

DOI: 10.11883/bzycj-2020-0046

Ti-6Al-4V 弹体破坏模式对冲击反应的影响研究*

何丽灵^{1,2}, 张方举^{1,2}, 颜怡霞^{1,2}, 谢若泽^{1,2}, 徐艾民^{1,2}, 周燕良¹

(1. 中国工程物理研究院总体工程研究所, 四川 绵阳 621999;
2. 工程材料与结构冲击振动四川省重点实验室, 四川 绵阳 621999)

摘要: Ti-6Al-4V 材料是武器结构轻量化时的重要替代材料, 其冲击反应将可能增加战斗部毁伤威力, 但目前缺乏对其冲击反应条件及反应机理的研究。本文将采用试验与理论分析方法, 研究结构破坏模式对 Ti-6Al-4V 材料冲击反应的影响, 获得其冲击反应条件及反应机理。设计并开展了钛合金弹(头部与壳体均为钛合金)与复合弹(头部碳/碳复合材料、壳体空心钛合金圆柱)正侵彻混凝土试验, 撞击速度在 222~1008 m/s 之间。钛合金弹激发了剧烈的氧化冲击反应, 但复合弹未产生冲击反应。破坏模式宏微观分析显示, 钛合金弹侵彻后宏观结构基本完整, 仅表面发生摩擦磨损, 以细观组织剪切变形为主要失效模式, 形成尺寸在微米量级至百微米量级的颗粒碎片, 碎片个数可高达 3×10^6 。复合弹的钛合金空心圆柱被撕裂成块, 撕裂面沿剪切带方向发展, 碎块尺寸在毫米或以上量级, 个数至多百余个。碎片供氧和供热的效率均与碎片尺寸成反比, 而特定供氧与供热条件下, 碎片尺寸足够小是 Ti-6Al-4V 材料发生冲击反应的必要条件, 这是钛合金弹发生冲击反应而钛合金空心圆柱无法激发冲击反应的本质原因。在具备冲击反应必要条件的前提下, 碎片个数越多, 冲击反应烈度越高。

关键词: 冲击反应; Ti-6Al-4V; 破坏模式; 碎片尺寸/个数; 供氧/供热效率; 反应烈度

中图分类号: O385 国标学科代码: 13035 文献标志码: A

Study on the impact initiated reaction of Ti-6Al-4V projectiles by the fracture modes

HE Liling^{1,2}, ZHANG Fangju^{1,2}, YAN Yixia^{1,2}, XIE Ruoze^{1,2}, XU Aimin^{1,2}, ZHOU Yanliang¹

(1. Institute of Systems Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621999, Sichuan, China;
2. Shock and Vibration of Engineering Materials and Structures Key Laboratory of Sichuan Province, Mianyang 621999, Sichuan, China)

Abstract: Ti-6Al-4V is a kind of important alternative material for light-weight design of warhead whose impact-initiated reaction could enhance the damage power of the weapon. However, there is not enough research on the condition and mechanism of its impact-initiated reaction. Through experimental and theoretical analyses, the influences of fracture modes of Ti-6Al-4V structure on impact initiated reaction were studied in the present paper, in order to obtain the condition and mechanism of impact-initiated reaction of Ti-6Al-4V material. Two types of projectiles were designed to normally penetrate the unreinforced concrete target, i.e., the titanium projectile with ogival nose and the composite projectile with C/C nose and hollow titanium cylinder. The impact velocity followed between 222 m/s and 1008 m/s. Two projectiles exhibit different fracture modes. In the studied velocity range, there is an impact-initiated reaction during penetration for the titanium projectile, but no reaction is observed during the impact of the composite projectile. The fracture modes of the two projectiles were analyzed in the macroscopic and microscopic views. After penetration, the structure of the titanium projectile is almost intact. Only abrasion is observed on the outer-surface of the projectile. The main failure mode for abrasion is the shear deformation of

* 收稿日期: 2020-02-28; 修回日期: 2020-08-25

第一作者: 何丽灵(1984—), 女, 博士, 副研究员, heliling1984@139.com

通信作者: 谢若泽(1970—), 男, 硕士, 研究员, xierz@caep.cn

its microstructure, which induces fragments with lengths in micrometers or hundreds of micrometers. The number of fragments could be up to 3 millions. For the hollow titanium cylinder in the composite projectile, it is teared up into large fragments, whose dimensions are in millimeters. The tearing surface develops along the shear band. The largest number of fragments is almost 120. Further analyses indicate that the efficiency of oxygen and heat supply is reverse proportional to the size of the fragment. Under certain oxygen and heat supply, the necessary condition to initiate the impact reaction of Ti-6Al-4V is that the size of fragments should be small enough. This must be the essential reason for the impact reaction in an ogival titanium projectile and no reaction in a composite projectile during penetration. With the necessary condition to initiate the impact reaction, the greater the number of fragments, the higher the impact reaction intensity is.

Keywords: impact-initiated reaction; Ti-6Al-4V; fracture modes; size/number of fragments; efficiency of oxygen/heat supply; reaction intensity

Ti-6Al-4V 是目前应用最广泛的钛合金,在航空航天、国防工业、医药等领域都有重要应用^[1-2],质轻且比强度高,兼具强度与韧性,综合性能优异,是结构轻量化的重要替代材料,有作为战斗部壳体、破片等的潜在应用价值。冲击加载时,Ti-6Al-4V 构件快速形变将导致其局部温度急剧上升,鉴于钛、铝等活性元素在高温环境下将发生剧烈氧化放热反应^[2],构件局部温升可能诱发自燃,发生冲击反应,有助于增强战斗部毁伤威力。为全面评估含 Ti-6Al-4V 战斗部的毁伤威力,有必要研究 Ti-6Al-4V 材料的冲击反应条件及反应机理。然而,目前相关研究较匮乏。

所谓冲击反应,是指由冲击引起的材料放热化学反应,如氧化、合金化、相变等^[3]。能发生冲击反应且兼具适当强度的材料称为多功能含能结构材料^[3],其通常为脆性材料,如 Zr 基非晶合金^[4-8]、活性金属粉末混合物等^[9]。在高速冲击条件下,由脆性多功能含能材料制成的结构一般将碎裂成碎片云,结构破坏模式对结构具体形式较不敏感。撞击速度越高,脆性多功能含能材料形成的碎片个数越多,冲击反应烈度越高^[4,10-12]。然而,若多功能含能结构材料为韧性材料,其结构破坏模式将随结构形式改变而改变,这可能影响其材料的冲击反应能力。需进一步分析撞击速度改变对结构破坏模式以及关联冲击反应能力的影响。

