

DOI: 10.11883/bzycj-2021-0181

不同撞击速度下穿燃弹侵彻陶瓷/铝合金复合靶板时 弹芯破碎失效特性研究*

王晓东¹, 余毅磊¹, 蒋招绣², 马铭辉¹, 高光发^{1,2}

(1. 南京理工大学机械工程学院, 江苏 南京 210094;
2. 宁波大学冲击与安全工程教育部重点实验室, 浙江 宁波 315211)

摘要: 为了研究 12.7 mm 穿燃弹以不同速度撞击陶瓷/铝合金复合靶板时弹芯的破碎及失效特性, 开展了 12.7 mm 穿燃弹以 434.5~844.6 m/s 速度撞击 SiC 陶瓷/6061T6 铝合金复合靶板的弹道试验, 分析了弹靶的失效模式。弹芯在侵彻靶板后会产生不同尺寸的碎片, 使用回收箱收集弹芯碎片并用不同孔径筛网对其进行筛分、称重, 得到了不同撞击速度下弹芯碎片的质量分布, 并对不同部位的弹芯碎片断面形貌进行了宏观和微观观测分析。研究结果表明: 背板失效模式为碟形变形-剪切穿孔-花瓣形失效, 试验后的弹芯碎片累积质量分布符合 Rosin-Rammler 幂率分布规律, 且随着着靶速度的增大, 小质量碎片质量增加; 弹芯在冲击过程中等效直径较大碎片(大于 8 mm)失效模式为拉伸脆性断裂, 而等效直径小于 2 mm 的碎片上存在局部塑性剪切断裂。

关键词: 侵彻; 12.7 mm 穿燃弹; 破碎; 质量分布; 断裂模式

中图分类号: O385; TJ012.4

国标学科代码: 13035

文献标志码: A

Dynamic fragmentation and failure of the hard core of a 12.7 mm API projectile against SiC/6061T6Al composite armor with various impact velocities

WANG Xiaodong¹, YU Yilei¹, JIANG Zhaoxiu², MA Minghui¹, GAO Guangfa^{1,2}

(1. School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, Jiangsu, China;
2. MOE Key Laboratory of Impact and Safety Engineering, Ningbo University, Ningbo 315211, Zhejiang, China)

Abstract: The high hardness combined with its lower density makes silicon carbide (SiC) an attractive candidate for armor material. The main purpose of employing ceramics plate is to erode and fragment the impacting projectile, such as a 12.7 mm armor piercing incendiary (API) projectile with a very hard steel core. To explore the failure mechanism of the hard steel core, the ballistic impact experiments were carried out to study the dynamic responses of 12.7 mm API projectiles impacting ceramic/aluminium alloy composite armors. The SiC ceramics/6061T6 aluminium alloy composite targets with the composite cover on the front of the SiC were tested at speeds of 434.5, 503.1, 662.7, 704.6 and 844.6 m/s. The targets were entirely perforated by 12.7 mm API projectiles with the hard steel cores. The damages of projectiles, ceramic and back plates were analyzed phenomenologically. The damage modes of ceramic and steel backplates were identified. The resulting core fragments were collected and separated through a series of sized sieving screens, which allowing the core fragmentation to be quantified. The cumulative mass distribution curves of core after impact under various velocities were obtained. Microstructural and mechanical responses to the ballistic impacts were studied by using scanning electron microscope (SEM), showing that the core

* 收稿日期: 2021-05-12; 修回日期: 2021-09-30

基金项目: 国家自然科学基金(11772160, 11472008, 11802001); 江苏省研究生科研与实践创新计划(KYCX20_0319); 爆炸科学与技术国家重点实验室开放课题(KFJJ18-01M)

第一作者: 王晓东(1993—), 男, 博士研究生, 18752006367@163.com

通信作者: 高光发(1980—), 男, 博士, 教授, gfgao@ustc.edu.cn

was broken into different particle sizes under the action of stress wave and impact. The cumulative mass of the steel core conforms to the Rosin-Rammler power function distribution. With the increase of impact velocity, both the power index k and the average characteristic size λ decreased. Average characteristic size λ can be used to characterize the fragmentation degree of the whole core to a certain extent. The failure mode of the larger equivalent diameter fragment (greater than 8 mm) in the process of impact was a tensile brittle fracture, while the local plastic shear fracture existed on the fragments with an equivalent diameter less than 2 mm.

Keywords: penetration; 12.7 mm armor piercing incendiary projectile; fragment; mass distribution; fracture mode

12.7 mm 穿甲燃烧弹(armor piercing incendiary, API)是轻装甲目标和低空目标的威胁之一,主要配用于高射机枪、车载机枪和航空机枪。12.7 mm API 弹的弹头由钢芯、被甲和低质量的铅套、燃烧剂构成,当弹头撞击到坚硬的目标时,燃烧剂燃烧、被甲剥离,硬质弹芯起主要侵彻作用。在武装直升机、装甲车辆等机动装备轻量化要求下,陶瓷/金属复合结构装甲成为目前抵抗 12.7 mm API 弹的主要方式。

