



不同陶瓷厚度复合靶的抗侵彻行为研究

王伯通¹, 褚庆国^{2*}, 武一丁¹, 王晓东¹, 余毅磊¹, 周 玄¹, 高光发¹

(1.南京理工大学 机械工程学院, 江苏 南京 210094; 2.中国人民解放军 63963 部队, 北京 100072)

摘要:轻型复合装甲是现代装甲防护系统的研究重点之一, 为了研究不同陶瓷厚度陶瓷/纤维复合靶板的抗侵彻性能, 开展了 12.7 mm 穿甲燃烧弹在同一工况条件下正侵彻芳纶/SiC 陶瓷/UHMWPE 纤维复合靶板的弹道试验。回收试验后的弹芯和靶板, 观测分析了弹芯和陶瓷的破碎特征和失效模式, 同时对回收的弹芯和靶板碎片进行筛分、称重, 分析弹芯和陶瓷碎片的累积质量分布规律, 表征了陶瓷/纤维复合靶板的抗侵彻性能。研究结果表明: 弹芯头部破碎呈粉末状, 身部破碎成大小不规则的碎片, 而剩余弹芯无破碎且断口表面呈规律性断裂特征。通过扫描电子显微镜对剩余弹芯的断口处进行观测, 发现断口处存在规律性的解理性断裂特征, 表明弹芯断口处的主要失效模式为拉应力作用下产生的脆性断裂和局部的塑性变形, 且为多次断裂失效作用的结果。陶瓷破碎形态为环状裂纹、径向裂纹以及两种裂纹相互交织形成的含有锥角的陶瓷锥, 且随着陶瓷厚度每增加 1 mm, 陶瓷锥锥角增大 11.67%。陶瓷破碎区域分为粉碎区和裂纹区, 粉碎区是以着靶点为中心圆形区域, 且陶瓷厚度每增加 1 mm, 粉碎区面积增大 11.13%。对弹芯和陶瓷碎片统计分析发现, 弹芯和陶瓷碎片累积质量分布规律均符合 Rosin-Rammler 幂率分布函数, 且随着陶瓷厚度的增加, 平均特征尺寸减小, 弹芯与陶瓷的破碎程度增大。

关键词:陶瓷/纤维复合靶板; 陶瓷厚度; 陶瓷锥; 弹靶破碎特征; Rosin-Rammler 分布函数

中图分类号: TJ012.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-499X(2024)04-0030-09

Study on Anti-penetration Behavior of Ceramic Composite Targets with Different Thicknesses

WANG Botong¹, CHU Qingguo^{2*}, WU Yiding¹, WANG Xiaodong¹, YU Yilei¹, ZHOU Xuan¹, GAO Guangfa¹

(1.College of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;

2.Unit 63963 of PLA, Beijing 10071, China)

Abstract: Light composite armor is one of the key points modern armor protection system. In order to study the anti-penetration performance of ceramic/fiber composite targets with different ceramic thicknesses, ballistic test of 12.7 mm armor-piercing incendiary projectile penetrating aramid/SiC ceramic/ultra high molecular weight polyethylene fiber composite targets under the same working condition was carried out. The core and target plate were recovered after the test. Then, the crushing characteristics and failure modes of the core and ceramics were observed and analyzed. At the same time, the recovered projectile core and target fragments were screened and weighed, and the cumulative mass distribution of projectile core and ceramic fragments was analyzed. Thus, the anti-penetration performance of ceramic/fiber composite target was characterized. The results show that the head of the core is crushed into powder and the body is crushed into irregular fragments. While the remaining core is not broken and the fracture surface shows the characteristic of regular fracture. It is found that there are regular cleavage fracture characteristics in the remaining core by scanning electron microscope, which indicates that the main failure modes are brittle fracture and local plastic deformation under tensile stress caused by multiple

fracture failures. The ceramic crushing form includes annular crack, radial crack and ceramic cone with cone angle generated by the two kinds of cracks interweave. The ceramic cone angle increases by about 11.67% for every increase of 1 mm in ceramic thickness. The ceramic crushing area is divided into crushing zone and crack zone. The crushing zone is the circular area on the target. The crushing area increases by about 11.13% for every increase of 1 mm in ceramic thickness. Based on the statistical analysis of projectile core and ceramic fragments, it is found that the cumulative mass distribution law of projectile core and ceramic fragments accords with the Rosin-Rammler power law distribution function model. With the increase of ceramic thickness, the average characteristic size λ decreases, and the fragmentation degree of projectile core and ceramic increases.

Key words: ceramic/fiber composite target; ceramic thickness; ceramic cone; fragmentation characteristics of projectile target; Rosin-Rammler distribution function

随着武器装备的快速发展,武器的精准性和杀伤性得到极大的提升,对军用车辆、武装直升机、船舶等造成巨大的威胁,也对装甲提出更好的防护性能要求。轻型复合装甲系统是现代装甲防护系统的研究重点之一,随着先进材料与制备工艺的发展,轻型复合装甲系统也在不断地更新迭代,如轻型钛合金、铝合金、陶瓷和纤维增强复合材料等。轻型复合装甲通常由多层材料组合而成,用于代替传统的整体金属装甲,可大大减轻重量^[1]。

陶瓷材料被广泛应用于轻型复合装甲系统,但具有低抗拉强度、脆性等特性,不能在抗侵彻过程中完全消耗弹丸的能量。超高分子量聚乙烯 (ultra high molecular weight polyethylene, UHMWPE) 纤维具有低密度和高强度等独特的性能,其与热塑性聚合物基质的结合可以得到质量轻、强度高、抗冲击性能好等特性^[2-3]。但 UHMWPE 复合材料抗压强度和抗剪切强度低,在某些情况下无法单独用作抗弹材料^[4]。因此,可选用陶瓷作为面板, UHMWPE 纤维作为背板,通过不同层与层之间及不同材料的协调作用,可提高靶板的抗侵彻性能,弥补单一陶瓷或单一纤维的局限性^[5]。陶瓷具有很高的硬度和抗压强度,通过钝化、侵蚀、粉碎弹丸来耗散弹丸的能量;纤维背板具有较高的韧性和抗拉强度,可以吸收陶瓷碎片和破碎弹丸的残余动能^[6-7]。

