冲击性能, 其相关机制见文献详细报道<sup>[6]</sup>。其它 3 种合金冲击功从高到低顺序依次为 TA15、Ti-6432 和 TC21。与拉伸性能相比, 冲击性能的规律性不强。这是因为一般拉伸应变速率为  $10^{-4} \sim 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ , 属于静载荷, 而冲击载荷应变速率一般在  $10^2 \sim 10^3 \text{ s}^{-1}$ , 高速载荷下材料的形变损伤行为的不确定影响因素增多。Ti-6432 冲击功优于 TC21 的原因, 单从显微组织分析, 可能与  $\alpha$  相的尺寸相关。一般认为, 静载荷下, 塑性变形可以较为均匀地分布在各个晶粒中, 而在冲击载荷下, 塑性变形更倾向于集中在某些局部区域。对于本实验的 TA15、Ti-6432 和 TC21 3 种合金, 其组织都是由一定尺寸的初生  $\alpha$  相和  $\beta$  转变组织构成 (图 1a~1c), 相对于  $\beta$  转变组织中细片层  $\alpha$  和残余  $\beta$  交错排布的复合结构, 等轴初生  $\alpha$  相具有更优的承受塑性变形的能力, 这也是含有等轴初生  $\alpha$  相组织比片层组织对应更优塑性的原因。而对于同样具有等轴  $\alpha$  相的组织, 细小的组织更有利于均匀承担塑性变形, 粗大的等轴  $\alpha$  相组织更有利于局部塑性变形, 因此, 在高速冲击条件下, 相对粗大的等轴  $\alpha$  相更有利于在冲击下的塑性变形, 从而获得更高的冲击功, 这在一定程度上解释了本实验 TA15、Ti-6432、TC21 3 种合金对应的冲击功的大小, 也说明冲击吸收功和合金静态拉伸性能没有直接的关系。

一般认为, 材料抗弹性能和动态性能相关, 分离式霍普金森压杆 (SHPB) 装置可以模拟材料在高速靶弹冲击下的变形, 从而测试材料在高速冲击下动态压缩相关性参数。表 1 显示 4 种材料在破坏极限条件下的平均流变应力 ( $\sigma$ )、均匀塑性应变 ( $\epsilon$ )、动态冲击吸收功 ( $E$ ) 和最大应变速率 ( $\dot{\epsilon}_m$ )。这 4 个参数中, 最大应变速率和均匀塑性应变具有对应关系, 动态冲击吸收功是应变过程中动态流变应力与塑性应变的积分, 是平均流变应力和均匀塑性应变的综合值。可以看到, TC21 合金具有最优的动态冲击吸收功, 对应其较高的动态均匀塑性应变和平均流变应力。TA15 合金次之, 平均流

变应力和动态均匀塑性应变都有所降低。Ti-15Mo 合金动态冲击吸收功低于前两者, 虽然合金呈现优异动态均匀塑性变形能力, 但流变应力显著低于其它合金。Ti-6432 合金对应最低动态冲击吸收功, 是由于对应最低的均匀塑性应变, 即使其对应最高的平均流变应力。如果单从动态冲击吸收功判定合金动态性能, 显然均匀塑性应变比平均流变应力更为重要。

对比拉伸性能和动态压缩性能, 虽然其在应变速率和变形方式上存在巨大差别, 但塑性和强度指标具有一定的对应关系, 高的抗拉强度对应较高的动态压缩流变应力, 高的延伸率对应高的均匀塑性应变。这种对应关系只是一种趋势的反映, 具体数值没有对应的比例关系。反映了动态压缩流变应力与材料静态强度指标相关, 均匀塑性应变与材料静态延伸率指标相关。而且, 如果以材料动态吸收功为评判标准, 显然塑性指标在材料动态性能中具有更为关键的作用, 这和传统结构材料更侧重于强调强度不同。相对于传统的静态拉伸, 传统冲击性能的应变速率更接近动态压缩应变速率, 但是从结果看, 传统冲击吸收功和动态压缩吸收功没有直接关系。在 4 种合金中, TC21 对应最低的冲击功, 却具有最优的动态压缩性能, 特别是 Ti-15Mo 合金, 2 种条件下性能差异巨大, 反映了普通冲击和动态压缩冲击完全不同的形变损伤机制, 虽然变形速率相近, 但结果却没有直接的对应关系, 不能直接根据冲击性能判定动态性能。

