

【其他研究】

UHMWPE 纤维层合板抗弹侵彻数值模拟

夏清波, 晏麓晖, 冯兴民

(国防科学技术大学 指挥军官基础教育学院, 长沙 410073)

摘要:利用 ANSYS/LS-DYNA 非线性有限元分析软件对 UHMWPE 纤维层合板抗钢质立方体弹片侵彻进行了研究。首先根据细观力学理论, 研究确定纤维层合板的材料参数, 然后利用 LS-DYNAD 的 MAT_COMPOSITE_DAMAGE 材料模型对 UHMWPE 纤维层合板进行数值模拟, 模拟结果与试验结果吻合较好。得出利用 MAT_COMPOSITE_DAMAGE 材料模型可以较好地模拟 UHMWPE 纤维层合板。

关键词:细观力学; UHMWPE 纤维层合板; 侵彻; 数值模拟

中图分类号: TB303

文献标识码: A

文章编号: 1006-0707(2011)02-0119-03

随着现代科学技术的飞速发展及其在常规攻击武器上的运用, 反装甲武器的威力日益增强, 为了提高武器系统的作战机动性能和战场生存能力, 迫切需要研制具有良好防弹性能的轻质材料^[1]。防弹纤维复合材料由于具有质量轻、动能吸收性好且无“二次杀伤效应”等特点, 得到了越来越广泛的研究和应用^[2-3]。

超高分子量聚乙烯(UHMWPE)纤维是继碳纤维、Kevlar 纤维之后的第三代高性能纤维, 是当前高性能纤维中比模量、比强度最高的纤维, 研究表明 UHMWPE 纤维层合板的防护系数是芳纶(kevlar)的 3.6 倍^[4]。因此, 其在工程装甲防护方面的应用越来越多。目前, 国内外对于超高分子量聚乙烯(UHMWPE)纤维作为工程装甲防护材料抗侵彻打击多为一些试验研究, 而进行数值模拟的并不多见。这主要是因为 UHMWPE 纤维在进行数值模拟中存在许多技术问题: 纤维的性能参数不能直接用于纤维增强装甲防护材料, 纤维增强装甲防护材料的分层破坏和脱粘现象较难模拟等。

本文中基于文献[5]的试验, 根据 UHMWPE 纤维的物理力学性能, 利用细观力学理论公式^[6], 推导出 UHMWPE 无维布叠层的各项弹性参数及强度参数, 而后运用瞬态非线性有限元分析软件 ANSYS/LS-DYNAD 进行数值模拟, 通过与文献[5]中的试验结果进行对比分析, 得出利用 MAT_COMPOSITE_DAMAGE 正交材料模型能较好地模拟 UHMWPE 纤维层合板, 这对 UHMWPE 纤维层合板的数值模拟具有重要意义。

1 UHMWPE 纤维层合板参数确定

UHMWPE 纤维层合板是由 UHMWPE 无维布层压而成^[5,7]。无维布由体积含量 80% 左右的纤维和含量约 20% 的热塑性聚氨酯制成, 宏观上表现为正交各向异性。UHMWPE

纤维层合板的力学性能可由材料试验或细观力学方法确定。目前已发展的细观力学方法有材料力学法、弹性力学法、自一致场法、半经验法、等效包合法、桥联矩阵法等等^[8], 已有研究表明, 桥联矩阵法的精度较好, 这里采用该法进行计算。

