

防弹复合材料结构及其防弹机理

Structure and Bullet-proof Mechanism of Ballistic Composites

陈 磊¹, 徐志伟¹, 李嘉禄¹, 张刘飞², 陈 利¹, 吴晓青¹, 孙 颖¹, 陈光伟¹

(1 天津工业大学 复合材料研究所先进纺织复合材料教育部重点实验室,

天津 300160; 2 江阴出入境检验检疫局, 江苏 江阴 214400)

CHEN Lei¹, XU Zhiwei¹, LI Jia-lu¹, ZHANG Liu-fei², CHEN Li¹,

WU Xiao-qing¹, SUN Ying¹, CHEN Guang-wei¹

(1 Key Laboratory of Advanced Braided Composites (Ministry of Education), Institute of

Composite Materials, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300160, China; 2 Jiangyin

Entry-Exit Inspection and Quarantine Bureau, Jiangyin 214400, Jiangsu, China)

摘要: 探讨了弹块与防弹复合材料的作用机理, 分析弹块在侵入过程中复合材料吸能方式和破坏模式的变化, 提出了防弹复合材料的结构设计概念。分别研究了单根纤维性能、织物结构、树脂性能、基体含量和复合材料界面粘接强度等因素对防弹性能的影响, 并指出目前存在的不足, 以期为今后防弹复合材料的结构设计提供借鉴。

关键词: 防弹复合材料; 结构设计; 破坏模式; 织物结构; 界面

中图分类号: TB332 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381(2010)11-0094-07

Abstract: The interaction mechanisms of bomb block and composites are discussed, and the energy-absorbing means and failure mode of composites are analyzed in the penetration process of bomb block. The structural design of bullet-proof composite was put forward. The influence of single-fiber properties, fabric structure, resin, matrix content and interface strength on the bullet-proof performance is investigated. It is expected that this paper is beneficial to the structural design of bullet-proof composites.

Key words: bullet-proof composite; structural design; failure mode; fabric structure; interface

20 世纪 70 年代以来, 复合材料开始在防护过程中大量使用。纤维增强复合材料由于具有轻质高强和高冲击损伤容限等优点, 在航空航天、人体、车辆以及舰船重要舱室等防护领域受到了研究人员的青睐, 并得到了越来越广泛的应用^[1, 2]。

子弹与复合材料作用过程中发生侵入, 表现出了多种不同的破坏模式, 如纤维的拉伸断裂、层合板的分层、纤维和树脂的脱粘及材料产生的背凸等。弹体动能就是在这些破坏中被逐渐消耗, 从而达到了防弹的效果。本文针对弹道冲击下子弹与复合材料的作用机理和破坏模式展开了分析, 并根据子弹与复合材料在不同阶段的作用机理对当前国内外防弹复合材料的结构设计进行了研究。此外, 影响复合材料防弹性能的因素很多, 其中主要包括增强体、基体、界面和梯度结构等因素。对此, 本文探讨了包括天然纤维在内的纤维种类、织物组织结构、面密度、基体的性能、含量、纤维与树脂间界面性能以及梯度结构设计等因素对防弹性能的影响。

1 弹体与防弹复合材料的作用机理

1.1 应力波的传播机理

应力波是应力和应变扰动的传播形式, 在可变形固体介质中机械扰动表现为质点速度和相应的应力、应变状态的变化。在弹道冲击中, 子弹与靶板接触的瞬间产生的应力波以两个方向传播, 一是以连续的脉冲沿纤维的轴向传播, 受到冲击的纤维通过基体树脂及交错点的相互作用, 应力波在很多纤维上扩散开来; 二是应力波的沿靶板纵向传播, 应力波在靶板的织物和基体界面及靶板自由面之间产生连续反射, 使压力变成拉应力。

研究发现, 应力波在两种不同的材料中传播时, 当传至两种材料的界面会产生入射波和反射波^[3], 而且应力波在产生塑性变形的材料中的传递较在弹性变形材料中的传递规则许多^[4]。应力波在纤维中传播速度主要取决于纤维的杨氏模量^[5]及其在复合材料中的状态。一般, 材料的模量越高, 质量越低, 应力波传播的

速度越快。关于纤维形态对应力波传播速度的影响,陈利民^[6]通过对 Kevlar-29 和尼龙 66 织物研究,认为织物中的纤维若存在交迭点或收缩会使应力波产生反射,影响应力波在其中传播(如图 1)。表 1 为应力波在几种自由纤维(皱缩率为 0% 的纤维)和织物中的传播速度,从表中可以看出,纤维模量越高,应力波的传播速度就越快,自由纤维传播应力波的能力明显高于经向纤维和纬向纤维。因此,在防弹复合材料的设计中,需兼顾纤维的力学性能及纤维在织物中的状态。

