

丝织物编织结构与迎/背爆面组合对抗爆性能的影响

陶 洋, 张会锁*, 谢天奇, 李 程, 牛欣乐

(中北大学 机电工程学院, 山西 太原 030051)

摘 要: 针对柔性防爆材料的结构优化需求, 系统探究了丝织物编织构型与迎/背爆面组合模式对其抗爆性能的作用机理。基于显式动力学理论, 建立了单丝截面 $0.15\text{ cm}\times 0.02\text{ cm}$ 的Kevlar平纹、斜纹编织及双层结构的丝织物细观有限元模型, 通过数值仿真对比分析了不同结构在同当量TNT爆炸载荷作用下的动态响应过程。结果表明: 斜编织丝织物在受到冲击时变形较小, 能够更有效地分散冲击能量, 表现出优于正编织丝织物的抗爆性能, 其相同时间下的变形量较正编织小19.0%, 网后压力降低56.3%; 同时, 当迎爆面为正编织丝织物, 背爆面为斜编织丝织物时, 双/多层织物的抗爆性能最优, 相比其他组合方式, 最大可减小39.4%的冲击压力。

关键词: 编织方向; 背爆面; 抗爆性; 细观建模

中图分类号: TJ303.4

文献标识码: A

doi: 10.62756/jnuc.issn.1673-3193.2025.06.0006

引用格式: 陶洋, 张会锁, 谢天奇, 等. 丝织物编织结构与迎/背爆面组合对抗爆性能的影响[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2026, 47(1): 46-52.

TAO Yang, ZHANG Huisuo, XIE Tianqi, et al. Influence of the weaving structure of silk fabrics and the combination of the front and back explosion sides on the anti-explosion performance [J]. Journal of North University of China(Natural Science Edition), 2026, 47(1): 46-52.

Influence of the Weaving Structure of Silk Fabrics and the Combination of the Front and Back Explosion Sides on the Anti-Explosion Performance

TAO Yang, ZHANG Huisuo*, XIE Tianqi, LI Cheng, NIU Xinle

(School of Mechanical and Electrical Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: Aiming to the structural optimization requirements of flexible explosion-proof materials, this study systematically explored the mechanism by which the weaving configuration of silk fabrics and the combination mode of the front and back explosion-proof surfaces affected their explosion-proof performance. Based on the explicit dynamics theory, mesoscopic finite element models of Kevlar plain weave, twill weave and double-layer structure silk fabrics with a single filament cross-section of $0.15\text{ cm}\times 0.02\text{ cm}$ were established. The dynamic response processes of different structures under the same equivalent TNT explosion load were compared and analyzed through numerical simulation. The results show that the twill weave silk fabric has less

收稿日期: 2025-06-09

基金项目: 山西省研究生学术创新项目(2025XS427)

作者简介: 陶 洋(2000—), 男, 硕士生, 主要从事兵器工程方面的研究。

* 通信作者: 张会锁(1976—), 男, 副教授, 博士, 主要从事战斗部设计与仿真技术、终点效能评估、弹药安全性数值仿真方面的研究。

E-mail: 13653513620@139.com。

deformation when it is to impacted, and can more effectively disperse the impact energy, and exhibits superior anti-explosion performance compared to the plain weave silk fabric. The deformation amount under the same time is 19.0% smaller than that of the plain weave silk fabric, and the pressure behind the silk mesh is 56.3% lower. Meanwhile, when the front facing the explosion is a plain weave silk fabric and the back facing is a twill weave silk fabric, the anti-explosion performance of double/multi-layer fabrics is the best. Compared with other combination methods, the impact pressure can be reduced by up to 39.4% at most.

