文章编号：1003-1480（2022）04-0016-05

复合防护结构抗破片侵彻性能的研究

王 燕，李梦群，杨淼慧，徐 锦，王佳奇

（中北大学先进制造技术山西省重点实验室，山西 太原，030051）

摘 要：为提高复合柔性结构的抗破片侵彻能力，采用 AUTODYN 中 Euler-Lagarange 算法对不同位置和厚度聚脲材料复合柔性结构的抗破片侵彻效果进行数值模拟，并通过正交试验对复合柔性结构防护性能的影响因素进行了研究。结果表明：聚脲材料在复合柔性结构内侧位置时抗破片侵彻能力最强；抗破片侵彻效果与聚脲材料厚度成正比；复合柔性结构防护性能影响因素的主次顺序为：防爆液体厚度、芳纶纤维层数、聚脲材料位置、聚脲材料厚度。

关键词：复合柔性结构；聚脲材料；爆炸破片；破片侵彻

中图分类号：TJ410.3 **文献标识码：**A **DOI：**10.3969/j.issn.1003-1480.2022.04.004

Study on Anti-fragment Penetration Performance of Composite Protective Structure

WANG Yan，LI Meng-qun，YANG Miao-hui，XU Jin，WANG Jia-qi

(Shanxi Key Laboratory of Advanced Manufacturing Technology, North University of China, Taiyuan, 030051)

Abstract: In order to improve the anti fragment penetration ability of composite flexible structure, the anti penetration effect of composite flexible structure with different position and thickness of polyurea material was numerically simulated by Euler-Lagarange algorithm in AUTODYN, and the influence factors of its protective performance were studied by orthogonal test. The results show that the polyurea material has the strongest anti fragment penetration ability at the inner side of the composite flexible structure, the anti fragment penetration effect is directly proportional to the thickness of polyurea material. The order of factors affecting the protective performance of composite flexible structure from high to low is: thickness of explosion-proof liquid, number of aramid layers, location of polyurea material , thickness of polyurea material.

Key words: Composite flexible structure; Polyurea material; Explosive fragments; Fragment penetration

爆炸事件不仅严重影响社会稳定，而且会使人民群众的生命财产遭受重大损失[1]。由防护材料和特殊防爆液组成的复合柔性防护结构可以吸收爆炸破片的动能，减缓破片速度，从而降低破片对人体的损伤效果，国内外许多学者对此进行了研究。黄阳洋等[2]采用仿真软件对铜质射弹侵彻防护液舱进行模拟，研究剩余速度和侵彻深度的影响。彭佳等[3]采用欧拉算法仿真模型，模拟爆炸破片侵彻圆柱形防护结构的过程。Jian Jin 等[4]通过试验验证了高速破片是舰船多舱防护结构损坏的主要因素。肖文莹[5]采用 LS- DYNA 非线性动态有限元软件理论分析不同迎弹面及不同混杂比的复合材料，研究表明芳纶作为迎弹面混合比为 1/2 时防弹性能最优。Damith Mohotti 等[6]研究了全金属夹套弹对聚脲涂层铝合金板的穿透能力。杨竹林等[7]结合仿生学原理设计了一种新型防护装具，并通过不同规格破片侵彻测试其防护性能。

破片侵彻是爆炸产生伤害的重要因素，常见炸药、手榴弹、恐怖分子自制炸弹通常会产生破片而对一定范围内车辆、建筑物、生物形成伤害，其破坏力和杀伤力十分强大[8]。因此，在防爆技术研究中对于

收稿日期：2022-03-02

作者简介：王燕（1995-），女，硕士研究生，从事爆炸力学、复合材料防爆性能研究。

破片的防护研究十分重要。本文采用聚脲材料、特殊防爆液体和高性能纤维复合材料组成一种可随时拆合、方便运输的新型复合柔性防护结构，通过数值模拟[9]研究了聚脲材料在不同位置和不同厚度时该结构的抗破片侵彻性能，并通过正交试验研究了聚脲材料位置、芳纶层数、防爆液体厚度及聚脲材料厚度对其防护性能的影响。

