

# 纤维增强复合材料靶板抗钢球 贯穿的工程分析方法研究\*

李永池, 王志海, 王肖钧, 胡秀章

(中国科学技术大学 近代力学系, 合肥 230027)

(刘人怀推荐)

**摘要:** 介绍了钢球贯穿纤维增强复合材料靶板的一维工程近似分析方法. 钢球被假定为刚体, 复合材料靶板被近似为横观各向同性弹塑性材料. 通过将球腔膨胀模型和柱腔贯穿相结合的方法, 提出了一种改进的复合材料靶板抗贯穿的工程近似分析方法. 利用该方法, 对三维芳纶纤维编织 (3DKW) 复合材料靶板开展了抗钢球贯穿的工程近似分析, 计算结果与实验结果一致性较好; 并进一步讨论了计算中材料主要参数对靶板抗贯穿规律的影响.

**关键词:** 纤维增强复合材料; 工程分析; 横观各向同性弹塑性材料; 球腔膨胀模型; 柱腔贯穿模型

**中图分类号:** O315      **文献标识码:** A

## 引 言

近年来, 纤维增强复合材料被广泛地应用于防弹器件<sup>[1]</sup>, 如复合装甲、防弹衣和防弹车等. 然而, 由于侵彻问题是一很复杂的科学难题, 受很多因素影响, 如弹型、弹体的几何尺寸以及靶板的本构、断裂破坏行为等, 所以目前研究工作大多集中在实验方面<sup>[2]</sup>, 仅能提供一些经验公式, 费时费钱, 且不易更好分析问题的物理本质. 随着计算机数值方法和大型计算程序的进步, 对贯穿问题的数值模拟工作得到长足发展, 数值方法给出了合理的计算物理图像, 但常常不能简明清晰地给出各种参数对贯穿问题的影响. 而近似分析方法, 诸如球腔膨胀模型和柱腔贯穿模型, 它们由于其简明、清晰和高效, 能够很方便地找到与侵彻贯穿问题相关的影响因素<sup>[3-4]</sup>. 本文在前人研究成果<sup>[5-7]</sup>的基础上, 将球腔膨胀模型和柱腔贯穿模型相耦合提出了一种改进的纤维增强复合材料靶板抗钢球贯穿的工程近似分析方法. 在球腔膨胀模型下, 复合材料的屈服准则仅依赖于厚度方向的屈服应力, 通过区域平均法计算得到了材料的浮动锁应变, 并进一步得到球腔压力; 接着提出了柱腔贯穿模型的运动学修正, 引入了靶材屈服强度的各向异性修正, 以及纤维强度的弱化处理; 最后通过积分钢球的运动方程, 系统地开展了贯穿问题的分析计算并分析了主要材料参数对贯穿问题的影响, 计算结果与作者所开展的钢球贯

\* 收稿日期: 2008-11-18; 修订日期: 2008-12-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (10572134); 瞬态物理国家重点实验室基金资助项目 (5145303205ZK0101)

作者简介: 李永池 (1941—), 男, 教授, 博士生导师 (联系人. Tel: + 86-551-3606734; E-mail: ycli@ustc.edu.cn).

穿 3DKW 靶板实验结果符合良好.

## 1 靶材的理论模型

在钢球系列贯穿纤维增强复合材料靶板实验中, 由于钢球的刚度远大于靶板材料, 可近似为刚体(由回收的弹丸来分析, 钢球基本无变形). 实验中靶板为 3DKW 复合材料靶(关于 3DKW 复合材料详细信息参见附录), 严格来说是一种正交各向异性材料, 但由于实验结果表明, 面内不同方向纤维的强度差异不是很大, 3DKW 可近似作为一种横观各向同性弹塑性材料来处理, 旋转对称轴沿靶板厚度方向, 这为准一维工程分析方法奠定了基础.