陶瓷材料由于高硬度、低密度、抗侵彻能力强等特点,在弹靶作用过程中,能够使弹芯发生减速、侵蚀、破碎,从而降低子弹的侵彻能力。研究弹芯在侵彻过程中的失效模式对研究子弹的后继侵彻能力以及防护结构设计具有重要的意义,不同于长杆弹侵彻陶瓷/金属复合靶板时表现的侵蚀失效,12.7 mm API 弹的弹芯在侵彻过程中会破碎成形状不规则、质量不一的碎片,而弹芯的破碎程度受到子弹着靶速度、靶板结构、靶板材料等因素的共同影响。

现阶段,子弹在弹靶作用过程破碎特性研究主要从弹芯的微观断裂机理与宏观碎片粒度研究出发,其中,对弹芯微观断裂机理的研究包括: Savio 等^[1]从微观角度研究了 7.62 mm AP 弹侵彻 SiC 陶瓷/铝合金复合靶板后硬质钢制弹芯失效、破碎机制, Di Benedetto 等^[2]研究了包括工具钢在内的多种材料的硬质核心侵彻靶板后的剩余弹芯宏观和微观失效机制;针对弹芯冲击破碎后碎片粒度分布的研究较少, Rahbek 等^[3]分析了 7.62 mm APM2 弹在相同速度下侵彻不同结构 Al₂O₃ 陶瓷/纤维复合靶后的弹芯碎片质量和能量分布规律。碎片的质量分布规律是研究材料破碎特性的一种方法,学者们在对材料冲击试验结果进行统计的基础上,得到了描述碎片分布规律的各种相关函数,包括对数分布、幂率分布、指数分布、Mott 分布、Weibull 分布以及指数与幂率分布的联合等^[4-7]。最近, Ma 等^[8]和 Wang 等^[9]分别利用幂率函数、Rosin-Rammler 分布表征玻璃球、铅基非晶撞击刚性壁后的碎片分布,同时, Shan 等^[10]研究结果表明玻璃球在不同口径 SHPB(分离式霍普金森压杆)撞击下的碎片分布可以用 Rosin-Rammler 分布表征。12.7 mm API 弹撞击陶瓷/金属复合靶板过程中弹芯受力状态复杂,影响弹芯破碎的因素较多,其中,子弹着靶速度是影响弹芯破碎的重要因素之一。

为了研究子弹速度对弹芯碎片粒径分布规律的影响,本文中开展 12.7 mm API 弹以 434.5~844.6 m/s 范围内不同速度侵彻芳纶纤维布/SiC 陶瓷板/铝合金板复合靶板试验研究,通过收集、筛分、统计试验弹芯碎片,确定着靶速度对弹芯破碎的影响规律。

1 试验研究

1.1 试验设计

试验装置如图 1 所示,主要由发射装置、测速装置、复合靶板和回收装置构成。12.7 mm API 弹丸通过 12.7 mm 弹道枪发射,通过减装药方式调整装药量以达到控制弹丸着靶速度的目的,枪口距离靶板迎弹面约为 10 m,弹丸飞行速度通过测试靶纸连接测速仪获得,并以飞行速度作为弹丸最终的着靶速度,忽略子弹在此距离内的速度降。

为了尽可能多地收集到试验后的弹芯碎片,将复合靶板固定在一个尺寸为 510 mm×525 mm×405 mm 的回收箱内,回收箱内壁安装一层厚度为 12 mm 的木板以防止弹芯碎片接触到回收箱金属外壁而造成二次损伤。同时,为对比子弹穿透复合靶板后的剩余侵彻能力,分析着靶速度对穿透复合靶板后的残余弹体侵彻能力的影响规律,在与复合靶板迎弹方向相反的方向,并距离复合靶板约 200 mm 处放置一块尺寸为 200 mm×200 mm×60 mm 厚的 6061T6 铝合金块作为后效靶。

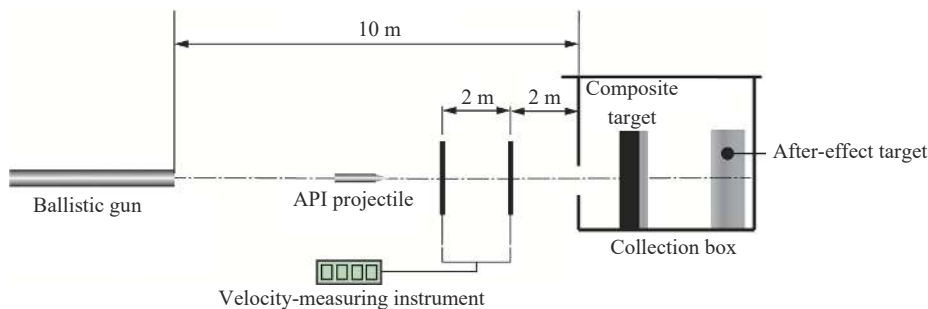


图 1 试验布置

Fig. 1 Schematic of the arrangement for test

1.2 试验材料

试验用弹丸为 12.7 mm 穿甲燃烧弹, 弹头结构如图 2 所示, 由 T12A 材料硬质钢芯、覆铜钢被甲以及少量的燃烧剂和铅套构成, 弹头总质量为 (48.2 ± 0.8) g。其中, 弹芯质量约为 30 g, 直径为 10.8 mm, 弹芯总长为 51 mm。

