

【武器装备】

Kevlar 纤维层合板抗弹性能的数值模拟

王云聪, 何 煌, 曾首义

(国防科技大学 指挥军官基础教育学院, 长沙 410072)

摘要:采用 Ansys/Ls - dyna 建立了 Kevlar 纤维层合板的三维有限元模型,模拟了 Kevlar 纤维层合板的抗侵彻过程和抗弹性能,模拟结果与实验吻合较好,证明了模拟方法以及模型参数的合理性。在此基础上讨论了靶板的抗弹机理以及破坏方式,分析得到了随着靶板厚度的变化,抗弹性能会出现一个拐点,靶板破坏方式会发生变化,而在拐点之后,靶板厚度增加,靶板吸收能量减少,抗弹性能降低的结论。对某种特定弹体,存在一个合理的厚度匹配,以发挥 Kevlar 纤维层和板的抗弹性能。

关键词:Kevlar 纤维;侵彻过程;数值模拟

中图分类号:O385

文献标识码:A

文章编号:1006 - 0707(2011)03 - 0017 - 04

Numerical Simulation of Anti-resilience for Kevlar Fiber Laminate

WANG Yun-cong, HE Huang, ZENG Shou-yi

(Commander College of Basic Education, National University of Defense Technology, Changsha 410072, China)

Abstract: The paper built 3D finite element model by means of Ansys/Ls-dyna. In the paper, it simulated the anti-penetration process and anti-resilience for Kevlar fiber laminate, the simulation result was better fitted with experiment, and the rationality was certified in simulation method and model parameter. Based on the above mentioned, it discussed the anti-resilience mechanism and breakage pattern, and analyzed that with the variation of target ban thickness, the performance of anti-resilience would appear an inflection point, and also the breakage pattern of target ban would be changed. After the inflection point, with the increasing of target ban thickness, the absorbed energy of target ban would be decreased, and the anti-resilience performance would be reduced. For a certain specified resilience body, there must be a reasonable thickness match to exert its anti-resilience performance of Kevlar fiber laminate.

Key words: Kevlar fiber; penetration process; numerical simulation

在武器性能不断提高的推动下,人员和装备的防弹问题受到越来越广泛的重视。Kevlar 纤维具有较高的拉伸强度和弹性模量、优异的耐疲劳和抗冲击性能以及较好的耐热性能,成为极具发展潜力的新型防弹材料^[1-3]。Kevlar 层合板的抗弹性能对设计者至关重要,但由于复合材料力学性能和耗能的复杂性,故对层合板的弹道性能也较难掌握。梁子清^[4]认为,纤维的剪切和拉伸变形是 2 种主要的失效响应方式,同时靶板还会出现明显的分层现象;杜忠华^[5]则给出了此类层合板弹道性能 v_{50} 的预测公式。本文采用数值模拟的方法,对 6.35 mm 直径的柱形弹低速侵彻 Kevlar 纤维层合板进行了模拟分析,并将结果与理论模型以及实验进行了对比;而后又对不同弹径弹体侵彻不同厚度的 Kevlar 纤维层合

板进行了分析,得出了与文献[7]类似的拐点现象,完整的展现了靶板随厚度变化的性能特点。

1 弹体和靶板有限元模型

防弹复合材料主要用于阻挡弹丸和射流的侵彻,目前其结构主要采用层压的形式。本文所用 Kevlar 纤维层合板采用单层纤维薄片正交叠层铺设,通过粘结和热力层压加工而成,其尺寸为 100 mm × 100 mm,厚度为 9 mm。弹体采用 6.35 mm 平头弹,长 15.6 mm,重 3.84 g,由硬钢合金制成,采用气炮枪发射,以调整弹体的着靶速度。弹体垂直入射靶板,靶板四周固定。

收稿日期:2010 - 12 - 18

作者简介:王云聪(1984—),男,硕士研究生,主要从事抗侵彻效应研究。

有限元计算模型包括弹体和靶板的模型,鉴于计算的效率比和问题的对称性,在此建立 1/4 模型。为了保证模拟计算结果的准确性,弹体和靶板选用 8 节点三维实体 (solid164) 单元。为了保证计算的精度,弹体和靶板均采用映射网格划分,其划分的形式将直接影响到计算的精度和计算的规模。一般来讲,网格数量增加,计算精度会有所提高,但同时计算规模也会增大。因此,在划分网格时要考虑到计算精度和计算时间两方面的影响。弹体共划分 432 单元,靶板共划分 22 500 个单元,如图 1 所示。计算在高性能计算机工作站上完成。

由于弹体变形较小,故弹体在模拟中选用刚体模型。由于 Kevlar 纤维层合板结构和性能的复杂性,故材料模型的选取将直接影响模拟的其实性和计算结果的可靠性,是模拟的关键。