根据 Hill 理论<sup>[8]</sup>, 各向异性材料的屈服准则为(考虑随动硬化)

$$F \equiv \frac{(\sigma_{11} - \alpha_{11})^2}{Y_{11}^2} + \frac{(\sigma_{22} - \alpha_{22})^2}{Y_{22}^2} + \frac{(\sigma_{33} - \alpha_{33})^2}{Y_{33}^2} + \frac{(\sigma_{12} - \alpha_{12})^2}{Y_{12}^2} + \frac{(\sigma_{23} - \alpha_{23})^2}{Y_{23}^2} + \frac{(\sigma_{31} - \alpha_{31})^2}{Y_{31}^2} + Y_{11}(\sigma_{22} - \alpha_{22})(\sigma_{33} - \alpha_{33}) + Y_{22}(\sigma_{33} - \alpha_{33})(\sigma_{11} - \alpha_{11}) + Y_{33}(\sigma_{11} - \alpha_{11})(\sigma_{22} - \alpha_{22}) - 1 = 0, \quad (1)$$

其中

$$Y_{11} = \frac{1}{Y_{11}^2} - \frac{1}{Y_{22}^2} - \frac{1}{Y_{33}^2}, \quad Y_{22} = \frac{1}{Y_{22}^2} - \frac{1}{Y_{33}^2} - \frac{1}{Y_{11}^2}, \quad Y_{33} = \frac{1}{Y_{33}^2} - \frac{1}{Y_{11}^2} - \frac{1}{Y_{22}^2},$$

式中,  $Y_{ii}$  为  $i$ -方向上一维应力下的屈服应力,  $Y_{ij}$  ( $i \neq j$ ) 为相应条件下的纯剪屈服应力;  $\alpha_j$  为随动硬化参数, 在本文中未予考虑. 对横观各向同性材料的球对称变形, 当各向同性方向位于球面内并且以  $r = X_1$  为第一方向且为旋转对称轴时, (1) 式可简化为

$$F \equiv \frac{(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2}{Y_{11}^2} - 1 = 0 \text{ 或 } \sigma_r - \sigma_\theta = Y_{11} \equiv Y_1, \quad (2)$$

故在球腔膨胀模型中, 靶材的屈服准则仅依赖于厚度方向的屈服应力. 但由于在钢球贯穿造成球腔膨胀问题中, 只有在钢球正下方时(见图 1)靶材的变形才与球对称膨胀的情形相一致, 因而我们对靶材抗贯穿时, 球腔表面各处的屈服强度引入如下的各向异性修正:

$$Y_1(\varphi) = Y_{11} - (Y_{11} - Y_{22}) \cos \varphi, \quad (3)$$

式中,  $Y_{11}$ ,  $Y_{22}$  分别是靶板球腔膨胀变形的径向和球面方向的压缩屈服应力, 当  $\varphi = \pi/2$  时,  $Y_1 = Y_{11}$ ; 当  $\varphi = 0$  时,  $Y_1 = Y_{22}$ .

对横观各向同性靶材当以  $r = X_1$  为第一方向且为旋转对称轴时, 其弹性本构关系如下:

$$\begin{cases} \varepsilon_{11} = a_{11} \sigma_{11} + a_{21} \sigma_{22} + a_{21} \sigma_{33}, & \varepsilon_{22} = a_{21} \sigma_{11} + a_{22} \sigma_{22} + a_{23} \sigma_{33}, \\ \varepsilon_{33} = a_{21} \sigma_{11} + a_{23} \sigma_{22} + a_{22} \sigma_{33}, & \varepsilon_{31} = a_{55} \sigma_{31}, \\ \varepsilon_{12} = a_{55} \sigma_{12}, & \varepsilon_{23} = (a_{22} - a_{23}) \sigma_{23}, \end{cases} \quad (4)$$

其中

$$\begin{cases} a_{11} = \frac{1}{E_1}, & a_{22} = \frac{1}{E_2}, & a_{21} = -\frac{\nu_{21}}{E_2}, & a_{23} = -\frac{\nu_{23}}{E_2}, \\ a_{55} = \frac{1}{2G_{21}}, & a_{22} - a_{23} = \frac{1}{2G_{23}}, & G_{23} = \frac{E_2}{2(1 + \nu_{23})}, \end{cases} \quad (5)$$

