

文章编号: 1001-1455(2003)06-0509-07

# 叠层靶板弹击实验及弹道侵彻机理的数值模拟研究\*

陈 晓, 周 宏

(总后勤部军需装备研究所士兵系统研究中心, 北京 100088)

摘要: 为了提高军盔等防护装备的防弹性能, 采用非线性动态显式有限元分析软件 ANSYS/LS-DYNA5.6.1 模拟了几种复合材料防弹靶板的抗弹道侵彻过程, 弹头采用标准 1.1g 模拟弹片。结合  $v_{50}$  弹击实验分析了靶板在此类弹击下的破坏机理和吸能方式, 对靶板的选材、铺层顺序、层数和制造工艺等提出合理化建议, 主要是沿靶板厚向应采用非均匀的三段式结构和工艺。

关键词: 爆炸力学; 侵彻; 数值模拟; 叠层靶板

中图分类号: O385

国标学科代码: 130°35

文献标志码: A

## 1 引 言

防弹复合材料是指主要为阻挡弹丸、弹片和射流等侵彻而设计制造的一类复合材料。目前, 国内头盔用纤维主要品种有碳纤维、玻璃纤维、芳纶、高强 PE 纤维和超高分子量聚乙烯等。寻求合适的组合材料及其最佳的复合方式以提高弹道极限速度, 可采用计算机数值模拟结合试验的方法进行破坏机理分析, 并有初步的实验为模拟建模指明方向<sup>[1]</sup>。

$v_{50}$  为各弹速接近且 50% 击穿靶板时全部弹速的算术平均值, 体现了抗弹极限速度, 是通过弹击试验评估材料抗弹性能的重要指标。通过试验逼近, 一般选取所有弹速间最大差异小于 50m/s 且正好半数(三发)击穿靶板的六发弹计算。有限元侵彻模拟时仍采用同样的方法计算  $v_{50}$ 。本文的侵彻实验和模拟计算, 采用最典型的弹体为 1.1g 的钢质标准楔形模拟弹片, 靶板采用面积为约 220cm<sup>2</sup> 的平板形状。

## 2 弹击实验

图 1 为采用中国科学院力学研究所研制的三段直拉式霍普金森压杆装置测量的七种高性能纤维在名义应变速率为 800s<sup>-1</sup> 时的冲击拉伸应力-应变曲线, 其中前四种均为芳纶, 后三种分别为玻纤、碳纤维和超高分子量聚乙烯。可见, 初始模量、断裂应力和延伸率都相差较大。

通过大量的弹击实验可知, 采用比普通结构用复合材料低很多的树脂含量(约 15%)时叠层靶板的抗弹性能最好, 且树脂应只存在于织物之间而不渗透到织物中的纤维上。低含量的基体比例更为突出纤维的作用使结构各层的强度和刚度均尽可能地高; 仅存在于织物层间的树脂固化后使织物各层间

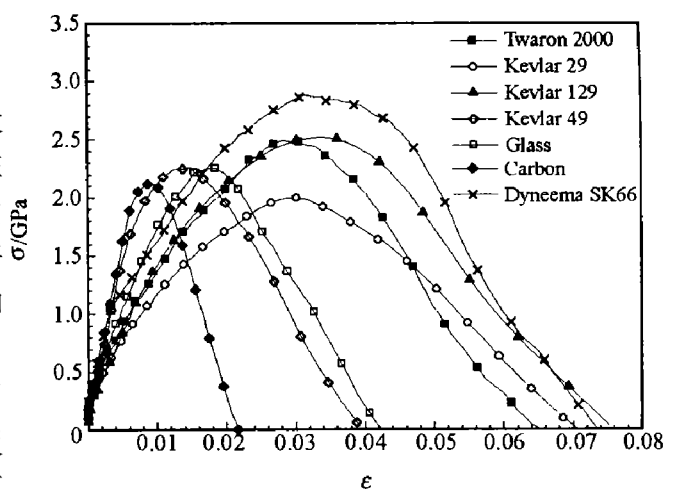


图 1 纤维的拉伸应力-应变曲线

Fig.1 Stretch stress-strain curves of fibers

\* 收稿日期: 2002-12-23; 修回日期: 2003-03-27

作者简介: 陈 晓(1971—), 男, 博士, 高级工程师。

形成沿法向软硬相间的特征而更易发生分层并吸能,而且减弱高速冲击时应力波在层间的来回反射所造成的背面纤维提前断裂。采用17层的芳纶(本文实验和计算均采用 Twaron 2000)织物和合理的用胶量时,由试验, $v_{50}$ 可达到632.6m/s,已经超过了某型军盔的战术技术指标要求。而采用12层芳纶的靶板, $v_{50}$ 为489.7m/s。