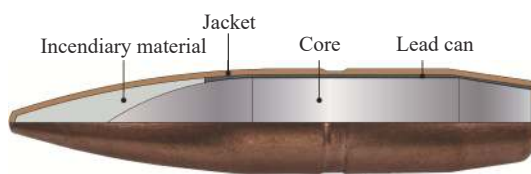


图 2 12.7 mm 穿燃弹弹头结构

Fig. 2 Structure of a 12.7 mm API projectile

在 12.7 mm API 弹侵彻陶瓷/铝合金复合靶板过程中, 弹芯起主要侵彻作用。弹芯材料是一种经过特殊热处理 T12A 材料, 显微硬度 HV 可达 764~789, 该材料表现出明显的拉压不对称性, 如图 3 所示, 其中, 材料准静态拉伸断裂应变在 1.0%~1.5% 范围内, 材料拉伸脆性明显, 而在压缩条件下具有明显的塑性变形。综上: 弹芯材料是一种明显拉压不对称的高强、高硬金属, 这是导致弹芯在侵彻复合靶板过程中出现破碎失效的主要原因之一。

试验用复合靶板为芳纶纤维布/SiC 陶瓷板/铝合金板层合结构。陶瓷板使弹芯发生减速、侵蚀和破碎, 起主要抗弹作用。SiC 陶瓷板尺寸为 $200 \text{ mm} \times 200 \text{ mm} \times 12 \text{ mm}$ 面密度为 39.75 kg/m^2 , SiC 陶瓷板迎弹面粘结一层芳纶纤维布, 其作用是通过抑制陶瓷碎片的飞散而提高靶板抗弹性能, 这已得到试验^[11]证实; 背板起支撑作用, 背板与陶瓷之间通过金属框固定, 结构如图 4 所示, 背板材料为 6061T6 铝合金, 几何尺寸为 $200 \text{ mm} \times 200 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$, 其准静态拉伸强度约为 290 MPa。已有研究表明陶瓷板的侧限对陶瓷抗侵彻能力有较大影响^[12-14], 但不在本文研究范围内, 所以为了避免陶瓷侧限对侵彻行为的影响在陶瓷侧边与金属框之间保留 3 mm 间距, 确保侵彻过程中靶板无侧向约束和预应力。

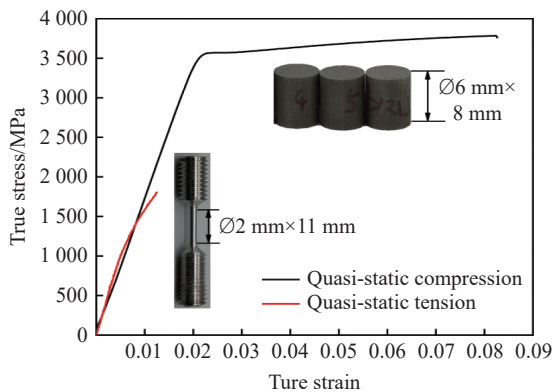


图 3 弹芯材料准静态条件下的真实应力-应变曲线

Fig. 3 Quasi-static true stress-strain curve of core material

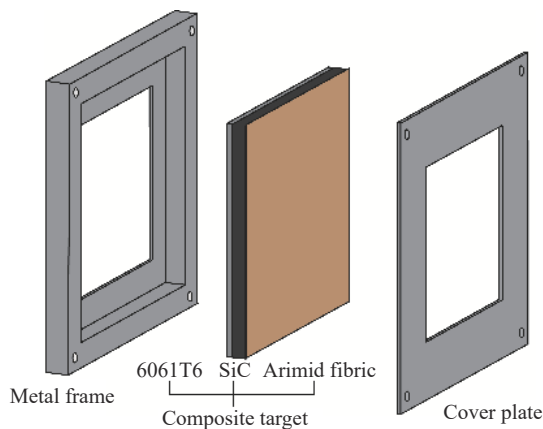


图 4 靶板结构

Fig. 4 Target structure

1.3 破片统计

每发试验后, 收集回收箱内的所有碎片, 用磁铁分离出弹芯碎片, 并对其进行清洗、干燥。通过筛分法对碎片粒度进行定量分析, 参考文献 [3], 本文选用筛网孔径尺寸包括: 8.0、4.0、2.0、1.0 和 0.5 mm, 分别测量 0~0.5、0.5~1.0、1.0~2.0、2.0~4.0、4.0~8.0 和 >8.0 mm 不同组分的质量, 并对较大质量碎片 (大于 4 mm) 进行单独称重。

2 试验结果与分析

共开展 5 发试验, 着靶速度分别为 434.5、503.1、662.7、704.6 和 844.6 m/s, 所有试验复合靶板均被贯穿, 陶瓷板形成宏观裂纹而发生失效, 其主要的宏观裂纹形式包括: (1) 从子弹着靶处向外的径向裂纹; (2) 圆心在子弹着靶处的多条环向裂纹; (3) 从子弹着靶点向外、向背板方向扩展的锥形裂纹, 如图 5(a) 所示。铝合金背板发生碟形变形-剪切穿孔-花瓣形失效, 如图 5(b) 所示, 且随着着靶速度 v 的增加, 陶瓷靶板的破碎程度明显增加, 铝合金背板凸起高度 h 及穿孔的投影面积 S 也相应增大, 如图 5(c) 所示。