$E_1$ ,  $E_2$ ,  $\nu_{21}$ ,  $\nu_{23}$ ,  $G_{21}$ ,  $G_{23}$  是相应方向的弹性模量、Poisson 比和剪切模量, 独立参数为  $a_{11}$ ,  $a_{22}$ ,  $a_{23}$ ,  $a_{21}$ ,  $a_{55}$  或  $E_1$ ,  $E_2$ ,  $\nu_{21}$ ,  $\nu_{23}$ ,  $G_{21}$ . 由式(4)可以得到体应变  $\varepsilon$  和平均应力  $\sigma$  的关系:

$$\varepsilon = \frac{1}{K} \sigma + \frac{1}{\alpha} \sigma_{11}. \quad (6)$$

假定在塑性变形阶段, 体积压缩律(6) 依然成立, 则联立屈服准则(2) 和式(6) 有

$$\varepsilon = \left[ \frac{1}{K} + \frac{1}{\alpha} \right] \sigma + \frac{2}{3\alpha} Y_1, \quad (7a)$$

其中

$$1/K = 3(1 - \nu_{21} - \nu_{23})/E_2, \quad 1/\alpha = 1/E_1 - (1 + \nu_{21} + \nu_{23})/E_2. \quad (7b)$$

式(7a) 即为靶板抗贯穿过程中的体积压缩律. 为了考虑靶板在贯穿过程中产生的纤维断裂和脱层破坏对靶板的抗压屈服强度的影响, 引入弱化因子  $D$ , 即假设贯穿过程中抗压屈服强度的弱化满足如下关系:

$$Y_1(q) = Y_1(1 - D) = Y_1 \left[ 1 - \frac{q}{H} \right], \quad (8)$$

$q$  为钢球穿深,  $H$  为靶板厚度. 式(8) 的意思是将纤维断裂的相对靶厚作为一种对厚度方向各层微元的平均损伤量的描述, 这使我们避免了分别精确地考虑每一个厚度方向微元的损伤弱化情况. 考虑到侵彻初期的损伤很小, 在近似分析计算中仅当侵深超过一个所谓的临界侵深  $q_D$  (纤维开始断裂) 时, 才考虑弱化,  $q_D$  值可以由靶板横向纤维的断裂应变和钢球直径间的几何关系来确定.

## 2 基本假定和基本方程

考虑图 1 所示的钢球对横观各向同性复合材料靶的垂直贯穿问题. 为了简化问题, 我们认为贯穿过程中弹体所受阻力主要是由靶的球形扩张变形所产生的球壁径向压力所引起的, 而弹体垂直运动的作用只是改变每个球腔微元的径向速度和加速度, 从而改变弹的阻力在不同弹表元素上的分布. 这样我们就把球腔扩张和柱腔垂直贯穿的复杂耦合作用简化为弹体垂直运动对球腔对称膨胀过程的运动学修正, 从而将问题化为准一维问题. 这里我们对此贯穿问题作如下假定<sup>[9]</sup>:

- 1) 不考虑弹体的变形而将之视为刚体;
- 2) 忽略弹体和靶材之间的摩擦力;
- 3) 假定靶材始终处于塑性变形状态, 而且满足横观各向同性材料的屈服准则;
- 4) 在冲击压缩加载时, 靶材的体积变形满足横观各向同性材料的体积压缩规律, 而在其后的卸载时, 体积变形将锁定不变, 即材料满足浮动锁模型.

在这些基本假定下, 靶材球腔膨胀的基本方程组可写为

$$\rho_0 r^2 \ddot{u} = (r + u)^2 \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} - (\sigma_r - \sigma_\theta) \frac{\partial(r + u)}{\partial r}, \quad (9)$$

$$\frac{\rho_0}{\rho} r^2 = (r + u)^2 \frac{\partial(r + u)}{\partial r}, \quad (10)$$

$$\sigma = K \varepsilon - \frac{K}{\alpha} \sigma_r, \quad (11)$$

$$\sigma_r - \sigma_\theta = Y_1. \quad (12)$$

子弹的运动方程:

$$M \dot{q} = P_z, \quad (13)$$

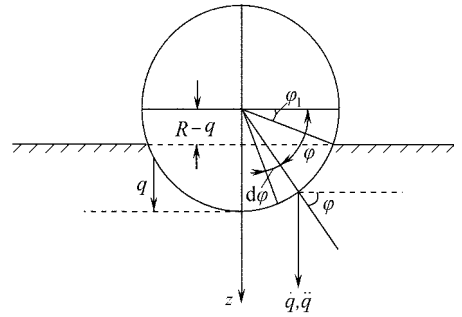


图 1 钢球正贯穿靶板示意图

其中,  $r$  是 Lagrange 坐标,  $u$  是径向位移,  $\rho_0$  和  $\rho$  分别是靶的初始和瞬时密度,  $\sigma_r$  和  $\sigma_\theta$  分别是靶材中的径向真应力和周向真应力(以压为正),  $Y_1$  是靶材沿厚度方向的压缩屈服应力,  $M$  为球体质量,  $q$  为侵彻深度,  $P_z$  为球体受到的阻力, “ $\cdot$ ” 表示随体导数,  $v$  和  $\dot{u}$  分别是径向速度和加速度; 对靶材我们将采用浮动锁模型, 认为当弹的撞击在靶中产生径向塑性激波过后, 激波后方的压缩体应变  $\varepsilon = 1 - \rho_0/\rho$  在出现卸载时也将锁定不变, 称为锁应变。

对方程(9)和(10)在区间  $[0, r]$  上积分, 并利用屈服准则(12)和浮动锁模型假定, 靶材的径向应力  $\sigma_r(r, t)$  和平均应力  $\sigma$  可求得如下:

$$\begin{cases} \sigma_r(r, t) = p(t) - \frac{2}{3} Y \ln \left[ 1 + \frac{\rho_0 r^3}{\rho R^3} \right] + \rho (R\dot{R} + 2R\dot{\varepsilon}) \left[ \left( 1 + \frac{\rho_0 r^3}{\rho R^3} \right)^{-1/3} - 1 \right] - \\ \frac{\rho}{2} R^2 \left[ \left( 1 + \frac{\rho_0 r^3}{\rho R^3} \right)^{-4/3} - 1 \right], \\ \sigma = \sigma_r(r, t) - \frac{2}{3} Y_1, \end{cases} \quad (14)$$

其中,  $\rho$  表示  $[0, r]$  上的平均锁密度,  $\varepsilon = 1 - \rho_0/\rho$ , 由激波阵面守恒方程<sup>[7]</sup>有  $\sigma_r(h) = \rho_0 \varepsilon^{1/3} R^2$ , 并联立(14)式, 可得  $r = R$  处的腔壁压力  $p(t)$  为

$$p(t) = -\frac{2}{3} Y_1 \ln \varepsilon + \rho (1 - \varepsilon^{1/3}) R\dot{R} + \rho \left( \frac{3}{2} - \frac{1}{2} \varepsilon^{4/3} - \varepsilon^{1/3} \right) R^2. \quad (15)$$

设  $\sigma$  表示激波后方的总体平均应力

$$\sigma = -\frac{3}{h} \int_0^h \sigma(r, \varepsilon) r^2 dr. \quad (16)$$

联立式(14)和(16)得到

$$\begin{aligned} \sigma = & \frac{2}{3} Y_1 \frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon} \ln \varepsilon + \frac{\rho_0}{2} R^2 \frac{4\varepsilon^{1/3} + 4\varepsilon^{4/3} - 9\varepsilon + \varepsilon^{7/3}}{(1 - \varepsilon)^2} + \\ & \frac{\rho_0}{2} R^2 \frac{\varepsilon^{1/3} - 3\varepsilon + 2\varepsilon^{4/3}}{(1 - \varepsilon)^2}. \end{aligned} \quad (17)$$

考虑到实际的问题并非单纯的球腔膨胀, 而是钢球沿垂直方向运动并引起的靶材膨胀, 当垂直侵彻速度和加速度各为  $q, \dot{q}$  时, 方位角为  $\varphi$  的微元沿钢球半径方向的速度和加速度即各为  $R\dot{\varepsilon} = q\dot{\varepsilon} \sin \varphi$ ,  $R\ddot{\varepsilon} = q\ddot{\varepsilon} \sin \varphi$ , 故引入如下的柱腔贯穿的运动学修正: 将  $R\dot{\varepsilon} = q\dot{\varepsilon} \sin \varphi$ ,  $R\ddot{\varepsilon} = q\ddot{\varepsilon} \sin \varphi$ , 代替式(17)中的  $R\dot{\varepsilon}$ ,  $R\ddot{\varepsilon}$ , 于是得到

$$\begin{aligned} \sigma = & \frac{2}{3} Y_{11} \frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon} \ln \varepsilon + \frac{\rho_0}{2} (q\dot{\varepsilon} \sin \varphi)^2 \frac{4\varepsilon^{1/3} + 4\varepsilon^{4/3} - 9\varepsilon + \varepsilon^{7/3}}{(1 - \varepsilon)^2} + \\ & \frac{\rho_0}{2} R \dot{q} \sin \varphi \frac{\varepsilon^{1/3} - 3\varepsilon + 2\varepsilon^{4/3}}{(1 - \varepsilon)^2}. \end{aligned} \quad (18)$$