1　模型建立

图 1 为破片及柔性防护结构示意图。

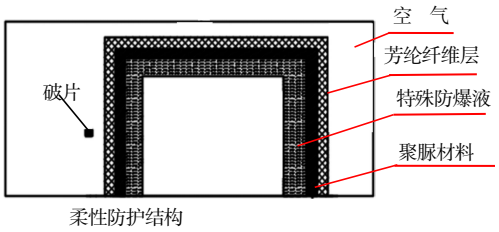


图 1　破片及柔性防护结构示意图

Fig.1　Schematic diagram of the fragment and flexible protective structure

采用 AUTODYN 中 2D-Symmetry 建模，在此过程中空气模型采用 Euler 算法，柔性防护结构采用 Euler-Lagarange 混合模型和 1mm 网格尺寸进行计算。以防御手榴弹的破片侵袭情况为例进行仿真。防御手榴弹主要靠破片动能对一定范围内的生物进行伤害，全弹重量通常为 0.3 ~ 0.6 kg，有效破片重量可达 2 ~ 4 g，破片数量可达 1 000 ~ 2 000 个，破片初始速度可达 1 000 ~ 1 500m·s^{-1}[10]。综上，此处取破片质量 m=0.35 g，初始速度 v_0=1 000m·s^{-1}，向柔性防护结构模型进行侵袭。

在材料库中选取所需材料，其中，芳纶纤维和聚脲材料需单独设置。芳纶纤维密度为 1.29g·cm^{-3}，Gruneisen 系数为 0.35，弹性模量为 110MPa[11]。聚脲材料密度为 1.02g·cm^{-3}，性能与橡胶材料接近，其状态方程模型选用 Hyperelastic 和 M-R 模型：

$$M=C_{10}(I_1-3)+C_{01}(I_2-3) \qquad (1)$$

式（1）中：C_{10} 为 4 500 kPa，C_{01} 为 700 kPa[12]，d=4e−7，在 AUTODYN 界面爆炸破片防护仿真模型设置如图 2 所示。

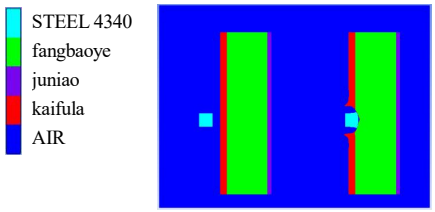


图 2　破片防护仿真模型

Fig.2　Patch chip protection simulation model

2　仿真结果及分析

2.1　不同形式结构的抗破片侵彻能力分析

柔性防护结构由聚脲材料、芳纶纤维和特殊防爆液组合而成，3 种不同形式的复合结构如图 3 所示，研究聚脲材料在不同位置时，复合防护结构的抗爆炸破片侵彻能力。

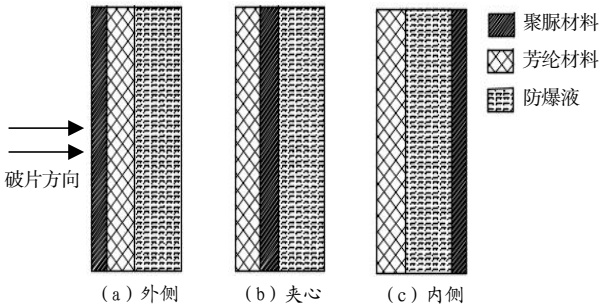


图 3　3 种不同形式的复合结构

Fig. 3　3 different styles of composite structures

为了研究不同复合结构对抗破片的侵彻能力，固定每种材料的厚度，芳纶纤维层数用 F_i（层）表示，防爆液厚度用 Y_i（mm）表示，聚脲材料厚度用 J_i（mm）表示。设计 2 种柔性防护材料模型：柔性防护材料模型 1 为芳纶纤维层数 F_1=25 层、防爆液厚度 Y_1=50mm 和聚脲材料厚度 J_1=2.5mm；柔性防护材料模型 2 为芳纶纤维层数 F_2=25 层、防爆液厚度 Y_2=30mm 和聚脲材料 J_2=3mm。爆炸破片以初始速度 v_0=1 000 m·s^{-1} 分别对这 2 种模型下的 3 种复合结构（聚脲材料在外侧、夹心、内侧）进行侵彻，2 种模型的速度衰减如图 4 所示。

以破片的动能 E_d 来衡量其毁伤效果：

$$E_0=\frac{1}{2}mv_0^{\ 2} \qquad (2)$$

2 类模型破片侵彻计算结果见表 1。

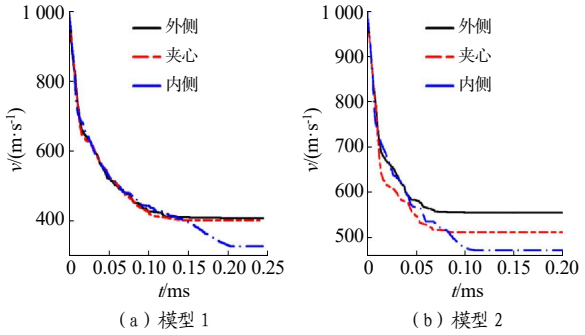


图 4 不同复合结构模型 1 和模型 2 的速度衰减图

Fig.4 Speed attenuation diagram of model 1 and model 2 for different styles of composite structure

