

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2025.05.017

超高分子量聚乙烯纤维增强陶瓷复合材料抗弹性能

王小伟^{1,2}, 翟文^{1,2}, 张文婷^{1,2}, 宗昊¹, 董彬^{1,2}, 何金迎^{1,2}, 付思伟^{1,2}, 魏汝斌^{1,2},
李英建^{1,2}, 马伟超¹, 吴炘铭^{1,2}, 刘文龙^{1,2}

(1. 山东非金属材料研究所, 济南 250031; 2. 山东三达科技发展有限公司, 济南 250031)

摘要: 采用53式7.62 mm穿甲燃烧弹分别对高温处理后的整板SiC和B₄C防弹插板进行3次连续有效射击, 分析插板凹陷深度、陶瓷面板毁伤情况及断口形貌显微结构, 对防弹插板的耐损伤特性进行研究, 并分析陶瓷力学性能与插板抗多发弹性能的关系; 随后采用超高分子量聚乙烯薄膜材料和超高分子量聚乙烯纤维UD预浸料制备防弹插板进行靶试试验, 分析了插板靶试结果、防弹机理。研究结果表明, 使用超高分子量聚乙烯纤维UD预浸料的插板抗穿透性能优于薄膜材料, 超高分子量聚乙烯薄膜材料在吸收冲击能量方面更有效。SiC和B₄C与超高分子量聚乙烯纤维复合防弹插板在高温条件下均能抵御住3发53式7.62 mm穿甲燃烧弹的连续打击, 具有良好的抗多发弹打击性能。此外, SiC防弹插板的抗多发弹性能稳定性优于B₄C防弹插板, B₄C防弹插板抗单发弹性能优于SiC防弹插板。陶瓷的强度和硬度有利于提高陶瓷的抗弹性能, 而其韧性在防弹插板的抗多发弹性能方面发挥了重要作用。

关键词: 超高分子量聚乙烯; 复合材料; 抗弹性能; 损伤特性; 力学性能

中图分类号: TJ04 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2025)05-0121-06

Ballistic performance of PE-UHMW fiber reinforced ceramics composite

WANG Xiaowei^{1,2}, ZHAI Wen^{1,2}, ZHANG Wenting^{1,2}, ZONG Hao¹, DONG Bin^{1,2}, HE Jinying^{1,2}, FU Siwei^{1,2}, WEI Rubin^{1,2},
LI Yingjian^{1,2}, MA Weichao¹, WU Xinming^{1,2}, LIU Wenlong^{1,2}

(1. Shandong Non-metallic Materials Institute, Jinan 250031, China;

2. Shandong Sanda Scientific and Technological Development Co., Ltd., Jinan 250031, China)

Abstract : The type 53 7.62 mm armor-piercing incendiary bomb was used to shoot SiC and B₄C bulletproof inserts after high temperature treatment for three consecutive times. The depression depth of the inserts, the damage of the ceramic panels and the fracture morphology and microstructure were analyzed. The damage resistance characteristics of the bulletproof inserts were studied, and the relationship between the mechanical properties of the ceramics and the anti-multiple bomb performance of the inserts was analyzed. Then the target test of bulletproof insert plate prepared by ultra high molecular weight polyethylene (PE-UHMW) film material and PE-UHMW fiber UD prepreg was carried out. The test results and the mechanism of bulletproof insert plate were analyzed. The results show that the penetration resistance of the insert plate using PE-UHMW fiber UD prepreg is better than that of the thin film material, and the thin film material is more effective in absorbing the impact energy. SiC and B₄C with PE-UHMW fiber bulletproof inserts can withstand the continuous attack of three 53-type 7.62 mm armor-piercing incendiary bombs under high temperature conditions, showing good anti-multiple bomb attack performance. In addition, the anti-multiple bomb stability of SiC bulletproof insert is better than that of B₄C bulletproof insert, and the anti-single bomb property of B₄C bulletproof insert is better than that of SiC bulletproof insert. The strength and hardness of ceramics are beneficial for improving the anti-elastic properties of ceramics, and the toughness of ceramics plays an important role in the anti-multiple bomb properties of bulletproof inserts.