由式(11)和屈服准则(12), 得到

$$\varepsilon = \left( \frac{1}{K} + \frac{1}{\alpha} \right) \sigma + \frac{2}{3\alpha} Y_1. \quad (19)$$

联立式(18)和(19), 通过迭代即可得到平均锁应变  $\varepsilon$  和平均锁应力  $\sigma$  值. 同样对式(15)进行柱腔贯穿的运动学修正, 于是有

$$p(\varphi, t) = -\frac{2}{3} Y_1 \ln \varepsilon + \rho (1 - \varepsilon^{1/3}) R \dot{q} \sin \varphi + \rho \left( \frac{3}{2} - \frac{1}{2} \varepsilon^{4/3} - \varepsilon^{1/3} \right) (q\dot{\varepsilon} \sin \varphi)^2. \quad (20)$$

整个弹体所受垂直阻力  $P_z$  则是

$$P_z = \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} dP_z = \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} -2\pi R^2 p(\varphi, t) \sin \varphi \cos \varphi d\varphi, \quad (21)$$

其中

$$\varphi_1 = \begin{cases} \arcsin \frac{R-q}{R}, & \text{当 } q \leq R (\text{下半球全侵入靶前}), \\ 0, & \text{当 } q \geq R (\text{下半球全侵入靶后}). \end{cases} \quad (22)$$

积分弹体的运动方程式(13)将得到该近似分析方法的解. 在计算中考虑了各向异性修正和屈服强度  $Y_1$  弱化处理. 计算流程如下:

当已知某时刻  $t$  的贯穿参数  $q(t)$ ,  $\dot{q}(t)$ ,  $\ddot{q}(t)$  后, 联立求解式(18)和(19)而求出平均锁应变  $\varepsilon$ ; 代入式(20) 求出腔壁压力  $p(\varphi, t)$ , 再由式(21) 积分而求出钢球所受之阻力  $P_z(t)$ ; 最后积分运动方程(13) 而得到贯穿过程新时刻  $t + \Delta t$  的运动学参数  $q(t)$ ,  $\dot{q}(t)$ ,  $\ddot{q}(t)$ , 从而进入下一循环.

### 3 计算结果与讨论

弹体和靶板的基本参数如下:

钢球半径  $R = 5.05 \text{ mm}$ , 质量  $M = 4.465 \text{ g}$  3DKW 靶板: 厚度  $3.5 \text{ mm}/4.5 \text{ mm}/8.5 \text{ mm}$ .

靶体基本力学性能参数:

$$E_1 = 10.24 \text{ GPa}, E_2 = 18.60 \text{ GPa}, Y_{11} = 465 \text{ MPa}, Y_{22} = 154 \text{ MPa},$$

$$\rho_0 = 1.29 \text{ g/cm}^3, \nu_{21} = 0.08, \nu_{23} = 0.11, q_D = 1.75 \text{ mm}.$$

#### 3.1 剩余速度与初始速度关系分析

图2给出的是钢球的初始速度  $V_i$  和贯穿后的剩余速度  $V_r$  关系 ( $V_r - V_i$ ) 曲线, 图2中同时标出了实验点(实心点)和计算点(空心点). 在系列钢球贯穿 3DKW 靶板系列贯穿实验中, 初始速度控制在  $500 \text{ m/s}$  至  $1100 \text{ m/s}$ , 靶板厚度  $H$  分别为  $3.5 \text{ mm}$ ,  $4.5 \text{ mm}$  和  $8.5 \text{ mm}$ . 计算结果表明, 在实验弹速范围内, ( $V_r - V_i$ ) 曲线近似线性; 相同的初始速度下, 剩余速度与实验结果相比一致性较好, 整体偏差在  $3\%$  以内. 进一步开展了初始速度  $V_i$  较低速度时的系列贯穿靶板的近似计算(参见图2), 结果表明: 当初始速度接近弹道极限时,  $V_r - V_i$  曲线表现出明显的非线性, 而弹道极限可以通过对  $V_r - V_i$  曲线进行外推由  $V_r = 0$  时的初始速度  $V_i$  而得到. 对于靶厚为  $8.5 \text{ mm}$  的靶板, 计算的弹道极限为  $339 \text{ m/s}$ , 与作者实验直接测量的弹道极限  $341.4 \text{ m/s}$  的偏差仅有  $1\%$ . 所有以上这些计算结果都表明, 我们所提出的工程近似分析方法是合理的可靠的.

