

文章编号:1671-6833(2010)04-0085-04

# 冲击荷载下防弹钢板三维损伤分析

李成, 马志垒, 王永涛

(郑州大学 机械工程学院, 河南 郑州 450001)

**摘要:** 为了综合考虑防弹装备的防弹能力及作战灵活性, 笔者采用 ANSYS/LS-DYNA 有限元分析软件对子弹侵彻防弹钢板进行数值模拟, 再现了侵彻的动态过程, 进一步分析分层及间隙作用对钢板的抗侵彻能力的影响, 为防弹装备的设计提供参考。

**关键词:** 侵彻; 数值模拟; 极限厚度; 分层; 间隙

**中图分类号:** TB31 **文献标识码:** A

## 0 引言

随着科学技术的发展, 武器的性能不断提高, 人员和装备的防弹性能越来越受到重视<sup>[1]</sup>。防弹材质中, 防弹钢板因具有可靠的防护性能而被广泛用于装甲及个人防护, 因而提高防弹钢板的防护性能, 对提高作战机动性能有重要意义。

数值模拟方法是在理论分析和实验研究的基础上进一步进行验证分析的一个重要研究途径, 其优点是方法简单, 不受客观条件的限制, 参数可调性强, 无需耗费大量的经费和精力。针对某些复杂问题, 在实验不能够说明相关情况的时候, 可采用数值模拟分析进行验证, 适用范围广<sup>[2-3]</sup>。实验证明 ANSYS 10.0/LS-DYNA 非线性动力学有限元程序在计算这类问题上是非常可靠的<sup>[4]</sup>。笔者运用非线性动态显式有限元分析软件 ANSYS 10.0/LS-DYNA, 对子弹侵彻防弹钢板的过程进行数值模拟。通过数值分析, 得到分层作用及间隙作用对防护装备的影响, 为防弹装甲等防弹装备的研制提供数值参考。

## 1 计算模型

### 1.1 几何模型

子弹采用 7.62 mm 五一式手枪弹, 防弹钢板为 12 cm × 12 cm 正方形靶板, 由于计算问题的对称性, 计算时采用 1/4 模型。图 1 为子弹与靶板(厚度 2.4 mm)的 1/4 模型图。



图 1 子弹与靶板 1/4 模型图

Fig. 1 The fourth model of bullet with target plate

### 1.2 有限元模型

子弹和钢板单元模型均采用八节点六面体单元 Solid164。Solid164 单元是 8 节点实体单元, 缺省省时, 它使用单点积分和沙漏控制, 以得到较快的单元求解<sup>[5]</sup>。

对于子弹的材料模型, 选择随动塑性(与应变率相关)材料(Plastic Kinematic)。这种材料模型是各向同性、随动硬化或各向同性和随动硬化的混合模型, 且与应变率相关, 可考虑失效。通过在 0(仅随动硬化)和 1(仅各向同性硬化)间调整硬化参数  $\beta$  来选择各向同性随动硬化。应变率用 Cowper-Symonds 模型来考虑, 用与应变率有关的因数表示屈服应力, 如式(1)所示。

$$\sigma_Y = \left[ 1 + \left( \frac{\dot{\epsilon}}{C} \right)^P \right] (\sigma_0 + \beta E_p \epsilon_p^{\text{eff}}) \quad (1)$$

式中:  $\sigma_0$  为初始屈服应力;  $\dot{\epsilon}$  为应变率;  $C, P$  为 Cowper-Symonds 应变率参数;  $\epsilon_p^{\text{eff}}$  为有效塑性应变;  $E_p$  为塑性硬化模量, 由下式给出:

收稿日期: 2010-01-14; 修订日期: 2010-03-13

基金项目: 教育部科学技术研究重点项目(208082); 人事部留学人员科技活动项目择优资助经费(优秀类)项目

作者简介: 李成(1962-), 男, 新疆乌鲁木齐人, 郑州大学教授, 博士, 主要研究方向为机械强度、复合材料结构强度与冲击损伤, E-mail: chengli@zzu.edu.cn.

$$E_p = \frac{E_{tan} E}{E - E_{tan}} \quad (2)$$

定义该模型时需要输入的参数如表 1 所示。

表 1 子弹的材料属性

密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	杨氏模量/GPa	硬化系数β
7 850	210	1.0
切线模量/MPa	屈服应力/MPa	失效应变
763	380	0.3