表1为玻纤和芳纶织物各10层按三种方式复合后的 $v_{50}$ 值。可见,玻纤在前、芳纶在后的复合顺序有最佳的防弹效果。

表2为玻纤和芳纶织物按照其他各种顺序和层数复合后的 $v_{50}$ 值。其中的数字为层数。可见,同种纤维织物分离铺层的效果并不好,玻纤在前的含量越大或者芳纶在后的含量越大,抗弹效果越好;而就夹心方式比较,芳纶夹在中间比玻纤在中间稍好。

表3为按玻纤在前、芳纶在后的方式排列时实验所得的玻纤/芳纶比例(共20层织物)与靶板

表1 玻纤布/芳纶布的复合顺序与防弹效果

Table 1 Glass fabrics/Twaron fabrics composite sequence and bulletproof effect

复合方式	含胶量/(%)	$v_{50}$ /(m/s)
玻纤在前、芳纶在后	15.1	584.3
芳纶在前、玻纤在后	15.4	550.6
玻纤、芳纶间隔配置	15.3	561.8

表2 玻纤布/芳纶布的铺层结构与防弹效果

Table 2 Glass fabrics/Twaron fabrics laminated configuration and bulletproof effect

复合方式	靶板面密度/(kg/m <sup>2</sup> )	$v_{50}$ /(m/s)
玻纤12/芳纶9	9.44	574.4
玻纤9/芳纶9/玻纤3	9.12	542.8
玻纤6/芳纶9/玻纤6	8.96	553.5
玻纤3/芳纶9/玻纤9	9.76	504.6
芳纶9/玻纤12	8.96	486.7
芳纶6/玻纤12/芳纶3	8.48	489.1
芳纶3/玻纤12/芳纶6	9.44	542.2

表3 玻纤/芳纶比例对防弹性能的影响

Table 3 Influence of Glass/Twaron ratio on bulletproof effect

玻纤含量/(%)	芳纶含量/(%)	含胶量/(%)	靶板面密度/(kg/m <sup>2</sup> )	$v_{50}$ /(m/s)
88	12	15.3	10.30	489.3
76	24	15.8	9.76	523.6
54	46	17.0	9.01	540.3
34	66	16.2	8.44	629.5
26	74	15.8	8.11	633.1

弹道极限 $v_{50}$ 的关系。可见,随芳纶比例的提高,防弹性能不断上升。

图2(a)为芳纶靶板侵彻后的截面形貌照片,下面为入射面,上面为出射面。当弹片穿过靶板时,在出射面的纤维断裂形态杂乱无章,原纤化严重,遮盖了本来较入射面稍大的断口,且织物断口向外翻明显。结构分层相当严重,尤其是在靠近出射面的数层甚至出现肉眼可辨的永久不可回复的分层。为了更清楚地观察侵彻时纤维的断裂模式,为有限元抗弹模拟建模提供依据,采用高分辨率的扫描电镜(SEM)工具获得了芳纶纤维断口的照片,如图2(b)所示。可见,大部分纤维(尤其是出射面)断头原纤化严重,说明弹击时纤维断裂的主要方式为拉伸断裂,这与文献[2]的观点一致。



图2 靶板侵彻形貌和纤维断口的SEM照片

Fig. 2 Pictures of the penetration panel and the broken fibre

### 3 有限元模型

由实验观察知,靶板分层后基体实际上均粘在各层织物的单面上(一般为接近加载位置的表面),受基体的热塑性和细观破裂的影响,与单纯织物不同而在宏观上表现出明显的塑性特征,造成前述的不可回复的分层和断口外翻现象。为了模拟出该类现象,应该建立随动/各向同性的弹塑性各层壳模型,在对应变率影响简化处理的同时,一般假设双线性的应力-应变关系<sup>[3~4]</sup>。本文中采用与应变率无关的各向同性硬化材料模型。另外,由于织物采用平纹结构,设为各向同性材料,由此带来的影响仅是不能识别纤维扭曲和填充的方向而已<sup>[5~6]</sup>。