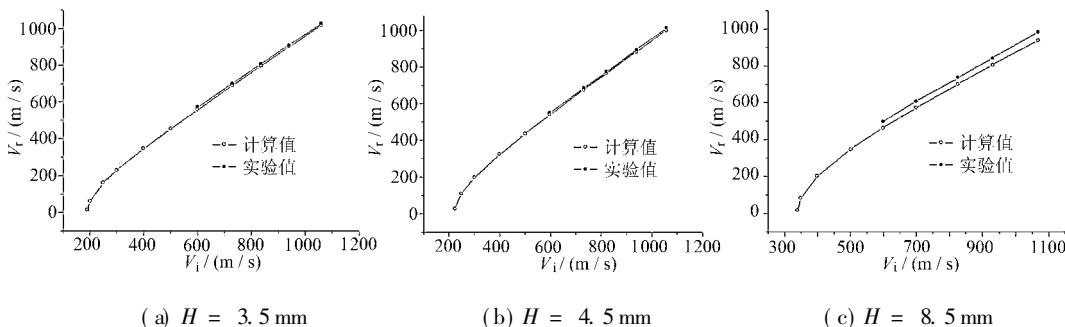


图2 钢球贯穿不同厚度靶板初始弹速与剩余弹速曲线的计算结果与实验结果比较

#### 3.2 弹的初始速度与侵深关系讨论

为了更好地认识 3DKW 靶材的抗侵彻/贯穿规律, 在提出的耦合模型基础上, 进一步开展

了系列近似分析计算. 图3为钢球贯穿靶厚为8.5 mm的3DKW靶时, 初始弹速与侵深的关系, 结果表明: 随着初始速度增加, 侵深也随之按图示的非线性关系增加. 从该曲线, 我们可以预测特定初始速度下的侵深; 反之, 也可以得到特定靶厚的弹道极限. 图4分别给出了初始速度为300 m/s和330 m/s时, 子弹在侵彻靶板过程中的弹体速度随着侵深变化曲线. 所有以上这些结果都是不容易直接通过实验手段而准确得到的, 而这些计算结果却可以为更好地揭示3DKW靶板抗钢球贯穿机理提供丰富的数据和信息.

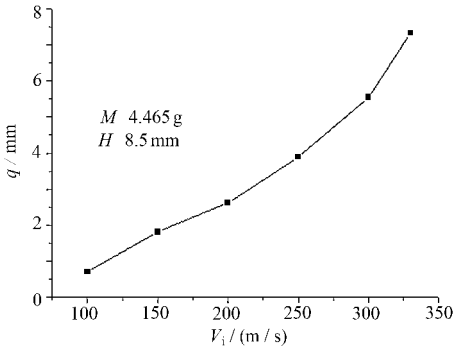


图3 特定靶板的初始弹速与侵深的关系

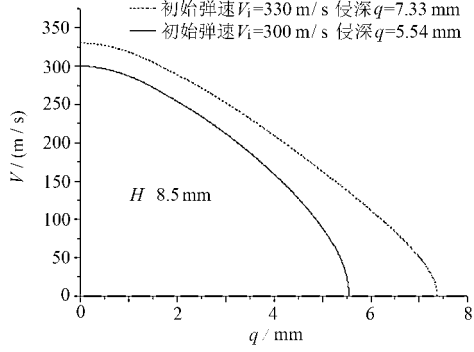


图4 特定靶板不同初始弹速与侵深关系

### 3.3 靶材的动态压缩强度对抗侵彻规律影响

图5给出了靶材厚度方向动态压缩强度  $Y_{11}$  对靶体弹道极限影响的计算曲线, 靶板厚度为8.5 mm. 由图5可见, 在计算数据范围内, 随着  $Y_{11}$  增加靶板的弹道极限速度近似呈线性增加. 图6给出了在特定初始弹速贯穿时, 侵深与靶材厚度方向动态压缩强度  $Y_{11}$  的关系曲线, 结果表明, 相同初始速度下, 随着  $Y_{11}$  增加, 子弹的侵深降低. 图5和图6结果表明: 靶板厚度方向动态压缩强度在靶体抗贯穿规律中起着很重要的作用.