常温状态下,多功能含能结构材料性能稳定,可作为结构材料,因此,高温是冲击反应发生的重要条件之一,如 Ti、Al、Mg 等活性金属高温环境下极易与氧气发生氧化反应,同时释放大量热量^[10,13-14]。亚稳态且性脆的 Zr 基非晶合金高速撞击时结构失效生热,促使碎片产生相变与氧化,进一步释放热量^[4-8]。Al、Mg 粉末与 Fe₂O₃ 混合物制成的铝热剂碎片高速撞击时形变与失效生热,促使铝热剂反应,进一步释放热量^[9]。冲击加载下,材料快速变形、断裂失效以及材料与碰撞界面的高速摩擦等均可快速生成大量热量,提供激发冲击反应的高温环境。氧化、合金化、相变等冲击放热化学反应将进一步释放热量,维持高温环境。

反应物接触表面积是冲击反应烈度的控制参数之一。反应物颗粒尺寸越小,接触表面积越大,反应烈度越高^[2,6]。如 W/Zr 复合材料撞击破碎形成的颗粒尺寸在 200 μm 以下时,易点燃形成火星或燃烧形成火球;但更大尺寸的颗粒将难以全部氧化^[6]。将铝热剂粉末研磨至纳米尺寸并充分混合制成的破片可提高铝热反应效率^[9]。20 μm 活性金属粉末混合而成的复合材料,撞击时更易激发金属合金化与氧化反应^[14]。即使反应产物(如氧化膜)可能隔离阻断反应过程,但当碎片颗粒尺寸足够小时,生成反应产物的一次反应就可将颗粒全部反应。因此,多功能含能结构材料冲击后形成碎片的尺寸应是控制冲击反应的重要参数。

针对 Ti-6Al-4V,其块体在 600 °C 以下时与氧气生成约 100 nm 厚的致密氧化膜,将切断内部 Ti-6Al-4V 与氧气的接触路径,阻断内部材料的进一步氧化反应^[15]。所谓块体,即其最小尺寸在毫米或以上量级。尽管 Ti-6Al-4V 燃烧产物易开裂脱落^[16],无法切断氧气与内部材料的接触路径,但其块体燃烧条件较为苛刻,启燃温度约 3 727 °C,稳定燃烧温度约 2 937 °C^[17]。这说明块体 Ti-6Al-4V 在高温环境下化学性能仍较为稳定,这也是其作为抗高温结构材料的重要原因之一。

爆炸加载驱动 Ti-6Al-4V 膨胀环的试验中发现, 膨胀环碎裂成毫米尺寸的碎块。加载应变率为 10^2 s^{-1} 或材料为粗晶粒时, 尽管膨胀环中激发了绝热剪切带, 但断面无明显氧化痕迹; 细晶粒且加载应变率达 10^4 s^{-1} 时, 断裂面呈紫蓝色, 有熔化痕迹^[2]。尽管未激发冲击反应, 但说明在足够多的热量供给及足够大的氧气接触表面积时, 活性金属 Ti-6Al-4V 仍存在冲击反应的可能。

鉴于 Ti-6Al-4V 为韧性材料, 本文设计两种 Ti-6Al-4V 弹体, 以期撞击混凝土后获得不同的结构破坏模式; 开展两种弹体正侵彻混凝土试验, 观察弹体是否发生冲击反应; 从宏观和细观两个层面观测侵彻后弹体, 分析弹体的破坏模式; 基于碎片特征揭示 Ti-6Al-4V 材料的冲击反应条件与机理, 为其作为多功能含能结构材料的应用奠定基础。

1 两种 Ti-6Al-4V 弹体侵彻混凝土的试验现象分析

本文设计了两种弹体, 如图 1 所示。一种头部尖卵形, 壳体为空心圆柱形, 全部由 Ti-6Al-4V 制成, 称为钛合金弹; 另一种头部为碳/碳复合材料, 壳体为 Ti-6Al-4V 空心圆柱, 称为复合弹。侵彻靶标为无筋混凝土圆柱, 外裹钢皮, 混凝土无约束抗压强度 48 MPa。弹靶几何尺寸见表 1。弹体采用口径 25 mm 滑膛火炮发射, 正侵彻混凝土靶体, 网靶通断测量弹体着靶速度, 高速摄影记录弹靶作用过程, 试验布局见图 2。

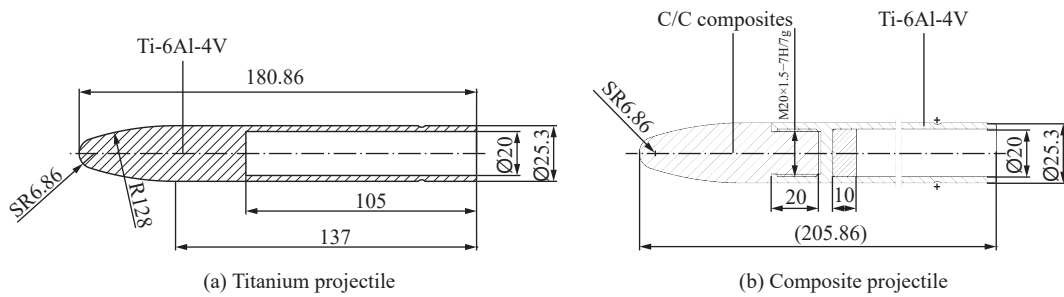


图 1 两种试验弹结构示意图(单位: mm)

Fig. 1 Schemes for two projectiles tested (unit: mm)

表 1 弹靶几何尺寸

Table 1 Dimensions for projectiles and target

类别	直径/mm	长度/mm	质量/g
钛合金弹	25.3	180.8	220
复合弹	25.3	206.0	183
混凝土靶	500.0	400.0	-

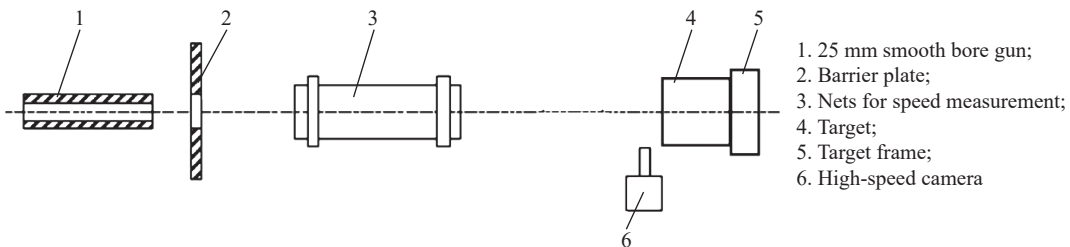


图 2 试验系统

Fig. 2 Layout of experimental set-up

两种弹体侵彻混凝土靶标的试验结果分别见表 2 和表 3, 侵彻前后弹体形状对比分别见图 3 和图 4。由图表可知, 钛合金弹侵彻后仍能保持结构基本完整, 仅弹体表面有摩擦磨损, 质量损失在 6% 以内; 而随着靶速度增加复合弹破坏加剧, 复合弹的钛合金空心圆柱发生大变形并撕裂成块, 损失质量可高达 70%。