若忽略胶对结构模量的贡献(胶模量小含量低),则结构沿面内各方向的模量和应力近似等于纤维的模量和应力乘以单向纤维体积含量,则由图 1 可估算出各层织物的材料性质。由于

$$\begin{aligned} \text{纤维体积含量} &= \text{织物等效厚度} / \text{结构单层厚度} \times 100\% \\ \text{织物等效厚度} &= \text{单层织物面密度} / \text{纤维密度} \end{aligned} \quad (2)$$

并且对于平纹织物,在面内两方向受力的各为一半纤维。因此

$$\text{单向纤维体积含量} = \frac{\text{单层织物面密度}}{2 \times \text{纤维密度} \times \text{结构单层厚度}} \times 100\% \quad (3)$$

则可获得各种纤维增强复合材料板的主要材料性质(见表 4),表中  $E$ 、 $\mu$ 、 $\sigma_s$ 、 $E_T$  和  $\epsilon_b$  分别为弹性模量、泊松比、屈服应力、切线模量和延伸率。

表 4 各种层板的计算参数

Table 4 Calculated parameters of every laminated panels

带胶织物和黏结	$E/\text{GPa}$	$\mu$	$\sigma_s/\text{MPa}$	$E_T$	$\epsilon_b$
芳纶	40.0	0.2	788	0	0.0248
玻纤	58.9	0.2	712	0	0.0190
碳纤	105.5	0.2	671	0	0.0090
超高分子量聚乙烯	60.4	0.2	911.5	0	0.0314

网格图见图 3,采用对称结构的四分之一。考虑到纤维主要为轴向拉断,织物不存在横向正应变和剪应变的破坏形式,故各层织物均采用由四节点四边形 Belytschko-Tsay 薄壳单元简化后的薄膜元。基于薄壳经典理论,适合于大位移和大转动,但采用单层单点积分,即积分在单元形心沿壁厚仅有一个积分点,故没有弯曲作用。织物层间效仿文献[7]以八节点六面体实体元模拟黏结,黏结层厚度为 0.45mm。弹片为刚体;织物和层间黏结均采用带失效的材料模式,并遵从最大应变理论,织物层的强度判据式为

$$-\epsilon_b < \epsilon < \epsilon_b \quad (4)$$

式中:  $\epsilon$  为织物面内任意方向的正应变。薄膜单元附作于实体单元的上下表面上,节点共用,保证了薄膜层和实体元间的自由度约束,通过黏结实体元的失效即可模拟相临织物层间从粘到分的全过程。LS-DYNA 所提供的面-面固连失效接触类型由于只适于初始共面的接触面,故不能在此替代层间黏结。由于各层薄膜壳单元实际上模拟分层后仍为单面带胶的织物层(而非仅是织物本身),故层间黏结仅为模