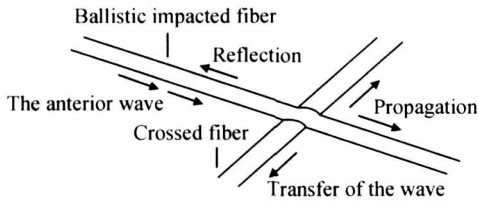


图 1 纤维增强复合材料冲击波的传播形式^[7]

Fig. 1 Model of the stress wave propagation in the fiber reinforced composites^[7]

表 1 几种典型防弹纤维中的声速($\times 10^3 \text{ m/s}$)^[6,7]

| Fiber | UHMWPE | Kevlar | Glass fiber | Carbon fiber | Nylor 66 | PBO |
|------------|--------|--------|-------------|--------------|----------|------|
| Free fiber | 9.12 | 7.9 | 9.11 | 11.14 | 2 | 13.5 |
| Warp fiber | - | 0.9 | - | - | 0.9 | - |
| Weft fiber | - | 5 | - | - | 1 | - |

1.2 高速冲击下复合材料吸能方式及破坏模式

防弹复合材料吸能方式主要包括^[8]: 纤维的变形、纤维的拉伸断裂、分层、基体开裂、材料的剪切破坏、弹体与复合材料的摩擦和“背凸”的形成等。吸能较多的为材料的分层、纤维的拉伸断裂及基体开裂,其他方式则相对较少。其中材料的分层主要取决于复合材料的结构设计,纤维的断裂主要取决于纤维强度,而基体的开裂主要取决于所选基体的性能。

评价靶板防弹性能的国际通用指标是弹道极限速度 V_{50} , 它是指针对一定质量的弹块在该速度下(入射方向不变)穿透给定系统靶板的概率为 50%^[9]。在防弹过程中,复合材料的破坏模式有多种,主要有纤维剪切和拉伸破坏,层合板的分层等。当弹丸开始作用于复合材料时,由于弹丸产生的压缩应力,织物产生了变形。随着子弹的侵彻,材料变形越为严重,紧接着的是分层现象的产生。当子弹从材料背面穿过时,背部形成较大的鼓包并伴有原纤化的现象产生,弹体进入一侧,弹孔基本为圆形,孔内呈现整齐的纤维断头,而弹体射出面无明显弹孔,有长短不一的纤维抽脱,靶板面部鼓包较小,纤维的断裂方式主要为拉伸断裂。若弹

体未能穿透靶板,弹孔周围形成明显的“+”,靶板背面出现较大的鼓包,靶板内部出现分层。而且若靶板增强织物为单向或平纹织物,在弹体射出一侧,靶板的最外层被撕起一些小窄条,撕起和脱落窄条数量与弹体的冲击速度和弹体的质量有关^[10]。

2 增强体对防弹复合材料性能的影响

2.1 增强纤维性能的影响

在防弹复合材料中,作为增强体的高性能纤维主要包括高强聚乙烯纤维(UHMWPE)、芳纶纤维、碳纤维和玻璃纤维。UHMWPE^[11]的优越性能是由于它的超分子结构决定的,其传播应力波的速度相当于芳纶纤维的两倍^[12]。但 UHMWPE 纤维在高温下使用强度低,其惰性的分子链就很难与通用的树脂基体粘接形成性能优良的复合材料。为提高 UHMWPE 性能, Della^[13]等采用碳纳米管来增强 UHMWPE 纤维以提高其防弹性能。此外,射线等外界因素也间接影响着纤维的防弹性能, Alves^[14]通过加速实验发现 250kGy 的 γ 射线辐射后 UHMWPE 由韧性向脆性的转换,从而影响其防弹性能。芳纶纤维的化学键主要由芳环构成,这种芳环刚性高,使聚合物链呈伸展状态,形成棒状结构,因而纤维具有高模量,并且具有极强的韧性。但芳纶纤维是一种沿轴向排列的有规则的褶皱层结构,所以其横向强度低、压缩和剪切性能差且易劈裂^[15]。玻璃纤维由于韧性较低,在防弹复合材料中一般用于层合板的夹层,碳纤维则因为其较低的压缩强度^[16]限制了它在弹道性能方面的应用。

研究表明^[17], UHMWPE 单位质量能量吸收是 29.9kJ/kg, 碳纤维为 63.5kJ/kg。与编织的芳纶/环氧复合材料相比,编织碳纤维布/环氧树脂复合材料具有较高的能量吸收能力,因此混合脆性的碳纤维与韧性的高性能聚乙烯纤维,能使结构冲击后保持了完整性及稳定性,但能量吸收能力有所下降。张佐光^[18]等人通过对不同面密度的玻纤复合材料靶板、芳纶复合材料靶板以及 Dyneema UD66 复合材料靶板进行了靶试,发现这三种复合材料的吸能都随面密度的增加而增加,但增加速度不同,芳纶纤维和高强聚乙烯纤维明显优于玻璃纤维。

除了高性能纤维外,天然纤维在防弹领域的应用也逐渐受到人们的重视。Wambua^[19]等人曾对黄麻、亚麻、大麻织物增强聚丙烯的复合材料防弹性能进行研究,结果发现亚麻织物增强聚丙烯复合材料的防弹性能竟高于纯金属钢板,但黄麻和大麻织物防弹复合材料的防弹性能稍逊于纯金属钢板。

