

引用格式:王亚进,王陶,王良模,等.陶瓷/芳纶纤维复合靶板防弹性能研究及结构改进[J].北京化工大学学报(自然科学版),2020,47(2):74-80.

WANG YaJin, WANG Tao, WANG LiangMo, et al. Ballistic performance and structural improvement of an aramid fiber/ceramic composite target[J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology (Natural Science), 2020,47(2):74-80.

陶瓷/芳纶纤维复合靶板防弹性能研究及结构改进

王亚进¹ 王陶^{1*} 王良模¹ 沙小伟² 黄健² 陈威²

(1.南京理工大学机械工程学院,南京 210094;2.苏州江南航天机电工业有限公司,苏州 215300)

摘要:为了提高靶板防弹性能,提出一种由陶瓷和芳纶纤维复合材料构成的防弹结构。对陶瓷及芳纶纤维防弹性能有限元仿真分析的结果表明:陶瓷的弹孔面积大于纤维,陶瓷内部的形状比较粗糙而纤维则比较平滑,陶瓷吸能主要是通过自身的破碎和断裂及应力波的传递实现的,而纤维吸能则主要是通过自身的拉伸和延展将弹丸的动能转换为自身的弹性势能和断裂能。此外,基于陶瓷和芳纶纤维的抗侵略原理,进行了复合靶板的结构设计,并利用NSGA-II算法对层间材料的厚度进行了优化,优化后复合靶板子弹的剩余速度降低了185 m/s,靶板的面密度降低了5.4 kg/m²,综合防弹性能得到了明显提高,为后续进行新型轻质防弹复合装甲的结构设计提供指导思路。

关键词:防弹结构;有限元仿真;复合材料;抗侵略原理;优化

中图分类号: TJ03 **DOI:** 10.13543/j.bhxbzr.2020.02.011

引言

现代战争中,防弹装甲材料是军事力量的核心技术之一。而随着科学技术的发展,对防护装甲的要求越来越高,因此,研发轻质、高强度、具有良好防弹性能的新型材料迫在眉睫。

目前已有一些针对防弹新型材料展开的研究工作。安振涛等^[1]设计了一种阵列式陶瓷颗粒破片防护层的新型防弹材料,并利用仿真分析的方法验证了该材料具备良好的防弹性能,研究结果可以为阵列式陶瓷颗粒破片防护层的优化设计提供参考。高华等^[2]利用数值模拟的方法分析了纺织复合材料和陶瓷的低速冲击性能,剖析了陶瓷/复合材料装甲板受弹头冲击时的防弹机理,为复合材料在复合装甲上的应用及其防弹能力预测提供了理论分析的

依据。Hu等^[3]研究了碳化硅陶瓷层单元结构的差异对于靶板防弹性能的影响,提出了陶瓷钢板的结构,分析了圆柱形、六角形以及长方形单元结构阻碍子弹侵略过程的差异,为复合靶板设计中碳化硅单元结构的选择提供了理论参考。

目前广泛用于防弹的三大陶瓷材料是氧化铝、碳化硅和碳化硼,相比于金属防弹板而言,陶瓷的特点是密度小、硬度高和模量高。考虑到氧化铝和碳化硅的密度指标、力学特性和防弹性能都比较优越,而对于密度较小且防弹性能优越的碳化硼陶瓷,由于加工技术的限制,不适合大规模使用^[4]。而纤维作为装甲材料,能够大幅度地减小装甲的质量,并且由于其断裂安全性好、可设计性强、具有良好的制作工艺性,因此被广泛地应用于各种防弹装甲上^[5]。

目前,很多学者都对陶瓷和复合材料的失效机理、制备工艺及影响因素进行了研究^[6],也有针对陶瓷和复合材料构成的复合靶板的防弹性能的研究工作^[7],但很少有关于如何通过优化靶板结构来提高其防弹性能的研究。本文在课题组前期与苏州某公司合作项目成果的基础上,基于芳纶纤维和陶瓷良好的防弹性能,提出了一种由芳纶纤维与陶瓷复合材料构成的防弹结构,结合试验设计并利用NSGA-II算法优化了该结构,最后通过仿真模拟验

收稿日期:2019-09-27

基金项目:突发事件紧急医学救援保障成套化装备关键技术研究与应用示范项目(2017YFC0806405);江苏省自然科学基金青年基金(BK20190462)