表 1 2 类模型破片侵彻计算结果

Tab.1 Calculation results of fragments penetration for two models

	聚脲位置	初始速度/(m·s-1)	破片剩余速度/(m·s-1)	全过程速度损耗比/%	破片剩余动能/J
模型 1	内侧	1 000	325.19	67.48	18.51
	夹心	1 000	399.56	60.04	27.94
	外侧	1 000	406.72	59.33	28.95
模型 2	内侧	1 000	471.54	52.85	38.91
	夹心	1 000	511.51	48.85	45.79
	外侧	1 000	554.08	44.59	53.73

由表 1 可见：在模型 1 中，聚脲材料在内侧时，爆炸破片侵彻后剩余速度为 325.19 m·s^{-1}，剩余动能 18.51 J，相比聚脲材料在外侧动能降低 10.44 J，全过程速度损耗高 8.15%，是该模型下 3 种结构形式中速度及能量降低最多，且剩余动能最小的结构形式；在模型 2 中，聚脲材料在内侧时破片侵彻后剩余速度为 471.54 m·s^{-1}，剩余动能 38.91J，相比在外侧时动能降低 14.82J，全过程速度损耗比高 8.26%，同样是在此模型下 3 种结构形式中速度和能量下降最多，剩余动能最小的情况。研究表明聚脲材料越靠内侧，其对爆炸破片的抗侵彻能力就越强，其位置对爆炸破片防护有重要影响。

2.2 不同厚度聚脲材料的侵彻效果

为研究不同厚度聚脲材料对侵彻效果的影响，选择聚脲材料为内侧，设计模型 3：芳纶纤维层数 F_3=15 层，防爆液厚度 Y_3=30mm，在 1 000m·s^{-1} 的破片初速下，分别对涂覆聚脲材料厚度 J_3 为 1mm、3mm、5mm、7mm 的复合结构进行仿真，得到相同初速下聚脲复合材料抗侵彻能力随聚脲材料厚度变化的规律，如图 5 所示。由图 5 可见，随着聚脲涂层厚度的增加，破片的速度变化趋势基本一致。

不同聚脲材料厚度下的破片侵彻结果如表 2 所示。

表 2 不同聚脲材料厚度下破片侵彻结果

Tab.2 Results of fragments penetration of different polyurea material thickness

工况	内侧聚脲材料厚度/mm	剩余速度/(m·s-1)	全过程降速/(m·s-1)	破片剩余动能/J
1	1	573.27	426.73	57.51
2	3	512.12	487.88	45.90
3	5	409.62	590.38	29.36
4	7	265.23	734.77	12.31

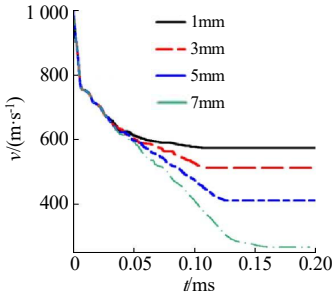


图 5 不同聚脲材料厚度的破片侵彻速度衰减

Fig.5 The decline diagram of fragments velocity of different polyurea material thicknesses

根据表 2 数据得到爆炸破片的速度降低程度和破片剩余动能随聚脲涂层厚度变化的曲线，如图 6 ~ 7 所示。

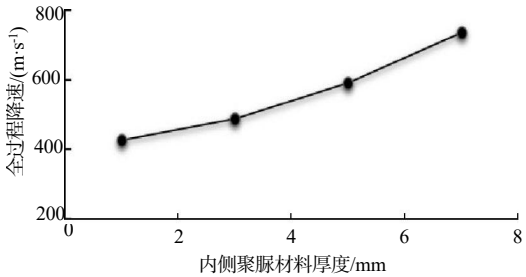


图 6 全程降速——聚脲材料厚度关系

Fig.6 Full speed decline *vs* polyurea material thickness

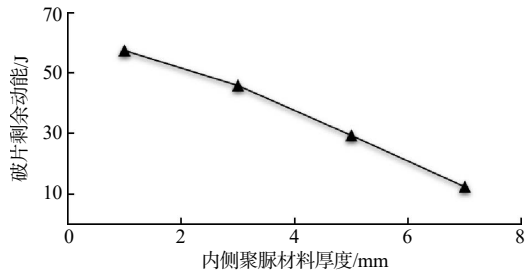


图 7 破片剩余动能——聚脲材料厚度关系图

Fig.7 Residual kinetic energy *vs* polyurea thickness

由图 6~7 可知，随着聚脲材料厚度的增加，爆炸破片速度降低程度增大，剩余动能减小。这也进一步说明，聚脲材料在内侧时的抗侵彻能力随着聚脲材料厚度的增加呈线性增大趋势。