李永鹏等^[8]通过试验与仿真对比验证的方法,研究了 SiC 陶瓷和 UHMWPE 纤维复合结构中陶瓷和纤维厚度对其抗侵彻性能的影响,指出随着 SiC 陶瓷与 UHMWPE 纤维板厚度比的增加,复合结构的抗弹性能先增强后减小。司鹏等^[9]通过弹道实验及数值模拟,研究了陶瓷和金属厚度在不同厚度配比下复合靶板的抗弹性能,指出当陶瓷与金属厚

度比为 1:2 时,弹体具有较长的界面驻留时间,复合靶板具有更高的防护效能。

WOODWARD 等^[10]在弹道冲击试验的研究中发现陶瓷/纤维复合靶板的抗侵彻性能与弹芯和靶板的破碎特征有着明显的联系。RAHBK 等^[11]开展了 7.62 mm AP 硬钢芯弹丸侵彻氧化铝陶瓷/纤维复合靶板试验,通过收集并分析残余弹靶碎片的粒径尺寸与质量分布规律,量化弹丸和靶板之间的相互作用。BENEDETTO 等^[12]研究了工具钢芯穿甲弹的冲击行为和弹道效率,对弹丸碎片进行宏观分析与微观观测,对核心碎片进行了金相分析。SAVIO 等^[13]研究了 7.62 mm AP 弹丸撞击碳化硼陶瓷的失效机理,从微观层面上观测到失效弹丸中存在的不同断裂模式,研究了硬质钢芯弹丸在与陶瓷靶板撞击过程中的失效机理与破碎机制。

通过研究弹靶碎片的粒径尺寸与质量分布规律可表征材料的破碎特性。碎片的质量分布可由各种相关函数进行描述,其中有指数分布、幂率分布、Mott 分布、对数分布等^[14-15]。MA 等^[16]研究了不同断裂机理对脆性非均质固体冲击破碎的影响,利用统计方法分析了断裂模式对撞击后破碎质量分布和形状特征的影响,用幂律函数表征碎片的质量分布。

综合上述研究成果可知,当前研究主要集中于复合靶板的材料、厚度比和界面之间的相互作用对复合靶板的抗侵彻性能的影响,但对于复合靶板中陶瓷厚度变化对抗侵彻性能的影响以及弹靶破碎特征的变化描述较少。因此,本文开展 12.7 mm 穿甲燃烧弹在相同工况条件下正侵彻不同陶瓷厚度芳纶/SiC 陶瓷/UHMWPE 纤维复合靶板的弹道试验。分析弹芯和陶瓷在侵彻过程中的失效模式与破碎特征,并收集试验后的弹芯和陶瓷碎片,进行筛分称

重,对碎片的粒径尺寸与累积质量分布规律进行分析,指明陶瓷厚度与弹芯和陶瓷的破碎规律的变化关系。

1 弹道试验研究

1.1 试验装置

本文试验装置主要由 12.7 mm 口径弹道枪、12.7 mm 穿甲燃烧弹、光幕测速系统、芳纶/陶瓷/纤维复合靶板和弹靶碎片收集装置组成,如图 1 所示。陶瓷/纤维复合靶板放置在距离弹道枪枪口约 10 m 的位置,并在枪口与靶板之间布置光幕测速系统,测速系统距靶板约 4 m。在测速架上粘贴两张测速靶纸,2 个靶纸之间间隔约 1 m,并将测速靶纸连接测速仪。当弹丸先后穿过 2 张测速靶纸,测速靶纸将电信号传递到测速仪,即可得到弹丸的弹道飞行速度。

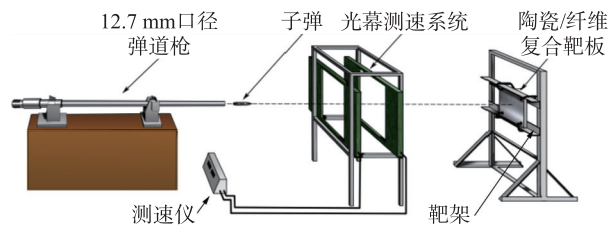


图 1 试验装置
Fig. 1 Test device

试验过程中需要测量弹丸的着靶速度,由于测速靶纸与靶板之间的距离很短,且弹丸速度很大,可以忽略弹丸在这一段距离的速度变化,即将经过光幕测速系统测出的弹丸飞行速度作为弹丸着靶速度。同时为了确保弹丸以稳定的速度侵彻靶板,试验准备阶段通过调节发射药药量的方法来控制弹丸的初速。测速靶纸的厚度很小且硬度低,对弹丸飞行姿态与速度的影响可以忽略不计。

1.2 试验方案

试验所用的 12.7 mm 穿甲燃烧弹由刚脆性弹芯、铅套及覆铜钢被甲构成,弹芯前方填充少许燃烧剂,如图 2 所示。弹芯材质属于硬质合金,其主要特点是在垂直侵彻当前各类高强金属装甲时皆呈现刚性特性,而在侵彻陶瓷复合装甲时却呈现脆性破碎特性,因此可将这类弹芯称之为刚脆性弹芯。刚脆性弹芯质量约为 30 g,铅套、覆铜钢被甲与燃烧剂总质量约为 18.2 g,弹丸总质量约为 48.2 g。

试验所用的复合靶板由 3 部分组成,芳纶纤维布作为止裂层粘贴于陶瓷面板的迎弹面, SiC 陶瓷

置于中间,而 UHMWPE 纤维板作为背板粘贴于陶瓷面板的后方,复合靶板结构如图 3 所示。

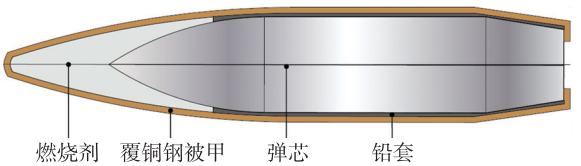


图 2 弹丸结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of projectile structure