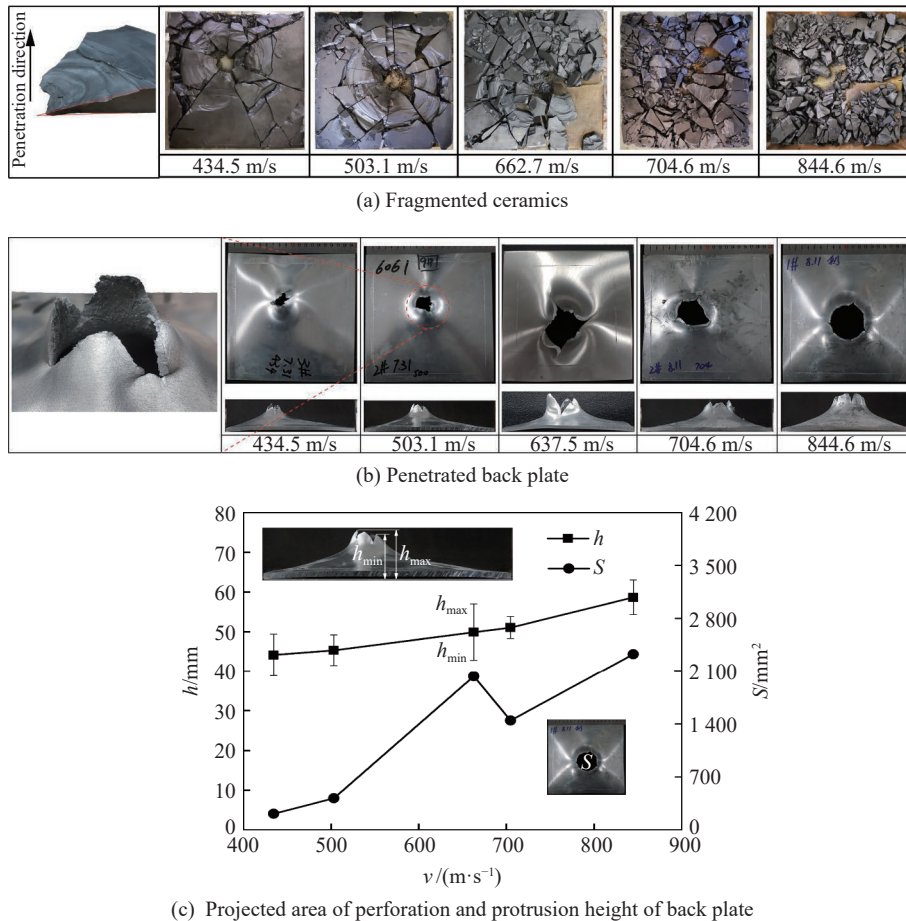


图 5 试验后靶板形貌

Fig. 5 Back face images of tested targets

子弹在穿透复合靶板的过程中产生粉碎、断裂, 之后剩余弹体及碎片继续向后运动, 并作用在后效靶上的一个圆形区域内。如图 6 所示, 随着着靶速度 v 的提高, 后效靶上的最大侵彻深度 D 并未呈现递增趋势, 比较图 6 中 c、d 两发试验, 试验 d 的侵彻深度相对于试验 c 的略有降低, 同时相对于试验 d, 试验 c 的后效板具有更多的弹坑。弹芯的破碎是造成这一现象的主要原因之一, 随着着靶速度的增加, 弹芯破碎程度增加, 碎片质量的降低导致作用在后效靶上的威力降低。

2.1 弹芯碎片

弹芯在侵彻过程中会产生一些较大碎片和许多较小的碎片, 碎片经过回收并按照碎片粒径筛选分离, 得到不同粒径的碎片, 其中最大质量碎片质量一般产生在弹芯尾部, 这也是提供后续侵彻能力的主要部分。Rahbek 等^[3]、Savio 等^[15]在 7.62 mm AP 弹侵彻陶瓷复合靶板时观测到同样的现象。在剩余弹体前端区域的外侧发现轴向裂纹, 如图 7 所示, 这个观察结果以及小碎片的形成, 都表明弹芯头部作用的高应力状态。

试验后收集回收箱内的所有弹芯碎片, 5 发试验中单发收集比例分别为 96.64%、75.18%、81.90%、93.42%、84.92%(按照子弹着靶速度递增顺序), 对收集的弹芯碎片通过一系列的筛网分离后进行称重, 不同粒径碎片称重结果如图 8 所示。从图 8 中可以看出, 弹芯碎片的大部分质量集中在最大粒径部分, 即粒径大于 8 mm 或大于 4 mm 的碎片, 而随着碎片粒径的减小, 破碎的质量也随之减小。图 8 直观地显示了在 2.0~4.0、1.0~2.0、0.5~1.0、<0.5 mm 区间内随着弹丸着靶速度的增加, 相同区间内的弹芯碎片质量呈现增加趋势。

芳纶纤维布/SiC 陶瓷板/铝合金板复合靶板中, 铝合金板对陶瓷板起支撑作用, 可以避免陶瓷过早破裂和飞溅, 进而充分发挥陶瓷的抗弹能力。考虑到弹芯高强高硬的特性, 认为弹芯在侵彻陶瓷板后, 弹芯不会发生二次破碎。当弹丸以不同速度撞击芳纶纤维布/SiC 陶瓷板/铝合金板复合靶板时, 弹芯受力大小与材料应变率均不相同, 导致弹芯碎片表现为不同的分布特征, 如图 9 所示。