1.1 单向纤维复合材料

对正交各向异性材料, 本构可表示为

$$\{\varepsilon\} = [S]\{\sigma\} \quad (1)$$

其中: $\{\sigma\} = \{\sigma_{11} \ \sigma_{22} \ \sigma_{33} \ \sigma_{23} \ \sigma_{13} \ \sigma_{12}\}^T$; $\{\varepsilon\} = \{\varepsilon_{11} \ \varepsilon_{22} \ \varepsilon_{33} \ \varepsilon_{23} \ \varepsilon_{13} \ \varepsilon_{12}\}^T$ 。柔度矩阵

$$[S] = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & & & \\ S_{12} & S_{22} & S_{23} & & & 0 \\ S_{13} & S_{23} & S_{33} & & & \\ & & & S_{44} & & \\ & & & 0 & & S_{55} \\ & & & & & & S_{66} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/E_{11} & -v_{12}/E_{11} & -v_{13}/E_{11} & & & \\ -v_{12}/E_{11} & 1/E_{22} & -v_{23}/E_{22} & & & 0 \\ -v_{13}/E_{11} & -v_{23}/E_{22} & 1/E_{33} & & & \\ & & & 1/G_{13} & & \\ 0 & & & & 1/G_{12} & \\ & & & & & 1/G_{12} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中, E_{ij} , G_{ij} 和 v_{ij} ($i, j = 1, 2, 3$) 分别为单向复合材料的弹性模量, 剪切模量和泊松比。

根据桥联矩阵法^[8], 单向复合材料的弹性参数可由下式计算

$$E_{11} = V_f E_{f11} + V_m E_m \quad (3)$$

收稿日期: 2010-12-03

作者简介: 夏清波(1983—), 男, 硕士研究生, 从事防灾减灾与防护工程研究;

晏麓晖(1962—), 男, 教授, 硕士研究生导师, 主要从事固体力学及防护工程研究。

$$\nu_{12} = V_f \nu_{f12} + V_m \nu_m \quad (4)$$

$$E_{22} = \frac{(V_f + V_m A_{11})(V_f + V_m A_{22})}{(V_f + V_m A_{11})(V_f S_{f22} + A_{22} V_m S_{m22}) + V_f V_m (S_{m21} - S_{f21}) A_{12}} \quad (5)$$

$$G_{12} = G_m \frac{(G_{f12} + G_m) + V_f (G_{f12} - G_m)}{(G_{f12} + G_m) - V_f (G_{f12} - G_m)} \quad (6)$$

$$G_{23} = \frac{0.5(V_f + V_m A_{22})}{V_f (S_{f22} - S_{f23}) + V_m A_{22} (S_{m22} - S_{m23})} \quad (7)$$

$$\nu_{23} = \frac{E_{22}}{2G_{23}} - 1 \quad (8)$$

式中: ν_f 和 ν_m 分别为纤维和基体的体积含量; E_{fij} , G_{fij} 和 ν_{fij} ($i, j = 1, 2, 3$) 分别为纤维弹性模量, 剪切模量和泊松比; E_m , G_m 和 ν_m 分别为基体弹性模量, 剪切模量和泊松比, 且

$$A_{11} = \frac{E_m}{E_{f11}}, A_{22} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{E_m}{E_{f22}} \right),$$

$$A_{12} = \frac{(S_{f12} - S_{m12})(A_{11} - A_{22})}{(S_{f11} - S_{m11})} \quad (9)$$

由式(2)~(4), 可得到单向复合材料的弹性参数和柔度矩阵分量系数。

1.2 正交复合材料

由于纤维板是由单向布正交层合而成, 板的弹性常数可由单向复合材料参数推导。

由式(1)可知

$$\{\sigma\} = [C] \{\varepsilon\} = [S]^{-1} \{\varepsilon\} \quad (10)$$

式中, $[C]$ 为刚度矩阵。

则 0° 层和 90° 层的本构分别为

$$\{\sigma\}_1 = [C]_1 \{\varepsilon\}_1 \quad (11)$$

$$\{\sigma\}_2 = [C]_2 \{\varepsilon\}_2 \quad (12)$$

假设 0° 和 90° 的铺层数相等且为交叉铺层, 则板的弹性性能与仅有一层 0° 和一层 90° 层合布的性能完全相同。

不失一般性, 取正交两层的厚度相等, 则正交复合材料的本构关系为

$$\{\sigma\} = [\bar{C}] \{\varepsilon\} \quad (13)$$

其中, $[\bar{C}] = \frac{1}{2} ([C]_1 + [C]_2)$ 。

据此可导出正交复合材料参数为

$$\bar{E}_{11} = \bar{E}_{12} = 1/\bar{S}_{11}, \bar{E}_{33} = 1/\bar{S}_{33}, \nu_{12} = -\bar{E}_{11} \bar{S}_{12},$$