Keywords : ultra high molecular weight polyethylene ; composite ; ballistic performance ; damage characteristics ; mechanical property

基金项目: 济南市“新高校20条”资助项目自主培养创新团队计划(2021GXRC022)

通信作者: 王小伟, 硕士, 主要研究方向为人体防护材料

收稿日期: 2025-03-07

引用格式: 王小伟, 翟文, 张文婷, 等. 超高分子量聚乙烯纤维增强陶瓷复合材料抗弹性能[J]. 工程塑料应用, 2025, 53(5): 121-126.

WANG Xiaowei, ZHAI Wen, ZHANG Wenting, et al. Ballistic performance of PE-UHMW fiber reinforced ceramics composite[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(5): 121-126.

超高分子量聚乙烯(PE-UHMW)纤维密度小,分子结构高度取向,具有高强度、高模量的特点,是目前投入使用的综合防弹性能最为优异的纤维材料,被广泛应用于防弹衣等防弹装备中,PE-UHMW纤维的开发加速了防弹材料向轻量化、舒适化和高防护性能的方向发展,极大地拓展了防弹材料的空间,使得防弹材料的防弹性能不断增强。PE-UHMW纤维成为制备防弹复合材料的极佳材料^[1-4]。

碳化硅(SiC)、碳化硼(B₄C)陶瓷由于高强度、高硬度、质量轻等优点,被广泛应用在人体防护领域,逐渐代替传统金属装甲材料^[5-7]。随着陶瓷制造技术的提升,更加符合人体工程学设计的整板陶瓷也实现了产业化,但陶瓷脆性大、韧性低,在子弹高速冲击下整板陶瓷容易破碎,导致防弹插板抗多发弹能力不足^[8-9]。而PE-UHMW纤维层压板能提高防弹插板的抗多发弹能力,因此研究PE-UHMW增强复合材料具有重要的军事意义。

崔凤单等^[10]比较了陶瓷/PE-UHMW复合结构在5.8 mm钢芯弹连续打击下的损伤特性,发现B₄C陶瓷/PE-UHMW纤维复合结构表现出更优的综合性能。朱德举等^[11]设计以SiC陶瓷和PE-UHMW纤维复合材料拼接结构的新型柔性防弹复合材料,实现防弹插板高防护性和柔性化;Wang等^[12]使用PE-UHMW纤维和陶瓷材料设计了一种轻质复合装甲,该结构在单次射击中不会产生大面积破坏,具有抗多发弹打击的潜力。Medvedovski等^[13]研究了陶瓷的防弹性能与微观结构和力学性能的关系。Liu等^[14]研究了陶瓷硬度和韧性对抗弹性能的重要性。

PE-UHMW纤维层压板在高温下抵抗变形的能力发生明显下降,从而影响抗弹性能^[15],结合战场使用环境,笔者以SiC和B₄C陶瓷为面板,PE-UHMW层压板为背板,制备整板陶瓷/聚乙烯复合防弹插板,经过高温处理(55℃恒温处理3 h)后,能够抵御3发53式7.62 mm穿甲燃烧弹的连续打击,分析了PE-UHMW薄膜材料及其单向布(UD)预浸料制备的防弹插板的抗弹性能,通过分析模塑胶泥凹陷深度、陶瓷面板毁伤情况及陶瓷断口显微形貌对防弹插板的损伤特性进行研究。此外,对陶瓷密度、弯曲强度、硬度、断裂韧性进行测试,分析陶瓷力学性能与插板抗多发弹性能的关系。

1 实验部分

1.1 主要原材料

PE-UHMW薄膜材料:厚度0.1 mm, SDH90E,

山东三达科技发展有限公司;

PE-UHMW纤维UD预浸料:DRH132-2A,树脂为水性聚氨酯,固含量10%,江苏东润安全科技有限公司;

SiC和B₄C陶瓷:面密度26 kg/m², B₄C陶瓷牌号为BC20, SiC陶瓷牌号为SC-N,扬州三山工业陶瓷有限公司;

热熔胶膜:EPT,上海浩魁材料科技有限公司。

1.2 主要仪器及设备

固体密度计:XF-3000E,山东安泰智能科技有限公司;