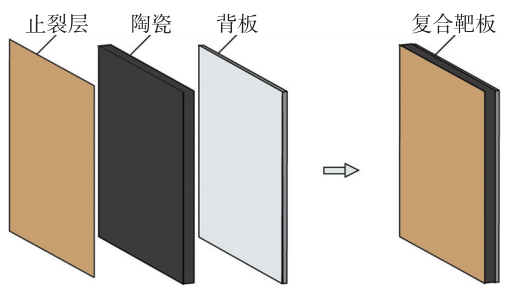


图 3 止裂层/陶瓷/纤维复合靶板结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of crack

layer/ceramic/fiber composite target structure

复合靶板整体的尺寸为长和宽各 200 mm,其中芳纶纤维布厚度约为 1 mm, SiC 陶瓷面板的厚度为 8~15 mm, UHMWPE 纤维背板的厚度为 10 mm。复合靶板结构的组元厚度如表 1 所示。

表 1 复合靶板结构的组元厚度

Table 1 Component thickness of composite target structure

靶板结构	止裂层厚度/mm	陶瓷面板厚度/mm	纤维背板厚度/mm	靶板组合厚度/mm
	1	8	10	19
芳纶/SiC 陶瓷/	1	10	10	21
UHMWPE 纤维	1	12	10	23
	1	15	10	26

由于侵彻试验过后需要对弹丸和复合靶板的破碎形态进行观测和分析,因此试验时将复合靶板放置在收集箱内,尽可能地收集破碎的弹芯和靶板。同时,为了确保弹丸在侵彻复合靶板时的稳定性,用夹具将复合靶板固定在箱内的中心位置,夹具对复合靶板没有施加预紧力和侧向约束力。为了避免弹丸和靶板的碎片撞击收集箱内壁而产生二次损伤或丢失,在收集箱内铺设一层厚木板。

在侵彻过程中,芳纶纤维止裂层的作用是限制和约束粉碎的陶瓷碎片流动,从而增加侵彻阻力,提高陶瓷复合靶板的抗弹效率^[17]。同时,芳纶纤维止

裂层可以有效地防止陶瓷在受到强冲击作用下碎片的飞散,有利于试验后对靶板的观测与分析。在弹芯侵彻陶瓷时,由于陶瓷材料具有硬度高、抗侵彻能力强等特点,使弹芯破碎、侵蚀、失效,并使其速度降低,损失大量的动能。纤维背板为陶瓷面板提供强力的支撑,当陶瓷面板破碎后,残余的弹芯和部分陶瓷碎片继续侵彻纤维板,而纤维板吸收弹芯的残余动能,并减少弹芯及陶瓷碎片的喷射。

T12A 弹芯和 SiC 陶瓷的力学性能如表 2 和表 3 所示^[18]。

表 2 T12A 弹芯材料力学性能

Table 2 Mechanical properties of core materials				
密度 /($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性模量 /GPa	泊松比	屈服强度 /MPa	洛氏硬度 /HRC
7 830	197	0.3	3 544	14.2

表 3 SiC 陶瓷材料力学性能

Table 3 Mechanical properties of SiC ceramic materials				
密度 /($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性模量 /GPa	泊松比	断裂韧性 /($\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$)	维氏硬度 /GPa
3 196	430	0.16	3.4	22.0

2 试验结果与分析

当弹丸撞击复合靶板时,弹芯前端的覆铜钢被甲在冲击作用下产生塑性变形脱落,少量的燃烧剂瞬间燃烧耗尽,弹丸穿过芳纶止裂层与陶瓷面板,在陶瓷的背弹面形成一团碎片,碎片继续侵彻陶瓷后方的 UHMWPE 纤维板。弹丸的冲击和穿孔过程不仅导致弹丸本身的显著破碎,也导致陶瓷面板的破碎与纤维背板的变形。每一发侵彻试验过后,收集并分离收集箱中所有的弹丸和复合靶板碎片。覆铜钢被甲颜色为黄铜色,易与弹芯和陶瓷区分,同时覆铜钢被甲具有良好的延展性,其在弹丸侵彻靶板过程中受高温、高压的影响产生塑性变形,破坏熔融成

一个不规则的大碎块。由于弹芯材料具有磁性,可以通过磁铁收集弹芯碎片。将收集的弹芯碎片进行清洗、干燥处理,并对收集到的弹芯碎片进行称重,得到侵彻试验后弹芯剩余总质量,弹芯剩余总质量为试验后回收的所有弹芯碎块及碎片的质量和。当弹芯碎片被分离后,剩余碎片为 SiC 陶瓷、纤维背板及木屑等碎片,用镊子剔除除陶瓷碎片以外的碎片,并将收集到的陶瓷碎片进行清洗、干燥、称重,得到侵彻试验后陶瓷剩余总质量,侵彻试验结果如表 4 所示。可以看出,弹丸以相同速度侵彻芳纶/SiC 陶瓷/UHMWPE 纤维复合靶板时,陶瓷面板厚度为 8 mm 的复合靶板被穿透,其余靶板均未被穿透。

表 4 侵彻试验结果

Table 4 Penetration test results				
SiC 陶瓷厚度/mm	弹芯剩余总质量/g	陶瓷剩余总质量/g	弹芯着靶速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	靶板穿透情况
8	29.73	1 049.03	520.7	穿透
10	29.96	1 338.65	516.3	未穿透
12	29.24	1 587.52	527.3	未穿透
15	29.94	1 983.70	528.1	未穿透