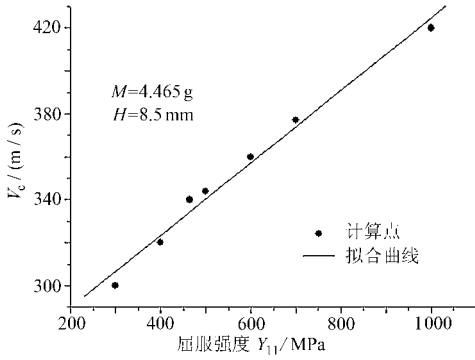


图5 靶板的弹道极限与  $Y_{11}$  关系

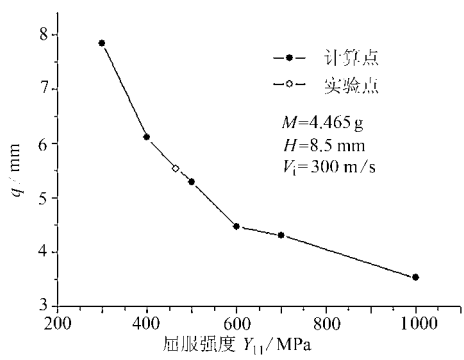


图6 固定靶厚和弹速时子弹侵深与  $Y_{11}$  关系

## 4 结 论

由以上系列的数值计算结果分析表明, 计算的剩余速度和预测的弹道极限与实验结果一致性都较好, 故本文提出的准一维工程分析近似方法是合理的、简洁的、高效的. 利用我们的方法还可以方便系统地研究其它靶板材料参数的影响, 如屈服强度  $Y_{11}$  和  $K$ ,  $\alpha$ ,  $\rho$  等对材料抗贯穿规律的影响, 而这些结果都可为我们工程上改进靶的组份提高靶的抗贯穿能力提供指导.

## 附录 3DKW 复合材料

实验材料为 Kevlar/ 乙烯基树脂 3DKW, 见图 A. 1, 其中 (a) 为试件的表面结构, (b) 为  $z$  向结构. 3DKW 的整体结构如图 A. 2 所示, 图中  $x, y, z$  分别表示面内经向、纬向和厚度  $z$  方向. 经纱和纬纱均为平直铺设, 经纱层和纬纱层按照  $0^\circ/90^\circ$  互相叠层,  $Z$  纱将叠层贯穿起来形成 3D 结构, 然后再灌注树脂成型. 其中 Kevlar 29 的密度为  $1.44 \text{ g/cm}^3$ , 基体为 854 乙烯基树脂; 实验靶板纤维的基本参数参见表 A. 1.