第一作者:男,1995年生,硕士生

*通信联系人

E-mail: Wangtao-me@njust.edu.cn

证了优化结果的可靠性。

1 陶瓷/芳纶纤维子弹侵彻靶板有限元模型的建立

1.1 陶瓷/芳纶纤维材料

陶瓷选用碳化硅(SiC)和氧化铝(Al_2O_3)陶瓷材料作为研究对象,纤维材料选用大分子链高度取向结晶的芳纶纤维。

1.2 几何模型

防弹标准参考警用防暴车的B级防护标准,其使用的子弹为56式7.62 mm普通弹,子弹由外到内分别是覆铜披甲、铅芯及钢芯,子弹长度为32.3 mm,质量约为8.096 g。防弹靶板分别为6 mm厚的碳化硅和15 mm厚的芳纶纤维,横向尺寸为45 mm×45 mm。对子弹和靶板分别建立几何模型,如图1(a)所示。

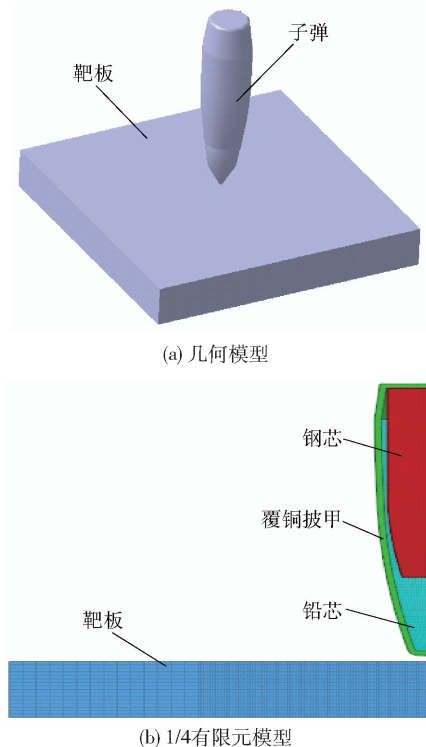


图1 子弹侵彻靶板模型

Fig.1 Bullet penetration target model

1.3 有限元模型的建立

1.3.1 单元选择和网格划分

将建立好的几何模型导入Hypermesh软件中进行网格划分,选用Lagrangian算法,采用4节点四面体单元和8节点六面体单元划分网格。需要说明的是,由于子弹垂直作用在靶板上,为了减少计算时

间,有限元模型采用1/4的几何模型,如图1(b)所示。

1.3.2 材料参数

为了更好地描述子弹的模型,选择Johnson_Cook材料模型与Gruneisen状态方程相结合的方式,其中Johnson_Cook本构模型关系为

$$\sigma = (a + b\varepsilon_p^n)(1 + c \ln \dot{\varepsilon}^*)(1 - T^{*m}) \quad (1)$$

式中: $a + b\varepsilon_p^n$ 、 $1 + c \ln \dot{\varepsilon}^*$ 、 $1 - T^{*m}$ 分别描述了材料的硬化效应、应变率效应和温度效应; a 、 b 、 n 、 c 、 m 为经验参数,可以根据动、静压应力-应变关系进行拟合得到^[8]; $\dot{\varepsilon}^* = \dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0$ 为归一化应变率, $\dot{\varepsilon}$ 为有效塑性应变率, $\dot{\varepsilon}_0$ 为参考塑性应变率; $T^{*m} = (T - T_r)/(T_m - T_r)$ 为归一化温度, T_m 、 T_r 分别为材料的熔点温度与参考温度。

陶瓷等脆性材料的材料模型采用由Johnson和Holmquist提出的JH-2模型,该模型中未损伤陶瓷和已损伤陶瓷的强度由一组随压力、应变率和损伤演化的经验关系确定^[9]。模型中未损伤陶瓷的强度为

$$\sigma_i^* = A(P^* + P_T^*)^N(1 + C \ln \dot{\varepsilon}^*) \quad (2)$$

损伤陶瓷强度为

$$\sigma_f^* = B(P^*)^M(1 + C \ln \dot{\varepsilon}^*) \quad (3)$$

其中: σ_i^* 为材料损伤因子为0时的归一化等效应力, σ_f^* 为材料损伤因子为1时的归一化等效应力; A 为无损伤强度系数, B 为损伤强度系数, C 为与应变率相关的强度系数, M 为损伤强度指数, N 为无损伤强度指数; P^* 为归一化静水压力; P_T^* 为归一化最大拉伸流体静压力^[10]。