2.2 二维织物结构的影响

Roylance 等^[20]指出,除了纤维的性能之外,织物的组织对材料的防弹性能同样有着很大的影响。Karahana^[21]等认为,对于机织物,由于交织的作用,纱线必定存在弯曲,当织物表面受到冲击作用的时候,作用力就会产生水平方向以及垂直方向的分量 F_x 和 F_y (如图 2 所示),这会导致纱线之间相对滑移严重,产生更大创伤。

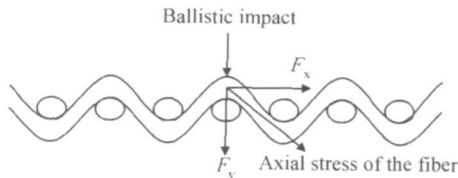


图 2 受弹道冲击机织物纤维中的应力^[21]

Fig. 2 Stress in the fiber of the woven fabric after ballistic impact

自由纤维在拉伸载荷下,受力状态比较简单,仅受到单纯的正应力,而织物中的纤维不仅受到正应力,还受到了横向的拉应力(如图 3 所示)。图中,纤维截面上的拉应力 $\sigma = P / (\pi d^2 / 4) = 4P / (\pi d^2)$,弯曲力矩 $M = Pd/2$,弯曲截面模量 $W_z = \pi d^3 / 32$,弯曲应力 $\sigma_b = M / W_z = (Pd/2) / (\pi d^3 / 32) = 16P / \pi d^2 = 4\sigma$,应力之和 $\sigma = \sigma_b + \sigma = 5\sigma$ (式中 P ——拉力, d ——纤维直径)。可见此时,产生的合应力是拉应力的 5 倍。因此,相对于自由纤维,织物中的纤维更容易产生断裂。

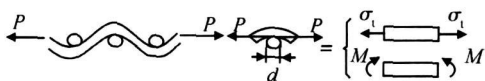


图 3 织物纤维受横向力的分析

Fig. 3 Analysis of the stress in the fiber when horizontal force was applied

由图 3 中可以看出,应力波在纤维中的传递取决于纤维的弯度以及交织点的个数。由于应力波在弯度小的纤维中传播相对于弯度大的快,而应力波传递越快,单位时间内传递能量越多,因此吸能效果越好,所以无编织物(纤维间无交织的织物)较编织、针织以及机织物的防弹性能好。在机织物中,相对于斜纹和平纹织物,缎纹织物的防弹性能最好。而相对于普通的机织物来说,一些针织物的防弹性能较好,如李勇^[22]及梁子青^[23]等分别对经编及纬编双轴向织物的抗冲击性能进行了研究,发现机织布由于弯曲的纱线本身存在应力,使其承受外部剪切力的能力减少,而双轴向

织物纱线呈平行排列,理论上内部应力为零,不会产生机织布中纱线的蠕变和松弛现象,其纱线在受到冲击时所有承载的应力也较机织布大。因此相对于普通机织物,双轴向织物具有对载荷响应快的特点,在防弹中更受人们的青睐。

除二维织物中纤维取向外,织物的单层面密度和层数对复合材料的防弹性能也具有不可忽视的影响。Goldsmith^[24]认为碳纤维/环氧层合板弹道极限速度 V_{50} 是板厚的函数,曲线初始阶段斜率较大,然后随板厚线性增长。增加织物的层数是增加其面密度的有效途径,织物的层数增加,单层织物吸收的能量也会增加,总吸能便大大提高。而且在面密度一定的情况下,层数越多,单层面密度越低,织物的防弹性能越好^[25-27]。当然,若一味地增加织物面密度,既提高了成本,又增加了质量,并不利于防弹复合材料的广泛应用。

2.3 三维织物结构的影响

由于三维编织复合材料细观结构比较复杂,针对三维编织防弹复合材料国内外研究目前还处于探索阶段。Jenq^[28]对玻璃纤维增强环氧四步法三维编织复合材料准静态侵彻性能进行研究,指出了侵彻破坏包括基体开裂、纤维断裂、纤维从试件背面抽拔等模式,并把准静态侵彻破坏模式及破坏准则用于预测动态侵彻的剩余速度和靶板的弹道极限。练军^[29]首次提出了三维编织复合材料精细化的准细观模型,并采用该模型有效地模拟了三维编织复合材料的弹道贯穿过程,获得了纤维和树脂抗侵彻过程中的吸能差异以及子弹受力变化等实验无法得到的中间结果。Barcom^[30]等还对其中含有氮气的三维多孔复合材料(也称泡沫复合材料)进行动态和准静态研究,发现三维泡沫复合材料受到弹道冲击时相对于无孔复合材料有许多优点:①降低了材料的重量;②基体碎裂以后有一定的偏移,增加吸能;③气孔给予了其中的纤维更大的可挠曲空间。因此,防弹材料的比吸能性获得了大幅度的提高。