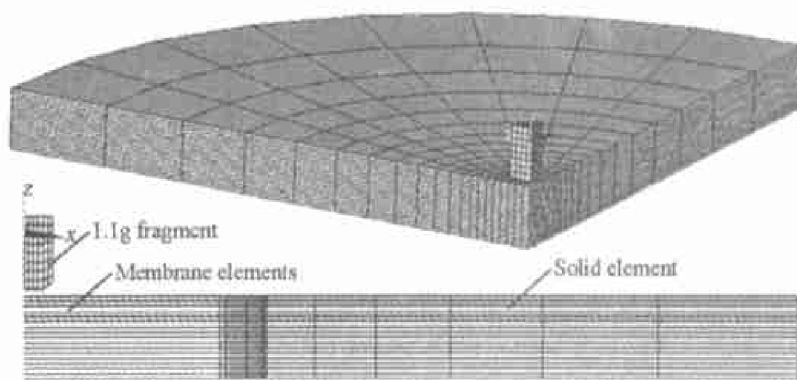


图 3 弹道侵彻模型

Fig.3 Ballistic penetration model

拟层间分层现象而虚设,并非完全代表真实的基体。层间黏结单元也采用各向同性硬化双线性弹塑性模式,密度、模量及强度均尽量小,以减小对结构整体惯性、刚度和强度的附加,并获得较接近于试验所见的分层面积。靶板分网在靶面内分区进行,在靶板中心比弹头面积稍大的圆形区域内采用密集且较均匀的自由网格<sup>[8]</sup>,保证了计算精度;而在其外的大面积圆环区域采用汇聚型映射网格,以减少计算量。在弹片和靶板间定义面-面侵彻接触以模拟贯穿,当接触时若发生材料失效,接触可依旧在剩余的单元中进行;在各层薄膜壳单元之间定义面-面自动接触,可自动确定壳单元接触表面的方向,以保证当层间黏结失效删除后织物间不发生穿透;接触面间再定义适当的摩擦和粘性阻尼。

面-面接触算法采用对称罚函数法<sup>[9]</sup>。将可能相互接触的两单元表面分为主片和从片,其上节点称为主节点和从节点。在每一时步先核查各从节点  $n_s$  是否穿透主片  $S_i$ ,如果穿透则在  $n_s$  与  $S_i$  之间引入一个较大的界面接触力  $f_s$ ,即罚函数值为

$$f_s = -lk_i n_i \quad (5)$$

$$k_i = fK_i A_i^2 / V_i \quad (6)$$

式中:  $l$  为穿透深度,  $n_i$  为在接触点处  $S_i$  的外向法线单位矢量,  $k_i$  为  $S_i$  的刚度因子,  $K_i$ 、 $V_i$  和  $A_i$  分别为  $S_i$  所在单元的体积模量、体积和主片面积。对称罚函数法按同样算法再对各主节点处理一遍。若计算中发生明显穿透,可以放大罚函数值或缩小时步长来调节。

#### 4 算例与分析

17层和12层的芳纶靶板弹片入射速度和计算所得的出射速度关系见图4~5。可见,计算所得的  $v_{50}$  值比试验值偏小,这是由于 LS-DYNA 的侵彻模拟时将失效的单元从模型中完全删除,这与实际情况有一定差异。另外由图可见,曲线在刚好穿透的附近斜率相当大,表明贯穿体系出现类似失稳的现象,弹体不穿透则已,一旦穿透则结构局部崩溃,未穿透时用以吸收转换弹体动能的结构形变能随之剧减,因此在临界段初始弹速的细微提高会造成剩余弹速的爆长以及侵彻位形的较大变化。在靶板层数较多时,这种现象更为明显。这在文献[3]中也有类似论述,入靶速度  $v_s$  和出靶速度  $v_r$  的关系可用经验公式拟合

$$v_r = \alpha(v_s^p - v_{50}^p)^{1/p} \quad (7)$$

式中:  $\alpha$  和  $p$  为常数。若假设弹头穿透靶板的动能耗失不随弹速变化,则  $p=2$ , 因为有以下关系

$$\frac{1}{2}mv_r^2 = \frac{1}{2}mv_s^2 - \frac{1}{2}mv_{50}^2 \quad (8)$$

式中:  $m$  为弹体质量。实际上,由于随着弹速的增长,摩擦生热更强,弹头的动能耗失一般会随之增长,故  $p$  一般大于2,且在靶板层数较多时,这种增长更明显。因此,(7)式曲线在出靶速度为零时斜率为无穷大,且以图4~5中的虚线为渐近线,也即随着入靶弹速的增长,出靶速度与之越接近。图6为计算所得的芳纶靶板的  $v_{50}$  值与织物层数  $N$  的关系,可见,靶板的极限弹速与织物层数几乎为线性关系。