万能材料试验机;INSTRON-5566,美国英斯特朗公司;

硬度计:HMV-G,日本株式会社岛津制作所;

弹道系统:山东非金属材料研究所;

扫描电子显微镜(SEM):QUANTA2000,美国FEI公司;

热压罐:R2020-0059,山东中航泰达复合材料有限公司;

X射线CT检测系统:MG452,德国依科视朗国际有限公司。

1.3 试样制备

PE-UHMW层压板分别使用845 g PE-UHMW薄膜材料和PE-UHMW纤维UD预浸料层压而成,铺层方向为0°与90°正交方式,层压过程中,压制压力为18 MPa,压制温度为128℃,以确保层压板的致密性和界面结合强度。制备出的层压板形状和尺寸与陶瓷相匹配,以实现层压板与陶瓷的有效复合。将面密度同为26 kg/m²的SiC和B₄C陶瓷与面密度同为10 kg/m²的PE-UHMW层压板使用热熔胶膜进行复合,在热压罐中负压成型得到防弹插板,尺寸为325 mm×260 mm。

1.4 测试与表征

采用电子密度计按照GB/T 5163-2006测量陶瓷的体密度;

采用万能材料试验机按照GB/T 6569-2006测试陶瓷弯曲强度;

采用维氏硬度计按照GB/T 16534-2009测试维氏硬度;

采用万能材料试验机按照GB/T 23806-2009测试陶瓷断裂韧性。

插板靶试验过程如下。

以模塑胶泥作为鉴证靶,将在烘箱中55℃恒温处理3 h的防弹插板置于鉴证靶前,采用7.62 mm弹

道枪发射 53 式 7.62 mm 穿甲燃烧弹,射击速度(878 ± 10) m/s,每发弹着点间距(100 ± 10)mm,靶试试验装置示意图如图 1 所示,测试步骤按照美国 NIJ 0101.06 防弹衣测试标准的要求,射击完成后使用数显深度尺测量每个弹着点的凹陷深度,每个测量点量 3 次,取 3 次的算术平均值作为该点的凹陷深度。

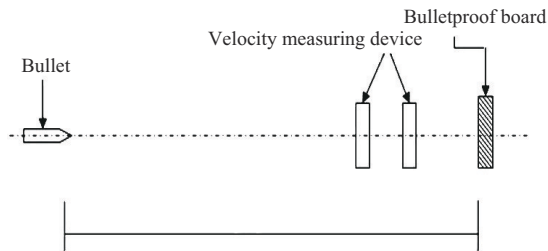


图1 靶试试验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of ballistic test system

靶试试验结束后,采用 CT 对防弹插板内部损伤情况进行无损检测,收集弹击后磨削碎片,使用 SEM 对两种陶瓷的断口微观形貌进行观察,最后对插板进行拆解分析损伤情况。

2 结果与讨论

2.1 不同陶瓷材料抗弹性能影响研究

陶瓷在插板中的主要作用是破坏和侵蚀弹体,陶瓷的强度、硬度和断裂韧性是决定其防弹性能的三个重要力学性能指标。陶瓷的高韧性在提高防弹插板的抗多发弹性能方面发挥重要作用,而其高硬度、高强度有利于提高防弹插板的抗单发弹性能。表 1 为两种陶瓷的力学性能。根据表 1 的数据, SiC 陶瓷虽然硬度和弯曲强度分别低于 B_4C 陶瓷 23.92% 和 15.76%,但其断裂韧性却高出 19.89%。

表1 两种陶瓷的力学性能

Tab. 1 Mechanical properties of two kinds of ceramics

Types of ceramics	Density/ ($g \cdot cm^{-3}$)	Flexure strength/MPa	Hardness/ MPa	Fracture toughness/ ($MPa \cdot m^{1/2}$)
SiC	2.9	390	225.5	9.4
B_4C	2.5	463	296.4	7.84