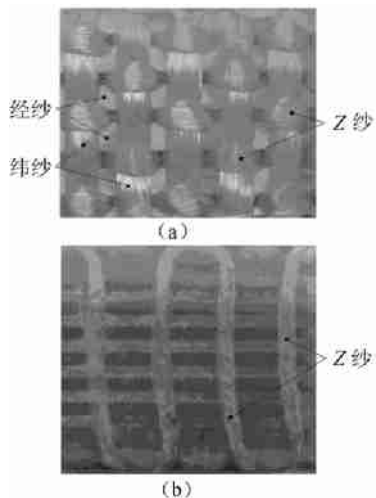


图 A. 1 Kevlar/ 乙烯基树脂 3DKW

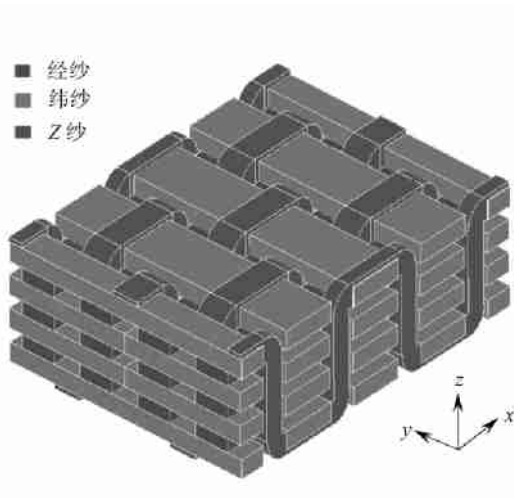
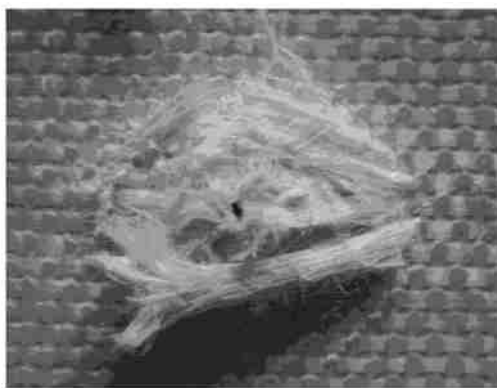


图 A. 2 3DKW 结构示意图



(a) 迎弹面



(b) 贯穿后靶板背面

图 A. 3 钢球贯穿 4.5 mm 靶板破坏形貌  
3DKW 纤维的基本参数

表 A. 1

纱	材料	层数 $n$	线密度 $c / \text{tex}$	织物密度 $\rho / (\text{ends}/\text{cm})$	纤维体积分数 $V_f / \%$
经纱	Kevlar	4(2)(8)	628	5	25
纬纱	Kevlar	5(3)(9)	628	5	25
Z 纱	Kevlar	- (-)(-)	314	-	10

实验靶板的厚度分别为 3.5 mm/4.5 mm/8.5 mm, 图 A. 3 给出了厚度为 4.5 mm 靶板抗钢球贯穿时的破坏形貌的照片.

## [参 考 文 献]

- [1] 周履, 范赋群. 复合材料力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1991.
- [2] Naik N K, Shirao P. Ballistic impact behaviour of woven fabric composites parametric studies[J]. *Materials Science and Engineering, A*, 2005, **412**(1/2): 104-116.
- [3] Naik N K, Doshi A V. Ballistic impact behaviour of thick composite-parametric studies[J]. *Composite Structures*, 2008, **82**(3): 447-464.
- [4] Peng X Q, Cao J. A continuum mechanics based non-orthogonal constitutive model for woven composite fabrics[J]. *Composites: Part A*, 2005, **36**(6): 859-874.
- [5] Yankelevsky D Z, Adin M A. A simplified analytical method for soil penetration analysis[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 1980, **4**(3): 233-254.
- [6] Hanagud Sathya, Ross Bernard. Large deformation deep penetration theory for a compressible strain-hardening target material[J]. *AIAA Journal*, 1971, **9**(5): 905-911.
- [7] 李永池, 王肖钧. 橡胶基复合材料靶抗贯穿特性的近似分析方法[J]. *爆炸与冲击*, 1993, **13**(4): 289-295.
- [8] Drysdale W H. Modeling of rate-dependent anisotropic material behavior by plasticity theory[J]. *Journal de Physique Collegure C5*, 1985, **46**(5): 73-80.
- [9] Jenq S T, Jing H S, Chung Charles. Predicting the ballistic limit for plain woven glass/epoxy composite laminate[J]. *Internat J Impact Engineering*, 1994, **15**(4): 451-464.

## Engineering Analysis of Penetration of a Metal Ball Into Fibre-Reinforced Composite Targets

LI Yong-chi, WANG Zhi-hai, WANG Xiao-jun, HU Xiu-zhang  
(Department of Modern Mechanics, University of Science and Technology of China,  
Hefei 230027, P. R. China)

**Abstract:** An engineering analysis method of computing the penetration problem of a steel ball penetrating into fibre-reinforced composite targets is presented. The metal ball was assumed to be a rigid body, and the composite target was regarded as a transversely isotropic elastoplastic material. In the analysis the spherical cavity dilatation model is coupled with the cylindrical cavity penetration method. The simulation results based on the modified model are in good agreement with the results for the 3-D Kevlar woven composite (3DKW) anti-penetration experiments. Furthermore, the effects of the target material parameters and impact parameters on the penetration problem were also studied.

**Key words:** fibre-reinforced composites; engineering analysis; transversely isotropic elastoplastic materials; spherical cavity dilatation model; cylindrical cavity penetration model