### 2.3 打靶组织与性能

采用 7.62 mm 穿甲燃烧弹对 4 种合金进行打靶, 不同合金弹孔深度如表 2 所示。如果以弹孔穿深来衡量不同合金的抗弹性能, 4 种合金抗弹性能排序为 TC21 > TA15 > Ti-6432 > Ti-15Mo。其中 TC21、TA15 和 Ti-6432 抗弹性能和其动态压缩性能一致, 证明动态性能可以一定程度反映抗弹性能规律, 但是从具体数值看, TC21、TA15 和 Ti-6432 动态压缩性能差距明显, 以动态压缩吸收功来衡量, TC21 几乎是 Ti-6432 合金的 2 倍, 而弹孔穿深差别并不明显, 在整体穿深达 18 mm 当量时, 差距仅为 0.5 mm, 几乎可以认为抗弹性能处于同一水平。Ti-15Mo 合金弹孔穿深明显大于 Ti-6432 合



表 2 不同合金弹孔深度

Table 2 Penetration depth of crater for four alloys

Alloy	TC21	Ti-6432	TA15	Ti-15Mo
Thickness of target/mm	22	22	22	30
Penetration depth/mm	17.3	17.8	17.4	21.3

金, 这和其动态压缩性能不符, 结合其它 3 个性能具体差异, 说明用动态压缩性能并不能完全反映材料具体抗弹性能。

图 2 显示 4 种合金打靶后弹坑形貌和弹孔附近的显

微组织。从图 2 可以看到, TA15 合金弹孔附近宏观形貌没有显示明显的形变特征, 也没有肉眼可见的裂纹(图 2a<sub>1</sub>)。在金相显微镜下可以看到弹孔周围有向外延伸的少量裂纹和大量的绝热剪切带(adiabatic shear band, ASB)(图 2b<sub>1</sub>), 在裂纹的末端可以看到绝热剪切带, 部分绝热剪切带内也可以发现小裂纹, 证明裂纹的萌生是由绝热剪切带引起。还可以观察到绝热剪切带内部拉长变形的初生 α 相(图 2c<sub>1</sub>), 说明绝热剪切带内的 α 相有较强的塑性变形能力, 有利于绝热剪切带内的继续变形, 抑制绝热剪切带内裂纹的产生。Ti-6432 弹孔展示