2.1 弹芯破碎情况分析

弹芯碎片经回收整理后,采用筛网分级筛分的方法对弹芯碎片进行分筛,筛网采用 8 mm、4 mm、2 mm、1 mm 和 0.5 mm 5 种筛径,分筛结果如图 4 所示。可以看出,弹芯在侵彻陶瓷/纤维复合靶板时,破碎主要集中在弹芯头部和身部前端位置,弹芯尾部基本保持完整,4~8 mm 粒径的碎片主要为弹芯身部碎片,粒径<2 mm 的碎片主要为弹芯头部碎片。随着陶瓷厚度的增加,弹芯残余的最大粒径碎片的尺寸明显减小,而粒径<4 mm 的碎片的粉碎程度增大。

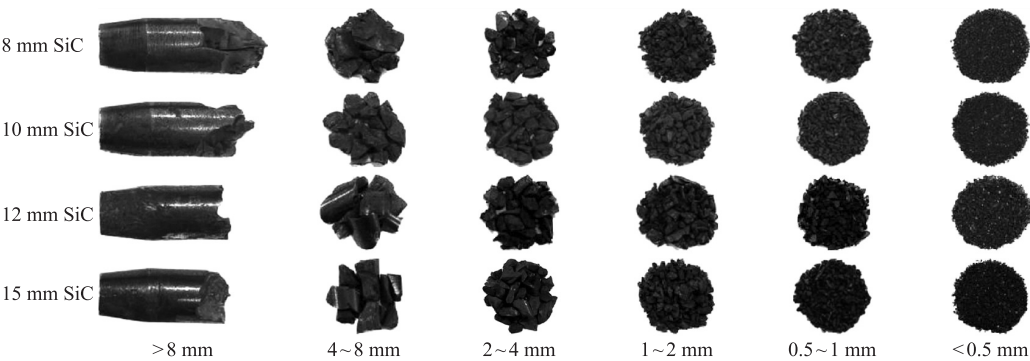


图 4 不同粒径范围内的弹芯碎片

Fig. 4 Projectile core fragments with different particle sizes

选取弹芯残余的最大粒径碎片进行扫描电子显微镜(SEM)分析,对弹芯的断裂面进行观测,结果如图5所示。可以看出,在弹芯的断裂面上有许多规则的长条形沟壑,呈现典型的脆性断裂特征。而脆性断裂是弹芯在侵彻陶瓷时产生的高拉伸应力作用的结果^[19],这表明弹芯在侵彻过程中主要的断裂模式是拉应力作用下产生的失效。将断裂面进行局部放大,可以看到断裂面上杂乱分布着一些尺寸不同的类圆形孔洞。从图中可以看出,类圆形孔洞的边缘是脆性断裂特征,但在孔洞的内部也存在塑性变形,这表明此类类圆形孔洞是脆性断裂和塑性变形共同作用的结果。

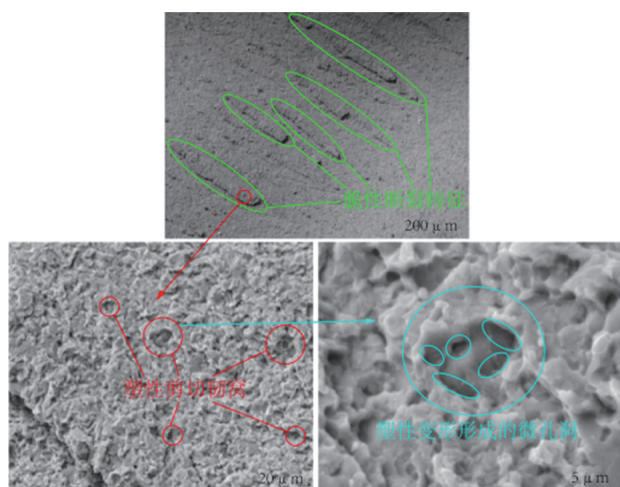


图5 弹芯碎片的SEM观测

Fig. 5 SEM observation of core fragments

本文通过对材料碎片的统计分析,研究材料碎片的质量分布规律,表征固体材料的断裂破碎行为。但由于脆性材料的特性,单个碎片的质量对概率函数有着较大的影响,单一的数据会影响碎片质量分布模型的拟合结果。因此,研究材料碎片的累积质量分布规律,可以降低数据的误差。

表征弹道侵彻试验过后材料碎片的累积质量分布的两种典型分布函数模型是指数型和幂律型^[20]。两者的区别在于,指数型函数分布模型只能用于描述延性固体材料的碎片累积质量分布规律,而幂律型函数分布模型可以描述脆性固体材料碎片的累积质量分布规律。

为了研究弹芯侵彻陶瓷/纤维复合靶板后剩余弹芯碎片的累积质量分布规律,将回收的剩余弹芯碎片用不同孔径的筛网进行分筛,对筛分出的不同粒径范围的弹芯碎片分别称重。由于弹芯

碎片直径大于4 mm的碎片尺寸过大且不规则,对结果的影响较大,所以需要将单个碎片分别称重,并在统计时将其等效为相同质量的球体直径。对于弹芯碎片直径在2~4 mm、1~2 mm、0.5~1 mm、<0.5 mm范围内的碎片,将同一直径范围内的碎片集中称重,同时可以用其对应的筛网孔径作为等效直径。

本文中应用的固体材料碎片的累计质量分布模型为 Rosin-Rammler 分布模型^[21-22]:

$$m(x \leq X) = m_0 \{1 - \exp[-(x/\lambda)^k]\} \quad (1)$$

式中: x 为碎片的直径, X 为碎片的等效直径, $m(x \leq X)$ 为累积质量, m_0 为试验前弹芯的总质量, λ 为碎片的平均特征尺寸, k 为碎片的幂指数系数。为了方便计算,可以将式(1)简化为:

$$m(x \leq X) = m_0 (x/\lambda)^k \quad (2)$$

为了更直观地表达碎片累积质量与碎片直径之间的线性关系,同时对式(2)等号两边取对数,将上式化简为:

$$\lg(M(x \leq X)) = k \lg x + \lg \left(\frac{m_0}{\lambda^k} \right) \quad (3)$$