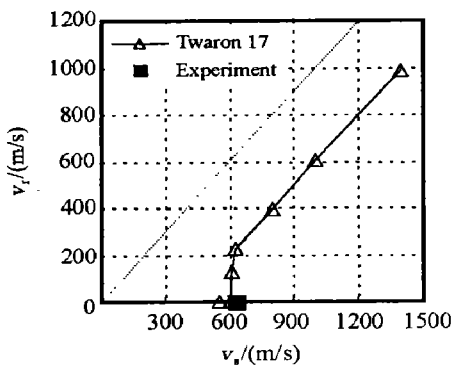


图4 芳纶17靶板入靶、出靶速度  
Fig.4 In/out velocity of Twaron17

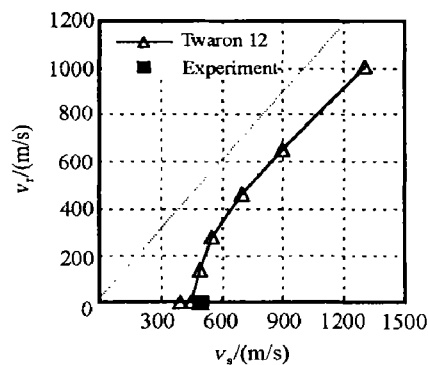


图5 芳纶12靶板入靶、出靶速度  
Fig.5 In/out velocity of Twaron12

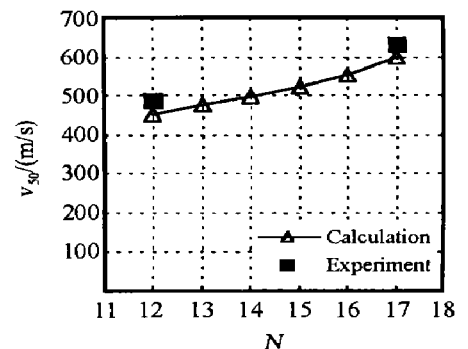


图6 芳纶靶板  $v_{50}$  值与层数  
Fig.6 Twaron panel  $v_{50}$  vs laminated layer numbers

图 7 为弹体的  $z$  向加速度, 由于材料在厚度方向前约三分之二段为逐层破坏, 造成曲线锯齿形的波浪起伏; 但在  $30\mu\text{s}$  后进入后三分之一段, 由后述知此时材料已提前拉断, 并不能起到抗弹作用, 故曲线趋于平直。另外, 靶板在初始阶段承受的冲击力过大, 使受力均衡并延迟最大波峰的出现, 有可能提高靶板的防弹性能。图 8~9 分别为芳纶 17 靶板在  $610\text{m/s}$  和  $600\text{m/s}$  弹速下的侵彻和分层位形演化, 为贯穿和非贯穿两种情况。可见, 在如此小的弹速增长下, 侵彻位形发生了较大的变化, 其原因前面已有论述。另外, 可以由位形演化图分析靶板的破坏过程。在临界击穿弹速的附近, 靶板

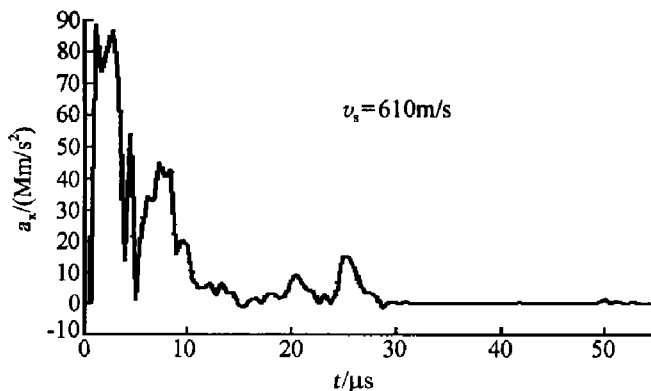


图 7 芳纶 17 的弹片  $z$  向加速度  
Fig.7 Perforation acceleration along  $z$  axis of Twaron17 panel