Key words: positive weaving; back exposed face; antiknock property; mesoscopic modeling

0 引言

防爆材料是防护装备的核心,而非金属柔性防护材料因其低附带毁伤的特性,在防爆、防弹等应用中展现出显著优势^[1-4],得到了广泛关注和深入研究。王刚^[5]研究了碳纤维复合加固方法、碳纤维布粘贴层数、碳纤维筋直径和碳纤维筋间距等参数对加固板的加固效果的影响;何志杰^[6]对碳纤维增强复合材料机织板的最佳爆炸分离方式以及断裂机理进行了探究与分析;陆文成等^[7]分析了不同厚度比的Kevlar/SiC-碳纤维增强环氧树脂基复合材料的抗弹能力。许丁鹏等^[8]研究了平纹编织CFRP/钢板厚度比对结构抗爆性能的影响。蒋逸伦^[8]分析了爆炸冲击波与破片威力场、织布层叠比例、织布边界条件等因素对织布防护性能的影响。Hebert等^[10]的研究结果表明,基体类型对复合材料层合板的抗冲击强度有较大影响。在复合材料基体中加入各种颗粒,同样可改善层合板材料的性能。赵敏等^[11]研究了碳纤维增强树脂嵌片对超高分子量聚乙烯(UHMWPE)多层复合织物防爆性能的影响,发现嵌入CFR片的复合结构对雷管破片的阻挡率比未嵌入的有明显提高,且显著减少了UHMWPE熔融破坏。冯振宇等^[12]通过数值模拟研究了芳纶纤维平纹织布在爆炸冲击下的动态响应与失效机理,发现织物在爆炸载荷下主要表现为中心撕裂和边界拉伸断裂两种失效模式,通过优化层叠角度可增强横向和剪切强度,减少边界撕裂,从而提升其抗爆性能,为柔性防爆材料的结构设计提供了理论依据。在编织复合材料拉伸性能研究领域,Byun等^[13]基于编织复合材料结构几何模型,结合体积平均法构建了宏观拉伸性能预测体系。Tabiei等^[14]则从细观力学角度切入,通过引入纤维束截面尺寸参数建立单胞模型,在满足等应力-应变场基本假设的前提下,基于增量理论构建了材料刚度矩阵,并

系统解析了其拉伸力学响应机制。

目前针对丝织物在细观结构层面上的抗爆性能研究仍然相对较少,特别是关于丝织物的编织方向与迎/背爆面结构组合对其抗爆性能的具体影响,尚缺乏系统性研究和深入分析。同时,现有防爆材料的性能主要依赖于其材料本身的高强度和韧性。因此,本文通过仿真来分析织物编织方向对抗爆性的影响,同时针对多层织物,分析迎/背爆面结构组合对其抗爆性的影响,从而为丝织物抗爆结构的设计及优化提供理论基础,增强其在实际应用中的防护性能。

1 仿真方案

1.1 细观模型的建立

丝织物由经向纱线(经线)和纬向纱线(纬线)相互交织而成。本文利用SOLIDWORKS三维建模软件进行了丝织物的细观建模,参考吴宁等^[15]的研究成果,设计了两种不同编织方向(经线与水平线之间的夹角不同)的丝织物细观模型,如图1所示。

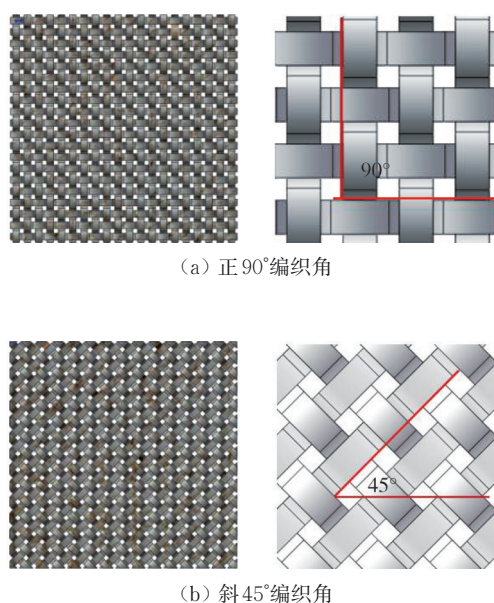


图1 织网细观3D模型

Fig. 1 3D mesoscopic model of silk mesh

织网整体尺寸大小为5 cm×5 cm,炸药尺寸为0.5 cm×0.5 cm。织物基本结构参数:经密度为4 根/cm;纬密度为4 根/cm;单根纱线宽度为0.15 cm,横截面厚度为0.02 cm。