三维编织复合材料弹道冲击破坏形态与二维织物相比^[31],破坏发生于局部,复合材料横向整体变形较小。细观上正面纤维的断裂面较为光滑,少部分纤维呈原纤化状态,而反面纤维大量表现为纤维的原纤化。相对于层压复合材料,一般认为三维编织复合材料的防弹性能要稍微逊色,主要是由于三维编织复合材料中,纤维的屈曲以及绉缩较多,影响了应力波在其中的传递,导致子弹动能无法被迅速吸收。然而,Flanagan^[32]认为,UHMWPE 纤维增强的三维编织织物的防弹性能要优于其他形式的织物,主要是因为其中的

横向纱线的存在以及其良好的结构整体性,高的抗侵略性能以及低损坏。因此,关于三维编织织物和铺层织物增强的复合材料的防弹性能的比较还有待进一步的考察。

针对缝合复合材料的防弹性能,目前也存在着一些争议。Mouritz^[33]通过对玻纤增强缝合复合材料的研究认为,缝合并不能明显改善材料的弹道性能,主要因为在弹道冲击下缝合织物的抗弯性能和非缝合的类似。然而Hosur^[34]等分别对25.4mm和12.7mm厚的玻璃纤维增强复合材料进行研究,发现相对于非缝合的复合材料,缝合复合材料的弹道性能略有提高,且12.7mm厚的缝合复合材料提高相对明显。Hsin^[35]等认为,在缝合的过程中,当缝合长度大于缝合宽度时,复合材料的防弹性能是同等材料下非缝合或其他缝合形式复合材料抗穿透性能的两倍。

3 基体对复合材料防弹性能的影响

3.1 基体材料性能的影响

防弹纤维复合材料基体树脂的性能及其含量直接影响着冲击侵略过程中纤维的分布和受力状态,从而影响到材料的破坏模式和防弹性能。热塑性树脂韧性良好的特点赋予了复合材料优异的抗冲击性能和抗损伤能力,而热固性树脂基体在复合材料中交联固化为三维网络结构,刚度较高、脆性较大、抗冲击和抗损伤的能力较差^[7]。常用树脂基体主要包括聚氨酯、橡胶、聚乙烯和乙烯基酯树脂。

聚氨酯中由于含有柔性分子链,故具有极好的抗弯、抗冲击性能,此外它还具有较强的剥离强度和化学稳定性以及优异的耐低温性能^[36]。Lodewijk等人^[37]研究发现,使用高性能纤维增强无定形聚氨酯防弹复合材料可以防止由于受到弹击而产生大量的破损对使用者形成的伤害。

橡胶类树脂基体由于富有韧性和抗震性,其防弹性能整体上优于聚氨酯类基体^[38],被大量用于防弹复合材料韧性层中,以提高防弹效果。赵俊山^[39]等人曾在防弹材料中加入橡胶,发现它的存在延长了弹头侵略过程,吸收了更多的弹体能量。由于天然橡胶具有易老化和耐有机溶剂性能不佳等缺点,人造橡胶聚苯乙烯-聚乙炔-聚丁炔-聚苯乙烯(SEBS)在防弹材料中的使用逐渐浮出水面^[40]。俞喜菊^[7]等采用聚乙烯对SEBS弹性体进行改性,结果表明,在SEBS中加入高密度聚乙烯(HDPE)大大提高了复合材料的抗冲击强度,又赋予复合材料良好的加工流变性能及适当

的硬度。

防弹领域采用的聚乙烯类树脂主要有HDPE和低密度聚乙烯(LDPE)。Arazi^[41]等分别使用UHMWPE纤维增强HDPE及LDPE,结果表明HDPE由于发生较多的纵裂而使得其复合材料的防弹性能会高于LDPE基复合材料。

乙烯基酯树脂因为具有酯基,密度低,综合了环氧树脂的粘结性能和饱和树脂的加工工艺。Walsn^[42]在测试UHMWPE纤维增强复合材料的抗弹道侵略的性能中发现,乙烯基酯树脂由于对纤维具有较好的粘结性,因此乙烯基酯复合材料的吸能性高于聚氨酯基复合材料。但它作为热固性树脂(包括环氧树脂和酚醛树脂)所具有的低韧性特点限制了它在防弹复合材料领域的应用。