芳纶纤维是由多个单层的纤维材料经过粘接形成的层压板结构,材料模型选择的是composite_failure模型,该模型可以准确地描述纤维复合材料在受冲击时的响应过程^[11]。

本文仿真选用的SiC和 Al_2O_3 陶瓷的材料性能参数是由项目前期进行的相关试验得到的,如表1所示。表中, ρ 为材料密度; G 为剪切模量;EPSI为准静态阈值应变率; T 为最大拉伸压力强度;SFMAX为最大归一化断裂强度;HEL为Hugoniot弹性极限;PHEL为Hugoniot弹性极限处的压力分量; β 为弹性势能损失转化为静水能的比例。

芳纶的材料性能参数同样也是由试验得到,如表2所示。表中, E_A 为纵向弹性模量; E_B 为横向弹性模量; E_C 为法向弹性模量;PRBA为法向泊松比

表 1 不同陶瓷 JH-2 模型参数
Table 1 Different parameters of JH-2 ceramic

陶瓷	$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	G/GPa	A	B	C	M	N	EPSI	T/GPa	SFMAX	HEL/GPa	PHEL/GPa	β
SiC ^[11]	3 163	183	0.96	0.35	0.0	1.0	0.65	1.0	0.37	0.8	14.567	5.9	1.0
Al ₂ O ₃ ^[9]	3 890	152	0.88	0.28	0.007	0.6	0.64	1.0	0.262	0	6.57	3.512	1.0

表 2 芳纶材料模型参数
Table 2 Parameters of ARAMID material

纤维	$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	E_A/MPa	E_B/MPa	E_C/MPa	PRBA	PRCA	PRCB	G_{AB}/MPa	G_{BC}/MPa	G_{CA}/MPa
芳纶纤维	1 043	16 100	16 100	16 100	0.02	0.125	0.125	280	280	280

量;PRCA 为横向泊松比;PRCB 为纵向泊松比; G_{AB} 为纵向剪切模量; G_{BC} 为法向剪切模量; G_{CA} 为横向剪切模量。

1.3.3 边界条件设置

由于有限元模型采用的是 1/4 模型,因此对靶板的对称面定义对称约束,而靶板边缘则采用固定约束方式。

子弹和靶板之间采用单面侵蚀接触 CONTACT_ERODING_SINGLE_SURFACE。此类单面接触的算法对于处理接触区域不能提前预知的自接触或者大变形问题是非常有效的,并且所有的外表面都在搜索范围内,因此不需要定义接触面与目标面。侵蚀接触用于保证删除外部的失效单元后,剩下内部的单元还可以保持接触^[12]。

2 陶瓷及芳纶纤维防弹性能分析

对子弹侵彻靶板的模型进行前处理并检查无误后提交 LS-DYNA 计算,对仿真结果进行分析。

2.1 陶瓷和纤维破碎形态分析

SiC 陶瓷和芳纶纤维受到子弹冲击后的破碎形态如图 2 所示,可以看到,在子弹的冲击作用下陶瓷产生的碎块比纤维的大很多,在子弹侵彻过后,陶瓷靶板上形成的弹孔形状较大,弹孔内部的形状比较粗糙,在靶板的表面处尤其是背面又因冲击产生了特别明显的陶瓷锥飞溅。而纤维主要发生的是剪切破坏,整体的变形较小,内部的形状比较平滑,子弹穿透纤维板材后,没有明显的分层和脱层现象,整个靶板仍然是一个整体。