表 2 钛合金弹侵彻试验结果

Table 2 Experimental results for titanium projectiles

弹号	原始弹直径/ mm	原始弹长度/ mm	原始弹质量/ g	实测弹速/ (m·s ⁻¹)	试后弹质量/ g	试后弹长/ mm	弹坑尺寸/mm		
							<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>
A01	25.26	180.80	220.4	364	219.0	180.7	200	162	83
A02	25.23	180.98	219.8	423	217.4	181.1	320	290	95
A05	25.24	180.84	220.3	591	216.6	178.8	390	310	130
A04	25.26	180.97	221.4	601	217.0	179.3	420	300	120
A07	25.22	180.82	219.5	772	—	—	碎散	碎散	碎散
A08	25.24	180.80	220.7	811	212.3	177.0	碎散	碎散	碎散
A12	25.24	180.90	220.5	941	209.4	174.2	碎散	碎散	碎散
A11	25.24	180.78	220.6	945	207.6	171.7	碎散	碎散	碎散

注: (1)*a*表示靶面弹坑最长长度, *b*表示弹坑最短长度, *c*表示弹坑深度; (2)A07弹未找到。

表 3 复合弹侵彻试验结果

Table 3 Experimental results for composite projectile

弹号	原始弹直径/ mm	原始弹长度/ mm	原始弹质量/ g	钛合金空心 圆柱质量/g	实测弹速/ (m·s ⁻¹)	试后弹质量/ g	试后弹长/ mm	弹坑尺寸/mm		
								<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>
B03	25.25	206.12	183.50	132.20	222	143.0	149.9	无弹坑	无弹坑	无弹坑
B02	25.26	205.74	183.20	131.90	282	132.0	148.1	65	45	4
B01	25.22	205.86	181.70	130.00	341	113.7	134.1	80	60	3
B05	25.27	206.12	184.00	132.80	424	115.6	133.2	160	135	22
B06	25.24	206.32	183.40	132.20	516	105.1	129.0	120	105	33
B04	25.23	205.76	182.00	130.60	574	85.5	106.9	180	155	35
B08	25.24	206.00	182.80	131.80	681	68.7	77.2	230	200	45
B11	25.21	205.96	181.80	131.10	719	72.3	80.2	250	250	45
B09	25.24	206.10	183.50	132.30	813	59.3	82.0	240	230	63
B07	25.23	205.84	181.60	130.70	857	49.0	63.7	300	260	70
B10	25.25	205.86	182.90	131.50	1008	40.4	52.3	290	240	90



图 3 侵彻前后钛合金弹形状对比

Fig. 3 Shape variation of titanium projectile before and after penetration test

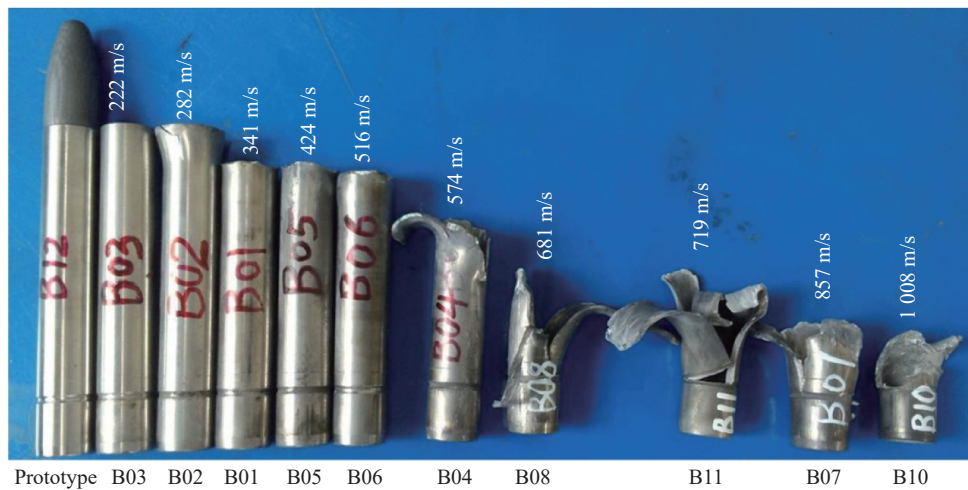


图 4 侵彻前后复合弹形状对比

Fig. 4 Shape variation of composite projectile before and after penetration test

表 4 给出了不同着速时钛合金弹侵彻混凝土的高速摄影图像。当着速为 364 m/s 时(A01), 触靶 40 μs 后, 钛合金弹尖有零星火星, 形成的火光并不连续; 在后续侵彻过程中, A01 的零星火星未能形成明亮的火光, 在侵彻后约 400 μs 时火星几乎全部湮灭。当着速增至 591 m/s 时(A05), 钛合金弹尖有明亮火光, 连续且对称分布在弹尖位置, 反应形成燃烧火球并随侵彻进行持续增大, 在约 400 μs 时充满高速摄影的整个视野, 持续反应至约 1 ms。在本文研究撞击速度范围内, 侵彻混凝土时, 钛合金弹发生了冲击化学反应。随撞击速度增加, 钛合金弹撞击混凝土靶的化学反应烈度逐渐增加, 反应持续时间逐步增长。这说明, 即使为韧性材料, 相同结构形式时, 撞击速度仍可表征多功能含能结构材料的反应烈度。

表 4 同时刻不同着靶速度时钛合金弹撞击混凝土靶的高速摄影图像对比

Table 4 High-speed photographs for titanium projectiles penetrating into concrete target at different impact velocities

时间/ μs	A01 364 m/s	A02 423 m/s	A05 591 m/s	A04 601 m/s	A07 772 m/s	A08 811 m/s	A12 941 m/s	A11 945 m/s
0								
40								
100								
200								
400								
800								
1200								

表 5 给出了不同着速时复合弹侵彻混凝土的高速摄影图像。可以看出, 在本文研究着速范围内, 复合弹触靶后, 头部碳/碳复合材料破碎成粉末, 后部钛合金空心圆柱随进。在整个侵彻过程中, 高速摄影视野内只能见到碳/碳复合材料和混凝土靶的破碎粉尘, 未见反应火星。这说明在本文研究速度范围内, 复合弹撞击混凝土未发生冲击反应。

类似撞击速度时,复合弹未发生冲击反应,而钛合金弹有冲击反应,这说明当多功能含能结构材料为韧性材料时,撞击速度不再能统一表征不同结构形式的冲击反应。需进一步分析结构破坏模式、反应机理等,获得激发冲击反应的条件。