图 2 为 SiC 和 B_4C 两种陶瓷防弹插板经子弹冲击后的 SEM 断口形貌,从图 2 可以看出 SiC 陶瓷断裂面形貌出现明显的凹凸不平起伏,可以清楚地看到明显的晶界,以沿晶断裂为主,陶瓷的裂纹扩展有较多的韧性断裂。相比之下, B_4C 陶瓷的 SEM 断口形貌则显得平整光滑,缺乏明显的层次和晶界, B_4C 陶瓷的断裂主要是穿晶断裂,即断裂路径穿过晶体内部,而不是沿着晶界。这种断裂方式通常

与脆性断裂相关联,断裂过程迅速,因此断口比较平滑。

综上所述, SiC 陶瓷和 B_4C 陶瓷在经受弹丸冲击后的 SEM 断口形貌反映了它们不同的断裂机制。 SiC 陶瓷的断裂包含了大量韧性断裂,而 B_4C 陶瓷则主要表现为脆性断裂。

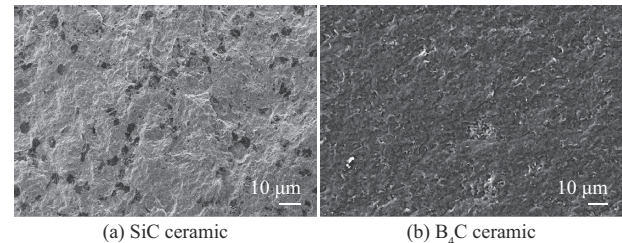


图2 SiC 和 B_4C 陶瓷断口 SEM 照片

Fig. 2 SEM photos of fracture surface of SiC and B_4C ceramic

2.2 PE-UHMW 薄膜材料与纤维 UD 预浸料抗弹性能研究

在制备防弹插板时,背板支撑材料分别采用 PE-UHMW 薄膜材料和 PE-UHMW 纤维 UD 预浸料,陶瓷选用 SiC 陶瓷。在靶试实验中,采用了 53 式 7.62 mm 穿甲燃烧弹对防弹插板进行射击测试。每块防弹插板都经受了 3 发弹药的射击,以评估其防弹性能。测试结构分为两组,1#~3#防弹插板使用薄膜材料,4#~6#防弹插板使用纤维 UD 预浸料,编号及结构见表 2。

表2 两种防弹插板的结构

Tab. 2 Structure of both ballistic insert plates

Number	Types of ceramics/ Areal density/($kg \cdot m^{-2}$)	Types of backplane/ Areal density/($kg \cdot m^{-2}$)
1#	SiC/26	Film/10
2#	SiC/26	Film/10
3#	SiC/26	Film/10
4#	SiC/26	UD/10
5#	SiC/26	UD/10
6#	SiC/26	UD/10

靶试实验数据见表 3,对比试验数据显示,使用 PE-UHMW 薄膜材料的插板有两块出现了穿透现象,而使用 PE-UHMW 纤维 UD 预浸料的插板则没有任何穿透。这表明在相同条件下, PE-UHMW 纤维 UD 预浸料的抗穿透性能优于薄膜材料。对比未穿透的试验数据显示,使用薄膜材料的插板凹陷整体上比使用纤维 UD 预浸料的插板小。这意味着 PE-UHMW 薄膜材料在吸收冲击能量方面更有效,但这并不意味着它具有更好的抗弹性能,因为在实际情况下,插板是否有穿透会更受关注,而不仅仅是凹陷大小。

表3 两种防弹插板的实弹靶试试验结果

Number	Shot order	Bullet velocity/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	Wearface signature depth/mm
1 [#]	1	879.3	24.2
	2	877.7	27.3
	3	878.1	30.9
2 [#]	1	878.5	25.3
	2	879.3	26.7
	3	879.9	Penetrate
3 [#]	1	878.8	Penetrate
	2	877.4	28.1
	3	878.6	29.3
4 [#]	1	878.2	29.6
	2	878.7	32.8
	3	879.1	34.7
5 [#]	1	878.5	29.2
	2	877.8	29.6
	3	878.4	32.3
6 [#]	1	878.2	25.4
	2	878.3	29.2
	3	879.4	33.2