为保证仿真结果的可靠性,结合模型尺寸,分别建立网格尺寸为1.5、0.75、0.5和0.375 mm的模型,对比分析压力响应,结果如表1所示。可以看出,网格尺寸小于0.5 mm时,压力响应基本不再发生变化,所以确定网格尺寸为0.5 mm,网格形状为六面体,单元类型为SOLID1,经纬向纱线之间和各层之间均使用AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE接触。

表 1 不同网格尺寸下的压力响应

Tab. 1 Pressure response under different grid sizes

网格尺寸/mm	压力响应/GPa
1.5	0.107 5
0.75	0.113 4
0.5	0.116 5
0.375	0.116 7

丝织网材料采用 Kevlar 纤维,使用 MAT_COMPOSITE_DAMAGE 本构模型进行模拟,材料参数详见表 2。炸药和空气的模拟均采用欧拉算法,其中,TNT 炸药使用 JWL 状态方程描述,空气则使用理想气体状态方程描述。相关参数与文献[11-12]保持一致。

表 2 Kevlar 材料参数

Tab. 2 Kevlar material parameters

$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	E_1/GPa	E_2/GPa	E_3/GPa	ν_{12}	ν_{23}	ν_{13}
1.35	21.00	21.00	4.60	0.31	0.14	0.14
G_{12}/GPa	G_{13}/GPa	G_{23}/GPa	$K_{\text{fail}}/\text{GPa}$	$AOPT$	$MACF$	Sc/GPa
1.20	1.20	1.20	2.00	0	1	0.25
X_T/GPa	Y_T/GPa	Y_C/GPa	α	S_N/GPa	S_{YZ}/GPa	S_{ZX}/GPa
1.20	1.20	0.80	0.5	0.55	0.55	0.55

1.2 试验方案

为了研究编织方向对丝织物抗爆性能的影响,采用控制变量法,在保持炸药尺寸、网格大小、爆炸距离及材料参数等条件一致的情况下,通过对比特定时间内正编织与斜编织丝织网的变形情况,并结合能量耗散路径与应力波传播特性来评估其抗爆性能。

仿真采用炸药中心起爆方式,空气域六面设置非反射边界,不考虑边界反射冲击波的影响,爆炸仿真模型如图2所示。

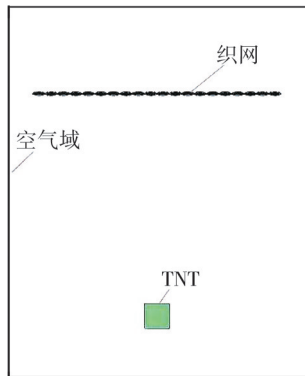


图 2 爆炸模型示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the explosion model

为深入探究多层丝织物迎/背爆面结构组合对抗爆性能的影响,首先需要明确各层织物在爆

炸冲击波作用下的动态响应情况。本文通过模拟冲击波作用过程,重点观察和分析多层丝织物在冲击波作用下的形变行为、受力特征以及能量吸收等动态变化特性。

多层丝织网爆炸仿真模型如图3所示,每层织网厚度为0.25 mm,共8层,各层完全相同。边缘固定,各层织网堆叠排列且不存在夹角,不考虑织网间的粘结作用。为确保模型的稳定性与仿真结果的准确性,织网网格尺寸及其他实验参数与前文一致。多层丝织物各层按照从背爆面到迎爆面的顺序依次编号为A、B、C、D、E、F、G、H,以便于后续分析各层的响应特性。

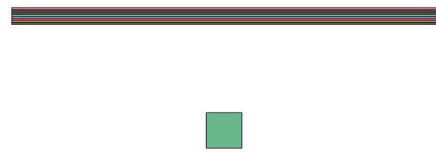


图 3 多层丝织网爆炸模型示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the explosion model of multi-layer silk mesh