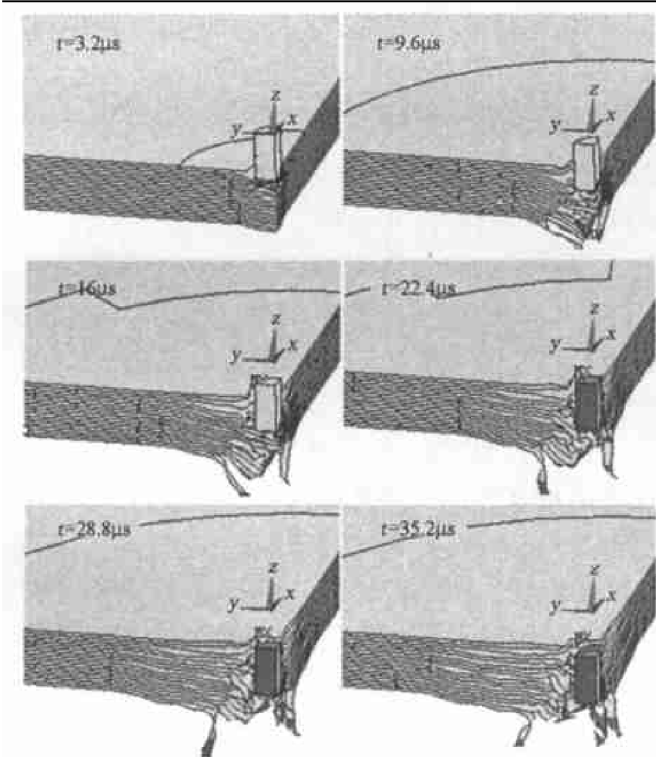


图 8 芳纶 17 靶板在  $610\text{m/s}$  弹速下的侵彻仿真  
Fig.8 Penetration simulation of Twaron17 panel under  $610\text{m/s}$  bullet velocity

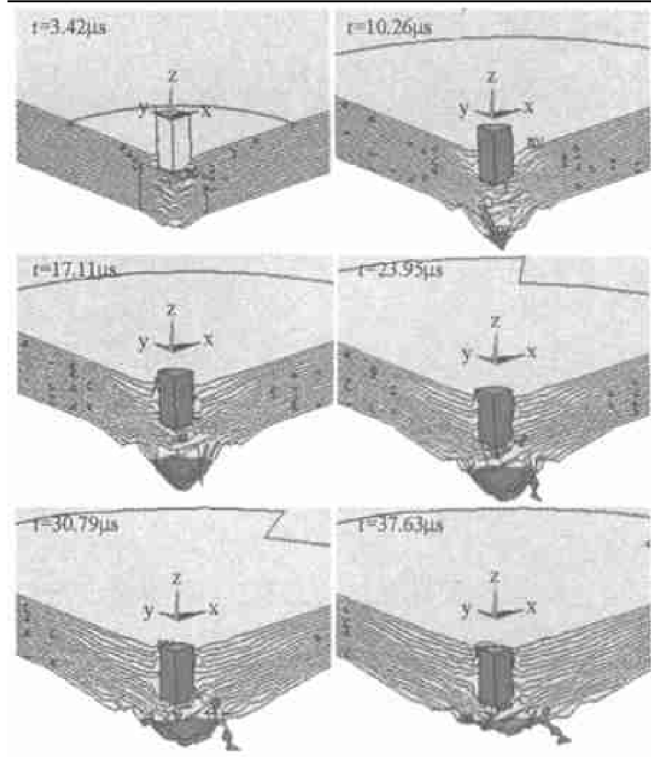


图 9 芳纶 17 靶板在  $600\text{m/s}$  弹速下的侵彻仿真  
Fig.9 Penetration simulation of Twaron17 panel under  $600\text{m/s}$  bullet velocity

在入射面由于与弹体的接触首先造成破坏, 这个区域占厚度的约三分之一, 为直接接触破坏。紧接着在背射面提前出现分层、破坏(不管最终击穿与否), 破坏的面积、幅度甚至超过了入射面, 此区域也占厚度的三分之一, 为间接破坏; 并且在背射面被撕出许多小窄片, 断面外翻严重, 这和试验所见一致。实际上, 对于弹性体而言, 其  $z$  向传播的纵波和横波分别有关系<sup>[10]</sup>

$$w/c_1 = \varepsilon_z, \quad w/c_2 = \gamma_{zx} \tag{9}$$

式中:  $\varepsilon_z$  和  $\gamma_{zx}$  分别为正应变和剪应变,  $c_1$  和  $c_2$  分别为纵波和横波的波速, 满足

$$c_1 = \sqrt{\frac{E(1-\mu)}{(1+\mu)(1-2\mu)\rho}}, \quad c_2 = \sqrt{\frac{E}{2(1+\mu)\rho}}, \quad c_1 > c_2 \tag{10}$$