本文选用 *MAT_COMPOSITE_DAMAGE(2 2#模型),

这是一个正交各项异性材料模型,与复合材料的真实力学性能相符,弹体和靶板之间定义面-面侵入 *CONTACT_ERODING_SURFACE_TO_SURFACE),以模拟贯穿失效,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。接触的静、动摩擦系数分别取为 0.3、0.28。Kevlar 纤维层合板材料的参数如表 1^[5] 所示。

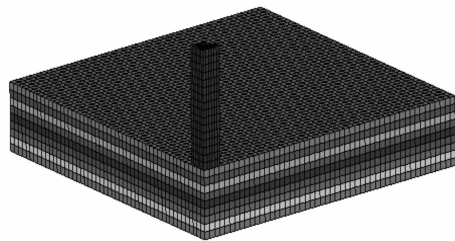


图 1 弹、靶有限元模型

表 1 单层 Kevlar 纤维材料参数

RO	EA	EB	EC	PRBA	PRCA	PRCB	GAB	GBC	GCA	ALPH
1 832	35.0E9	35.0E9	8.33E9	0.008	0.044	0.044	3.5E8	3.2E8	3.2E8	0 ~ 0.5
KFAIL	AOPT	MACF	XP	YP	ZP	A1	A2	A3	SZX	SN
2.2E9	0	3	0	0	0	0	0	0	1.8E9	9.0E9
V1	V2	V3	D1	D2	D3	SC	XT	YT	YC	SYZ
0	0	0	0	0	0	25E6	0.725E9	0.725E9	0.69E9	1.08E9

2 侵彻过程与数值模拟结果

图 2 给出了 Kevlar 纤维层合板在侵彻不同阶段的数值模拟情况。由图 2 可知,靶板在弹体冲击侵彻作用下,表现出了特有的侵彻贯穿、分层破坏以及剪切充塞和拉伸断裂现象。数值模拟方法能有效模拟实验现象,分层明显,与实验结果吻合较好,如图 3 所示。弹靶作用大体可以分为 3 个阶段^[6]:侵彻初期,弹体速度较大,前层纤维和基体都发生了充塞剪切破坏,厚度约为整体靶板的 1/3;侵彻中期,由于应力波在各层之间不断来回反射迭加,导致背板分层失效,抗力下降;侵彻末期,背板分层拉断,抗力进一步下降,产生很大的弯曲变形,纤维断裂,产生塞柱破片。图 4、图 5 分别为弹体的加速度和速度时程曲线。在弹体的加速度时程曲线中,明显的出现了 3 个平台,分别代表侵彻过程的 3 个阶段: $0 \mu\text{s} < t < 60 \mu\text{s}$ 为侵彻初期, $60 \mu\text{s} < t < 120 \mu\text{s}$ 为侵彻中期, $120 \mu\text{s} < t < 210 \mu\text{s}$ 为侵彻末期。同时可得出 Kevlar 纤维层合板的极限速度 v_{50} 为 320m/s,与实验结果的 327 m/s 吻合较好。

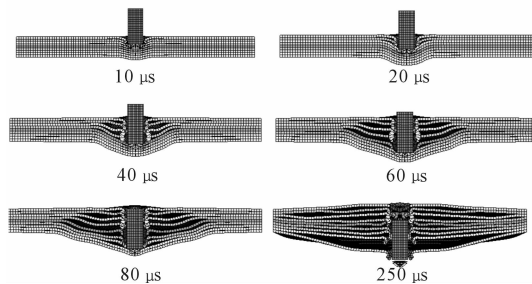
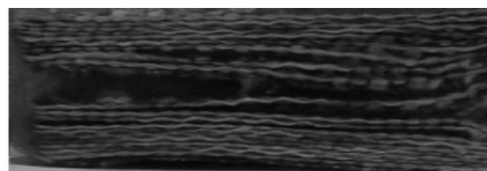