在上式中,弹芯碎片的幂指数系数 k 为试验结果拟合直线的斜率。

图6为不同陶瓷面板厚度下的弹芯碎片质量分布。从图中可以看出,弹芯残余的最大质量随着陶瓷面板厚度的增加而减少,同时直径4 mm内的弹芯碎片质量随着陶瓷面板厚度的增加而增加。

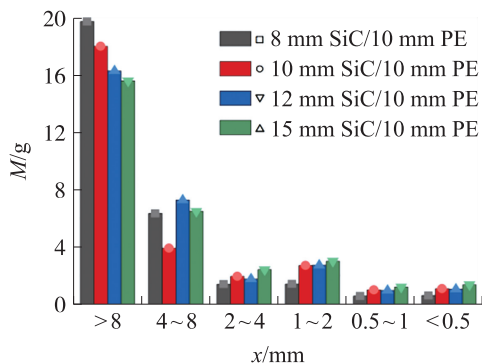


图6 弹芯碎片质量分布

Fig. 6 Mass distribution of core fragments

图7为不同陶瓷面板厚度下的弹芯碎片累积质量分布。可以看出,试验结果中对弹芯碎片直径对数值和对弹芯碎片累积质量对数值之间存在线性关系,这表明弹芯碎片的累积质量分布满足式(3),符合 Rosin-Rammler 分布模型。

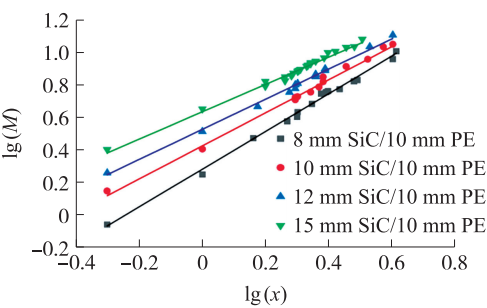


图7 弹芯碎片累计质量分布

Fig. 7 Cumulative mass distribution of core fragments

图8为不同陶瓷面板厚度下弹芯碎片的幂指数系数与平均特征尺寸的计算结果。弹芯碎片的幂指数系数为对弹芯碎片直径对数值和对弹芯碎片累计质量对数值之间线性关系的斜率,弹芯碎片的平均特征尺寸表述的是碎片的整体特征尺寸^[23]。从图中可以看出,随着陶瓷面板厚度的增加,弹芯碎片的幂指数系数与平均特征尺寸的计算结果均随之减小。平均特征尺寸值的减小在一定程度上可以表明随着陶瓷面板厚度的增加,弹芯在侵彻陶瓷/纤维复合靶板的过程中破碎形成的小碎片的质量增加,弹芯破碎的程度增大。因此,弹芯碎片的平均特征尺寸可以用来反映弹芯整体的破碎程度,值减小,则弹芯整体的破碎程度增大。

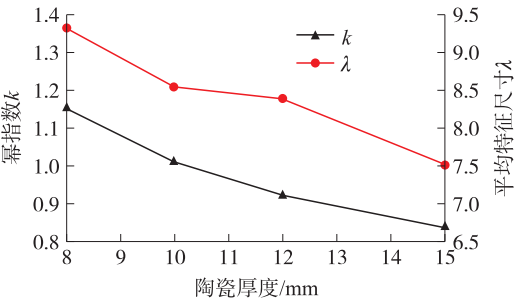


图8 不同陶瓷厚度下弹芯的 k 与 λ

Fig. 8 k and λ of elastic core under different ceramic thickness

2.2 复合靶板破碎情况分析

侵彻试验后,回收止裂层/陶瓷/纤维复合靶板,分离陶瓷面板和纤维背板分别进行观测分析,结果如图9所示。由图可知,陶瓷面板迎弹面上粘贴的芳纶止裂层中心位置有圆形穿孔,且随着陶瓷厚度的增加,穿孔直径逐渐增大。同时在穿孔周边的区域出现黑色灼烧痕迹,这是穿燃弹中少量的燃烧剂作用的结果。在陶瓷板迎弹面上粘贴芳纶止裂层可以有效防止陶瓷板在受到刚脆性弹芯高速撞击时产生破碎飞散,进而保持陶瓷破碎后整体的完整性,有

利于观察陶瓷面板破碎后的形态特征。

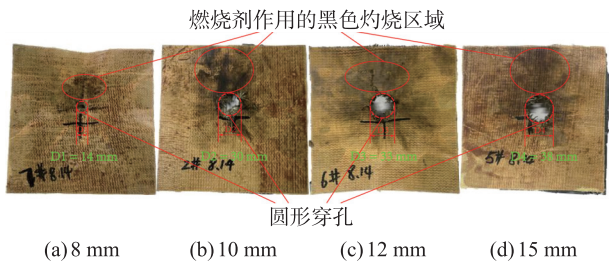


图9 陶瓷面板迎弹面粘贴的芳纶止裂层

Fig. 9 Aramid crack arrest layer pasted on the catapult surface of ceramic panel

对回收的陶瓷板进行清理,清理时避免过重的动作导致陶瓷面板沿裂纹方向加重破碎程度。不同陶瓷厚度下陶瓷面板的破碎情况如图10所示,图中 $D1$ 为粉碎区直径、 $D2$ 为环状破碎区直径。可以看出,陶瓷面板背弹面上的破碎纹路是以着靶点为中心的环形裂纹与以着靶点为起点向外发散的径向裂纹相互交错形成的近似蜘蛛网状的裂纹。同时陶瓷面板着靶点周围的大尺寸碎块呈现出明显的陶瓷锥形态。陶瓷锥是陶瓷在受到冲击时破碎形成的含有锥角的类锥形大尺寸碎块,是陶瓷主要的破碎形态之一^[24]。