2 仿真结果及分析

2.1 编织结构对抗爆性的影响

2.1.1 冲击结果及分析

20 μs 时丝织网在冲击波作用下的变形仿真结

果如图 4 和图 5 所示。

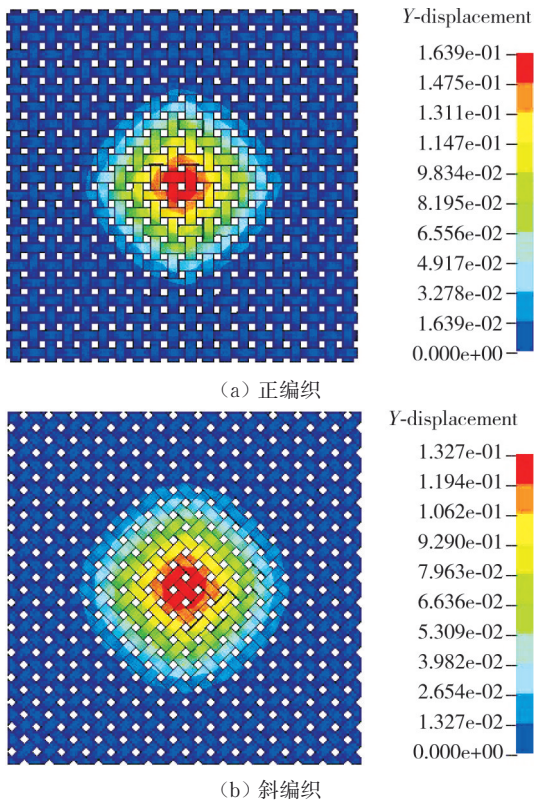


图 4 丝织网位移云图

Fig. 4 Displacement nephogram of silk mesh

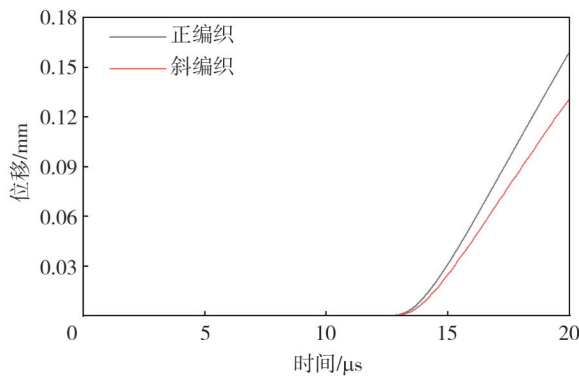


图 5 丝织网位移曲线

Fig. 5 Displacement curve of silk mesh

由图 4 和图 5 可以看出,在相同条件下,20 μs 时正编织丝织网的变形程度大于斜编织丝织网,其变形量比斜编织丝织网大 23.3%。

在丝织网靶后中心设置监测点,平面坐标为 (0,0),网后压力变化的监测结果如图 6 所示。可以看出,冲击波经过织网时,斜编织网后压力明显低于正编织网后压力,较正编织网低 56.3%。因此,斜编织结构在受到冲击时,产生的变形较小,能够更有效地吸收和分散冲击能量。斜编织结构的网后压力更小,具有更好的防护效果。

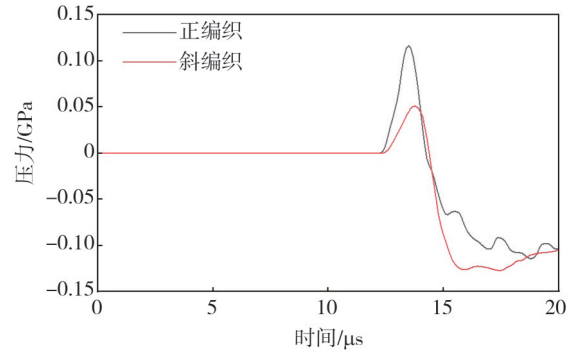


图 6 网后压力曲线

Fig. 6 Pressure curve behind silk mesh

2.1.2 抗爆性能结果及机理分析

为更深入地了解正编织物与斜编织物抗爆性能的差异,对其抗爆性能的作用机理进行详细分析。

1) 力学响应。网面经纬线方向的应力分布如图 7 所示。可以看出,正编织结构的最大应力响应为 275 MPa,斜编织结构的最大应力响应为 171 MPa。正编织丝织网在水平和竖直方向上的应力集中度更高,且应力值显著高于斜编织丝织网。同时,斜编织丝织网的受力更加均匀,整体损伤更小。