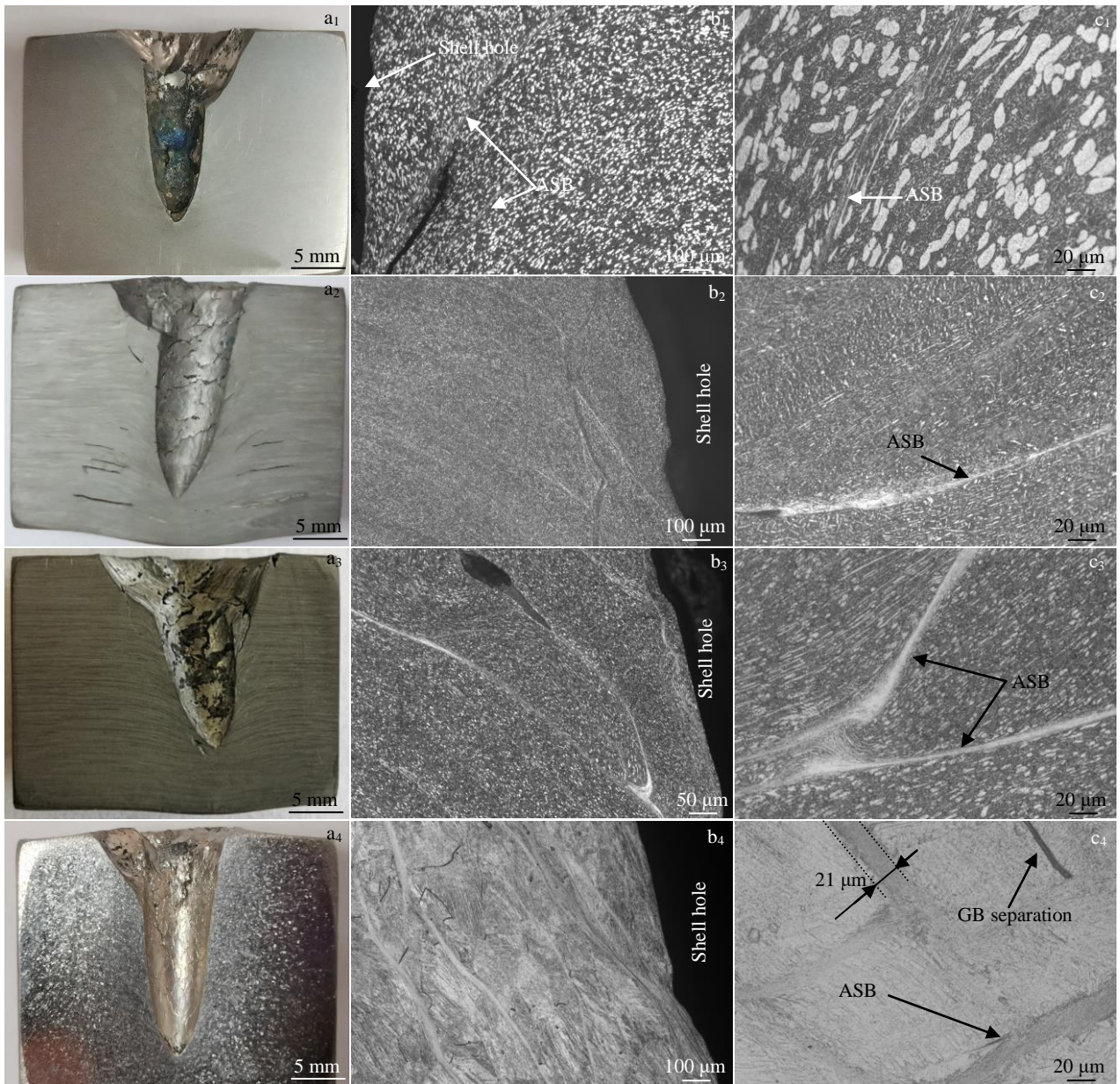


图 2 4 种合金弹坑形貌和周围组织

Fig.2 Morphologies (a<sub>1</sub>~a<sub>4</sub>) and surrounding microstructures (b<sub>1</sub>~b<sub>4</sub>, c<sub>1</sub>~c<sub>4</sub>) of shell hole of four alloys: (a<sub>1</sub>, b<sub>1</sub>, c<sub>1</sub>) TA15, (a<sub>2</sub>, b<sub>2</sub>, c<sub>2</sub>) Ti-6432, (a<sub>3</sub>, b<sub>3</sub>, c<sub>3</sub>) TC21, and (a<sub>4</sub>, b<sub>4</sub>, c<sub>4</sub>) Ti-15Mo

出明显的变形特征, 靶弹穿过方向与板材流线方向垂直 (图 2a<sub>2</sub>), 靶弹周围以及距离靶弹较远地方都存在大量沿板材流线方向的裂纹。金相组织显示弹孔边沿存在大量裂纹以及绝热剪切带 (图 2b<sub>2</sub>), 在绝热剪切带处存在大量裂纹或孔洞 (图 2c<sub>2</sub>), 这种形变特征与材料本身具有较高强度、较低塑性有关。TC21 合金整体变形形貌和 Ti-6432 合金相似, 只是没有明显的裂纹 (图 2a<sub>3</sub>), 金相组织显示在弹孔边沿也存在裂纹, 但明显少于 Ti-6432 合金 (图 2b<sub>3</sub>), 在绝热剪切带内部也存在裂纹孔洞, 绝热剪切带形貌和 Ti-6432 合金相似, 呈白亮带, 宽度较窄 (图 2c<sub>3</sub>)。Ti-15Mo 合金弹孔组织和形貌明显有别于其它 3 种合金, 弹孔边沿光滑 (图 2a<sub>4</sub>), 存在有大量绝热剪切带, 没有裂纹。弹孔附近金相组织中有明显的孪生变形 (图 2b<sub>4</sub>), 还可以看到 Ti-15Mo 合金的绝热剪切带宽度远超过其它合金, 达到约 21 μm, 在绝热剪切带内部没有裂纹或孔洞产生; 部分晶粒之间存在晶界分离, 这些都展示出塑性变形特征 (图 2c<sub>4</sub>)。