3.2 基体含量的影响

熊杰^[43]等人通过对芳纶层压复合材料弹道性能的研究,揭示了靶板的弹道极限、弹道性能指数与树脂体积含量的关系。他认为层压板的弹道极限主要取决于织物层数,与树脂体积含量关系不大,然而树脂含量太低或者太高都会对材料的防弹性能产生不利的影 响。一方面树脂体积含量不能太低,防止树脂层过薄造成织物与树脂的界面黏结力过低,从而在子弹的高速冲击下易产生界面粘结破坏;另一方面,树脂体积含量也不能过高,对于具有相同织物层数的层压板,树脂含量增加导致了靶板重量的增加,而且树脂含量偏高,层间的树脂层变厚,而树脂层又是弱相,弹击时容易造成树脂基体内聚破坏,不能充分发挥纤维的作用。Andrew等^[44]认为,在两层织物之间仅需使用一层树脂薄膜,以保证树脂不会浸润到纤维之间或者穿过整层纤维布,这样可以获得良好的弹道性能。同样Cunning^[45]的专利也揭示了在层间铺三层树脂的复合材料的防弹性能要明显逊于层间仅铺一层树脂的复合材料。刘国权等人^[46]还分析了对于不同种类的树脂,增加其体积含量会导致复合材料 V_{50} 值有不同的变化,例如橡胶等热塑性树脂作为基体的防弹复合材料随着基体含量的增加, V_{50} 逐渐趋向于某一个值,而不会降低;而热固性树脂层合板当树脂含量增加到一定程度以后, V_{50} 随基体体积含量的增加而下降。同样,对于不同纤维增强的防弹复合材料,理想树脂含量也是不同的。表2为不同纤维增强防弹复合材料的理想树脂含量。

从表中可以发现,防弹复合材料所采用的树脂体积含量一般都低于30%。主要是是由于防弹复合材料中树脂对靶板刚性和结构整体性的主要贡献仅为树脂与织物表面纤维的粘 结,避免纤维在弹丸冲击下产

表2 不同纤维增强体最佳树脂基体含量^[45-47]Table 2 The best matrix volume fraction of the composites reinforced by different fibers^[45-47]

| Fiber | Matrix | Fabric texture | The best matrix volume fraction |
|--------------|--------------------|----------------|---------------------------------|
| UHMWPE fiber | LDPE | Orthogonality | 26% |
| Kevlar | Phenolic resin/PVB | Plain weave | 14%-20% |
| Glass fiber | Epoxy | Plain weave | 24.70% |

生滑移,充分发挥纤维高强高模特性及传递应力、均衡载荷等功能,树脂自身的碎裂吸能并不是弹道吸能的主要方式。

复合材料的成型压力对材料的防弹性同样具有很大的影响^[48],主要是由于成型压力直接影响了材料的面密度、体密度以及界面强度。成型压力较小时,层与层之间结合不够紧密,当一部分纤维受到冲击时,无法通过层间耦合与其他纤维相互作用,纤维的协同效应差,不利于应力波的传递和冲击能量的耗散,因而吸能较低。随着成型压力的提高,纤维间协同效应越来越强,吸能迅速提高,然而,达到最大值后,继续提高成型压力将使层板弯曲刚度提高,不利于纤维的拉伸变形,使得参与拉伸断裂的纤维数目减少,因此吸能降低。

4 界面对防弹性能的影响

界面的作用是促使纤维和基体形成一个整体,通过它传递应力^[49]。从微观角度看,界面是由表面原子及表面亚原子构成,基体与纤维表面原子的构成取决于原子间的亲和力、原子和基团的大小以及复合材料制成后界面上产生的收缩量。对于复合材料中纤维与基体的结合,一般要满足如下性能:①树脂与纤维的接触角尽可能地小,以达到完全浸润;②树脂黏度越小,越容易浸润;③用物理及化学方法清除“薄弱界面”并赋予适当的粗糙度^[36]。

在防弹机理中,纤维与基体之间的界面脱粘是复合材料吸收弹体能量的一个重要方式^[50]。当界面粘接弱时,裂纹端部出现脱粘,脱粘引起的能量吸收主要取决于粘接强度,当界面粘接强时,纤维被冲断和纤维端部应力松弛吸收能量。因此,适当降低界面粘接强度有利于提高冲击韧性^[46]。然而界面强度过低,基体与纤维的抱合能力会下降,纤维在弹击作用下更易产生滑移,影响防弹性能^[23]。其中,针对表面惰性较强的UHMWPE纤维,人们开展了一系列表面改性研究。Moon^[51]通过氧等离子体刻蚀聚乙烯纤维表面,获得了满意的界面性能;Cohen^[52]将具有一定张力的UHMWPE纤维浸在石蜡油中并加热,发现在149℃

左右时,纤维仅仅是表面膨胀而不会发生溶解,结果纤维表面更加粗糙的同时避免了纤维性能的明显下降,由该纤维增强的乙烯基酯复合材料具备了更加良好的吸能性;郑震^[53]等人发现电晕法可使纤维表面氧化产生微坑、表面交联等,消除了弱边界层,增大了表面能。这些方法均具有两方面的作用,一是通过对纤维表面的蚀刻作用,形成力学咬合力,另一方面是在纤维表面引入含氧基团,增强了纤维与树脂的作用力^[54]。

5 防弹复合材料的结构设计

防弹材料自问世以来就以迅猛的速度向前发展,由早期的普通金属防弹板到单层的纤维增强树脂基体的防弹复合材料,再发展到当今多层次、梯度化结构复合材料。表3为部分国内外关于防弹复合材料的结构设计。