在使用相同厚度的抗弹陶瓷的情况下,插板的背板材料对其整体的抗弹性能产生了显著影响。PE-UHMW薄膜材料和PE-UHMW纤维UD预浸料虽然都是高强度材料,但是它们的微观结构和力学性能有所不同,这导致了二者在相同冲击条件下的不同表现。PE-UHMW薄膜材料的含胶量低于纤维UD预浸料,弹性模量大^[16],这通常会导致材料的柔软度降低,当这种薄膜材料经过压制成层压板时,由于较高的弹性模量,层压板会表现出更好的刚性,虽然能更好地抵抗弯曲和变形,使得层压板能够有效地支撑陶瓷,但是弹性模量的增加同时也意味着材料变得更加脆性,减少了其吸收分散冲击能量的能力。因此,当层压板受到强烈的外部冲击时,由于缺乏足够的韧性,材料更容易发生穿透损伤。

综上所述,尽管PE-UHMW薄膜材料在某些方面表现出较好的性能,但在防弹插板的应用中,PE-UHMW纤维UD预浸料由于具有更优异的抗穿透性能,是更合适的抗弹材料。

2.3 抗多发弹打击损伤特性分析

根据上述试验分析结果,使用PE-UHMW纤维UD预浸料制备层压板,分别与SiC和B₄C陶瓷复合制备防弹插板。表4给出了两种防弹插板的实弹靶试试验结果,3次射击的位置、距离、顺序大致相同,弹丸速度均在误差范围内,根据NIJ 0101.06人体防

弹衣中的规定,两种防弹插板的鉴证靶凹陷深度均未超过标准规定的44 mm, SiC和B₄C防弹插板在高温条件下均达到防弹要求,对防多发弹打击有较好的效果。比较发现两种防弹插板的鉴证靶凹陷深度表现出不同的规律, SiC防弹插板在经受连续射击时,每次射击造成的凹陷深度变化不大,表明其在多次打击下保持了较为稳定的防护性能。这是因为SiC材料具有较好的能量吸收和耗散能力,即使在受到损伤后,也能维持整体结构的完整性,从而保证了后续射击的防护效果。相比之下, B₄C防弹插板在连续射击中,每次射击后的凹陷深度逐渐增大,说明前一次射击造成的损伤对后续射击的防护能力有负面影响。这是由于B₄C材料虽然硬度高,但在吸收冲击能量时不如SiC,导致损伤累积,影响了材料的整体防护效果。

尽管SiC防弹插板第一发弹的凹陷深度大于B₄C防弹插板,但到了第三发时, SiC的凹陷深度反而小于B₄C。这表明SiC防弹插板在抵抗多发弹击的能力上更为稳定,而B₄C防弹插板虽然单发弹的防护效果更佳,但在连续射击中出现防护性能下降。

表4 两种防弹插板的实弹靶试试验结果

Types of ceramics	Shot order	Bullet velocity/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	Wearface signature depth/mm
SiC	1	879.5	30.2
	2	875.7	32.8
	3	871.1	30.7
B ₄ C	1	876.0	22.2
	2	871.1	32.3
	3	871.5	36.1

两种防弹插板弹击后迎弹面及背弹面损伤结果对比图如图3所示,由图3可以看出在相同面密度、相同实验条件下,尽管两种防弹插板在3发弹的连续打击下都没有被穿透,且外观上保持了整体的完整性,验证了PE-UHMW层压板的强支撑作用,但SiC插板和B₄C插板在迎弹面的损伤情况存在显著差异。SiC插板的弹着点弹孔面积相对较小,这意味着陶瓷面板受到的损伤更轻微。相反, B₄C插板的各弹着点中间区域的碎裂较为严重,损伤覆盖面较大。

图4为两种插板弹击后插板陶瓷的CT无损检测图 and 实际破损图,可以看出SiC和B₄C两种防弹插板在弹击后的内部损伤特征有显著差异。SiC防弹插板的损伤主要集中在弹着点附近,形成了以弹