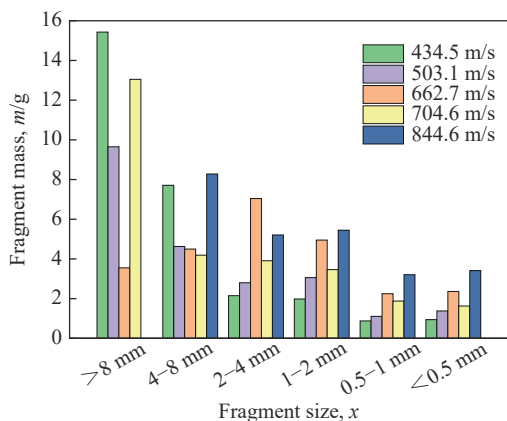


图 8 弹芯碎片质量
Fig. 8 Core fragment mass

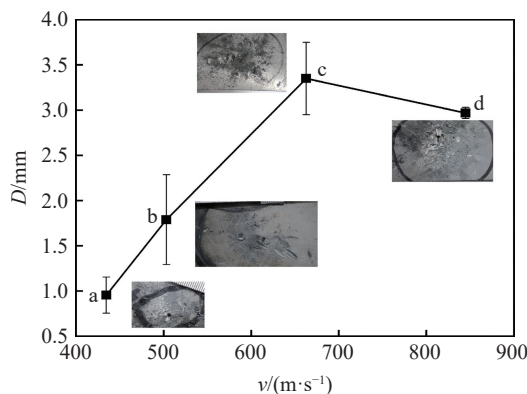


图 6 不同试验中后效板的失效
Fig. 6 The failure of aftereffect targets in different tests



图 7 残余弹体出现的裂纹
Fig. 7 A large fragment with a crack on the side



图 9 回收的弹体碎片
Fig. 9 Recovered projectile core fragments

2.2 碎片断面形貌分析

弹芯在侵彻靶板后形成残余弹体和大量的碎片, 分别选取残余弹体断面和弹体中部碎片断面进行宏观观测如图 10~11 所示, 图 10(a)与图 11(a)中灰色部分为取样位置, 深色表面为观测表面。从图中可

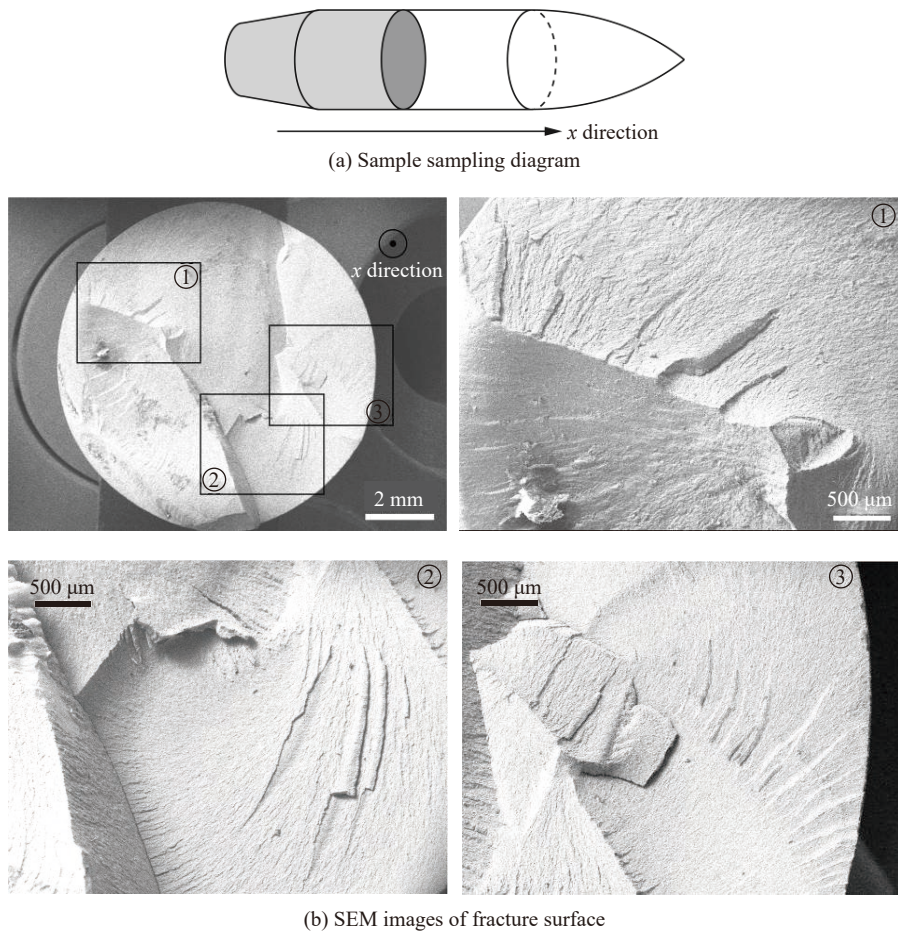


图 10 残余弹体断裂面

Fig. 10 Fracture surface of the residual projectile

以观测到断裂面周围没有明显的塑性变形, 每个表面都可以观测到明显的放射状标记, 这是解理断裂断口的宏观表现形式之一, 而解理断裂是拉应力作用产生的失效模式。表明拉应力失效是弹靶作用过程中弹芯中部和尾部碎片的主要断裂方式。同时, 这些宏观观测结果表明, 弹芯断裂具有明显的宏观脆性断裂特征。值得注意的是, 图 10(b) 表面是由多个独立的断裂面交叉形成的, 表明该表面是由多次断裂失效产生的。