以上研究表明，采用防爆液和芳纶纤维制作柔性防护结构可对爆炸破片产生有效防护，随着聚脲材料厚度的增加，防护效果也增强，但在考虑防护效果的同时还需要考虑相应的生产成本，所以应选取合适的聚脲材料。

2.3　正交试验设计与分析

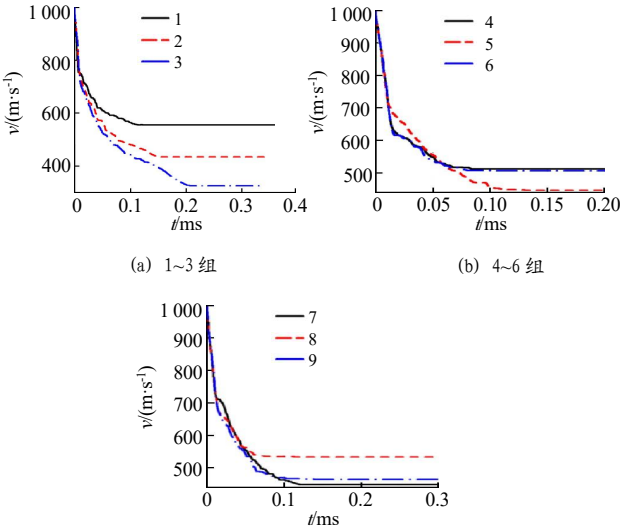
为获得最优的复合防护结构参数，采用 4 因素 3 水平 L9(4^3) 进行正交试验[13]，选择聚脲材料位置（A）、芳纶纤维层数（B）、防爆液体厚度（C）及聚脲厚度（D）4 个因素，正交试验因素水平如表 3 所示。以标准正交表为基础，由因素水平表得出表 4 中的 9 种防护结构方案，通过正交试验得出上述影响因素的大小。

表 3　正交试验因素水平表

Tab.3　Level table of orthogonal test factors

水平	因素			
	A	B	C	D
1	内侧	15	30	1.5
2	夹心	20	40	2.0
3	外侧	25	50	2.5

通过对不同因素水平的防护结构进行破片侵彻模拟，得到表 4 中聚脲材料在同一位置的 3 组破片侵彻的速度衰减曲线，如图 8 所示，对比不同因素水平的速度衰减曲线，分析其侵彻过程中的速度变化情况。



(a)　1~3 组　　(b)　4~6 组

(c)　7~9 组

图 8　正交试验破片速度衰减曲线

Fig.8　The velocity decline curve of fragments of orthogonal test

运用正交试验设计中的极差分析法[14]，对防爆层结构抗冲击波的数值模拟结果进行直观的分析，以获得使防护能力增强的最优水平组合，计算结果如表 4 所示。

表 4　正交试验结果与分析

Tab.4　Orthogonal test results and analysis

编号	聚脲位置	芳纶纤维层数/层	防爆液层厚度/mm	聚脲材料厚度/mm	破片剩余速度/(m·s⁻¹)	剩余动能/J
1	1	1	1	1	555.02	53.91
2	1	2	2	2	434.34	33.01
3	1	3	3	3	325.19	18.51
4	2	1	2	3	486.83	41.48
5	2	2	3	1	445.40	34.72
6	2	3	1	2	505.24	44.67
7	3	1	3	2	448.16	35.15
8	3	2	1	3	533.59	49.83
9	3	3	2	1	464.67	37.79
K_1	105.43	130.54	148.41	126.42	1 396.28	
K_2	120.87	117.56	112.28	112.83		
K_3	122.77	100.97	88.38	109.82		
$\bar{K}_1 = K_1/3$	35.14	43.51	49.47	42.14	-	
$\bar{K}_2 = K_2/3$	40.29	39.19	37.43	37.61		
$\bar{K}_3 = K_3/3$	40.92	33.66	29.46	36.61		
R	5.78	9.85	20.01	5.53		