2.2 陶瓷抗侵彻性能分析

从图 3(a)中可以看到,在侵彻陶瓷靶板时子弹的速度衰减过程非常明显,尤其是 B 至 C 段,该阶段对应着子弹与陶瓷靶板接触的 25 μs ,子弹的速度

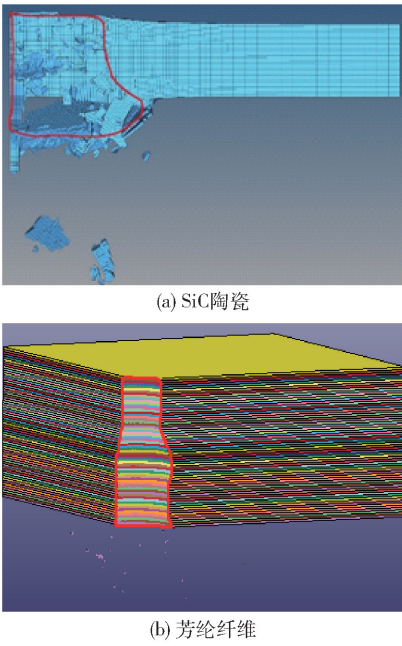


图 2 SiC 陶瓷和芳纶纤维受子弹侵彻后的破碎形态
Fig.2 Ceramic and fiber fracture patterns

从 700 m/s 降至 92 m/s,说明陶瓷靶板会极大地影响子弹对靶板的冲击作用,从而降低子弹的速度。从陶瓷的破碎形式(图 2(a))可以看出,陶瓷吸收能量以粉碎和断裂为主,子弹在侵彻的过程中将动能转化为陶瓷的粉碎能。结合陶瓷材料的动态力学性能,根据陶瓷面板的破损情况,将陶瓷的吸能机制分为粉碎吸能和应力波吸能。

由于陶瓷本身的硬度和抗压强度都高于子弹材料的属性,因此在侵彻过程中陶瓷可以通过侵彻、钝化、破碎弹体的材料以及自身的破碎等方式来吸收弹体的动能,这个过程中弹体和陶瓷破碎所消耗的弹体动能称为冲击粉碎能。弹体和靶板的粉碎耗能除了包含冲击粉碎能还有摩擦粉碎能。当弹体与靶板接触形成粉碎区域后,接触区的陶瓷由于受到周

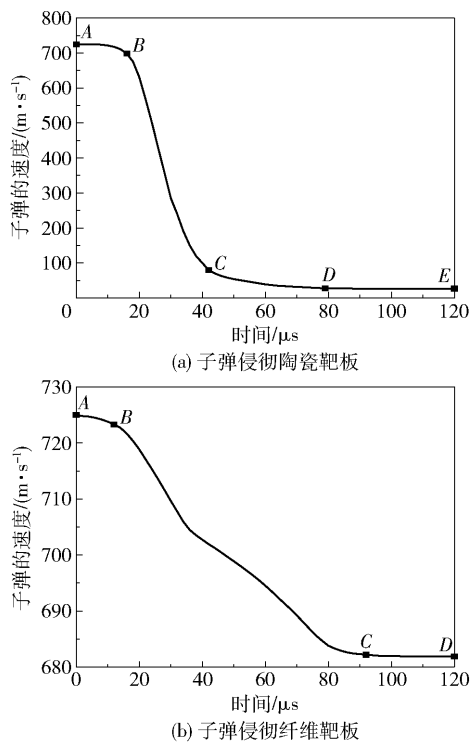


图 3 子弹侵彻不同靶板的速度-时间曲线

Fig. 3 Velocity-time curves of bullet penetration into different targets

围陶瓷的挤压及束缚作用,导致弹体和陶瓷之间存在巨大的摩擦力,致使陶瓷在接下来的侵彻过程中继续破碎,产生摩擦粉碎能,造成粉碎断裂耗能、摩擦热耗能、体积膨胀耗能等多种形式的混合耗能机制,即为摩擦粉碎能。

当陶瓷靶板受到子弹侵彻时,接触面的压力迅速增长,并迅速向靶板背部的四周传播压缩应力波,当应力波大于陶瓷材料的断裂应力时,接触界面周围的陶瓷材料将碎裂,产生陶瓷碎片。陶瓷碎片在冲击波的作用下,进行横向和反冲击方向的流动,这些碎片和粉末对子弹进一步的侵蚀,减缓并阻止子弹的侵彻过程。

2.3 纤维抗侵彻性能分析

对于芳纶纤维靶板而言,从图 3(b)中可以看出,子弹的剩余速度仍然比较大,侵彻过程主要发生在 B 至 C 段,这段时间对应着子弹与芳纶纤维靶板的接触阶段。从图中可以看出,15 ~ 86 μs 时间段内子弹的速度从 724 m/s 降至 682 m/s,速度曲线的下降趋势较为平缓。由此可知,这个阶段子弹的加速度比较小,这一现象是因为芳纶纤维是由许多层纤维通过树脂胶粘而成,并且其材料属性也决定了其无法有效抵御子弹的冲击。