弹芯在冲击作用下残余弹体头部产生失效裂纹, 观察发现残余弹体存在轴向上的失效行为, 在对残余弹体进行轴向切割后得到如图 12(b) 所示结果, 观测面为图 12(a) 所示的深灰色纵向剖面。图 12(b) 中残余弹体纵截面上裂纹根据裂纹的不同形态可划分为 2 个部分, A 区裂纹密集, 裂纹中有明显粉末状杂质, B 区裂纹光滑。X 射线能谱仪 (energy dispersive spectrometer, EDS) 显示图 12(b) 中 A 区裂纹缝隙中存在大量的铅 (Pb)

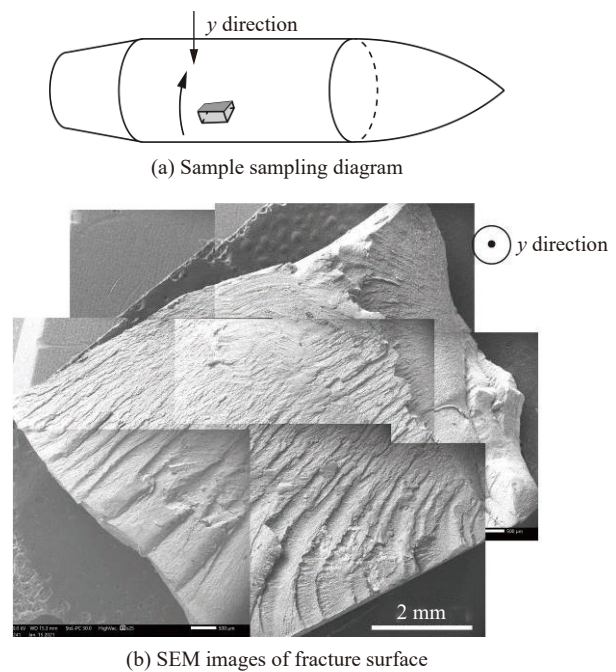


图 11 弹体碎片断口

Fig. 11 Fracture surface of projectile fragment

和铝(Al)元素, 分别来自于 API 弹丸的铅套和铝合金背板, 由此可知 A 区是在弹靶作用过程中, 弹芯碎片夹杂着部分铅套和背板部分材料堆积形成的; B 区裂纹是应力波作用、泊松效应及其相互作用形成的。