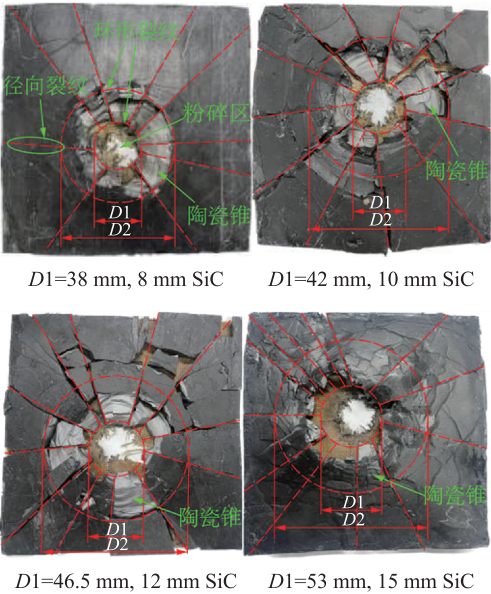


图10 不同陶瓷厚度下陶瓷面板的破碎情况

Fig. 10 Breakage of ceramic panels with different ceramic thickness

在弹芯与陶瓷板撞击的瞬间,冲击载荷会在2种材料中产生应力波,自着靶点向材料内部传播,此时的应力波以压缩波为主。高压压缩应力作用在着靶点,将着靶点附近区域的陶瓷轰碎成粉末状,形成

初始粉碎区,同时在陶瓷面板上形成以着靶点为中心的压剪裂纹并向四周延伸,形成破碎区^[25]。如图 10 所示,随着陶瓷面板厚度的增加, $D1$ 直径逐渐增大,粉碎区的面积增大,陶瓷面板厚度每增加 1 mm,粉碎区面积增大约 11.1%。

当压缩波从着靶点传至陶瓷和纤维的交界面处,由于 2 种材料的波阻抗不同,压缩波会分解为反射波和透射波,反射波反射后再与入射压缩波产生的卸载波相互作用,在交界面处形成局部拉伸或剪切应力^[26]。当拉伸或剪切应力超过陶瓷材料的强度极限时,陶瓷发生破碎并形成剪切裂纹,裂纹由陶瓷和纤维交界面向陶瓷迎弹面方向扩展,并于最初形成的锥形裂纹汇合,形成陶瓷锥^[27]。陶瓷锥由直径为 $D1$ 和 $D2$ 的两个环形裂纹与径向裂纹交叉形成,不同陶瓷厚度下的陶瓷锥锥角大小如图 11 所示。随着陶瓷面板厚度的增加,陶瓷锥锥角随之增大,陶瓷面板厚度每增加 1 mm,陶瓷锥的锥角增大约 11.67%。

不同陶瓷面板厚度下 UHMWPE 纤维背板的破坏形态如图 12 所示。从图中可以看出,8 mm SiC 陶瓷/UHMWPE 纤维复合靶板被穿透,10 mm、12 mm、15 mm SiC 陶瓷/UHMWPE 纤维复合靶板均未穿透,且随着陶瓷厚度的增加,纤维背板的整体变形越来越小。这表明弹芯在侵入陶瓷板时被消耗的动能随着陶瓷厚度的增加而增加,弹芯残余的动能与陶瓷破碎后流动碎片的动能随着陶瓷厚度的增加而减小。

为了研究陶瓷碎片的累积质量分布规律,采用筛网孔径分级堆叠的方法对靶板碎片进行筛分,筛网采用 6 种筛径:12.5 mm、8 mm、4 mm、2 mm、1 mm

和 0.5 mm,得到不同粒径范围内的陶瓷碎片,如图 13 所示。从图中可以看出,粒径小于 4 mm 的陶瓷碎片呈小颗粒状或粉末状,这部分碎片由着靶点中心粉碎区产生。碎片粒径大于 4 mm 的陶瓷碎片大多呈锥形结构,这部分碎片由破碎区产生。碎片粒径大于 8 mm 的陶瓷碎片为环形裂纹与径向裂纹由着靶点扩展到边缘产生的大碎块。

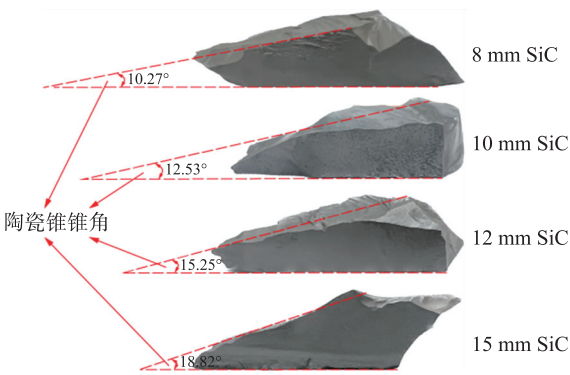


图 11 不同陶瓷厚度下的陶瓷锥锥角
Fig. 11 Ceramic cone angle under different ceramic thickness

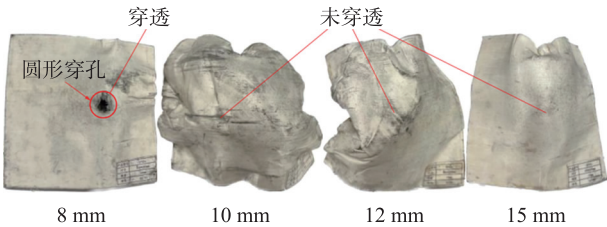


图 12 不同陶瓷面板厚度下 PE 纤维背板的破坏形态
Fig. 12 Failure morphology of PE fiber back plate with different ceramic panel thickness