从上述动态性能和显微组织特征可以看到, 不同合金有较大差别, 并且动态压缩性能和实际抗弹性能没有直接关系, 这主要是因为霍普金森压杆和实际打靶材料受力的方式不同。霍普金森压杆试验过程中, 试样被夹在入射杆和透射杆之间, 子弹以一定速度冲击入射杆, 入射杆将冲击波传递给试样, 入射杆直径远大于试样, 试样承受的是一个高速冲击的正压力, 可以充分发挥其强度和塑性。对动态压缩吸收功而言, 动态塑性更为重要, 故 Ti-15Mo 合金相对于 Ti-6432, 虽然动态强度相差很大, 但 Ti-15Mo 合金有优异的动态塑性, 因此对应更高的动态压缩吸收功。而实际打靶过程中, 靶板受靶弹的侵彻作用, 其接触端受力复杂, 不但有分方向的压应力, 而且承受靶板法线方向的切应力, 2 种应力的大小与靶弹类型密切相关。对本实验 7.62 mm 穿燃弹, 弹头较尖锐, 切应力更为突出, 而与动态压缩性能直接相关的压应力居于较为次要地位, 这是本实验 4 种合金动态压缩性能和抗弹性能没有直接关系的主要原因。

综上所述, 不同钛合金的静态拉伸性能、冲击性能、动态压缩性能和抗弹性能并没有明确的关系, 这主要与其承受载荷的载荷速率和载荷方式有关, 针对具体合金、具体载荷方式 (包括靶弹类型) 应该分别进行实验研究。目前钛合金在航空航天应用的推动下, 积累了大量静态性能和相关控制机理的研究, 在此基础上, 人们希望通过动态压缩性能来反映材料的抗弹性能, 试图建立装甲材料的静态性能-动态性能-抗弹性能的关联, 从而通过简单的测试能有效评判材料的抗弹性能。从本实验结果看, 材料在实际靶弹侵彻过程中的毁伤行为受多因素影响, 单一的性能测试很难反映具体抗弹性能, 还需要通过

大量的测试和分析, 积累更多的数据, 探索不同失效机制之间的内在联系, 才可能有效建立装甲材料评价体系。

### 3 结 论

1) TA15、Ti-6432、TC21、Ti-15Mo 4 种不同类别合金对应的冲击吸收功和合金静态拉伸性能没有直接的关系, 这主要与其显微组织和断裂过程中的形变损伤机制相关。

2) 以动态冲击吸收功作为标准, 合金动态性能排序为 TC21 > TA15 > Ti-15Mo > Ti-6432, 从对动态吸收功贡献来看, 均匀塑性应变比平均流变应力更为重要。

3) 对于静态拉伸和动态压缩性能, 高的抗拉强度对应较高的动态压缩流变应力, 高的延伸率对应高的均匀塑性应变, 这种对应关系只是一种趋势的反映, 具体数值没有对应的比例关系。对于冲击和动态性能, 普通冲击和动态压缩冲击具有完全不同的形变损伤机制, 传统冲击吸收功和动态压缩冲击吸收功没有直接关系, 不能直接根据冲击性能判定动态性能。

4) 以弹孔穿深来衡量不同合金的抗弹性能, 4 种合金抗弹性能排序为 TC21 > TA15 > Ti-6432 > Ti-15Mo。但从具体数值看, TC21、TA15 和 Ti-6432 动态压缩性能差距明显, 而弹孔穿深差别并不明显, 可以认为抗弹性能处于同一水平。Ti-15Mo 合金弹孔穿深明显大于其它合金, 弹孔附近组织出现明显的孪生, 表现出塑性变形特征, 虽然具有较高的动态压缩吸收功, 但是抗靶弹侵彻能力弱。故用动态压缩性能不能完全反映材料具体抗弹性能。