式中:  $\rho$  为弹性体的密度。(9)式说明质点的运动速度  $w$  总是远远小于弹性波的传播速度, 而由于弹速与靶板材料的运动速度大致相当, 故弹速也远小于弹性波速。因此, 背射面的提前分层主要是受到  $z$

向传播的纵波作用而造成了黏结实体元的失效,而背射面织物的提前破坏主要是受到 $z$ 向传播的横波作用而受拉断裂,并且分层比纤维断裂先发生。由(10)式可知,不同材料的波速不同,故而靶板层间所具有的沿法向软硬相间特征,不但易形成分层并吸能,并且通过界面反射作用可有效阻碍应力波的法向传播,在一定程度上限制了靶板背射面织物的提前受拉断裂。在厚度方向中间的约三分之一区域,织物最后破坏,它是阻止弹体贯穿的最后一道防线。故可认为,防弹靶板受弹面数层为直接与弹体接触时,由于来不及分层,而在背后约束和弹体冲击的联合作用下发生的破坏,其破坏形式与结构用复合材料类似;对于背弹面数层,由于结构局部刚度下降以及法向应力波造成提前分层后,形成了背后较大鼓包,而致使背面织物被提前拉断,拉断后的织物又在惯性的作用下急速外翻将断口扩大,由于这数层并不直接参与接触弹体,一旦拉断后对强度再无贡献,其作用仅为前期对刚度作出贡献;中间数层织物由于在弹体到来时已经完成分层,且又不处在鼓包的外层而导致提前绷断,故类似于多层软性织物层,是防止弹体贯穿的主要部位。

因此,针对以上的破坏机理分析,可在此对靶板各层选材和铺层方式作出一般性的推荐。在入射面厚向三分之一的织物层间,若尽量减小基体的含量,可使其更易发生分层而在弹体直接冲击下通过切向滑移而分散应力集中以避免骤然破坏,而对织物材料的抗拉强度要求相对较低,所以应选取价格较便宜而刚度又较高的玻纤或碳纤材料,在几乎不影响靶板防弹性能的同时提高了刚度降低了成本。在背射面少数层,织物的延伸率比其单独的刚度和强度指标均更重要,因为若提前绷断,对结构的强度并无丝毫贡献,相反由于造成应力集中,可能带来负面的影响,所以应选用超高分子量聚乙烯纤维或高延伸率的芳纶纤维,并采用相对较多的含胶量以延迟并抑制分层的出现。另外,在此提出一个大胆的建议,对于背射面织物可以采用在纺织时适当减小丝纱张力的工艺而使织物处于微松弛状态,也即为弹击时的鼓包出现留下余量。在厚度方向中间的数层,是通过应变能来抵消弹体动能的关键部位,故应选取强度很高的材料,如芳纶等。总之,本文中提倡,对军盔等防弹材料,各层结构的纺纱工艺、涂胶工艺、选材等均应按厚度方向进行非均匀分段(三段)考虑,而不宜采用传统的方法整盔笼统处理。

现对上述选材和排序建议进行验证和扩充,设仍采用厚度方向均匀的制作工艺。表5即为采用玻纤、芳纶、碳纤、超高分子量聚乙烯纤维的优化后的17层叠层组合时计算所得 $v_{50}$ 值。可见,按这些铺层方式,一般都可得到经济而良好的防弹效果,而芳纶材料的价格比其他材料贵得多,且短期内尚难以实现国产化。例如采用玻纤5/芳纶12与全芳纶的防弹效果实际上相差无几。但采用碳纤5/超高分子量聚乙烯12的组合效果比预想的差很多,表明延伸率差异太大的两种材料不宜组合在一起。侵彻动画

演示分析知这是因为脆性(在入射面)和韧性材料之间的界面由于应力集中而提前大面积破坏后,脆性材料不再为承载区域贡献刚度而吸能,由其分层面积较小即可证实这一点。另外,通过其他大量模拟分析可得出更一般性的结论,即脆性碳纤不适于用作防弹材料。而玻纤5/芳纶6/超高分子量聚乙烯6的组合方式从防弹效果和制作成本两方面综合考虑是表5中最为理想的,其弹道极限速度甚至超过了玻纤5/超高分子量聚乙烯12的组合,说明按强度关系在厚度方向采用“弱-次强-强”三段组合可以得到最佳的防弹效果(优于两段组合)。