$$\nu_{13} = \nu_{23} = -\bar{E}_{13} \bar{S}_{13}, \bar{G}_{13} = \bar{G}_{23} = 1/\bar{S}_{44}, \bar{G}_{12} = 1/\bar{S}_{66} \quad (14)$$

1.3 计算材料模型参数

目前, LS-DYNA 中能够完成复合材料损伤失效分析的材料模型主要有 MAT_COMPOSITE_DAMAGE 模型 (22# 模型), 已知 UHMWPE 纤维和热塑性聚氨酯材料参数如表 1 所示^[7-9]。

表中 S_{f11} , S_{f22} 分别表示纤维纵向和横向拉伸强度。

根据细观力学理论^[6] 可计算得 MAT_COMPOSITE_DAMAGE 材料模型其参数如表 2 所示。

表 1 UHMWPE 纤维和热塑性聚氨酯材料参数

$\rho_f /$ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	$E_{f11} /$ GPa	$E_{f22} /$ GPa	$E_{f33} /$ GPa	$G_{f12} /$ GPa
970	100.0	3.0	3.0	3.0
$G_{f13} /$ GPa	$G_{f23} /$ GPa	ν_{f12}	ν_{f13}	ν_{f23}
3.0	0.5	0.3	0.3	0.4
$S_{f11} /$ GPa	$S_{f22} /$ GPa	$\rho_m /$ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	$E_m /$ GPa	$G_m /$ GPa
3.0	0.03	1 200	0.13	0.043 6
ν_m				
0.49				

表 2 层合板材料参数

$\rho /$ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	$EA /$ GPa	$EB /$ GPa	$EC /$ GPa	$PRBA$
1006	40.6	40.6	2.6	0.008
$PRCA$	$PRCB$	GAB / GPa	GBC / GPa	GCA / GPa
0.044	0.044	1.75	1.6	1.6
$KFAIL / \text{GPa}$	$AOPT$	$MACF$	SC / GPa	XT / GPa
2.2	0	3	0.5	3.6
YT / GPa	YC / GPa	$ALPH$	SN / GPa	SYZ / GPa
3.6	3.0	0.5	0.9	0.9
SZX / GPa				
0.9				

其中各项参数的具体含义参见文献[10]。

2 模拟结果及分析

选文献[5]中试验进行计算, 弹片为立方体工具钢弹片, 边长为 7.5 mm, 重量为 3.3 g, 选用 MAT_PLASTIC_KINEMATIC 材料模型 (3# 模型), 材料参数^[11] 如表 3 所示。为了更好的模拟 UHMWPE 纤维层合板的叠层及受冲击侵彻后的分层破坏现象, 根据单层 UHMWPE 纤维的面密度 155 g/m^2 , 将层合板分为 0.16 mm 一层, 4.8 mm 的层合板共分为 30 层, 四周固定。采用 SOLID164 实体单元, 弹片与层合板采用面面自动接触。动摩擦系数分别为 0.05 和 0.1。其有限元模型见图 1。

表3 弹片材料参数

$\rho/$ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	$E/$ MPa	ν	$\sigma_0/$ MPa	$E_r/$ MPa	$\varepsilon_f/$ %
7 850	204 000	0.33	1 900	15 000	2.15