表 5 同时刻不同着靶速度时复合弹撞击混凝土靶的高速摄影图像对比

Table 5 High-speed photographs for composite projectiles penetrating into concrete target at different impact velocities

时间/ μs	B03	B02	B01	B05	B06	B04	B08	B07	B10
	222 m/s	282 m/s	341 m/s	424 m/s	516 m/s	574 m/s	681 m/s	857 m/s	1 008 m/s
0									
40									
100									
200									
400									
800									

2 两种 Ti-6Al-4V 弹体的破坏模式宏微观分析

2.1 宏观分析

侵彻后钛合金弹结构完整,仅头部钝化,弹体表面有黑色附着物及平行犁沟,如图 3 所示。随撞击速度增高,钛合金弹质量损失增加,如图 5(a) 所示。着靶速度接近 1 000 m/s 的高速撞击时,随着速增加,钛合金弹质量损失有加速增加的趋势。在本文研究速度范围内,钛合金弹总质量损失仅在 6% 以下。

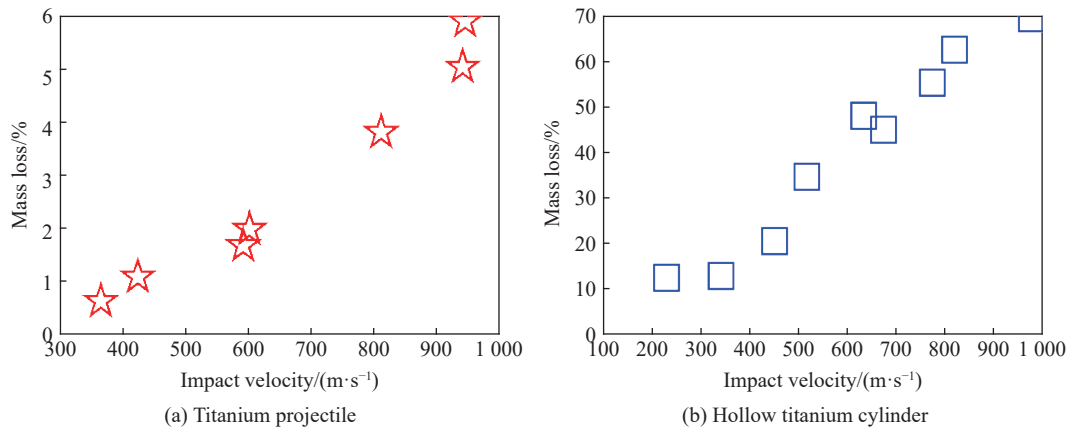


图 5 钛合金弹与钛合金空心圆柱的质量损失

Fig. 5 Mass loss for hollow titanium cylinders and titanium projectiles

与钛合金弹不同,撞击混凝土后,复合弹中钛合金空心圆柱产生结构大变形,撕裂成块,呈花瓣状破坏模式,如图 4 所示。钛合金空心圆柱撞靶后的大变形展现了弹体材料 Ti-6Al-4V 良好的塑性形变能力。随撞击速度增加,钛合金空心圆柱的剩余质量迅速减少,如图 5(b) 所示。在本文研究撞击速度范围内,其质量损失可高达 70%。试验后回收部分钛合金空心圆柱的碎片,如图 6 所示。碎片多呈长条状,若将碎片近似为长方体,则最长边与最短边之比约为 5。除长度方向外,其余两方向尺度之比约为 2。碎片撕裂面一般贯穿整个厚度方向,且空心圆柱壁厚通常为碎片最短边长。碎片形状与爆轰驱动的非控

破片形状类似^[18], 即长方体碎片三方向平均长度之比约为 $l_1 : l_2 : l_3 = 1 : 2 : 5$ 。因此, 针对钛合金空心圆柱, 其壁厚仅 2.6 mm, 碎片其他两方向特征尺寸分别为 5.2 mm 和 13 mm。

2.2 细观分析

2.2.1 Ti-6Al-4V 原始细观组织

本文所用两种弹体中 Ti-6Al-4V 结构均由锻造棒材制成, 弹材原始金相组织见图 7。由图可知, 弹材细观组织为 $\alpha + \beta$ 的两相组织, 最小尺寸为微米量级。

2.2.2 钛合金弹

取 A08 的头部横、纵截面, 以及 A12 的壳体中段横截面开展金相分析, 弹体外表面附近区域的金相形貌见图 8。由图可知, 与靶相互作用的弹体头部和壳体外表面绝大部分区域附着熔融区(re-solidification zone, RSZ), 而金相试样切割面无熔融区覆盖, 见图 8(d)。熔融区为氧化物与弹靶碎渣等的混合物, 其厚度从弹尖到壳体逐渐减薄, 但均在 0.1 mm 以下。这说明侵彻混凝土过程中, 钛合金弹体表面曾经历高温。弹体表面几乎无明显热影响区(heat affected zone, HAZ), 在弹尖纵剖面熔融区与未变形组织间发现厚度仅约数微米的热影响区, 区域内细观组织有方向趋同的结构变化, 类似剪切变形, 如图 8(b) 所示。这说明即使弹体表面温度升高, 但至多使弹体表面微米厚度内材料软化。在弹靶摩擦力作用下, 软化后材料发生细观组织形变, 而所升高的温度不足以促使材料发生明显相变。弹体表面有碎片颗粒即将脱落, 见图 8(a) 和 (c), 脱落颗粒形貌与切削碎片类似, 尺寸在微米量级。混凝土骨料等硬质颗粒切削软化后弹体表面材料, 是弹体表面形成脱落碎片颗粒的重要原因^[19-20]。

鉴于 Ti-6Al-4V 良好的塑性变形特征与剪切敏感性^[2, 21], 在金相分析中特别关注了侵彻诱发的剪切带, 其金相形貌见图 9, 其中 SB 代表 shearing band。由图可知, 在 A08 头部横、纵截面与 A12 壳体横截面发现了大量剪切带, 带宽为微米量级, 长度在 10^{-4} m 及以上量级。剪切带在弹体表面围成颗粒, 极易与弹体脱离。脱落颗粒尺寸在 10^{-4} m 量级。

综上所述, 侵彻混凝土过程中, 钛合金弹表面与混凝土高速摩擦, 将促使弹体表面数微米厚区域内材料温度升高并软化。在弹靶摩擦力与混凝土骨料等硬质颗粒切削作用下, 高温软化的弹体表面区域材料易剪切变形, 并形成颗粒碎片与弹体脱离, 碎片尺寸为微米量级。弹体表面区域发现大量剪切带, 其围成的碎片颗粒尺寸在 10^{-4} m 量级。脱离弹体表面的微米至百微米尺寸碎片易高温氧化甚至燃烧, 其产物与弹靶碎渣等混合, 粘附在弹体表面, 形成熔融区。因此, 细观组织剪切变形是钛合金弹侵彻混凝土的主要破坏机理, 形成的碎片尺寸在微米至百微米量级。