当子弹侵彻纤维面板时,纤维因为高速冲击发生拉伸变形,并以此形式减缓子弹的侵彻作用,当弹体进一步侵彻导致纤维的变形量超过其断裂延伸率时,纤维开始断裂。在整个过程中,子弹的动能先转化为纤维的弹性势能,最后转化为纤维的断裂能。

3 陶瓷/芳纶纤维复合靶板优化设计

基于第 2 节的研究结果,提出采用高强度纤维和陶瓷共同构成复合材料靶板,与传统的金属材料制成的防弹靶板相比,这是一种更为有效的轻型防护装甲。陶瓷的硬度虽然很高,但是它的塑性较差、断裂强度低,而纤维的模量很高,具有非常高的韧性,有足够的刚度作为背板支撑陶瓷材料,以陶瓷作为防弹面板、纤维作为防弹背板的结构能充分发挥两种结构的优势,可以提升靶板的防弹性能。

将 3 mm 厚的 SiC 陶瓷、5 mm 厚的 Al₂O₃ 与 15 mm 厚的芳纶纤维组合构成防弹复合靶板,如图 4 所示。

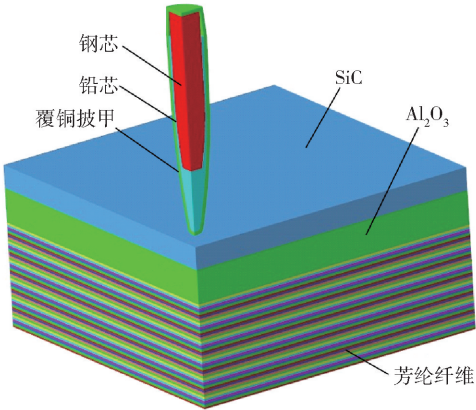


图 4 子弹侵彻复合靶板

Fig. 4 Bullet penetration into a composite target

靶板的面密度为 44.62 kg/m²,当子弹以 725 m/s 的速度侵彻靶板时,剩余速度为 131 m/s,侵彻深度等于靶板厚度,为 23 mm。从防弹性能角度出发,这样的结构显然是不能满足要求的,因此需要对复合靶板的结构进行优化。

对复合靶板结构进行优化,首先要考虑的是子弹侵彻靶板后的剩余速度,其次是靶板的质量,最后是子弹对靶板的侵彻深度。而复合靶板的厚度越大,子弹侵彻靶板后的剩余速度越小,靶板的质量越大,子弹对靶板的侵彻深度越小,即靶板的厚度对以上指标的作用效果不一致,因此考虑采用 NSGA-II 算法进行优化^[13]。

3.1 数学模型

3.1.1 设计变量

设计变量为 SiC 陶瓷层、Al₂O₃ 陶瓷层和芳纶纤维层的厚度 T_1 、 T_2 、 T_3 。

确定了设计变量后,利用 DOE 设计方法中的最优拉丁超立方设计确定 20 组样本点,最优拉丁超立方设计可按照式(4)进行采样。

$$x_j^{(i)} = \frac{\pi_j^{(i)} + U_j^{(i)}}{k} \tag{4}$$

式中, $1 \leq i \leq k, 1 \leq j \leq k, i$ 为第 i 次试验, j 为第 j 个变量, k 为样本点数量; U 是 0 到 1 之间的随机数, π 是 $0, 1, \dots, k-1$ 的独立随机排列,共有 $k!$ 种排列。部分样本点如表 3 所示。

表 3 最优拉丁超立方设计确定的样本点

Table 3 Sample points determined by optimal Latin hypercube design

编号	T_1/mm	T_2/mm	T_3/mm	$v_{50}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	h/mm	$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-2})$
#1	3.84	4.05	11.32	144	19.27	43.82
#2	4.47	3.84	14.47	-36	19.8	49.33
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
#9	3.63	4.37	5	330	13.0	35.48
#10	5	3.74	6.58	111	15.32	39.57
#11	4.58	4.89	12.37	-11	2.53	50.82
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
#18	3.32	3.53	5.53	362	12.38	31.97
#19	3.42	3.42	13.42	307	20.26	42.91
#20	3.74	3.21	9.21	399	16.16	37.21

