

基于高分子复合材料的防暴盾抗冲击性能与结构一体化设计研究

邢嘉鑫

广东联防防暴器材有限公司 广东 广州 522000

【摘要】：随着城市反恐、防暴及特殊作业环境需求的不断提升，防护装备正由传统“高强度单一材料”向“多材料协同与结构优化”方向演进。尤其是在高能冲击与爆炸碎片作用下，单一材料体系往往难以兼顾刚度、韧性与能量耗散能力，从而限制了防暴盾防护性能的进一步提升。近年来，高分子复合材料凭借其密度低、比强度高、界面可调控等优势，在防护结构领域逐渐展现出显著的应用潜力。文章围绕高分子复合材料防暴盾的抗冲击性能提升与结构一体化设计展开研究，构建多层复合结构模型，分析冲击载荷作用下的能量传递与损伤演化机制，并提出基于分区构型、连续过渡及界面协同的设计方法。通过参数化分析与结构优化，揭示材料配置与结构形态对抗冲击性能的影响规律，形成可用于工程应用的设计路径。

【关键词】：复合材料；防暴盾；抗冲击性能；结构一体化

DOI:10.12417/2705-0998.26.05.054

引言

在公共安全防护与特种装备持续升级的背景下，防暴盾作为典型的人体防护界面，其技术发展逐步从“材料强度主导”转向“结构—材料协同优化”的复合路径。传统以钢制或单一高强度材料为核心的防护体系，虽然在静态承载方面具有一定优势，但在高应变率冲击、碎片冲击以及复杂多向载荷耦合作用下，往往暴露出能量耗散路径单一、背面变形控制能力不足以及结构重量过大等问题，难以满足现代防护装备对轻量化、高可靠性与多场景适应性的综合要求。在这种环境条件下，反恐盾牌的设计开始出现由“分段结构”转变为“整体结构设计”的倾向，也就是在设计方案之初就规划材料选用、分块位置、联结形式以及成形手段等使得各个单元组成一整体力系相互耦合。这就需要更加全面的理解复合材料冲击力学行为并要在结构

级别上构建无缝衔接、可调的能量转移和耗散渠道。

1 基于高分子复合材料的防暴盾结构

在防暴盾结构设计上，高分子复合材料由原来的唯一负载载体变为了多层异质材质组成的“阻挡—扩散—耗能—缓冲”的分层次防护系统。其典型的构造是由外层的硬性材料、中间层的能量耗散材料以及内层的抗背后变形层构成，利用界面粘附和层次之间的相互配合共同来对冲击载荷进行逐级降低以及转换。并且利用连续纤维增强以及树脂基体相结合的特点，在维持着整个结构的整体刚性的基础上大幅度提高了它的韧性，从而使防暴盾在承受极大的冲击力情况下依然有着很好的稳定性和安全性余量。高分子复合材料防暴盾典型结构参数及性能指标如下所示：表 1

表 1 高分子复合材料防暴盾典型结构参数及性能指标

层级结构	材料类型	厚度/mm	密度/(g·cm ⁻³)	抗拉强度/MPa	吸能率/%	冲击后背面变形/mm
表层（阻挡层）	芳纶纤维/环氧树脂	3	1.38	3200	18	12.5
中间层（耗能层）	UHMWPE 复合层	6	0.97	2900	42	8.3
缓冲层（过渡层）	橡胶改性树脂层	4	1.15	800	26	5.6
内层（支撑层）	玻璃纤维复合材料	3.5	1.85	1500	14	4.2
整体结构（对比）	传统钢制结构	10	7.85	520	9	18.7

复合材料防暴盾各项主要技术参数都具有较大的优越性，首先就是抗拉强度上芳纶和 UHMWPE 等高强度纤维材料相比普通钢材有更大的提升，使得整个结构在受到冲击的瞬间就能

拥有更强的抵抗阻力；同时中间层用材料也吸收了 40% 以上的冲击能，说明它能在受到撞击的时候通过纤维的伸长。

界面的滑动以及局部产生微小裂缝等一系列方式来实现高效的能量吸收,进而可以大幅度减少对内部的冲击力度;再者背板变形量也是相当可观,最终的结果不超过5毫米,较传统的金属结构要低很多,因此对人体造成的二次伤害也就随之减弱了很多。

更重要的一点是各个级别的材料之间对功能配置的不同使得整个系统表现出了一定程度的“阶梯效应”,最外面的部分首先破坏并耗散能量,中部结构负责主要的耗能工作,内部则维持结构稳定并阻止变形蔓延,分层耗能的设计解决了传统单一材质抗冲击时容易出现的脆性断裂的现象,从密度的角度考虑,复合式结构的整体密度远远小于钢结构,不仅能够达到相应的防护效果而且还大幅度减轻了自身的重量,有利于提高装备的机动性和长期使用下的舒适性。