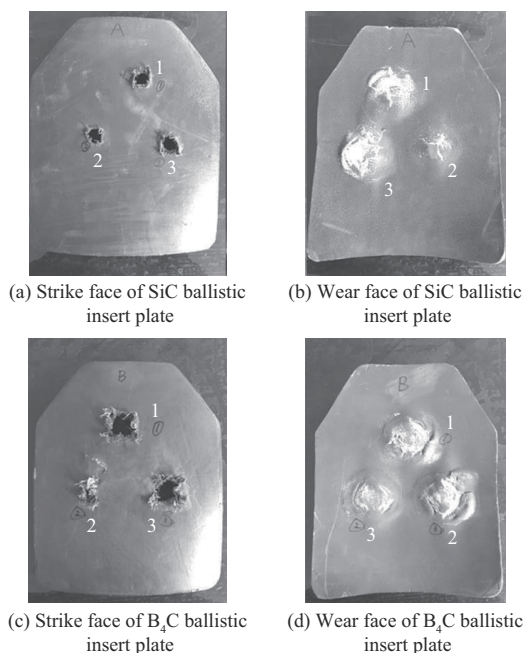


图3 SiC和 B_4C 防弹插板迎面及背面损伤情况
Fig. 3 Damage conditions of strike and wear faces of SiC and B_4C bulletproof insert plate

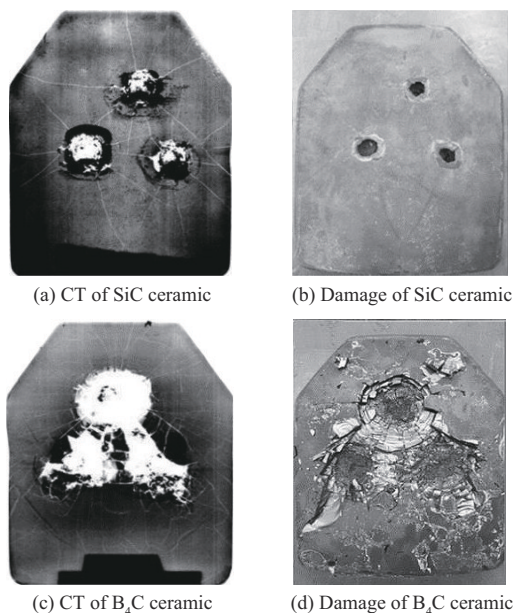


图4 弹击后SiC和 B_4C 陶瓷的CT无损检测和实际破损情况
Fig. 4 CT non-destructive testing and actual damage conditions of SiC and B_4C ceramics after hit

着点为中心的辐射状裂纹,这些裂纹主要沿径向方向发展,同时伴有少量环向裂纹。这种裂纹分布表明SiC陶瓷在受到弹丸冲击时能够有效地吸收和分散能量,且前次射击的损伤对后续区域的影响较小,陶瓷整体结构仍然保持相对完整。

相比之下, B_4C 防弹插板的损伤范围更广,不仅在弹着点处形成了大量的径向和环向裂纹,而且这

些裂纹之间相互连接,导致弹着点中间区域出现了较为严重的碎裂现象。这表明 B_4C 陶瓷在吸收冲击能量时,裂纹更容易扩散和连接,从而导致陶瓷结构的局部失效。

SiC和 B_4C 的不同抗弹机理与它们各自的力学性能密切相关。SiC陶瓷具有相对较高的韧性,能够在裂纹形成后消耗更多能量,从而减少裂纹的进一步扩展。 B_4C 陶瓷虽然硬度高,但韧性相对较低,更容易在受到冲击时产生脆性破坏,导致裂纹迅速扩展和连接。

2.4 抗弹机理分析

陶瓷作为迎弹面的主要作用是使弹丸碎裂和消耗弹丸冲击动能^[5,17],SiC陶瓷因其高韧性和耐磨性,在受到弹丸撞击时,能够通过弹丸的质量损失和动能耗散来减少陶瓷的碎裂和裂纹扩展。因此,即使在多次弹击后,SiC陶瓷的损伤相对较小,弹击之间的相互影响较低,显示出较好的稳定性。

另一方面, B_4C 陶瓷的能量耗散主要依赖于碎裂和裂纹的快速扩展,这导致了在每次弹击后,后续弹击对陶瓷的损伤程度有所减少,因为裂纹已经在之前的冲击中大量扩展,每次冲击传递到背板的能量更多,导致背板凹陷的增大,并且这种效应呈现出逐渐递增的趋势。