3.1.2 优化模型

在确定了优化目标及设计变量之后,可以建立多目标优化数学模型为

$$\begin{aligned} \min f &= w_1 v_{50} + w_2 h + w_3 \rho_s \\ \text{s. t. } T_1 &\in [3 \text{ mm}, 5 \text{ mm}] \\ T_2 &\in [3 \text{ mm}, 5 \text{ mm}] \\ T_3 &\in [5 \text{ mm}, 15 \text{ mm}] \end{aligned} \tag{5}$$

式中, v_{50} 为子弹侵彻靶板后的剩余速度, m/s ; h 为子弹对靶板的侵彻深度, mm ; ρ_s 为靶板的面密度, kg/m^2 ; w_1 、 w_2 和 w_3 为权重系数,由于最优解的选择原则是以子弹的残余速度为主要选择标准,在满足条件的情况下,寻找质量最轻的最优解,即目标函数中子弹残余速度最小的情况下要求靶板的面密度尽可能小,因此 w_1 、 w_2 和 w_3 取值为 0.6、0.1、0.3。

3.2 计算结果分析

3.2.1 建立响应面模型

利用 20 组样本点,运用最小二乘原理建立三阶响应表面模型,即有关 v_{50} 、 h 及 ρ_s 的三阶多项式。通过样本点得到目标变量的响应面模型后,需要对响应面的可靠性进行验证。可以通过方差分析中的决定系数 R^2 和调整的决定系数来对响应面的可靠性进行验证。 R^2 的值越接近 1,证明响应面的拟合效果越好。在本次 20 组样本点中,所建响应面模型的决定系数 R^2 分别为 0.932、0.912、0.995,调整的决定系数为 0.911、0.878 和 0.967。由此可知,该模型对目标函数达到了高度拟合,使用此模型进行优化分析是可行的。

3.2.2 优化结果分析

依据拟合出的高精度多项式响应面代理模型进行优化设计,选用 NSGA-II 算法进行优化计算,设置初始的种群个体数为 12,进化繁殖 100 代,其他使用默认值,参考相应的约束函数对设计变量的取值范围进行约束,同时满足相应的目标函数,得出 Pareto 最优解:SiC 厚度为 4.54 mm, Al₂O₃ 厚度为 4.50 mm,芳纶纤维厚度为 7.17 mm。根据最优解建立相应的模型进行仿真计算,并与近似模型响应值对比(表 4),可以看出剩余速度和侵彻深度与近似模型结果相对误差为 -3.5% 和 -2.6%,证明了响应面代理模型的准确性。

表 4 最优点仿真值与近似模型响应值对比

Table 4 Comparisons between the optimal simulation value and the response value of the approximate model

$v_{50}^a/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	h^a/mm	$v_{50}^b/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	h^b/mm	相对误差/%	
				v_{50}	h
-54	4.60	-56	4.72	-3.5	-2.6

a—模型仿真值;b—近似模型值。

表 5 是靶板结构优化前后的对比结果,可以看到,优化后的复合靶板在子弹侵彻后的剩余速度为 -54 m/s,侵彻深度为 4.60 mm,面密度为 39.22 kg/m²。与优化之前相比,子弹的剩余速度降低了 185 m/s,面密度降低了 5.4 kg/m²,侵彻深度降低了 18.4 mm。图 5 是复合靶板优化前后子弹的速度-时间曲线图, $B \sim C_1$ 段和 $B \sim C_2$ 段对应着子弹侵彻两种靶板中陶瓷的过程,通过对比可以看出,子弹侵彻两种靶板的陶瓷层所消耗的时间几乎没有变化,而子弹侵彻原始靶板时加速度的绝对值为

$1.825 \times 10^7 \text{ m/s}^2$, 小于侵彻优化之后的靶板的加速度 ($2.95 \times 10^7 \text{ m/s}^2$); $C_1 \sim D_1$ 和 $C_2 \sim D_2$ 对应着子弹侵彻两种靶板中芳纶纤维的过程, 可以看到, 优化之后, 侵彻芳纶纤维消耗的时间减少了, 而侵彻过程中的加速度也由 $1.875 \times 10^6 \text{ m/s}^2$ 提升至 $2.5 \times 10^6 \text{ m/s}^2$ 。综合而言, 可以得出, 复合靶板的综合防弹性能得到了明显提高。