图 2 Kevlar 纤维层合板侵彻过程



(a) 实验结果



(b) 数值模拟结果

图 3 靶板模拟结果与实验对比

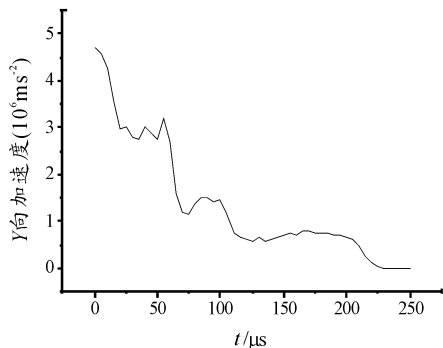


图4 弹体y向加速度时程曲线

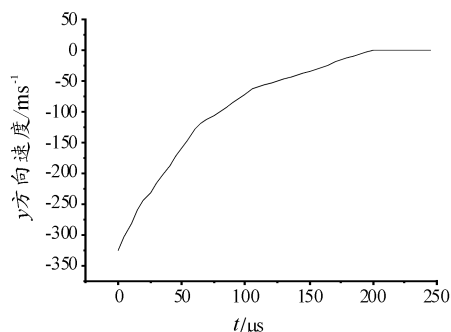


图5 弹体y向速度时程曲线

3 靶板抗弹性能

对侵彻4.5, 14.5, 19 mm的Kevlar纤维层合板和4.76 mm的平头弹侵彻4.5, 9, 14 mm等不同厚度的靶板分别进行了模拟, 得出了不同厚度靶板的极限速度。

文献[5]给出了计算薄层压板 v_{50} 的半经验公式

$$v_{50} = \left[\frac{\pi D (h_0 - H_E)^2 \tau + \varepsilon_r \sigma_s H_E / 0.91 f(a)}{m_p} \right]^{1/2}$$

式中: h_0 为靶板材料的厚度; σ_s 为拉伸应力极限; m_p 为弹丸质量; ε_r 为材料最大破坏应变; H_E 为2倍弹径; D 为塞柱直径; $f(a)$ 可由层压板面密度和弹径求得。实验结果^[3]与工程模型、数值模拟结果对比, 如表2所示。

表2 实验与工程模型, 数值模拟结果对比

弹径/mm	靶板厚度/mm	实验值 $v_{50}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	理论计算 $v_{50}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	数值模拟 $v_{50}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
6.35 平头弹	9	343	387	321
	14.5	482	468	463
	19	566	567	555
	23	612	617	601
4.76 平头弹	9	319	347	302
	14	406	423	390
	19	530	497	492
	20	541	511	521
	23	574	556	550

图6为不同弹径靶板极限速度对比图。从表2和图6可以看出, 理论计算和数值模拟结果与实验结果符合较好, 误差都小于10%, 该理论公式可以较好地模拟Kevlar纤维层合板的弹道极限速度, 并预测材料的抗弹性能。数值模拟采用的材料模型与材料参数合理, 模拟结果较好。从图6还可以看出, 模拟结果的弹道极限速度普遍小于实验极限速度, 这与模拟采用的算法有关。在计算过程中, 为了保证计算能连续进行, 材料单元的应变在到达失效应变后, 将会删除该单元, 这样相当于人为降低了材料的抗弹性能, 导致计算的极限速度偏小。理论计算结果在靶板厚度较小的时候偏大; 而当靶板厚度大于弹体2倍半径时, 理论计算结果将偏小。可见, 随着靶板厚度的增加, 靶板的破坏方式将发生变化。理论公式还不能完全包括破坏方式变化带来的影响, 而数值模拟结果与实验数据吻合较好。

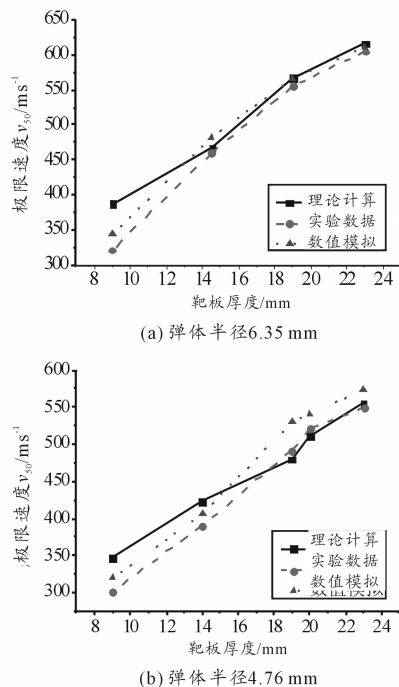


图6 不同弹径靶板极限速度对比

对弹径分别为 6.35, 4.76 mm 的 2 种弹体, 侵彻不同厚度的 Kevlar 纤维层合板进行了数值模拟, 得到了靶板的极限速度, 如图 7 所示。从图 7 中可明显观察到 1 个拐点, 文献 [5] 中也有类似现象, 拐点出现在大约 2 倍弹径附近, 这是因为在靶板厚度大于 2 倍弹径后, 破坏的方式发生了变化。虽然文献 [5] 也提到了这一现象, 但是仅有 4 个实验数据, 结果无法令人信服。如图 8、图 9 所示, 薄靶板的破坏方式主要为拉伸破坏和层间分层; 厚靶板的破坏方式为剪切充塞破坏, 同时存在粘结合层, 与顾冰芳^[8]描述的现象比较相似。从图 7 中的弹丸极限速度变化曲线可以发现, 在靶板厚度小于 2 倍弹径时, 随着靶板厚度的增加, 靶板的抗弹性能增加, 成线性变化; 而后出现了拐点, 有一个缓慢增长的平台, 在拐点以后靶板的极限速度增长趋于缓慢, 成非线性变化。这说明在拐点以后, 随着靶板厚度的增加, 靶板的抗弹能力下降, 并没有完全发挥出靶板的性能。这主要是由于 Kevlar 纤维有着很高的拉伸强度, 拐点以后, 破坏方式变为剪切和拉伸复合形式, 没有发挥 Kevlar 纤维的性能, 导致抗弹能力下降。由此可见, 对不同弹径的弹体, 存在着最佳的厚度匹配来发挥 Kevlar 纤维层合板的拉伸性能, 以提高靶板的抗弹能力。