图5为两种插板弹着点陶瓷磨削碎片。从图5中观察到的两种插板弹着点陶瓷磨削碎片的状态也证实了这一点。SiC陶瓷产生的碎片以细小的粉末状为主,这表明在侵彻过程中,SiC陶瓷主要通过磨削作用耗散能量。而 B_4C 陶瓷产生的碎片则以较细的颗粒状为主,这说明 B_4C 陶瓷在受到冲击时主要通过碎裂来耗散能量。

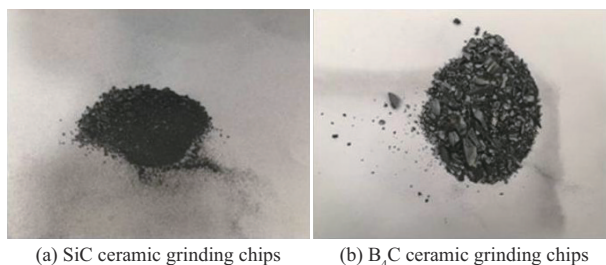


图5 两种插板弹着点陶瓷磨削碎片

Fig. 5 Ceramic grinding chips at impact point of two kinds of insert plates

3 结论

对陶瓷断口显微结构和力学性能进行测试分析,对比了PE-UHMW薄膜材料和纤维UD预浸料对抗弹性能的影响,对两种典型的陶瓷/PE-UHMW

增强复合防弹插板进行靶试试验,通过分析靶板凹陷深度,研究抗多发弹打击毁伤情况,分析了抗弹机理,主要结论如下。

(1)陶瓷的高韧性在提高防弹插板的抗多发弹性能方面发挥重要作用,而高硬度、高强度有利于提高防弹插板的抗单发弹性能。

(2) PE-UHMW 薄膜材料在吸收冲击能量方面更有效,PE-UHMW 纤维 UD 预浸料的抗穿透性能优于薄膜材料,纤维 UD 预浸料由于其更优异的抗穿透性能,更合适作为抗弹材料。

(3) SiC 和 B₄C 与 PE-UHMW 纤维的复合防弹插板在高温条件下均能抵御住 3 发 53 式 7.62 mm 穿甲燃烧弹的连续打击,两者都具有较好的抗多发弹打击性能。