表 5 优化前后结果对比

对比模型	T_1/mm	T_2/mm	T_3/mm	$v_{50}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	h/mm	$\rho_S/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-2})$
原始模型	3	5	15	131	23	44.62
优化模型	4.54	4.50	7.17	-54	4.60	39.22
改变量	+1.54	-0.50	-7.83	-185	-18.4	-5.4

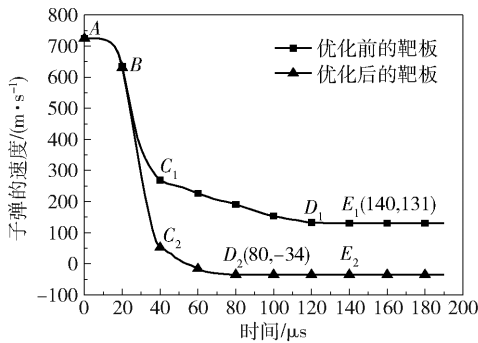


图 5 靶板优化前后子弹的速度-时间曲线对比
Fig. 5 Comparison of bullets velocity-time curves before and after optimization

4 结论

(1)陶瓷和纤维在高速子弹冲击作用下的破碎形态不同,具体表现为:陶瓷受到冲击后形成的弹孔面积大于纤维的弹孔面积;陶瓷受到冲击后内部的形状比较粗糙,而纤维的内部则比较平滑。

(2)陶瓷和纤维在高速子弹冲击作用下的失效形式和吸能方式不同,具体表现为:陶瓷在弹丸冲击下的吸能主要通过自身的破碎和断裂及应力波的传递实现,将子弹的动能转化为自身的破碎能;而纤维主要通过自身的拉伸和延展将弹丸的动能转化为自身的弹性势能和断裂能。

(3)利用最优拉丁超立方的试验设计方法建立侵彻模型的三阶响应面模型,并利用 NSGA-II 算法对响应面模型进行优化,得出的最优解为:SiC 的厚度 4.54 mm, Al₂O₃ 的厚度 4.50 mm, 芳纶纤维的厚度 7.17 mm。建立了相应的仿真模型进行验证,误

差为 -3.5% 和 -2.6%。优化后的复合靶板在子弹侵彻后的剩余速度为 -54 m/s, 侵彻深度为 4.60 mm, 面密度为 39.22 kg/m²。与优化之前相比, 剩余速度降低了 185 m/s, 面密度降低了 5.4 kg/m², 表明靶板的综合防弹性能得到了明显提高。

参考文献:

[1] 安振涛, 甄建伟. 阵列式陶瓷颗粒破片防护层防弹性能仿真研究[J]. 弹箭与制导学报, 2011, 31(2): 89-98.
AN Z T, ZHEN J W. The numerical simulation study of bullet-proof performance of array ceramic grains bullet resistant material [J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2011, 31(2): 89-98. (in Chinese)

[2] 高华, 熊超, 殷军辉. 纤维增强复合材料防弹装甲抗侵彻性能研究[J]. 飞航导弹, 2018(2): 91-95.
GAO H, XIONG C, YIN J H. Study on the anti-penetration performance of fiber reinforced composite bulletproof armor [J]. Aerodynamic Missile Journal, 2018(2): 91-95. (in Chinese)

[3] HU D, ZHANG Y, SHEN Z, et al. Investigation on the ballistic behavior of mosaic SiC/UHMWPE composite armor systems [J]. Ceramics International, 2017, 43(13): 10368-10376.