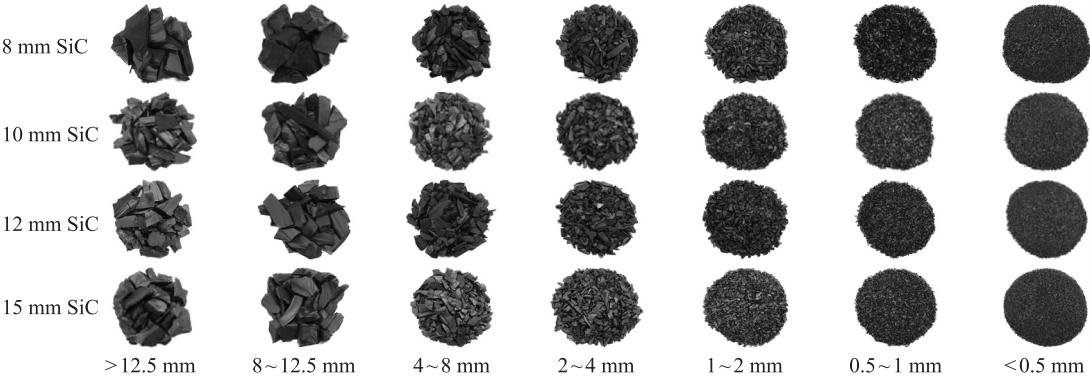


图 13 不同粒径范围内的陶瓷碎片
Fig. 13 Ceramic fragments with different particle sizes

对筛分出的碎片称重,得到不同陶瓷面板厚度下陶瓷碎片的质量分布如图 14 所示,从图中可以看

出,随着陶瓷面板厚度的增加,陶瓷破碎后各个粒径范围内的碎片质量均呈上升趋势。

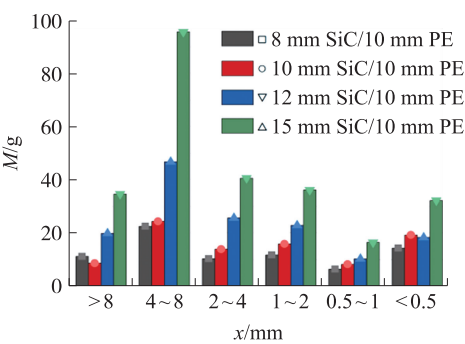


图 14 陶瓷碎片质量分布

Fig. 14 Mass distribution of ceramic fragments

不同陶瓷面板厚度下陶瓷碎片的累积质量分布如图 15 所示。可以看出,对陶瓷碎片直径对数值和对陶瓷碎片累计质量对数值之间存在线性关系,这表明陶瓷碎片的累积质量分布也符合 Rosin-Rammler 分布模型。

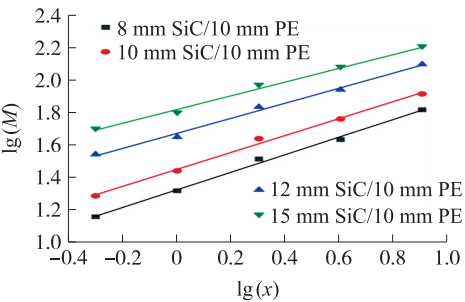


图 15 陶瓷碎片累计质量分布

Fig. 15 Cumulative mass distribution of ceramic fragments

不同陶瓷面板厚度下陶瓷碎片的幂指数系数与平均特征尺寸的计算结果如图 16 所示。

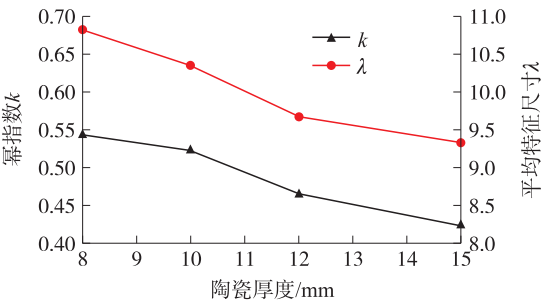


图 16 不同陶瓷厚度下陶瓷的幂指数 k 与平均特征尺寸 λ
Fig. 16 Power exponent k and average characteristic size λ of ceramics with different ceramic thickness

随着陶瓷面板厚度的增加,陶瓷碎片的平均特征尺寸值减小,平均特征尺寸越小则陶瓷面板的破碎程度越高,陶瓷的粉碎区面积增大,破碎区的面积减少。同时陶瓷面板在抗侵彻过程中消耗掉弹芯的

动能越多,可以有效地增强陶瓷的抗弹性能,平均特征尺寸可以表征陶瓷面板整体的破碎程度。

3 结论

本文开展了 12.7 mm 穿燃弹垂直侵彻不同厚度陶瓷/纤维复合靶板试验,收集并分析了试验后的弹芯与陶瓷碎片,得到以下结论:

①弹芯侵彻陶瓷/纤维复合靶板时发生破碎、断裂和侵蚀,弹芯头部的破碎呈粉碎状,弹芯身部的破碎呈不规则碎片状,而弹芯尾部质量最大且基本无破碎。对弹芯身部断裂面进行扫描电子显微镜观测分析发现,弹芯在侵彻陶瓷时的失效模式不仅有拉应力作用下的脆性断裂,也存在局部的塑性变形。

②陶瓷的破碎形态主要为环形裂纹、径向裂纹和 2 种裂纹相互交错形成的含有锥角的类锥形陶瓷锥,同时破碎的陶瓷面板可分为粉碎区和破碎区,其中粉碎区是由弹芯撞击到陶瓷的瞬间产生的高压应力波破碎陶瓷产生,而破碎区主要由应力波在陶瓷内的传播引起。陶瓷面板厚度每增加 1 mm,粉碎区面积增大约 11.1%,陶瓷锥锥角增大约 11.67%。

③弹芯和陶瓷碎片的累积质量分布均满足 Rosin-Rammler 幂率分布模型,且随着陶瓷面板厚度的增大,幂指数系数和平均特征尺寸均呈下降趋势。弹芯和陶瓷碎片的平均特征尺寸可以用来反映弹芯和陶瓷面板整体的破碎程度,且平均特征尺寸越小,则弹芯和陶瓷面板整体的破碎程度越大,陶瓷/纤维复合靶板的防护性能越好。

参考文献

[1] KHAN M K, IQBAL M A. Failure and fragmentation of ceramic target with varying geometric configuration under ballistic impact[J]. Ceramics International, 2022, 48(18) : 26147-26167.

[2] ZHANG R, TIAN J, WU Y, et al. An investigation on shape memory behaviors of UHMWPE-based nanocomposites reinforced by graphene nanoplatelets[J]. Polymer Testing, 2021, 99: 107217.