钢板材料模型采用 Johnson-Cook 模型。在 Johnson-Cook 模型中,采用流动应力  $\sigma$  和失效应变  $\epsilon^f$  来描述材料的动态力学特性。

$$\sigma = [A + B\epsilon^n][1 + C \ln \dot{\epsilon}][1 - T^{*m}] \quad (3)$$

$$\epsilon^f = [D_1 + D_2 \exp D_3 \sigma^*][1 + D_4 \cdot \ln \dot{\epsilon}][1 + D_5 T^*] \quad (4)$$

式中: $\epsilon$  为等效塑性应变; $\dot{\epsilon} = \frac{\dot{\epsilon}}{\epsilon_0}$  为无量纲等效塑性应变率( $\dot{\epsilon}_0$  一般取为 1.0/s); $\sigma^*$  为压力和有效应力的比值( $\sigma^* = P/\sigma_{eff}$ ),而材料的融化温度  $T^*$  为

$$T^* = \frac{T - T_1}{T_2 - T_1} \quad (5)$$

式中: $T_1$  为参考温度(一般为室温); $T_2$  而为材料的熔点温度。由于  $T^*$  一般不能为负数,所以  $T$  必须大于  $T_1$ ,如果  $T_1$  取为室温,则所构建的本构关系则只适应于高于室温的情况。其它 5 个参数  $A, B, C, m, n$  均为材料常数,其中  $C$  为表征应变率敏感性的参数,也称为应变率敏感系数。当损伤系数

$D(D = \frac{\sum \Delta \epsilon}{\epsilon_f})$  达到 1 时,材料发生碎裂。

靶板采用 Johnson-Cook 材料模型结合 Grüneisen 状态方程进行建模,Grüneisen 状态方程为

$$p = \begin{cases} \frac{\rho_0 C_0 \mu \left[ 1 + \left( 1 - \frac{\gamma_0}{2} \right) \mu - \frac{\alpha}{2} \mu^2 \right]}{\left[ 1 + (S_1 - 1) \mu - S_2 \frac{\mu^2}{\mu + 1} - S_3 \frac{\mu^3}{(\mu + 1)^2} \right]^2} + (\gamma_0 + \alpha \mu) E_0 & \mu \geq 0 \\ \rho_0 C_0 \mu + (\gamma_0 + \alpha \mu) E_0 & \mu < 0. \end{cases} \quad (6)$$

式中: $\mu = \frac{p}{\rho_0} - 1$ ;  $E_0$  为原单位体积的初始内能。

上述关系表示,当材料承受压缩与拉伸时,可采用不同的状态方程描述材料所产生的压力,式

(6)中的材料参数  $C_0, S$  分别为材料的 Hugoniot 曲线  $\mu_s - \mu_p$  的截距和斜率, $\gamma_0$  是 Grüneisen 参数, $\alpha$  是其一阶体积修正,参数如表 2,3 所示。

表 2 钢板 Johnson-Cook 材料参数<sup>[2]</sup>

$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$E/\text{GPa}$	$\mu$	$G/\text{GPa}$	$A/\text{GPa}$	$B/\text{GPa}$
7 830	210	0.3	80.80	0.792	0.51
$T_2/\text{K}$	$T_1/\text{K}$	$m$	$n$	$C$	$D_1$
2 066	298	1.03	0.26	0.014	0.80
$D_2$	$D_3$	$D_4$	$D_5$	$C_p/(J \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	
0	0	0	0	477	

表 3 钢板 Grüneisen 状态方程参数

$C_0/(m \cdot s^{-1})$	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$\gamma_0$	$\alpha$	$E_0$	$\mu$
5 900	1.49	0.00	0.00	2.17	0.46	0.00	1.00

### 1.3 有限元网格划分

有限元网格的大小直接影响了计算的精度,从理论上来说,网格划分得越密,越符合实际,计算精度越高,结果越可靠。但是划分过密的话,不可避免地增加了运算量,延长了运算时间。

为综合考虑计算精度和计算时间,在分析过程中,对子弹侵彻部分的网格进行了细化,在远离侵彻区,网格划分得相对较粗,为了表现清楚,图 2 截取了子弹与靶板的局部网格图。