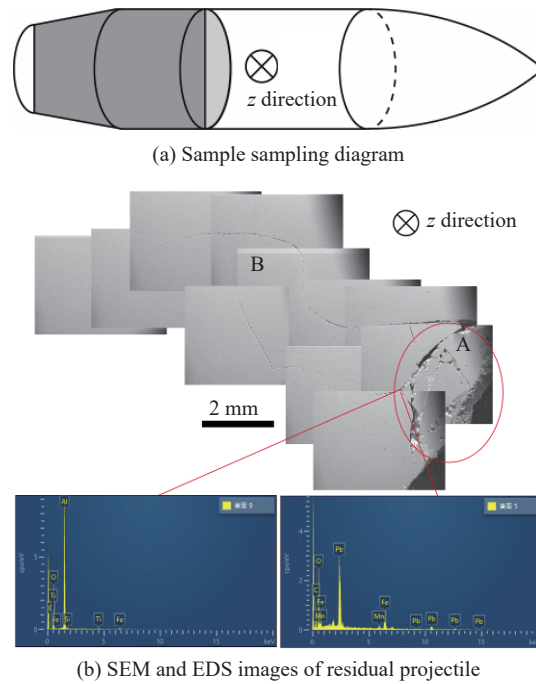


图 12 残余弹体纵向裂纹

Fig. 12 The longitudinal cross-section of the residual projectile

图 13 所示为对收集到的粒径小于 2 mm 的碎片 SEM 分析结果。在弹芯碎片上出现局部剪切切窝, 体现了弹芯在冲击过程中存在一定程度的局部冲击韧性。

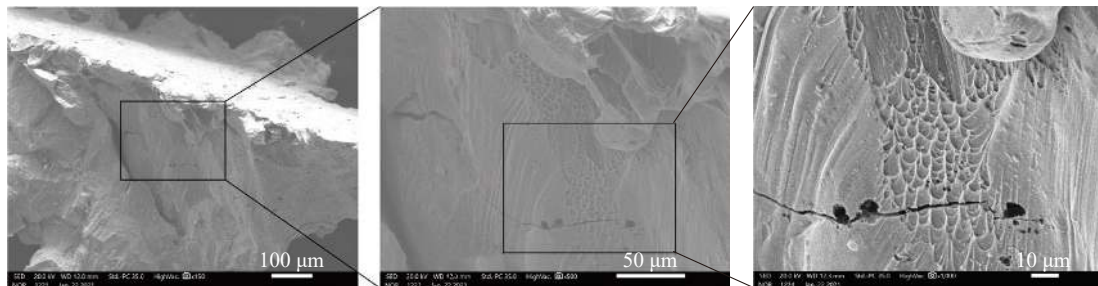


图 13 弹芯碎片中出现局部剪切切窝

Fig. 13 Local shear dimples appear in the core fragments

2.3 碎片质量分布

断裂破碎行为是很难预测的, 尤其是固体在高速冲击下的断裂行为, 在碎片质量分布的研究中, 概率函数对单个碎片的质量数据比较敏感, 而单个数据在统计学上存在一定的误差, 这将对碎片分布模型的拟合结果造成较大的误差, 而采用碎片的累积质量可以有效避免这一问题。为了获得试样撞击后的累积质量分布规律, 对于不同粒径范围的破片, 采用多级筛分法对破片进行筛分、称重, 获得不同粒径范围内的碎片质量。学者们在对材料的冲击试验结果基础上, 得到了描述碎片质量分布的各种相关函数, 主要包括指数型函数和幂率型函数^[16-18], 其中指数型函数分布规律仅适用描述具有一定延性的金属材料的破碎分布特性, 而对于高脆性材料, 碎片的累积质量分布遵循幂率规律分布。

Rosin-Rammler 分布模型是表示碎片累积质量分布的常用模型:

$$M(x \leq X) = M_0 [1 - e^{-(x/\lambda)^k}] \quad (1)$$

式中: X 为碎片等效直径, λ 与 k 分别为碎片的平均特征尺寸和幂指数系数, $M(x \leq X)$ 为直径等于或小于 X 的碎片总质量, M_0 为试样破碎前总质量。Rosin-Rammler 分布模型可以等效成^[9]:

$$M(x \leq X) = M_0 (x/\lambda)^k \quad (2)$$

式 (2) 适用于大多数脆性材料破碎后碎片分布的结果。幂指数 k 一般由试验结果的数据拟合得到, 没有实际的物理意义。通常来说, 为了确定幂指数 k 的值, 式 (2) 可以写成对数形式, 即:

$$\lg(M(x \leq X)) = k \lg x + \lg \left(\frac{M_0}{\lambda^k} \right) \quad (3)$$

对数处理后直线的斜率为 Rosin-Rammler 分布的幂指数 k 。

对尺寸范围在 <0.5 、 $0.5 \sim 1.0$ 、 $1.0 \sim 2.0$ 与 $2.0 \sim 4.0$ mm 范围内碎片进行集体称重, 对大于 4 mm 碎片进行单独称重, 同时, 以筛网网孔孔径小于 4 mm 碎片的等效直径, 对于大于 4 mm 碎片由于碎片为不规则的形状, 引入等质量的球体直径作为碎片的等效直径, 图 14 为不同着靶速度下弹芯碎片的累积质量的对数与碎片等效直径的对数的线性拟合结果 (R^2 为决定系数, $0 \leq R^2 \leq 1$, R^2 接近 1 表明拟合优度高), 从图 14 中可以看出, 弹芯碎片的累积质量的对数与碎片等效直径的对数之间的线性关系明显, 表明 12.7 mm 子弹侵彻陶瓷/金属复合靶板后的弹芯碎片满足 Rosin-Rammler 分布模型。

图 15 显示了不同速度下的幂指数 k 与平均特征尺寸 λ 的取值, 从图 15 中可以看出随着着靶速度的增加幂指数 k 与平均特征尺寸 λ 虽然存在波动, 但整体呈现递减趋势。幂指数 k 主要决定不同尺度碎片质量分布的比重, k 值的降低表明随着子弹撞击速度的增加, 碎片的累积质量的对数与碎片等效直径的对数的线性拟合斜率减小, 即随着撞击速度的增加, 小碎片的质量增加, 大质量碎片减少。平均特征尺寸 λ 表述的是碎片的整体特征尺寸, λ 值的降低表明随着撞击速度的升高弹芯破碎程度增加, 从而, 平均特征尺寸 λ 可以一定程度上表征弹芯整体的破碎程度。

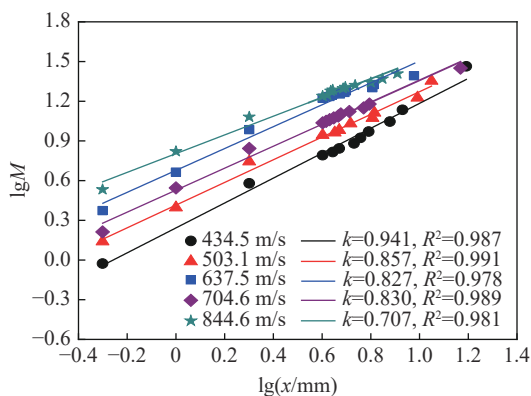


图 14 不同着靶速度下碎片质量分布

Fig. 14 Mass distribution of fragments under different impact velocities

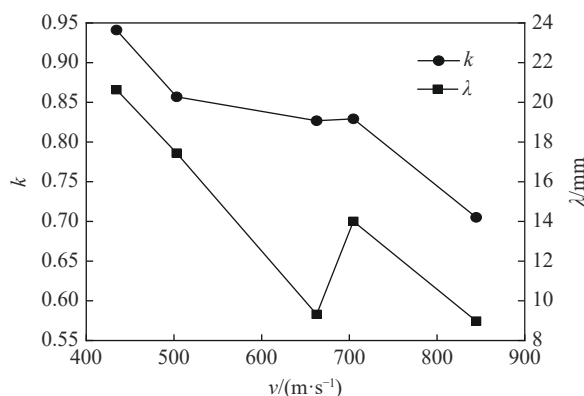


图 15 不同速度时的幂指数与平均特征尺寸

Fig. 15 The values of power index and average characteristic size under different impact velocities