表3 部分防弹复合材料的结构设计方法

Table 3 Structural design of some ballistic composites

| Structure | Angle | Reference |
|---|-------|-----------|
| B ₄ C fiber/ carbon fiber/ PBO fiber | — | [55] |
| Al ₂ O ₃ or B ₄ C fiber/ carbon or glass fiber/ UHMWPE or Kevlar | — | [56] |
| Ceramic/ armor plate/ ceramic/ high strength fiber/ ceramic | — | [57] |
| PE weave fabric/ PE laid fabric/ ceramic/ PE laid fabric/ PE weave fabric | — | [58] |
| Glass fiber or carbon fiber or the mixture/ UHMWPE | — | [56] |
| Ceramic fiber/ carbon fiber/ UHMWPE | ±45° | [59] |
| Armor plate/ high performance fiber fabric | — | [60] |

从表3中不难看出,织物表层多采用压缩强度较强的纤维,而内层多采用拉伸强度较大的纤维。除增强材料之外,树脂基体的性能也是结构设计考虑的重要因素之一。Cunning^[45]认为,当里层纤维的韧性及断裂伸长率远远小于表层纤维,层与层之间所采用的树脂模量不低于48.3MPa时,可获得优良的抗弹性能。Prevorsek^[61]认为在防弹材料的外表缠绕两层互相正交的无纬布,可显著提高材料的弹道侵彻性能。

由于防弹材料正面以纤维压缩、剪切破坏为主,反面以拉伸破坏为主,因此,正面材料单向板应该采用压缩强度较大的纤维如陶瓷纤维、高强玻纤等,背面则应采用拉伸强度较大的纤维,如芳纶、UHMWPE纤维等。背板若采用三维编织增强的复合材料^[62],可减少分层以及穿透现象。考虑到应力波的传递和织物组织及吸能的关系,可采用无编织物作为增强材料。在铺

层过程中,可错配辅层角,有利于材料的防弹,主要由于裂纹穿过某层到达与相邻纤维辅层角不同的层之间的界面时,由于相邻层中纤维织物辅层角的变化,对裂纹沿厚度方向扩散起到了阻碍作用,因而迫使裂纹转向薄弱的界面扩展,这样辅层角不同的靶板受到的损伤相对较小且吸能较多^[63,64]。

6 结束语

防弹复合材料作为高性能防弹材料具有质量轻、成本低和吸能性好等优点,已经广泛应用到防弹的各个领域,并有着广阔的发展前景。但是随着武器装备的不断更新换代,对防弹复合材料也提出了新的挑战,仍有许多问题有待于进一步的解决,主要体现在以下几个方面:

(1) 对增强体的结构进行优化设计,研究增强体材料的结构对复合材料细观结构和宏观性能的影响,尤其是针对三维编织结构的研究还很少。

(2) 分析树脂基体与增强纤维的匹配性,针对不同的结构部位提出合适的基体树脂。

(3) 研究复合材料界面粘接强度与防弹极限速率的对应关系,建立相应的数学模型。

(4) 根据弹块在侵彻过程中复合材料的不同破坏模式,建立系统、详实的数据库,为防弹复合材料的设计提供理论依据。

参考文献

- [1] 梅志远,朱锡,刘燕红,等. 纤维增强复合材料层合板弹道冲击研究进展[J]. 力学进展, 2003, 33(03): 375- 388.
- [2] ABRATE S. Impact on laminated composites: recent advances [J]. Application of Mechanics Review, 994, 47(11): 517- 544.
- [3] ABRATE S. Wave propagation in lightweight composite armor [J]. Journal De Physique IV, 2003, 110: 657- 662.
- [4] TASDEMIRCI A, HALL I W. The effects of plastic deformation on stress wave propagation in multilayer materials[J]. International Journal of Impact Engineering, 2007, 34(11): 1797- 1813.
- [5] 曾黎明. 功能复合材料及其应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [6] 陈利民. 织物特性对防弹复合材料弹道性能的影响[J]. 纤维复合材料, 1995(03): 6- 10.
- [7] 俞喜菊. 防弹纤维复合材料中树脂的性能研究[D]. 上海: 上海交通大学硕士学位论文, 2006.
- [8] NAIK N K, SHRIRAO P. Composite structures under ballistic impact[J]. Composite Structures, 2004, 66(1- 4): 579- 590.
- [9] 李琦, 龚烈航, 张庚申, 等. 芳纶与高强聚乙烯纤维叠层组合对弹片的防护性能[J]. 纤维复合材料, 2004, (03): 3- 5.
- [10] 金子明, 沈峰, 曲志敏, 等. 纤维增强复合材料抗弹性能研究[J]. 纤维复合材料, 1999, (3): 5- 9.
- [11] 孙志杰, 张佐光, 沈建明, 等. UD 75 防弹板工艺参数与弹道性能的初步研究[J]. 复合材料学报, 2001, 18(2): 46- 49.
- [12] 黄玉松, 陈跃如, 邵军, 等. 超高分子量聚乙烯纤维复合材料的研究进展[J]. 工程塑料应用, 2005, (11): 69- 73.
- [13] DELLA C N, SHU D. Mechanical properties of carbon nanotubes reinforced ultra high molecular weight polyethylene[J]. Advanced Structures and Functional Materials, 2008, 136: 45- 50.
- [14] ALVES A, NASCIMENTO L, SURARZE J. Influence of weathering and gamma irradiation on the mechanical and ballistic behavior of UHMWPE composite armor[J]. Polymer Testing, 2005, 24(1): 104- 113.
- [15] 王荣国, 武卫莉, 谷万里. 复合材料概论[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2001.
- [16] S K. Structure and properties of high performance polymeric and carbon fibers an overview[J]. SAMPE quarterly, 1989, 20(2): 3- 8.
- [17] 薛璞, 陶肖明, 余同希. 纺织复合材料能量吸收性能的研究进展[J]. 力学进展, 2000, 30(02): 227- 238.
- [18] 张佐光, 霍刚, 张大兴, 等. 纤维复合材料的弹道吸能研究[J]. 复合材料学报, 1998, 15(2): 74- 80.
- [19] WAMBU A P, VANGRIMDE B, LOMOV S, et al. The response of natural fibre composites to ballistic impact by fragment simulating projectiles[J]. Composite Structures, 2007, 77(2): 232- 240.
- [20] ROYLANCE D, WILDE A, TOCCI G. Ballistic impact of textile structures[J]. Textile Research Journal, 1973, 43(1): 34- 41.
- [21] KARAHAN M. Comparison of ballistic performance and energy absorption capabilities of woven and unidirectional aramid fabrics [J]. Textile Research Journal, 2008, 78(8): 718- 730.
- [22] 李勇, 陈南梁. 机织平纹布和经编双轴向布层合材料抗冲击性能研究[J]. 产业用纺织品, 2004, 22(02): 26- 29.
- [23] 梁子青, 邱冠雄, 周庆, 等. 纬编双轴向织物复合材料的弹道冲击响应[J]. 纺织学报, 2003, 24(03): 217- 219.
- [24] GOLDSMITH W, CHANG H, DHARAN C KH. Quasi static and ballistic perforation of carbon fiber laminates[J]. International Journal of Solids Structures, 1995, 32(1): 89- 103.
- [25] LEE L B, SONG W J, WARD T E. Failure of spectra polyethylene fiber reinforced composites under ballistic impact loading [J]. Journal of Composite Materials, 1994, 28(13): 1202- 1226.
- [26] GABRIELLA F C. A study on the ballistic performance of composites[J]. Macromolecular Symposia, 2006, 239(1): 217- 226.
- [27] 张佐光, 宋焕成, 梁志勇. 复合材料弹道性能的实验与估算[J]. 材料工程, 1994, (6): 28- 31
- [28] JENQ S T, KUO J T, SHEU L T. Ballistic impact response of 3D four step braided glass/epoxy composites [J]. Key Engineering Materials, 1998, 141- 143: 349- 366.
- [29] 练军. 三维编织复合材料弹道侵彻模拟[D]. 上海: 东华大学博士学位论文, 2005.
- [30] BAUCOM J N, ZIKRY M A, QIU Y. Dynamic and quasi static failure evolution of 3D woven cellular composite systems [J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2004, 23(5):