[4] 孙非, 曲一, 徐诚. 超高分子量聚乙烯材料软质防弹衣抗弹性能老化衰减规律研究[J]. 兵工学报, 2018, 39(11): 2249-2255.
SUN F, QU Y, XU C. Research on attenuation law of elastic resistance of UHMWPE material soft bulletproof vest [J]. Acta Armamentarii, 2018, 39(11): 2249-2255. (in Chinese)

[5] 周庆, 何业茂, 刘婷. 层间混杂复合材料装甲板防弹性能及其防弹机制[J]. 复合材料学报, 2019, 36(4): 837-847.
ZHOU Q, HE Y M, LIU T. Bulletproof performance and bullet mechanism of interlaminar hybrid composite armor plate [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2019, 36(4): 837-847. (in Chinese)

[6] 郭锐, 周昊, 刘荣忠, 等. 陶瓷棒填充点阵金属夹层结构的制备及抗侵彻实验[J]. 复合材料学报, 2016, 33(4): 921-928.
GUO R, ZHOU H, LIU R Z, et al. Preparation and anti-penetration experiment of metal lattice truss cored sandwich structures filled with ceramic rods [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2016, 33(4): 921-928. (in Chinese)

- nese)
- [7] FORRESTAL M J, LONGCOPE D B. Target strength of ceramic materials for high-velocity penetration [J]. *Journal of Applied Physics*, 67(8): 3669–3672.
- [8] 李伟, 李晶, 叶勇. UHMWPE 纤维层合板防弹性能数值分析研究 [J]. *兵器材料科学与工程*, 2012, 35(4): 84–87.
- LI W, LI J, YE Y. Numerical analysis on ballistic performance of UHMWPE fiber laminate [J]. *Ordnance Material Science and Engineering*, 2012, 35(4): 84–87. (in Chinese)
- [9] 李金柱, 张连生, 黄风雷. EFP 侵彻陶瓷/金属复合靶实验运动网格法模拟 [J]. *北京理工大学学报*, 2012, 32(10): 1004–1013.
- LI J Z, ZHANG L S, HUANG F L. Simulation of EFP penetrating into ceramic/steel composite target using moving mesh method [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2012, 32(10): 1004–1013. (in Chinese)
- [10] SWOLFS Y, GEBOES Y, GORBATIKH L, et al. The importance of translaminal fracture toughness for the penetration impact behaviour of woven carbon/glass hybrid composites [J]. *Composites Part A Applied Science & Manufacturing*, 2017, 103: 1–3.
- [11] 李大永, 罗应兵, 彭颖红, 等. 实体壳单元及其在动力显式有限元方法中的应用 [J]. *上海交通大学学报*, 2006, 40(10): 1663–1666.
- LI D Y, LUO Y B, PENG Y H, et al. The solid shell element and its application in the dynamic explicit finite element method [J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2006, 40(10): 1663–1666. (in Chinese)
- [12] SUBRAMANIAM K, DHAR MALINGAM S, FENG N L, et al. The effects of stacking configuration on the response of tensile and quasi-static penetration to woven kenaf/glass hybrid composite metal laminate [J]. *Polymer Composites*, 2017, 40(2): 568–577.
- [13] SHOKRIEH M M, JAVADPOUR G H. Penetration analysis of a projectile in ceramic composite armor [J]. *Composite Structures*, 2008, 82(2): 269–276.

Ballistic performance and structural improvement of an aramid fiber/ceramic composite target

WANG YaJin¹ WANG Tao^{1*} WANG LiangMo¹ SHA XiaoWei² HUANG Jian² CHEN Wei²

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

2. Suzhou Jiangnan Aerospace Mechanical and Electrical Industry Co., Ltd., Suzhou 215300, China)

Abstract: A bulletproof structure composed of a ceramic and aramid fiber composite is proposed as a way of improving the ballistic performance of a target. Finite element simulation analysis of the ballistic performance of the ceramic and aramid fiber shows that the bullet hole area in the ceramic is larger than that in the fiber and the surface of the ceramic inside the impact zone is rough whilst for the fiber it is relatively smooth. Furthermore, energy absorption by the ceramic mainly involves internal fracture and stress waves, while the fiber mainly converts the kinetic energy of the projectile into internal elastic potential energy and fracture energy through stretching and extension. Using the anti-penetration principle of ceramic and aramid fibers, a composite target plate was designed, and the thickness of the interlayer material was optimized by means of the NSGA-II algorithm. The residual speed of the bullet was reduced by 185 m/s when using the optimized composite target, the areal density of the target plate was reduced by 5.4 kg/m², and the comprehensive ballistic performance was significantly improved. This work provides guidelines for the design of new lightweight bulletproof composite armor.

Key words: bulletproof structure; finite element simulation; composites; ballistic principle; optimization