2.2.3 钛合金空心圆柱

侵彻后钛合金空心圆柱撕裂面的金相组织如图 10 所示。可见, 与钛合金弹不同, 空心圆柱表面未覆盖熔融区, 说明空心圆柱表面未与混凝土高速摩擦。撕裂面“蓝化”, 与原始组织有色差, 见图 10(a), 说明撕裂面释放了大量热量, 将其高温氧化。剪切带沿撕裂方向发展, 其形貌与钛合金弹中剪切带类



图 6 回收的部分钛合金空心圆柱碎片

Fig. 6 Recovered fragments of the hollow titanium cylinder

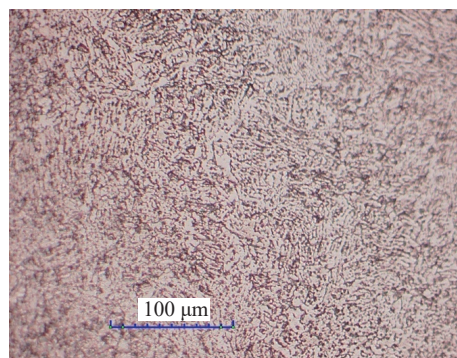


图 7 钛合金原始金相组织

Fig. 7 The undeformed microstructure of Ti-6Al-4V

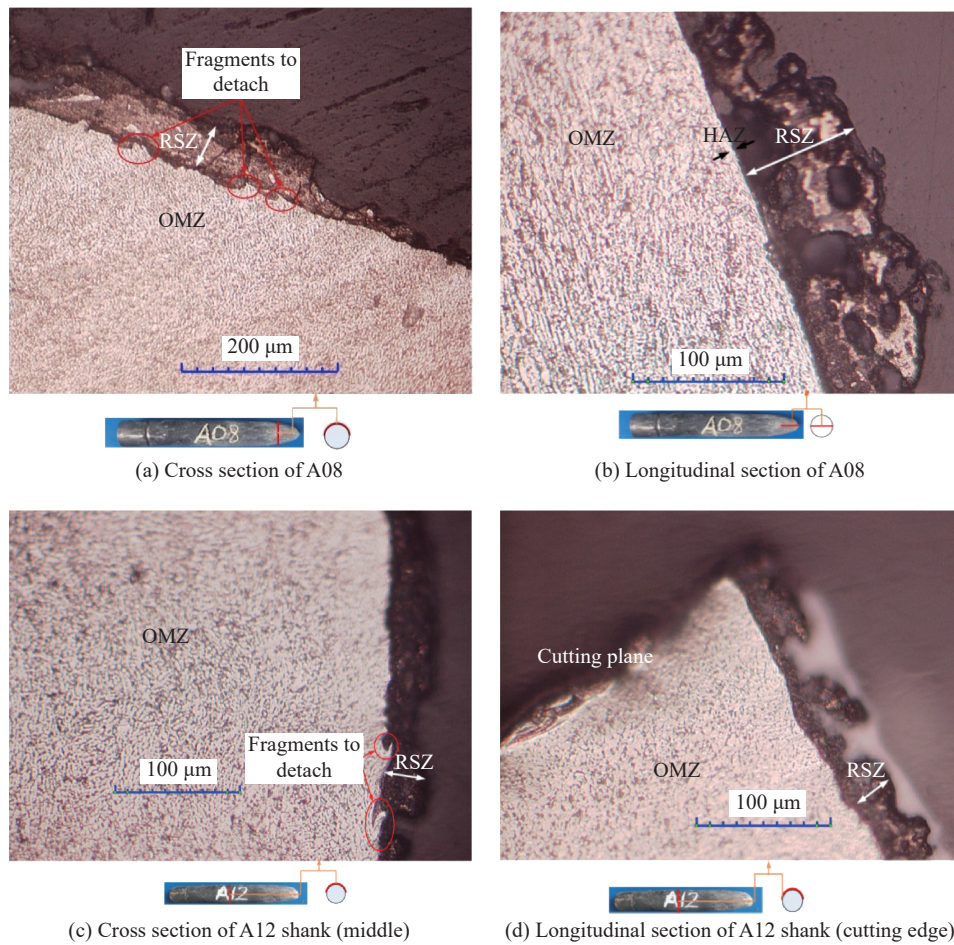


图8 钛合金弹侵彻后头部与壳体表面金相形貌(OMZ表示未变形区)

Fig. 8 Metallograph of outer-surface in titanium projectile after penetration (OMZ represents original material zone)

似,宽度数微米,见图10(b)。这说明钛合金空心圆柱碎块的撕裂面沿剪切带方向发展。

综上所述,侵彻混凝土时,钛合金弹与钛合金空心圆柱的破坏模式差异显著:前者主要以细观组织剪切变形为主要破坏模式,形成尺寸从微米到 10^{-4} m量级的碎片颗粒;而后者撕裂面沿剪切带方向发展,围成大块碎片,尺寸在毫米及以上量级。这两种弹体破坏形成的碎片特征差异显著。下文将分析碎片特征对Ti-6Al-4V材料冲击反应条件的影响。

3 碎片特征对Ti-6Al-4V材料冲击反应条件的影响

3.1 碎片尺寸及个数

由上文分析可知,钛合金空心圆柱撞靶后形成大块碎片,形状可近似为长方体,三方向长度之比为 $l_1:l_2:l_3=1:2:5$, $l_1=2.6$ mm。Ti-6Al-4V的密度约为 4.44 g/cm³,由钛合金空心圆柱质量损失可以估算其碎片的总数,如图11(a)所示。可见,在本文研究撞击速度范围内,钛合金空心圆柱仅破碎形成至多百余个碎片。

针对钛合金弹,其质量损失的主要机理为细观组织剪切变形,形成的碎片颗粒尺寸分布在数微米至数百微米区间。为估算形成颗粒碎片的个数,取 0.1 mm为钛合金弹撞靶后碎片的特征尺寸。基于钛合金弹横、纵截面金相分析,碎片三方向特征尺度近似相等,故简单假设钛合金弹撞靶后形成碎片为正方体,边长为 0.1 mm。根据钛合金弹质量损失同样可估算其碎片个数,如图11(b)所示。由图可知,高速撞击钛合金弹可形成高达 3×10^6 个的百微米尺寸碎片,在着靶面将形成碎片云。