2 基于高分子复合材料的防暴盾抗冲击性能优化策略

2.1 多层梯度结构的分级耗能设计

在提高耐冲能力方面,首先要建立具有梯度特性组成的多层次复合体,在厚度上分为多个层次递次弱化冲击能量。可以通过改变各层材料的弹性模数及强度等级,来达到一个从高刚性表面逐渐过度为高柔性中心的构造模式;外层使用高强度热固型芳纶或者碳纤维增强体来承受最初的冲击力,中间层使用超高分子量聚乙烯或者是多孔复合材料来进行能量传输及耗散,内部使用橡胶改性的树脂材料或者是泡沫夹芯来减小背面弯曲变形等。更进一步地,利用调整上下层厚度比的方法(例如:上层:中间层:下层=1:2:1)就可以改善传爆通路,将应力波能量在上、下层间摊开,在一定程度上可以防止局部区域应力过大发生破坏性断裂。

2.2 纤维铺层角度与结构各向异性优化

复合材料的抗冲击性能很大程度上依赖其纤维布层的形式以及各向异性的特点。所以,在结构设计的时候,可以通过合理的布置纤维布层角度以指导冲击能量的扩散路线;比如采取 $0^\circ/\pm 45^\circ/90^\circ$ 交错叠合的设计方式使得冲击应力被分解到不同的方向并利用剪切耦合作用加强整体能量吸收的能力;并且在重要冲击部位增加局部加强层(例如:多向编织结构或者三明治三维编织复合材料)能大大提高它们之间的抗脱离力从而降低分层破坏的可能性。另外利用有限元仿真对不同的铺层方案进行参数化搜索,可以找到在冲击的速度、入射的角度和施加载荷的情况下最理想的铺层方案,进而达到对结构性能的有目的性的调整。

2.3 界面强化与能量耗散机制调控

界面性能是影响复合材料抗冲击的重要条件之一,所以必须采用多层次的方法对纤维-基体界面进行加固,一方面加入纳米级填充物(例如石墨烯,纳米 SiO_2 等等)来提升界面间粘接

力;另一方面利用表面等离子化或者偶合剂对其进行修饰从而增加纤维外表的活性使得粘接更加牢固,在此基础上还可以控制界面韧性达到“可控脱粘”的效果,即冲击的时候可以容忍界面内产生一定程度的相对运动来耗散一部分冲击能减慢了裂纹蔓延的速度。这一“强连接-能耗散”的设计方法,在保持结构安全性的基础上提高了整体能量吸收能力,进而可对提高结构的抗冲击能力起到积极作用。

2.4 结构曲面化与冲击载荷分散路径优化

从结构方面来说,运用曲面设计能够很好的避免冲击载荷的集中问题,把以前集中作用的正向冲击变为沿着曲面方向的切向力,大大减少了冲击强度,同时运用微弧或者双曲线型来代替旧式的平面盾体并且通过对仿真模拟来进行曲率半径的设计达到冲击波不断在结构表面反射扩散的效果;另外还可以采用内腔增厚或者蜂窝夹层的设计来增加结构的多条传递路线,让冲击波的能量在更大的空间范围里进行扩散;再利用人机工程学的要求,在防护性能的基础上进行局部的调整达到既能满足防护要求又能便于人们使用的目的。从结构上进行的这种改进方案可以在不明显增大结构重量的情况下获得抗冲击效果的大幅度增强。

3 基于高分子复合材料的防暴盾抗冲击的结构一体化设计方法

3.1 防护目标分解与总体构型确定

基于结构一体化的设计不是以选择材料为开始点,而是对防护对象进行工程化分解。在设计过程中首先要将防暴盾的应用场景转为可以求解的边界条件即冲击的形式,作用部位、承压面大小、背弯允许角度、总重、手握稳定性和视窗的位置大小等等参数,进而得到盾体的整体外形;而对于既要承受正面硬冲击又要承受边缘斜冲击的盾体不宜直接用等厚平片的方式处理,应该首先构造出带主防护区、过渡区、边缘约束区的分层式结构。

主防护区承担主要的承受冲击的任务,其厚度以及加固层分布较为密集;过渡区的作用是用来缓解中间部位的应力分布到四周,防止出现在材料边缘产生急剧变化的情况出现;边缘约束区要同时考虑翻边,包角以及接合口预留等,从而保证整体的牢固性。另外,盾体曲率半径、宽高比和边缘圆角大小也要相应地设定出来,因为这些几何量都会影响到冲击载荷的传播途径以及结构的整体面外变形形式问题。也就是说,这一步骤的重点并不是“绘制一只盾牌图案”,而是在于通过整个形状的设计把之后的材料配置、内衬安排、手把设置和局部加强都整合在一个几何框架之中,作为下一步连续建模的基础。