## 5 结论与展望

在观察弹击试验效果的基础上建立了简约的弹道侵彻有限元模型,通过大量的数值模拟仿真和细致的破坏机理分析,定性地从选材、层序、涂胶工艺、纺纱工艺等方面提出了增强防弹叠层靶板抗弹性能的合理化建议,尽管在工艺方面的具体细节上还有待进一步实验验证进而完善,但所得到的最重要的结

表5 17层靶板铺层结构与计算所得防弹效果

Table 5 Laminated configuration and calculated bulletproof effect of 17 layers laminated panels

叠层方式	$v_{50}/(\text{m/s})$
玻纤 5/芳纶 12	595
玻纤 5/超高分子量聚乙烯 12	645
玻纤 5/芳纶 6/超高分子量聚乙烯 6	656
碳纤 5/芳纶 12	597
碳纤 5/超高分子量聚乙烯 12	596
玻纤 5/超高分子量聚乙烯 6/芳纶 6	653

论却是已有所证实且行之有效的,即沿靶板厚度方向应采用非均匀的三段式结构和工艺。

### 参考文献:

- [1] 陈晓. 复合材料装甲力学及单兵头面防护工效研究[D]. 北京: 清华大学, 2001.
- [2] 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, 16(3): 5—9.  
JIN Zi-ming, SHEN Feng, QU Zhi-min, et al. Research on ballistic resistance capability of fiber reinforced composites [J]. Fiber Composites, 1999, 16(3): 5—9.
- [3] Nandlall D, Pageau G, Bourget D, et al. Numerical and experimental study of the ballistic resistance of polycarbonate armour systems[A]. Reinecke W G. Proc 18th International Symposium on Ballistics[C]. San Antonio, Texas, U: Technomic Publishing Co Inc, 1999: 1065—1072.
- [4] Pageau G, Nandlall D, Bolduc M, et al. Fragmentation resistance of polycarbonate and acrylic: A numerical and experimental assessment[A]. Gotts P L, Kelly P M. Proc Personal Armour Systems Symposium 96 proceedings[C]. Colchester, UK: Defence Clothing & Textiles Agency, Science & Technology Division, 1996: 257—262.
- [5] Vinson J R, Zukas J A. On the ballistic impact of textile armor[J]. Journal of Apply Mechanics, 1975, 25(6): 263—268.
- [6] Taylor W J Jr, Vinson J R. Modeling ballistic impact into flexible materials[J]. AIAA Journal, 1990, 28: 2098—2103.
- [7] Johnson G R, Beissel S R, Cunniff P M. A computational model for fabrics subjected to ballistic impact[A]. Reinecke W G. Proc 18th International Symposium on Ballistics[C]. San Antonio, Texas, US: Technomic Publishing Co Inc, 1999: 962—969.
- [8] 美国 ANSYS 股份有限公司北京办事处. ANSYS 建模及分网指南[Z]. 2000: 105.
- [9] 北京理工软件技术开发有限公司. ANSYS/LS-DYNA 算法基础和使用方法 5.6 版[Z]. 2000: 62—67.
- [10] 徐芝纶. 弹性力学·上册[M]. 第 2 版. 北京: 高等教育出版社, 1988: 387—391.

## Numerical simulation of ballistic penetration of bulletproof laminated composite panels

CHEN Xiao<sup>\*</sup>, ZHOU Hong

*(The Quartermaster Research Institute of the General Logistics Department of CPLA,  
Beijing 100088, China)*

**Abstract:** Nonlinear dynamic explicit finite element analysis software ANSYS/LS-DYNA version 5.6.1 was used to simulate the penetration of several kinds of bulletproof composite panels. The simulating projectiles are standard 1.1g fragments. The optimization of material properties, layer numbers and helmet material processing are considered. The improvement of the ballistic resistance capability of the current military helmets is proposed. The damage histories of the panels are obtained from both numerical simulation and  $v_{50}$  ballistic experiments. The failure and energy absorption modes of the composite panels are discussed too. The suggested bulletproof panel structure is three thickness segments and non-homogeneous.

**Key words:** mechanics of explosion; penetration; numerical simulation; laminated composite panel

---

\* Corresponding author: CHEN Xiao

E-mail address: c-xiao@263.net