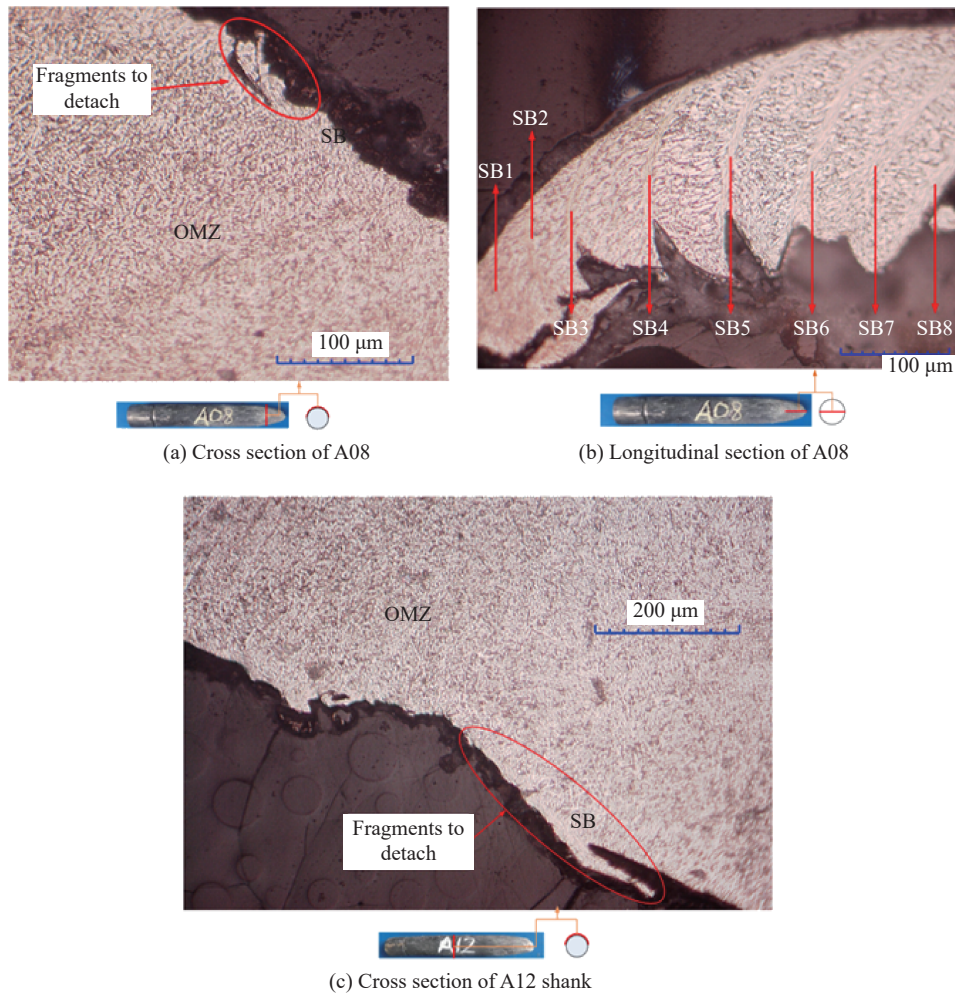


图 9 钛合金弹侵彻后头部和壳体表面剪切带金相形貌

Fig. 9 Metallograph of shear band (SB) on titanium projectile after penetration

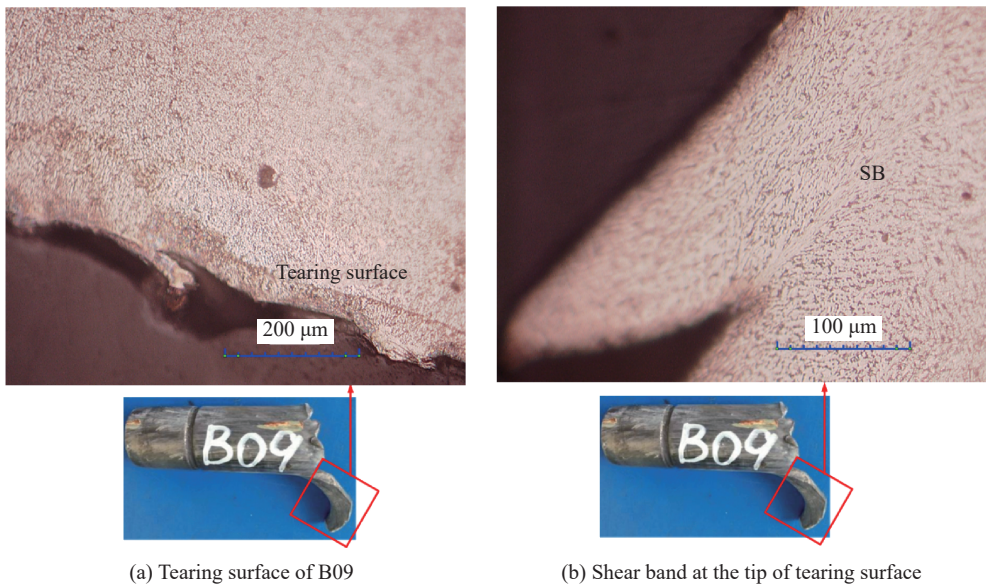


图 10 侵彻后钛合金空心圆柱金相形貌

Fig. 10 Metallograph of hollow titanium cylinder after penetration

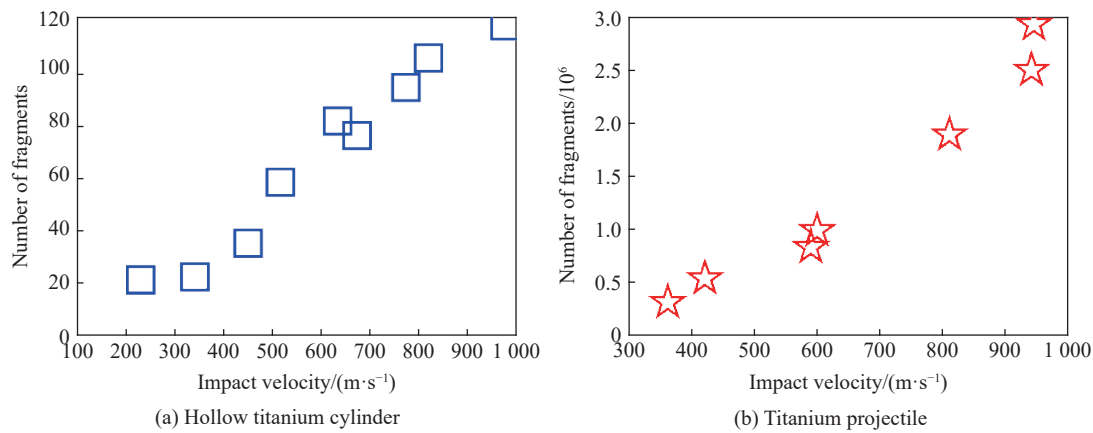


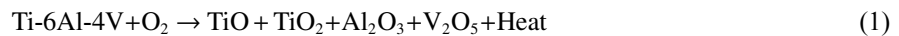
图 11 钛合金弹与钛合金空心圆柱的碎片个数

Fig. 11 Number of fragments for titanium projectiles and hollow titanium cylinders