3.2 功能分区建模与厚度连续过渡设计

在总体方案确定以后就需要进行下一步的功能分区建模,重点不是简单的叠加材料层而是根据不同部分的功能作用来

设计不同的截面，在具体设计中可以将盾体分为核心抗冲击区、视窗附近区、边缘固定区以及握柄耦合区几个功能分区并对每个分区进行厚度、层数、界面形式以及局部加强手段的设计。核心抗冲击区使用全封闭式完整的截面结构，注重面内的均匀受力；视窗附近区由于有开孔以及断面中断的情况，在轮廓周围必须要有环形过渡带，用厚度渐变以及轮廓倒棱的办法来减弱开孔引起的应力集中；边缘固定区域应该设计出翻边或者卷边，将层合板材边缘变为受限制的边缘来增强层间稳定性，抓取耦合区要保证安装和载荷传递的空间存在，还要防止出现因为局部刚性增大造成的盾壳形状偏斜的现象。

尤其是要特别注意的是，厚度的变化不能采取阶梯式的处理方式，而是应该采取渐变的方式进行转变，就是说用斜接、局部递减铺层、变厚模压等方法将结构刚度沿着空间逐渐改变，目的是为了冲击动能在一个结构上可以平缓的传递下去，而不是一个断面上突然出现了一个“折返”或者是聚集，所以盾体由二维平面意义下的“分区”的进一步转换为三维截面意义下的“分层—变厚—连续过渡”的复合结构才算是真正的实现了一体化设计理念。

3.3 承载部件嵌入与连接界面协同设计

防暴盾在实战中的应用远不止是单纯受到冲击的平板结构，而是包括了盾面，手柄，臂套，缓冲层，窗口框架以及沿边衬里在内的整套承重体系组合体。所以结构一体化的第三步就应该做好各个承重要件同主体盾牌之间的整合工作，在主体盾牌成型之前就对其进行整合，不能等到主体盾牌制作完成之后才去额外装配。在设计时可提前考虑好将手柄安装座以及臂套连接位置整合到盾体主体内，在生产初期就预先预留出加强钢板，局部增加内部填充层或者直接进行嵌入式浇注工艺，从

而使得连接处成为盾体的一体化部分，而非后期打孔固定后出现的松动部位。

而对于视窗结构，应该采取“透明防护层-框架过渡层-主盾基体”的联合设计理念，在透明件周围添加柔性过度区域以此来降低由于刚度差异造成的周向裂缝的风险。边缘部分也不只是起到装饰作用的一个镶边带而是应该做成一个封闭的圈口，利用边框或者包裹层进行周向限位控制冲击后的自由边缘弯曲以及分层脱离扩展开。对于结合部本身也要考虑受力方向、孔边缘间隙大小、压缩失稳的问题以及重复拆装引起的松动问题，所以在固定位置不应该放在最大变曲的地方，应当设置在传力路线变化平稳处。这种方法以“零件先插入、接口后配合、组装承力同时兼顾”，就不会出现传统分体式结构存在的连接部位薄弱环节、辅件脱出以及局部区域应力分布不均匀的现象，在受到打击时或者持握状态下都能形成一个完整的受力闭合圈。

4 结语

现阶段，防暴盾的技术路径已不再局限于材料性能的单向提升，而是逐步转向以结构逻辑为主导的系统性重构。本文在复合材料这一基础载体之上，将冲击响应过程中的能量传递、结构变形与界面作用纳入统一分析框架，通过构型分区、厚度连续、连接嵌入及工艺反推等多维度耦合，使防护结构由离散叠加转变为整体协同运行体系。由此，防暴盾不再是简单的受力构件，而成为具备分级响应与路径可控特征的功能结构单元。这种设计思路所体现的，并非单一性能指标的优化，而是对复杂工况下结构行为的整体重构，其意义在于为高性能防护装备的发展提供了一种更具延展性的技术范式。

参考文献：

- [1] 周铄.高分子复合材料在给排水管道中的应用研究进展[J].合成材料老化与应用,2025,54(06):63-66.
- [2] 陈飞羽.高分子复合材料的改性及微观结构表征[J].化纤与纺织技术,2025,54(12):17-19.
- [3] 苏航兴.高分子复合材料在能源领域的应用[J].塑料助剂,2025,(06):79-83.
- [4] 袁晓曦,杨统乾,焦璨.非对称结构电磁屏蔽复合材料研究进展[J].家电科技,2025,(S1):548-551.