(4) SiC 防弹插板的抗多发弹性能的稳定性优于 B₄C 防弹插板,B₄C 防弹插板抗单发弹性能优于 SiC 防弹插板。

参考文献

- [1] 王绪财,王伟,陈春晓,等. 超高分子量聚乙烯复合材料抗多发弹性能试验研究[J]. 中国测试,2018,44(10):145-150.
WANG Xucai, WANG Wei, CHEN Chunxiao, et al. Experimental study on the multi-hit performance of UHMWPE composite material[J]. China Measurement & Test, 2018, 44(10):145-150.
- [2] 程时雨,李忠盛,郭峰,等. 碳化硼陶瓷插板抗多发弹性能研究[J]. 兵器装备工程学报,2022,43(8):146-151.
CHENG Shiyu, LI Zhongsheng, GUO Feng, et al. Study on multiple elastic resistance of boron carbide ceramic insert[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2022, 43(8): 146-151.
- [3] 王然,张燕,刘永佳,等. 单兵防弹插板防弹材料效应匹配及结构设计研究[J]. 中国新技术新产品,2022(14):25-28.
WANG Ran, ZHANG Yan, LIU Yongjia, et al. Study on effect matching and structural design of bulletproof material for individual bulletproof inserts[J]. New Technology & New Products of China, 2022(14): 25-28.
- [4] 肖文莹,郭万涛,李想. 超高分子量聚乙烯纤维增强防弹复合材料研究进展[J]. 材料开发与应用,2019,34(2):131-138.
XIAO Wenying, GUO Wantao, LI Xiang. The progress of UHMWPE fiber-reinforced ballistic composites[J]. Development and Application of Materials, 2019, 34(2):131-138.
- [5] 郝焕. 防弹陶瓷材料的研究现状及发展趋势[J]. 中国陶瓷,2023,59(12):11-15.
HAO Huan. Research status and development trend of bulletproof ceramic materials[J]. China Ceramics, 2023, 59(12):11-15.
- [6] ONG C W, BOEY C W, HIXSON R S, et al. Advanced layered personnel armor[J]. International Journal of Impact Engineering, 2011, 38(5):369-383.
- [7] CLAYTON J D. Penetration resistance of armor ceramics: Dimensional analysis and property correlations[J]. International Journal of Impact Engineering, 2015, 85:124-131.
- [8] 韩奇,杨阳,刘靖宇,等. 止裂层对陶瓷复合防弹插板冲击损伤行为研究[J]. 包装工程,2023,44(21):1-10.
HAN Qi, YANG Yang, LIU Jingyu, et al. Thin membrane covering on impact damage development in ceramic composite bulletproof plate[J]. Packaging Engineering, 2023, 44(21):1-10.
- [9] 沈志伟,李伟萍,黄献聪,等. SiC、B₄C 及层状 SiC/BN 复合结构与防弹性能关系[J]. 硅酸盐学报,2020,48(6):841-848.
SHEN Zhiwei, LI Weiping, HUANG Xiancong, et al. Relationship of ballistic performance between SiC, B₄C and laminated composite structure of SiC/BN ceramics[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2020, 48(6):841-848.
- [10] 崔凤单,马天,李伟萍,等. SiC 和 B₄C 防弹插板抗多发弹打击损伤特性研究[J]. 无机材料学报,2017,32(9):967-972.
CUI Fengdan, MA Tian, LI Weiping, et al. Damage characteristics of SiC and B₄C ballistic insert plates subjected to multi-hit[J]. Journal of Inorganic Materials, 2017, 32(9):967-972.
- [11] 朱德举,汤兴. 基于犰狳外壳仿生的 SiC-超高分子量聚乙烯柔性防护板的试验测试和有限元模拟[J]. 复合材料学报,2020,37(10):2 561-2 571.
ZHU Deju, TANG Xing. Experimental testing and finite element simulation of SiC-ultrahigh molecular weight polyethylene flexible protective plate inspired by armadillo shell[J]. Acta Materialiae Compositae Sinica, 2020, 37(10):2 561-2 571.
- [12] WANG Q, CHEN Z H, CHEN Z F. Design and characteristics of hybrid composite armor subjected to projectile impact[J]. Materials & Design (1980-2015), 2013, 46:634-639.
- [13] MEDVEDOVSKI E. Ballistic performance of armour ceramics: Influence of design and structure. part1[J]. Ceramics International, 2010, 36(7):2 103-2 115.
- [14] LIU C Y, TUAN W H, CHEN S C. Ballistic performance of liquid-phase sintered silicon carbide[J]. Ceramics International, 2013, 39(7):8 253-8 259.
- [15] 聂嘉兴,程时雨,李忠盛,等. 高温环境对防弹插板抗弹性能影响分析[J]. 兵器装备工程学报,2024,45(2):94-99.
NIE Jiaxing, CHENG Shiyu, LI Zhongsheng, et al. Analysis of the influence of ballistic insert plate on its bulletproof performance under high temperature environment[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2024, 45(2):94-99.
- [16] 付杰,李伟萍,黄献聪,等. 新型超高分子量聚乙烯膜材料防弹性能及机理[J]. 兵工学报,2021,42(11):2 453-2 464.
FU Jie, LI Weiping, HUANG Xiancong, et al. Bullet-proof performance and mechanism of new ultra-high molecular weight polyethylene film[J]. Acta Armamentarii, 2021, 42(11):2 453-2 464.
- [17] 段婷婷,张岩,郭雁,等. 碳化硼陶瓷复合结构抗弹性能[J]. 工程塑料应用,2024,52(11):136-140, 153.
DUAN Tingting, ZHANG Yan, GUO Yan, et al. Anti ballistic performance of boron carbide ceramic composite structure[J]. Engineering Plastics Application, 2024, 52(11):136-140, 153.