通过直观分析表得到不同水平的效应曲线，如图 9 所示。

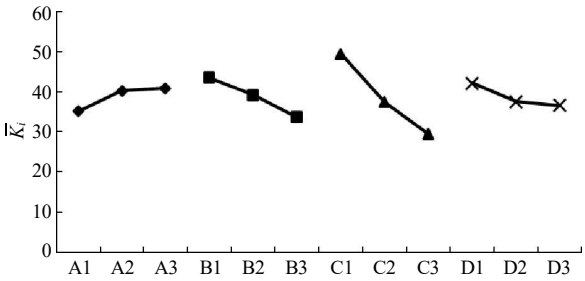


图 9　4 因素效应曲线图

Fig.9　Effect curve diagram of four factors

通过分析正交表数据可得出，聚脲材料处于复合柔性材料内侧，芳纶纤维层数 F=25 层，防爆液厚度 Y=50mm，聚脲材料厚度 J=2.5mm 时，破片剩余速度、剩余动能最小，表明柔性防护层的防护效果最好，抗破片侵彻能力最强。

分析图 9 可知，防爆液体厚度在正交试验中的降幅最大，表明其影响最重要。影响柔性防护结构防护性能的因素从大到小依次为：防爆液体厚度（C）、芳纶层数（B）、聚脲材料位置（A）、聚脲厚度（D）。

3　结论

柔性防护结构是反恐大环境下用于防爆炸破片的新型军用防护装备，通过本文研究得到以下结论：

（1）利用欧拉-拉格朗日算法进行不同形式防护结构下的爆炸破片侵彻模拟，研究表明聚脲材料越靠内侧，其对破片的抗侵彻能力就越强，其位置对爆炸破片防护有重要作用。

（2）采用不同厚度聚脲材料进行相同速度及质量的破片侵彻时，随着聚脲材料厚度的增加，破片速度降低程度增大，剩余动能减小。

（3）通过正交试验分析方法，得出当聚脲材料处于复合柔性材料内侧、芳纶纤维层数为 25 层，防爆液体厚度为 50mm，聚脲材料厚度为 2.5mm 时，柔性防护层防护效果最优；防爆液厚度在此防护结构中起着最主要影响，同时也得出影响防护性能的因素主次顺序为：防爆液体厚度、芳纶纤维层数、聚脲材料位置、聚脲材料厚度。本研究为军用防护结构提供了有效的研究思路，也拓展了正交试验的应用领域。

参考文献：

[1] 刘娴,龚维玲,梁瑜静,等.新形势下城市反恐防爆应急管理策略探析[J].辽宁警察学院学报,2019, 21(5): 61-66.

[2] 黄阳洋,王志军,赵鹏铎,等.射弹参数对侵彻防护液舱效果的影响研究[J].兵器装备工程学报, 2017, 38(12): 90-92,97.

[3] 彭佳,刘春美,张会锁,等.柔性防护结构对爆炸冲击波衰减作用数值模拟[J].科学技术与工程,2014,14(31):220- 224,230.

[4] Jian JIN, Hailiang HOU, Pengyu CHEN, et al. Experimental study on the combined damage of liquid cabin structure subjected to charge explosion with preset fragments[J]. International Journal of Impact Engineering, 2019(130): 19-26.

[5] 肖文莹,李想,郭万涛,等. Kevlar / UHMWPE 混杂纤维复合材料抗弹性能[J].玻璃钢/复合材料,2019(9):79-84.

[6] Damith Mohotti, Tuan Ngo, Priyan Mendis, et al. Polyurea coated composite aluminium plates subjected to high velocity projectile impact[J]. Materials and Design, 2013(52): 1-16.

[7] 杨竹林.基于仿生机理的柔性防护装具防破片优化分析[D].湖南 长沙:湖南大学,2019.

[8] Kun LIU, Mingfei JIANG, Zhilin WU, et al. A mechanical model for spherical fragments penetrating gelatine[J]. International Journal of Impact Engineering, 2019(131): 27-38.

[9] 方志威,侯海量,李永清,等.纤维增强复合材料夹芯结构抗高速破片侵彻数值模拟[J].船海工程, 2018, 47(4): 21-25.

[10] 赵未平,王亮,游培寒,等.基于 Autodyn 评估破片战斗部对雷达目标的毁伤效应[J].弹箭与制导学报,2019,39(5):55- 58,62.

[11] Catalin Pirvu and Lorena Deleanu. Ballistic testing of armor panels based on aramid[M]. IntechOpen,2019.

[12] 池海.抗冲击波聚脲装甲结构设计方法研究[D].山西 太原:中北大学, 2020.

[13] 王莹,肖巍,姚熊亮,等.水下爆炸冲击波载荷作用下冰层破碎特性及其影响因素[J].爆炸与冲击, 2019, 39(7):74-81.

[14] 马迎杰.正交试验类论文的规范化表达[J].编辑学报,2020, 32(2):173-176.