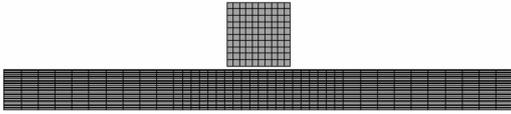


图1 有限元模型

2.1 表观破坏形态

图2给出了立方体弹片以586.27 m/s的速度正入射层合板,弹片穿透靶板后,靶板正反两面的弹孔破坏形态及与试验结果的对比。

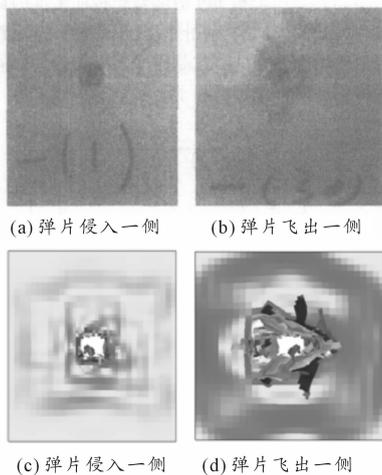


图2 靶板受速度为586.27 m/s的弹片冲击时的弹孔形态(a,b为试验结果,c,d为模拟结果)

由图2可以看出弹片侵彻层合板后弹孔的形状、大小数值模拟结果与试验结果比较相似。在弹体侵入一侧(图2(a),(c)),纤维断面光滑,基本为剪切破坏。随着侵彻的深入,弹片速度在降低,纤维发生一定程度的拉伸变形,弹片飞出一侧有冲塞物飞出,边上纤维有少量的脱粘,并有一定程度的分层现象如图2(b),(d)所示。

2.2 弹片的剩余速度

图3为弹片剩余速度试验值与模拟值对比曲线图。

由图可见试验结果与模拟结果吻合较好。

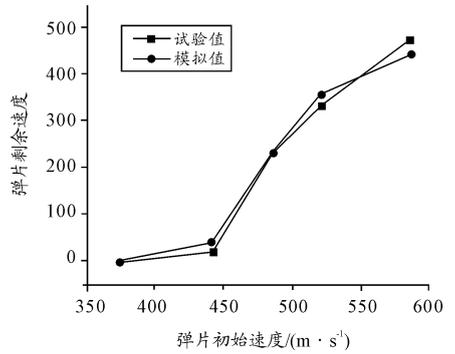


图3 弹片剩余速度试验值与模拟值对比曲线

2.3 弹道性能与冲击速度的关系及其对比分析

靶板能量吸收公式为

$$EA = \frac{1}{2} m_p (v_s^2 - v_r^2)$$

式中: m_p 为弹片质量; v_s 为弹片入射速度; v_r 为弹片剩余速度。

图4为靶板能量吸收与冲击速度的关系图。

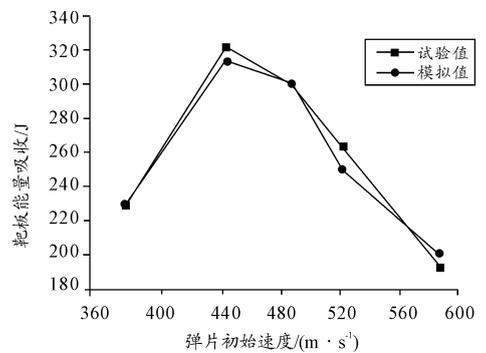


图4 靶板能量吸收试验值与模拟值对比曲线

如图可见,试验值与模拟值吻合比较好。当入射速度为440 m/s时,靶板耗能最好,结合图3可知,此时入射速度接近靶板的弹道极限速度 V_{50} 。当弹片速度低于 V_{50} 时,靶板没有被穿透,还有多余的层数去吸收弹片动能,因此随着弹片入射速度的增加,弹道吸能也增加;当弹片速度高于 V_{50} 时,靶板被完全穿透,此时,随着入射速度的增加,UHMWPE纤维层合板的能量吸收值下降。

3 结束语

综上所述,对于UHMWPE纤维层合板,依据细观力学理论合理确定材料性能,基于LS-DYNA的MAT_COMPOSITE_DAMAGE材料模型能较好地模拟UHMWPE纤维层合板抗弹侵彻问题。这对以后UHMWPE纤维层合板的数值模拟具有一定借鉴意义。

(下转第136页)