当钛合金弹着靶速度在 423 m/s 及以下时, 整弹质量损失仅约 1%, 形成数十万个百微米尺寸量级的碎片。由表 4 可知, 此时尽管仍有冲击化学反应, 但碎片云的燃烧反应持续时间较短。当碎片数量上升至百万量级, 形成的碎片云被点燃, 冲击反应明显且能持续约 1 ms。这说明碎片数量对钛合金弹冲击反应烈度有较大影响。

3.2 不同尺寸碎片供热及供氧效率对比

钛合金弹金相分析表明, 其表面未发现明显热影响区, 这意味着在侵彻形成的高温环境中, Ti-6Al-4V 材料细观组织结构稳定, 未发生明显相变。因此, 其冲击反应主要为活性元素与氧气发生的氧化或燃烧反应, 反应表达式可表示为:



反应发生的先决条件是充足的热量输入及足够的氧气供给。

热量与氧气通过反应物质表面输入, 其供应效率由单位体积反应物质获得的热量或氧气表征, 即

$$g = \frac{\gamma A}{V} \quad (2)$$

式中: g 为反应物质的供热或供氧效率, γ 为反应物质的单位表面积热量或氧气输入量, A 为反应物质表面积, V 为反应物质体积。此处反应物质指两种弹体侵彻混凝土靶后形成的 Ti-6Al-4V 碎片, 钛合金弹碎片为边长 $l=0.1$ mm 的正方体, 而钛合金空心圆柱的碎片为三边长度之比为 1 : 2 : 5 的长方体, 最短边 $l_1=2.6$ mm。因此, 式(2)可简化为:

$$g_h = \frac{17\gamma_h}{5l_1} \quad (3)$$

$$g_t = \frac{6\gamma_t}{l} \quad (4)$$

式中: 下标 h 和 t 分别表示钛合金空心圆柱与钛合金弹的参量。可见, 两种弹体的供氧或供热效率均与碎片的单位面积供氧或供热效率成正比, 与碎片特征尺寸成反比。

由前文分析可知, 钛合金弹空心圆柱以塑性变形与裂纹面撕裂为主要生热机制, 而钛合金弹除这两种生热机制外, 还包括摩擦生热机制。假设钛合金弹与钛合金空心圆柱的塑性变形与裂纹面撕裂两种生热机制的单位供热量相同(即 $\gamma_h=\gamma_t$), 则由于附加了摩擦生热机制, 钛合金弹的单位面积供热量大于钛合金空心圆柱的单位面积供热量。这意味着针对供热效率, 钛合金弹碎片是钛合金空心圆柱碎片的 46 倍以上, 二者之比由式(4)比式(3)计算得到。类似的, 两种弹体在相同供氧环境下, 即二者单位表面供氧量相同时, 钛合金弹碎片的供氧效率是钛合金空心圆柱碎片的约 46 倍。因此, 钛合金弹形成的百微米尺寸碎片更易与氧气反应。这应是钛合金弹撞击混凝土时发生冲击反应, 而钛合金空心圆柱不能

激发冲击反应的本质原因。

综上所述, Ti-6Al-4V 材料发生冲击反应的必要条件是形成尺寸足够小的碎片, 如在本文撞击混凝土的供热与供氧条件下, 其冲击反应的碎片尺寸在百微米或更小量级。在特定供氧与供热条件下, 存在碎片冲击反应的最大临界尺寸, 若碎片尺寸超过该尺寸, 无论碎片个数达到多少, 均不能发生冲击反应; 若碎片尺寸在最大临界尺寸之内, 碎片个数越多, 冲击反应烈度越高。如本文钛合金弹碎片个数由十万量级上升至百万量级, 冲击反应由零星火星向较长时间的持续燃烧转变。

4 结 论

本文设计并开展了两种结构的 Ti-6Al-4V 弹体正侵彻混凝土试验, 撞击速度在 222~1 008 m/s 之间。试验发现, 钛合金弹存在冲击反应而复合弹无法激发冲击反应。二者破坏模式存在显著差异: 钛合金弹侵彻后结构基本完整, 仅弹体表面发生摩擦磨损, 以细观组织剪切变形为主要失效模式, 形成尺寸在 10^{-6} 至 10^{-4} m 量级的颗粒碎片, 碎片个数可高达 3×10^6 ; 复合弹的钛合金空心圆柱撕裂成块, 撕裂面沿剪切带方向发展, 碎片尺寸在毫米或以上量级, 碎片个数至多百余个。弹体破坏模式决定了形成的碎片特征。形成足够小的碎片是 Ti-6Al-4V 材料发生冲击反应的必要条件。特定供氧与供热条件下, 存在碎片冲击反应的最大临界尺寸。若碎片尺寸在最大临界尺寸之内, 碎片个数越多, 冲击反应烈度越高。在本文撞击混凝土的供热与供热效率下, 百微米量级的 Ti-6Al-4V 碎片可发生冲击反应; 该尺寸碎片个数达百万量级时, 反应可持续约 1 ms。

若确定了冲击加载的供热和供热效率, 可进一步基于化学反应等特征决定材料的冲击反应最大临界尺寸。据此设计结构形式, 诱导结构破坏后形成在最大临界尺寸之内的碎片, 为冲击反应准备必要条件。此外, 可预制在冲击反应最大临界尺寸之内的颗粒混合物, 撞击后产生脆性破坏并直接释放颗粒, 同样具备冲击反应必要条件。冲击反应的条件与机理研究为多功能含能结构材料的释能应用奠定了基础。

参考文献:

- [1] MARTINEZ F, ESQUIVEL E V, LOPEZ M I, et al. Adiabatic shear bands associated with plug formation and penetration in Ti-6Al-4V targets: formation, structure, and performance: a preliminary study [C] // HOWARD S M, STEPHENS R L, NEWMAN C J, et al. EPD 2006 Congress, USA: The Minerals, Metals & Materials Society, 2006: 137-142.
- [2] 胡八一, 董庆东, 韩长生, 等. TC4 钛合金自然破片的引燃机理分析 [J]. 爆炸与冲击, 1995, 15(3): 254-258.
HU B Y, DONG Q D, HAN C S, et al. Analysis of the firing mechanics for Ti-6Al-4V natural fragments [J]. Explosion and Shock Waves, 1995, 15(3): 254-258.
- [3] 张先锋, 赵晓宁. 多功能含能结构材料研究进展 [J]. 含能材料, 2009, 17(6): 731-739. DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2009.06.021.
ZHANG X F, ZHAO X N. Review on multifunctional energetic structural materials [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2009, 17(6): 731-739. DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2009.06.021.
- [4] WANG C T, HE Y, JI C, et al. Investigation on shock-induced reaction characteristics of a Zr-based metallic glass [J]. Intermetallics, 2018, 93: 383-388. DOI: 10.1016/j.intermet.2017.11.004.
- [5] 张云峰, 罗兴柏, 施冬梅, 等. 动态压缩下 Zr 基非晶合金失效释能机理 [J]. 爆炸与冲击, 2019, 39(6): 063101. DOI: 10.11883/bzycj-2018-0114.
ZHANG Y F, LUO X B, SHI D M, et al. Failure behavior and energy release of Zr-based amorphous alloy under dynamic compression [J]. Explosion and Shock Waves, 2019, 39(6): 063101. DOI: 10.11883/bzycj-2018-0114.
- [6] REN H L, LIU X J, NING J G. Impact-initiated behavior and reaction mechanism of W/Zr composites with SHPB setup [J]. AIP Advances, 2016, 6(11): 115205. DOI: 10.1063/1.4967340.
- [7] HUANG C M, LI S, BAI S X. Quasi-static and impact-initiated response of $Zr_{55}Ni_5Al_{10}Cu_{30}$ alloy [J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 2018, 481: 59-64. DOI: 10.1016/j.jnoncrsol.2017.10.011.

- [8] LUO P G, WANG Z C, JIANG C L, et al. Experimental study on impact-initiated characters of W/Zr energetic fragments [J]. *Materials & Design*, 2015, 84: 72–78. DOI: 10.1016/j.matdes.2015.06.107.
- [9] WANG Y, JIANG W, ZHANG X F, et al. Energy release characteristics of impact-initiated energetic aluminum-magnesium mechanical alloy particles with nanometer-scale structure [J]. *Thermochemica Acta*, 2011, 512(1-2): 233–239. DOI: 10.1016/j.tca.2010.10.013.
- [10] 张云峰, 罗兴柏, 刘国庆, 等. W/ZrNiAlCu 亚稳态合金复合材料破片对 RHA 靶的侵彻释能特性 [J]. *爆炸与冲击*, 2020, 40(2): 023301. DOI: 10.11883/bzycj-2019-0065.
- ZHANG Y F, LUO X B, LIU G Q, et al. Penetration and energy release effect of W/ZrNiAlCu metastable reactive alloy composite fragment against RHA target [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2020, 40(2): 023301. DOI: 10.11883/bzycj-2019-0065.
- [11] WANG H F, ZHENG Y F, YU Q B, et al. Impact-induced initiation and energy release behavior of reactive materials [J]. *Journal of Applied Physics*, 2011, 110(7): 074904. DOI: 10.1063/1.3644974.
- [12] 刘俊晓, 任会兰, 宁建国. 不同配比 W/Zr 活性材料冲击反应实验研究 [J]. *材料工程*, 2017, 45(4): 77–83. DOI: 10.11868/j.issn.1001-4381.2016.001212.
- LIU J X, REN H L, NING J G. Experimental study on impact response of W/Zr reactive materials with different proportions [J]. *Journal of Materials Engineering*, 2017, 45(4): 77–83. DOI: 10.11868/j.issn.1001-4381.2016.001212.
- [13] 张先锋, 赵晓宁, 乔良. 反应金属冲击反应过程的理论分析 [J]. *爆炸与冲击*, 2010, 30(2): 145–151. DOI: 10.11883/1001-1455(2010)02-0145-07.
- ZHANG X F, ZHAO X N, QIAO L. Theory analysis on shock-induced chemical reaction of reactive metal [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2010, 30(2): 145–151. DOI: 10.11883/1001-1455(2010)02-0145-07.
- [14] AYDELOTTE B B, THADHANI N N. Mechanistic aspects of impact initiated reactions in explosively consolidated metal+aluminum powder mixtures [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2013, 570: 164–171. DOI: 10.1016/j.msea.2013.01.054.
- [15] 张源, 张爱荔, 李惠娟. TC4 钛合金的表面氧化及其对疲劳性能的影响 [J]. *钛工业进展*, 2010, 27(1): 25–27. DOI: 10.3969/j.issn.1009-9964.2010.01.005.
- ZHANG Y, ZHANG A L, LI H J. Surface oxidation and its effect on the fatigue property of TC4 alloy [J]. *Titanium Industry Progress*, 2010, 27(1): 25–27. DOI: 10.3969/j.issn.1009-9964.2010.01.005.
- [16] 赵永庆, 周廉, 邓炬. 钛合金的燃烧产物及形貌 [J]. *兵器材料科学与工程*, 1999, 22(6): 19–24.
- ZHAO Y Q, ZHOU L, DENG J. Burn resistant behavior and burn resistant mechanism of Ti40 alloy [J]. *Ordnance Material Science and Engineering*, 1999, 22(6): 19–24.
- [17] 王标, 田伟. TC4 钛合金燃烧形貌和机理分析 [J]. *燃气涡轮试验与研究*, 2013, 26(3): 50–52; 28. DOI: 10.3969/j.issn.1672-2620.2013.03.011.
- WANG B, TIAN W. Combustion morphology and mechanism analysis of titanium alloy TC4 [J]. *Gas Turbine Experiment and Research*, 2013, 26(3): 50–52; 28. DOI: 10.3969/j.issn.1672-2620.2013.03.011.
- [18] 隋树山, 王树山. 终点效应学 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2000: 65–66.
- [19] 何丽灵, 陈小伟, 范瑛. 先进钻地弹高速侵彻实验中质量磨蚀金相分析 [J]. *爆炸与冲击*, 2012, 32(5): 515–522. DOI: 10.11883/1001-1455(2012)05-0515-08.
- HE L L, CHEN X W, FAN Y. Metallographic observation of reduced-scale advanced EPW after high-speed penetration [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2012, 32(5): 515–522. DOI: 10.11883/1001-1455(2012)05-0515-08.
- [20] HE L L, CHEN X W, WANG Z H. Study on the penetration performance of concept projectile for high-speed penetration (CPHP) [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2016, 94: 1–12. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2016.03.010.
- [21] 胡八一, 董庆东, 韩长生, 等. TC4 钛合金及 40Cr 钢破片中绝热剪切带的 TEM 分析 [J]. *高压物理学报*, 1996, 10(1): 37–43. DOI: 10.11858/gywlb.1996.01.006.
- HU B Y, DONG Q D, HAN C S, et al. TEM observation of shear bands in Ti-6Al-4V and AISI 6140 steel [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 1996, 10(1): 37–43. DOI: 10.11858/gywlb.1996.01.006.

(责任编辑 王小飞)