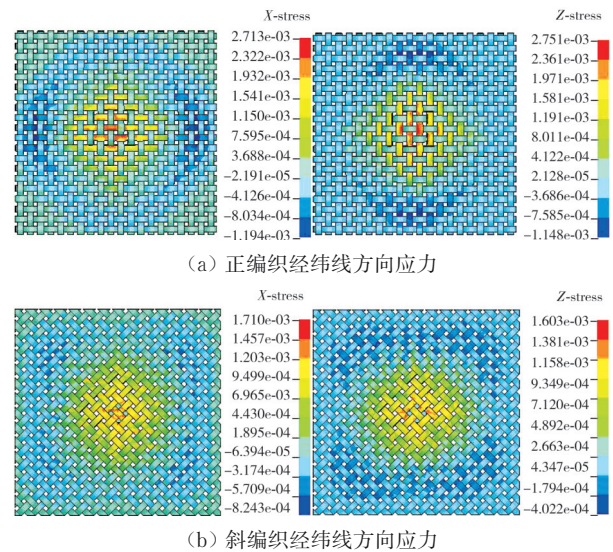


图 7 丝织网应力云图

Fig. 7 Stress nephogram of silk mesh

2) 能量耗散。将丝织网与炸药的距离缩短,记录相同时刻正/斜丝织网在大变形下的损伤情况,如图 8 所示。可以看出,正编织丝织网因其规则的正交结构,受损后形成的通孔垂直于织网平面,冲击波易直接穿透,网后压力较大。相比之下,斜编织丝织网受冲击变形后,纤维与冲击波传播方向呈斜角分布,改变了冲击波传播路径,从而降低了网后压力。

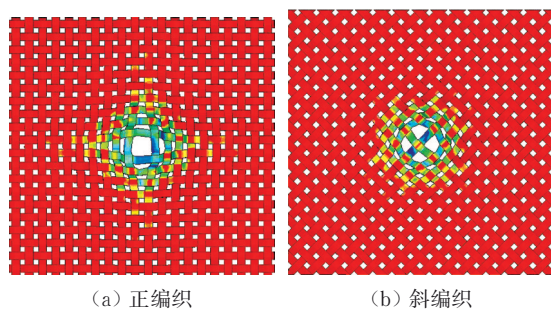


图8 丝织网损伤情况

Fig. 8 Damage condition of silk mesh

3) 能量吸收。相同时刻,冲击波经过丝织网时的压力云图如图9所示,丝织网的内能变化如图10所示。

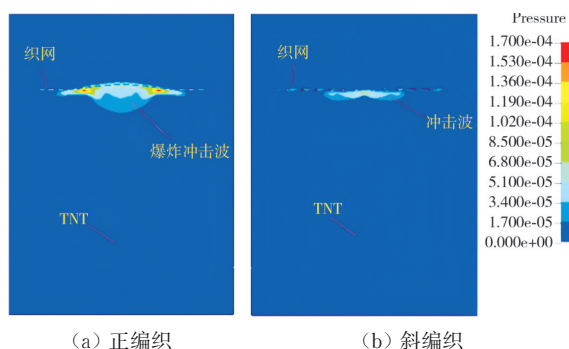


图9 丝织网压力云图

Fig. 9 Pressure nephogram of silk mesh

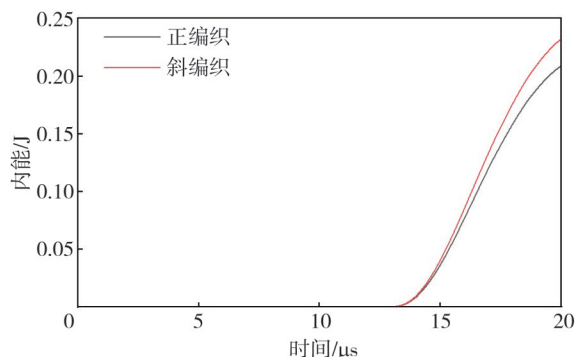


图10 正/斜编织网的内能变化曲线

Fig. 10 Variation curves of internal energy for the plain weave twill weave silk mesh