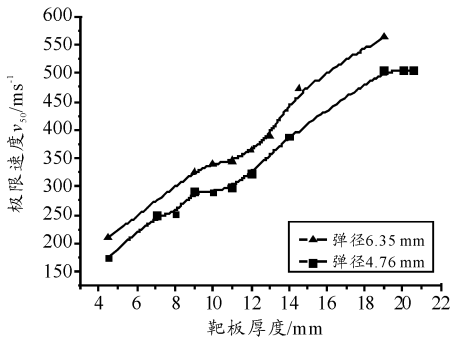


图 7 靶板极限速度曲线

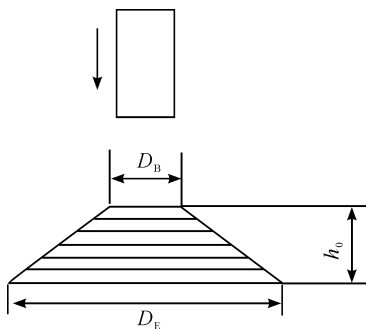


图 8 薄靶板撞击简图

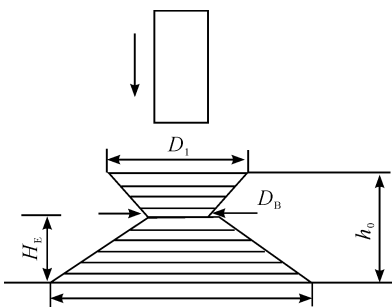


图 9 厚靶板撞击简图

4 结论

1) 建立的三维有限元模型能够很好地模拟弹体侵彻 Kevlar 纤维层合板的过程和性能, 数值模拟与实验结果吻合较好, 所选用的模型和计算方法合理, 模拟结果可信。

2) 数值模拟较好地模拟出了 Kevlar 纤维层和板侵彻的 3 个阶段, 并出现了剪切充塞现象、分层破坏和拉伸断裂现象。

3) 文献 [5] 的极限速度半经验公式结果与实验较为吻合, 计算简便, 借助半经验公式可以对符合要求的层合板厚度进行设计。

4) Kevlar 纤维层合板有着独特的抗弹性能, 随着厚度的变化, 会呈现一个拐点, 破坏方式发生变化, 而后进入缓慢增长阶段, 抗弹性能降低, 对抗某种确定弹丸的侵彻, 存在最优厚度匹配, 以发挥靶板的最优性能。

参考文献:

- [1] Rudiger H. Ballistic protective fabrics-past and future [C]// Proceedings of the 34th International SAMPE Technical Conference. Baltimore: [s. n.], 2002: 499 - 505.
- [2] Hideaki K. Recent advance in high-velocity impact perforation of fiber composite laminates [J]. JSME International Journal, Series A, 1999, 42(2): 245 - 252.
- [3] Hearle J W, Leech C M. Ballistic Resistance of Multilayer Textile Fabrics [R]. AD-A128064.
- [4] 梁子清, 周庆. 超高分子量聚乙烯纤维防弹复合材料的研究 [J]. 合成纤维, 2002, 31(4): 20 - 26.
- [5] 杜忠华, 赵国志, 王晓鸣. 复合材料层合板的工程分析模型 [J]. 兵器材料科学与工程, 2002(1): 8 - 10.
- [6] 秦曾涌, 何煌, 曾首义. 超高分子量聚乙烯增强层合板抗弹性能的数值模拟 [C]// 全国结构工程学术会议. [S. l.]: [s. n.], 2010: 129 - 133.
- [7] Gellert E P, Cimpoeru S J, Woodward R T. A study of effect of target thickness on the performance of glass-fiber-reinforced plastic composite [J]. Int J Impact Engng, 2000 (24): 445 - 456.
- [8] 顾冰芳, 龚烈航, 徐国跃. Kevlar 纤维层织物防弹机理和性能研究 [J]. 南京理工大学学报, 2007(5): 638 - 642.

(责任编辑 周江川)