### 参考文献 References

- [1] Zhang Jing, Tan Chengwen, Ren Yu *et al.* *Tans Nonferrous Met Soc China*[J], 2011, 21(11): 2396
- [2] Zheng Chao, Wang Fuchi, Cheng Xingwang *et al.* *Materials Science and Engineering A*[J], 2016, 658: 60
- [3] Sun Kai, Yu Xiaodong, Tan Chengwen *et al.* *Materials Science and Engineering A*[J], 2014, 595: 247
- [4] Zheng Chao, Wang Fuchi, Cheng Xingwang *et al.* *International Journal of Impact Engineering*[J], 2015, 85: 161
- [5] Sun Kai, Yu Xiaodong, Tan Chengwen *et al.* *Materials Science and Engineering A*[J], 2014, 606: 257
- [6] Ren Yu, Wang Fuchi, Wang Shuyou *et al.* *Materials Science and Engineering A*[J], 2013, 562: 137
- [7] Ren Yu, Xue Zhiyong, Yu Xiaodong *et al.* *International Journal of Impact Engineering*[J], 2018, 111: 77
- [8] Sukumar G, Singh B B, Bhattacharjee A *et al.* *International Journal of Impact Engineering*[J], 2013, 54: 149

- [9] Ali Tayyeb, Wang Lin, Cheng Xingwang *et al. Materials Letters*[J], 2019, 236: 163
- [10] Ren Yu, Wang Fuchi, Tan Chengwen *et al. Journal of Alloys and Compounds*[J], 2013, 578: 547
- [11] Ren Yu, Yu Xiaodong, Tan Chengwen *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2017, 695: 126
- [12] Li Rongting(李荣婷), Fan Qunbo(范群波), Wang Fuchi(王富耻) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2015, 44(8): 1937
- [13] Li Rongting, Fan Qunbo, Gao Ruihua *et al. Materials & Design*[J], 2014, 62: 233
- [14] Gao Ruihua(高瑞华), Fan Qunbo(范群波), Wang Fuchi(王富耻) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2015, 44(11): 2733
- [15] Tian Xue(田雪), Liu Jinxu(刘金旭), Li Shukui(李树奎) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2016, 45(1): 202
- [16] Yao K, Min X H, Emura S *et al. Journal of Materials Science*[J], 2019, 54(16): 11 279

## Relationship Between Static, Dynamic Properties and Ballistic Performance of Typical Titanium Alloys

Xin Shewei<sup>1</sup>, Hao Fang<sup>2,3</sup>, Zhou Wei<sup>1</sup>, Zhang Siyuan<sup>1</sup>, Mao Youchuan<sup>2,3</sup>, Sun Jiuping<sup>1,4</sup>, Li Qian<sup>1</sup>, Liu Xianghong<sup>2</sup>

(1. Northwest Institute for Nonferrous Metal Research, Xi'an 710016, China)

(2. Western Superconducting Technologies Co. Ltd, Xi'an 710018, China)

(3. Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

(4. Northeastern University, Shenyang 110819, China)

**Abstract:** The tensile properties, impact properties, dynamic mechanical property and ballistic performance were tested for four kinds of typical titanium alloys of TA15, Ti-6432, TC21 and Ti-15Mo. The microstructures of the different alloying sheets after penetration test of bullet were analyzed. The results show that there is no direct relationship between impact properties and tensile properties for four alloys. For static tensile properties and dynamic mechanical properties, there is a law that high tensile strength corresponds to high dynamic compression rheological stress and high elongation corresponds to high homogeneous plastic strain. However, this law is only a reflection of the trend, and there is no corresponding proportional relationship between the specific values. For dynamic performance and ballistic performance, the order of dynamic properties of the four alloys is TC21 > TA15 > Ti-15Mo > Ti-6432, and the order of ballistic performance is TC21 > TA15 > Ti-6432 > Ti-15Mo. From the specific value, the difference of dynamic properties for four alloys is obvious but the difference of penetration depth is not obvious, which is at the same level. Besides, the penetration depth of Ti-15Mo is obviously larger than that of other alloys, which shows that the dynamic performance can not fully reflect the ballistic performance. The above results are mainly related to different microstructure types and different deformation damage mechanisms in the damage process.

**Key words:** titanium alloy; tensile properties; impact properties; dynamic mechanical property; ballistic performance

---

Corresponding author: Xin Shewei, Ph. D., Professor, Titanium Alloy Research Center, Northwest Institute for Nonferrous Metal Research, Xi'an 710016, P. R. China, Tel: 0086-29-86231078, E-mail: nwpu\_xsw@126.com