3 结 论

本文中开展了 12.7 mm API 弹丸垂直撞击 SiC 陶瓷/6061T6 铝合金复合靶板试验, 分析了弹靶的失效模式, 对试验后弹芯碎片进行了收集、筛分, 并利用 SEM 和 EDS 观察断面形貌, 得到以下结论。

(1) 陶瓷板的失效模式为脆性断裂, 并形成锥形中心孔、径向放射性裂纹与环向裂纹, 铝合金背板失效模式为碟形变形-剪切穿孔-花瓣形失效。

(2) 12.7 mm API 垂直撞击 SiC 陶瓷/6061T6 铝合金复合靶板后弹芯发生破碎, SEM 分析结果显示弹芯失效模式主要为脆性拉伸, 弹芯头部碎片失效模式存在局部塑性剪切失效。EDS 分析结果表明残余

弹芯头部存在弹芯碎片颗粒与背板、铅套材料的堆积现象。

(3) 弹芯碎片累积质量与碎片等效直径之间满足 Rosin-Rammler 幂率分布关系, 随着着靶速度的增大, 幂指数 k 和平均特征尺寸 λ 呈降低趋势。平均特征尺寸 λ 可以一定程度上表征弹芯整体的破碎程度。

参考文献:

- [1] SAVIO S G, SENTHIL P, SINGH V, et al. An experimental study on the projectile defeat mechanism of hard steel projectile against boron carbide tiles [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2015, 86: 157–166. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2015.07.011.
- [2] DI BENEDETTO G, MATTEIS P, SCAVINO G. Impact behavior and ballistic efficiency of armor-piercing projectiles with tool steel cores [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2018, 115: 10–18. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2017.12.021.
- [3] RAHBK D B, JOHNSEN B B. Fragmentation of an armour piercing projectile after impact on composite covered alumina tiles [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2019, 133: 103332. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2019.103332.
- [4] ASAHI KAWASHIMA, H K H K. Fracture toughness of Zr55Al10Ni5Cu30 bulk metallic glass by 3-point bend testing [J]. *Materials Transactions*, 2005(7): 1725–1732.
- [5] GRADY D E, KIPP M E. Impact failure and fragmentation properties of metals [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1997, 20(1): 293–308. DOI: 10.1016/S0734-743X(97)87502-1.
- [6] PIEKUTOWSKI A J. Effects of scale on debris cloud properties [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1997, 20(6): 639–650.
- [7] GRADY D E. Dissipation in adiabatic shear bands [J]. *Mechanics of Materials*, 1994, 17(2): 289–293.
- [8] MA G, ZHANG Y, ZHOU W, et al. The effect of different fracture mechanisms on impact fragmentation of brittle heterogeneous solid [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2018, 113: 132–143. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2017.11.016.
- [9] WANG C T, HE Y, JI C, et al. Dynamic fragmentation of a Zr-based metallic glass under various impact velocities [J]. *Journal of Materials Science*, 2021, 56(4): 2900–2911. DOI: 10.1007/s10853-020-05495-5.
- [10] SHAN J, XU S, LIU Y, et al. Dynamic breakage of glass sphere subjected to impact loading [J]. *Powder Technology*, 2018, 330: 317–329. DOI: 10.1016/j.powtec.2018.02.009.
- [11] SARVA S, NEMAT-NASSER S, MCGEE J, et al. The effect of thin membrane restraint on the ballistic performance of armor grade ceramic tiles [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2007, 34(2): 277–302. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2005.07.006.
- [12] CHI R, SERJOU EI A, SRIDHAR I, et al. Pre-stress effect on confined ceramic armor ballistic performance [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2015, 84: 159–170. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2015.05.011.
- [13] LYNCH N J, BLESS S J, CULLIS I G, et al. The influence of confinement on the penetration of ceramic targets by KE projectiles at 1.8 and 2.6 km/s [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2006, 33(1): 390–401. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2006.09.029.
- [14] LUNDBERG P, RENSTRÖM R, LUNDBERG B. Impact of metallic projectiles on ceramic targets: transition between interface defeat and penetration [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2000, 24(3): 259–275. DOI: 10.1016/S0734-743X(99)00152-9.
- [15] SAVIO S G, RAMANJANEYULU K, MADHU V, et al. An experimental study on ballistic performance of boron carbide tiles [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2011, 38(7): 535–541. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2011.01.006.
- [16] GRADY D E. Fragmentation of rings and shells[M]. Berlin: Springer, 2006: 2–9.
- [17] GRADY D E. Fragment size distributions from the dynamic fragmentation of brittle solids [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2008, 35(12): 1557–1562. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2008.07.042.
- [18] 张青艳. 脆性材料在准静态和冲击压缩载荷作用下的动态碎裂过程 [D]. 宁波: 宁波大学, 2019: 26–46.
ZHANG Q Y. Fragmentations of brittle materials under quasi-static and dynamic compression[D]. Ningbo: Ningbo University, 2019: 26–46.

(责任编辑 王易难)