由图9和图10可以看出,冲击波经过斜编织物时有明显衰减,且整体内能大于正编织网。斜编织物由于其斜向编织结构能更均匀地承载冲击波压力,因此可以降低峰值载荷。

2.2 多层丝织物的抗爆性分析

记录多层丝织物各层在爆炸冲击作用下的响应情况,各层丝织网的内能变化和动能对比分别如图11和表3所示,各层织网产生变形,未发生分层情况。

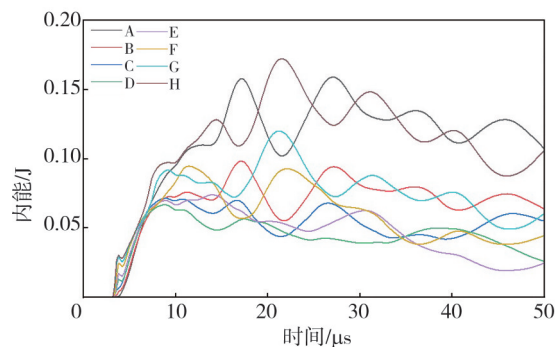


图11 各层丝织网的内能变化曲线

Fig. 11 Variation curves of internal energy for each layer of silk mesh

表3 各层丝织网的最大动能

Tab. 3 Maximum kinetic energy of each layer of silk mesh

丝织网层	动能/J
A(背爆面)	0.33
B	0.33
C	0.33
D	0.33
E	0.34
F	0.34
G	0.34
H(迎爆面)	0.34

由图11和表3可以看出:各层织网的能量吸收特性存在明显差异。A层(背爆面)和H层(迎爆面)的内能显著高于中间各层,表明这两层织物在冲击过程中吸收了更多能量。相比之下,各层丝织网的最大动能数值较为接近,H层略高于A层且呈线性变化。上述结果说明,多层丝织物在爆炸冲击作用下的能量吸收能力主要取决于材料的内能变化,而非动能差异。

1) 当丝织物受到冲击载荷时,中心区域首先受到作用力并向后移动。这种运动通过织布的整体结构逐步传递,引起各层织网的同步移动和整体变形。由于丝织物具有一定的厚度和层次结构,不同层织布在同等位移条件下的受力情况并不一致。由于冲击波在传播过程中逐渐向背面传递动能,背向冲击的织布层会承受更大的拉伸力,并在背面形成应力集中。

2) 丝织物各层织网在冲击过程中的能量吸收表现出明显的差异。靠近冲击源的迎爆面织网,直接受到冲击波的作用。远离冲击源的背爆面织布层,由于高应力集中而吸收了更多的拉伸变形能。在整个过程中,织布的能量吸收能力随着时间的推移而发生变化。

3) 织布在冲击载荷作用下的响应具有显著的层次性和非均匀性。因此,在抗冲击材料选择与

结构设计中,需要针对不同区域的特性进行优化。迎爆面处的织布主要承担初始冲击能量的吸收,应选用具有高吸能能力和良好抗弯性能的材料。背爆面由于承受较大的拉伸应力,应选用抗拉强度较高的材料,以提高其抗撕裂能力。同时,中间层织布的材料应在柔性和强度之间进行平衡,以达到吸能和延缓破坏的最佳效果。

2.3 迎/背爆面结构组合对抗爆性的影响

前文仿真结果表明,迎爆面与背爆面的能量吸收性能显著优于中间层。此外,在多层丝织网结构中,中间层的组合方式具有多样性和复杂性。因此,本文结合正斜编织结构,进一步分析迎爆面与背爆面的不同结构组合对抗爆性的影响,并基于这两种编织结构提出了4种组合方案以进行优化分析,组合方案见表4。

表4 迎/背爆面组合方式

Tab. 4 Combination of the front and back sides

工况	组合方式	
	迎爆面	背爆面
1	正	正
2	正	斜
3	斜	正
4	斜	斜

仿真采用控制变量法,在保持其他实验参数一致的条件下,建立对应的有限元模型。为定量评估抗爆性能的差异,在织物防护层后方设置固定鉴定块作为响应监测体,根据冲击波作用下鉴定块的动态响应参数,分析不同迎/背爆面结构组合对多层织物抗冲击波防护效能的影响。仿真模型如图12所示。