- 471-481.
- [31] 徐静怡, 顾伯洪. 编织复合材料弹道冲击破坏形态及模式[J]. 弹道学报, 2002, 14(2): 39-43.
- [32] FLANAGAN M P, ZIKRY M A, WALL J W, et al. An experimental investigation of high velocity impact and penetration failure modes in textile composites[J]. Journal of Composite Materials, 1999, 33(12): 1080-1103.
- [33] MOURITZ A P. Ballistic impact and explosive blast resistance of stitched composites[J]. Composites Part B-Engineering, 2001, 32(5): 429-437.
- [34] HOSUR M V, KARIM M R, JEELANI S. Studies on stitched woven S2 glass/epoxy laminates under low velocity and ballistic impact loading[J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2004, 23(12): 1313-1323.
- [35] LI H L, KWON Y D, LEM K W, et al. Constructions having improved penetration resistance[P]. USA Patent: 5591933, 1997-01-7.
- [36] 何洋, 梁国正, 吕生华, 等. 超高分子量聚乙烯纤维复合材料用树脂基体的研究进展[J]. 化工新型材料, 2002, 30(10): 29-32.
- [37] LODEWIJK L J, MARIE B J H. Polyurethane composite[P]. PCT: W000/29468, 2000-05-25.
- [38] 沈春银, 章忠秀, 盛季生. 聚合物/纳米粒子复合材料的制备及分散稳定机理[J]. 化学与粘合, 2000(04): 178-181.
- [39] 赵俊山, 王勇祥, 邱桂杰, 等. 结构/功能一体化轻质复合防弹材料研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2005, (01): 22-24.
- [40] 张小林, 程金星, 陶影, 等. 新型热塑性弹性体 SEBS 及其改性的研究进展[J]. 弹性体, 2005, 15(06): 72-76.
- [41] ARAZI Z S, HAREL H, MAROM G. Polyethylene/polyethylene composite materials for ballistic protection[J]. SAMPE Journal (USA), 1997, 33(4): 72-75.
- [42] WALSH T F, LEE B L, SONG J W. Penetration failure of Spectra polyethylene fiber reinforced ballistic grade composites[J]. Key Engineering Materials, 1998, 141-143: 367-382.
- [43] 熊杰, 顾伯洪, 周国泰, 等. 防弹层压复合材料防弹性能的实验研究[J]. 纺织学报, 2003, 24(06): 47-49.
- [44] PARK A D, PARK D, PARK A J. Ballistic laminate structure in sheet form[P]. USA Patent: US7148162B2, 2006-12-02.
- [45] CUNNINGHAM D V. Unique ballistic composition[P]. USA Patent: US7407900B2, 2008-08-05.
- [46] 刘国权, 杨大峰, 梅树清. 防弹用纤维复合材料最佳树脂含量研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2001, (2): 13-15.
- [47] 梁子青, 周庆, 邱冠雄, 等. 超高分子量聚乙烯纤维防弹复合材料的研究[J]. 天津工业大学学报, 2003, 22(2): 6-9.
- [48] 张大兴, 张佐光, 仲伟虹, 等. 成型压力等因素对 UD66 靶板弹道性能的影响[J]. 北京航空航天大学学报, 1999, 25(4): 378-380.
- [49] 胡保全, 牛晋川. 先进复合材料[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.
- [50] 彭刚, 冯家臣, 刘原栋, 等. 纤维增强复合材料抗弹吸能特性研究[J]. 弹道学报, 2007, 19(03): 10-14.
- [51] MOON S I, JANG J. The effect of the oxygen plasma treatment of UHMWPE fiber on the transverse properties of UHMWPE fiber/vinylester composites[J]. Composites Science and Technology, 1999, 59(4): 487-493.
- [52] COHEN Y, REIN D M, VAYKHANSKY L E, et al. Tailoring the interface in polyethylene fiber/matrix composites: surface entangled interfacial layer[J]. Composites Part A Applied Science and Manufacturing, 1999, 30(1): 19-25.
- [53] ZHENG Z, TANG X Z, SHI M W, et al. A study of the influence of controlled corona treatment on UHMWPE fibres in reinforced vinylester composites[J]. Polymer International, 2003, 52(12): 1833-1838.
- [54] 郑震, 唐小真, 施楣梧, 等. UHSPE 纤维的表面改性及其增强复合材料防弹性能的研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2002, 25(6): 3-7.
- [55] 张佐光, 孙志杰, 张大兴. 一种复合材料高效高强度承力防弹板[P]. 中国专利: ZL02256562.0, 2003-10-01.
- [56] 张佐光, 仲伟虹, 孙志杰, 等. 轻质复合材料防弹板[P]. 中国专利: ZL99210986.8, 2001-1-24.
- [57] 吴杨佳君. 一种多层结构复合材料防弹板及防弹装置[P]. 中国专利: ZL200520037954.6, 2006-12-13.
- [58] 陈成泗, 陈冠军. 高性能 PE 材料与陶瓷板复合的防弹胸插板[P]. 中国专利: ZL200520129510.5, 2006-10-18.
- [59] 孙志杰, 张佐光, 张大兴. 一种复合材料防弹承力装甲板[P]. 中国专利: ZL02256789.5, 2003-09-17.
- [60] HARPELL G A, PREVORSEK D C. Penetration and blast resistant composites and articles[P]. USA Patent: 5376426, 1994-12-27.
- [61] PREVORSEK D C, LEM K W, KWON Y D. Constructions having improved penetration resistance[P]. USA Patent: 5545455, 1996-08-13.
- [62] GROGAN J, TEKALUR S A, SHUKLA A, et al. Ballistic resistance of 2D and 3D woven sandwich composites[J]. Journal of Sandwich Structures & Materials, 2007, 9(3): 283-302.
- [63] 黄英, 刘晓辉, 李郁忠. Kevlar 织物增强复合材料层合板冲击损伤特性研究[J]. 西北工业大学学报, 2002, 20(3): 486-491.
- [64] 黄英, 刘晓辉, 李郁忠. S 玻纤织物增强复合材料层合板的冲击损伤特性研究[J]. 机械科学与技术, 1999, 18(03): 483-488.

基金项目: 天津市自然科学基金资助项目 (10JCYBJC02300, 09JCYBJC03700)

收稿日期: 2009-07-27; 修订日期: 2010-04-15

作者简介: 陈磊(1986-), 男, 硕士研究生, 主要从事抗冲击复合材料的研究, 联系地址: 天津市河东区成林道 63 号 (300160), E-mail: xlchenlei@163.com