[3] CHENG B, DUAN H, CHEN S, et al. Effects of thermal aging on the blend phase morphology and tribological performance of PI/UHMWPE blend composites[J]. Wear, 2021, 477: 203840.

[4] ZAKERI M, MANSOORI H, SADEGHIAN M, et al. Impact response of fiber metal laminates based on aluminum and UHMWPE composite: Numerical simulation [J]. Thin-Walled Structures, 2022, 172: 108796.

[5] JENA P K, RAMANJENEYULU K, KUMAR K S, et al. Ballistic studies on layered structures [J]. Materials and Design, 2009,

- 30(6):1922-1929.
- [6] ZHANG Y, DONG H, LIANG K, et al. Impact simulation and ballistic analysis of B4C composite armour based on target plate tests[J]. *Ceramics International*, 2021, 47: 10035-10049.
- [7] FEJDYŚ M, KOSIA K, KUCHARSKA-JASTRZĄBEK A, et al. Influence of ceramic properties on the ballistic performance of the hybrid ceramic-multi-layered UHMWPE composite armour[J]. *Journal of the Australian Ceramic Society*, 2020, 57(1): 149-161.
- [8] 李永鹏, 徐豫新, 张健, 等. SiC 陶瓷/UHMWPE 纤维复合结构抗 12.7 mm 穿甲燃烧弹试验与仿真[J]. *兵工学报*, 2022, 43(6): 1355-1364.
- LI Yongpeng, XU Yuxin, ZHANG Jian, et al. Test and simulation of SiC ceramic/UHMWPE fiber composite structure against 12.7 mm armor piercing incendiary projectile[J]. *Acta Armamentarii*, 2022, 43(6): 1355-1364. (in Chinese)
- [9] 司鹏, 白帆, 刘彦, 等. 不同厚度比陶瓷/金属复合装甲抗弹性能[J]. *兵工学报*, 2022, 43(9): 2318-2329.
- SI Peng, BAI Fan, LIU Yan, et al. Anti-elastic properties of ceramic/metal composite armor with different thickness ratios[J]. *Acta Armamentarii*, 2022, 43(9): 2318-2329. (in Chinese)
- [10] WOODWARD R L, GOOCH W A, O'DONNELL R G, et al. A study of fragmentation in the ballistic impact of ceramics[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1994, 15(5): 605-618.
- [11] 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.
- [12] BENEDETTO G, MATTEIS P, SCAVINO G, et al. Impact behavior and ballistic efficiency of armor-piercing projectiles with tool steel cores[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2018, 115: 10-18.
- [13] SAVIO S, 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.
- [14] GRADY D E. Fragment size distributions from the dynamic fragmentation of brittle solids[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2008, 35(12): 1557-1562.
- [15] SAVIO S, 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.
- [16] 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.
- [17] 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*, 2005, 34(2): 277-302.
- [18] 余毅磊, 王晓东, 任文科, 等. 陶瓷/金属复合靶受 12.7 mm 穿甲燃烧弹侵彻时弹靶破碎特征[J]. *兵工学报*, 2022, 43(9): 2307-2317.
- YU Yilei, WANG Xiaodong, REN Wenke, et al. The fragmentation characteristics of ceramic/metal composite target under the penetration of 12.7 mm armor-piercing incendiary projectile[J]. *Acta Armamentarii*, 2022, 43(9): 2307-2317. (in Chinese)
- [19] 王晓东, 余毅磊, 蒋招绣, 等. 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[J]. *爆炸与冲击*, 2022, 42(2): 83-91.
- WANG Xiaodong, YU Yilei, JIANG Zhaoxiu, et al. Study on the fracture failure characteristics of projectile core when penetrating ceramic/aluminum alloy composite target under different impact velocities[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2022, 42(2): 83-91. (in Chinese)
- [20] DJAMARANI K M, CLARK I M. Characterization of particle size based on fine and coarse fractions[J]. *Powder Technology*, 1997, 93(2): 101-108.
- [21] 洪晓文, 史安顺, 秦超, 等. 爆轰驱动陶瓷面背板碎裂行为研究[J]. *兵器装备工程学报*, 2024, 45(2): 188-196.
- HONG Xiaowen, SHI Anshun, QING Chao, et al. Study on fragmentation behavior of ceramic backplane driven by detonation[J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2024, 45(2): 188-196. (in Chinese)
- [22] WANG C, 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: 2900-2911.
- [23] GONZÁLEZ-TELLO P, CAMACHO F, VICARIA J M, et al. A modified Nukiyama-Tanasawa distribution function and a Rosin-Rammler model for the particle-size-distribution analysis[J]. *Powder Technology*, 2007, 186(3): 278-281.
- [24] 侯海量, 朱锡, 李伟. 轻型陶瓷/金属复合装甲抗弹机理研究[J]. *兵工学报*, 2013, 34(1): 105-114.
- HOU Hailiang, ZHU Xi, LI Wei. Study on ballistic mechanism of lightweight ceramic/metal composite armor[J]. *Acta Armamentarii*, 2013, 34(1): 105-114. (in Chinese)
- [25] SHOCKEY D A, MARCHAND A H, SKAGGS S R, et al. Failure phenomenology of confined ceramic targets and impacting rods[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1990, 9(3): 263-275.
- [26] 余毅磊, 蒋招绣, 王晓东, 等. 背板对氧化铝陶瓷薄板断裂锥形态的影响[J]. *北京理工大学学报*, 2021, 41(7): 713-720.
- YU Yilei, JIANG Zhaoxiu, WANG Xiaodong, et al. The influence of back plate on the fracture cone shape of alumina ceramic thin plate[J]. *Journal of Beijing Institute of Technology*, 2021, 41(7): 713-720. (in Chinese)
- [27] MEYER H, ABELN T, BINGERT S R, et al. Crack behavior of ballistically impacted ceramic[J]. *AIP Conference Proceedings*, 2000, 505(1): 1109-1112.