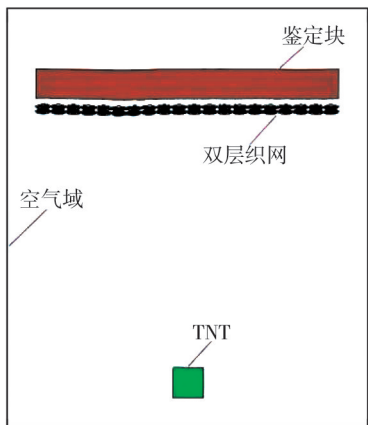


图12 双层丝织网爆炸模型示意图

Fig. 12 Schematic diagram of the explosion model for double-layer silk mesh

对迎/背爆面与编织方向的4种正交组合进行仿真,得到相同时刻鉴定块的应力响应,结果如图13所示。

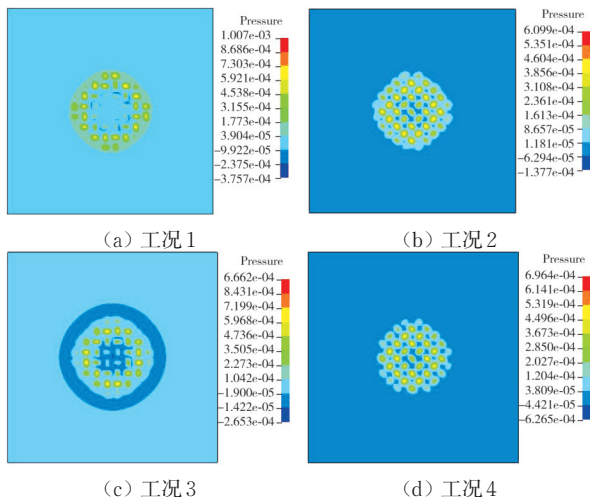


图13 鉴定块应力响应

Fig. 13 Stress response of the identification block

炸药起爆22 μs时,工况1~4的鉴定块受到的最大应力如表5所示。

表5 各工况鉴定块上的最大应力

Tab. 5 Maximum stress of identification block in each working condition

工况	应力/MPa	工况	应力/MPa
1	100.70	3	96.62
2	60.99	4	69.64

当迎爆面为正编织,背爆面为斜编织结构时,双/多层抗爆性最好。相比其他组合方式,丝织网后的冲击压力分别减小了39.43%、36.88%和12.42%。

分析以上仿真结果可得:

1) 正编织的规则排列纤维结构使得纤维能够在其主要方向上直接承受拉伸、压缩或剪切载荷,充分发挥纤维本身的强度和刚度特性。因此,正编织网作为迎爆面,能够在爆炸冲击波的作用下快速吸收冲击能量,充当第一道防线,减少冲击能量对背爆层的直接影响,同时,其规则的结构有助于将冲击能量均匀传递到整个织网表面。

2) 斜编织纤维呈交错斜向排列,具备优越的能量分散能力。作为背爆面时,能够进一步处理迎爆面传递过来的剩余能量,通过其斜向结构将能量沿多方向分散,降低背爆层的局部应力,同时减小整体变形和损伤。因此,迎爆面正编织网具有较高的冲击吸收能力与初始刚度,而背爆面斜编织网通过其独特的交错结构进一步分散剩余能量与应力波,实现了能量吸收与分散的协同优化。

3 结 论

本文研究了编织方向对丝织物抗爆性的影

响。设计了两种不同编织方向的丝织网并建立了其细观模型,在相同条件下对比分析了这两种丝织网受冲击波作用时的位移、压力、应力变化仿真结果。主要结论如下:

1) 编织方向对丝织物的抗爆性有显著影响。正编织丝织网在冲击波作用下的变形程度较大,抗爆性能相对较弱。相反,斜编织丝织网由于其独特的结构特点,能够更好地分散冲击能量,减少应力集中,从而表现出更优异的抗爆性能。

2) 在多层丝织物中,迎爆面与背爆面对其整体抗爆性能起到关键作用,迎/背爆面对能量的吸收能力高于中间层。

3) 迎爆面与背爆面织网结构的选择对丝织物的抗爆性有显著影响。当迎爆面为正编织织网,背爆面为斜编织织网时,丝织物整体结构的抗爆性能最优。

通过调整编织结构与迎/背爆面结构组合,可以提高丝织物的抗爆能力,这对于设计和制造高性能防护材料具有一定的指导意义。未来的研究可以进一步探索不同编织方式、材料组合对丝织物抗爆性能的影响,优化防爆材料的设计,提升其实用性能和应用范围。

利益冲突声明/Conflict of Interests

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors declare no relevant conflict of interests.

参考文献:

- [1] 王逸凡,李永鹏,徐豫新,等. 钨球对碳纤维增强复合材料包覆碳化硼陶瓷侵彻效应[J]. 兵工学报, 2024, 45(8): 2487-2496.
- WANG Yifan, LI Yongpeng, XU Yuxin, et al. Penetration effect of tungsten alloy spherical projectile on CFRP-coated B4C ceramics[J]. Acta Armamentarii[J] Journal of Ordnance, 2024, 45(8): 2487-2496. (in Chinese)
- [2] 巩娜娟,于天,张利. 软质防弹衣中减凹陷材料和防弹层结构的研究[J]. 广东化工, 2024, 51(8): 14-17.
- GONG Najuan, YU Tian, ZHANG Li. Study on the trauma reducing material and the structure of bullet-proof layer in soft bulletproof vest [J]. Guangdong Chemical Industry, 2024, 51(8): 14-17. (in Chinese)
- [3] HARTMAN W F, BOUGHTON B A, LARSEN M E. Blast mitigation capabilities of aqueous foam: SAND2006-0533 [R]. Albuquerque: Sandia National Laboratories, 2006.
- [4] WANG E, SHUKLA A. Analytical and experimental evaluation of energies during shock wave loading [J]. International Journal of Impact Engineering, 2010, 37(12): 1188-1196.
- [5] 王刚. 室内燃气爆炸下碳纤维复合加固RC板的抗爆性能研究[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2023.
- [6] 何志杰. 不同装药方式下爆炸分离碳纤维增强复合材料平板研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2022.
- [7] 陆文成,武一丁,余毅磊,等. 不同厚度比的SiC陶瓷-纤维增强树脂基复合材料装甲的损伤失效及其抗弹性能[J]. 复合材料学报, 2025, 42(2): 1125-1139.
- LU Wencheng, WU Yiding, YU Yilei, et al. Damage failure and ballistic performance of SiC ceramic-fiber reinforced resin-based composite armor with different thickness ratios [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2025, 42(2): 1125-1139. (in Chinese)
- [8] 许丁鹏,孙晓旺,刘勇,等. 平纹编织CFRP-钢板复合结构抗爆性能[J]. 复合材料学报, 2025, 42(11): 6636-6650.
- XU Dingpeng, SUN Xiaowang, LIU Yong, et al. Anti-explosion performance of plain woven CFRP-steel composite structure [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2025, 42(11): 6636-6650. (in Chinese)
- [9] 蒋逸伦. 爆炸冲击波与破片联合作用下纤维织布的动态响应与失效分析[D]. 天津: 中国民航大学, 2024.
- [10] HEBERT M, ROUSSEAU C E, SHUKLA A. Shock loading and drop weight impact response of glass reinforced polymer composites [J]. Composite Structures, 2008, 84(3): 199-208.
- [11] 赵敏,屈晴,杨舒琪. 碳纤维/Uio66-NH₂环氧复合材料的制备及其性能研究[J]. 陕西科技大学学报, 2024, 42(3): 98-105.
- ZHAO Min, QU Qing, YANG Shuqi. Study on preparation and properties of carbon fiber/Uio66-NH₂ epoxy composites [J]. Journal of Shaanxi University of Science and Technology, 2024, 42(3): 98-105. (in Chinese)
- [12] 冯振宇,姜超,高斌元,等. 芳纶纤维平纹织布在爆炸载荷下的动态响应与失效行为的数值分析[J]. 应用数学和力学, 2021, 42(11): 1113-1125.
- FENG Zhenyu, JIANG Chao, GAO Binyuan, et al. Numerical study on dynamic responses and failure behaviours of aramid fabrics subject to blast loads [J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2021, 42(11): 1113-1125. (in Chinese)

(下转第70页)