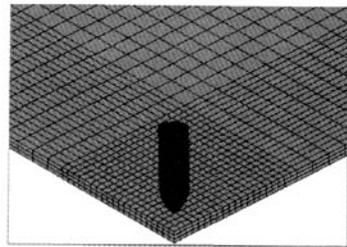


图 2 子弹与靶板局部网格图

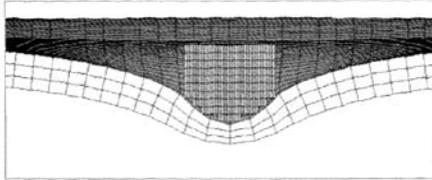
Fig. 2 The local meshed map of bullet and target plate

## 2 有限元计算及结果分析

根据以上的有限元分析模型,对钢板厚度相同,但层数不同;或层数相同,但层间距不同的情况分别进行计算。

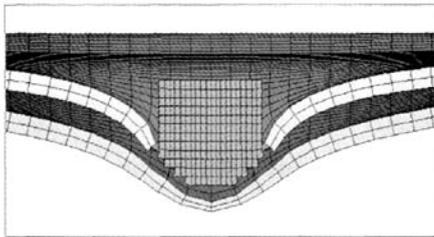
在有限元分析过程中,子弹能量的耗损主要包括:子弹的本身变形及破坏吸能和钢板变形破坏吸能。因此在厚度相同的情况下,钢板的分层及间隙作用对钢板的变形吸能会有影响。

对于速度 500 m/s 的子弹,侵彻 3 mm 厚的钢板,采用不同的钢板结构及间距,分 4 种工况,进行分析,并对仿真结果进行对比.经仿真计算,各工况及其结果如图 3~6 所示.



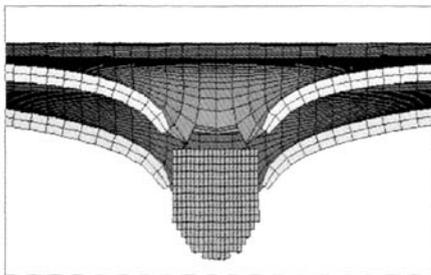
工况 1:子弹初速 500 m/s,单层板厚 3 mm.  
结果:子弹速度为 0,靶板未破坏,鼓包高度为 6.7 mm.

图 3 工况 1 及结果状态  
Fig.3 Condition 1 and results



工况 2:子弹初速 500 m/s,双层板,每层厚 1.5 mm,层间距 0.  
结果:子弹速度为 0,第一层穿透,第二层鼓包 9.8 mm.

图 4 工况 2 及结果状态  
Fig.4 Condition 2 and results

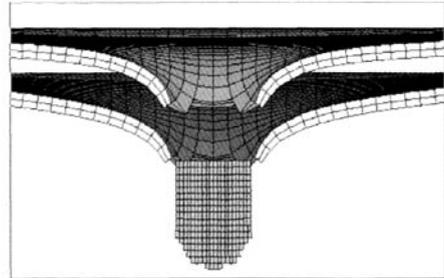


工况 3:子弹初速度 500 m/s,双层板,每层厚度 1.5 mm,层间距 1 mm.  
结果:两层板都被击透,子弹速度为 54 m/s.

图 5 工况 3 及结果状态  
Fig.5 Condition 3 and results

由工况 1 和工况 2 对比可得知,在子弹初始能量一致的情况下,厚度相同(3 mm)的钢板,单层钢板和双层贴合的钢板,都能抵御初速度为 500 m/s 子弹的侵彻,但是在靶板的背面出现了

6.7 mm 的鼓包;而 0 间距贴合的双层钢板,第一层钢板发生了穿透性破坏,第二层钢板未破坏,只出现了 9.8 mm 的鼓包.由此可以得出,在不考虑其它因素影响的情况下,不分层的同厚度钢板具有更好的防御子弹侵彻破坏的能力.



工况 4:子弹初速度 500 m/s,双层板,每层厚度 1.5 mm,层间距 3 mm.  
结果:两层都被击透,子弹速度为 205 m/s.

图 6 工况 4 及结果状态  
Fig.6 Condition 4 and results

图 4、5、6 中,靶板都是双层钢板,只是层间距有所不同.当间距为 0 时,子弹末速度为 0,当间距为 1 mm 时,子弹末速度为 54 m/s,当间距增大到 3 mm 时,子弹末速度增大到 205 m/s.即随着双层板间距的增大,靶板对子弹动能的吸收量显著减少,图 7 中显示了 1/4 计算模型时,双层板间距对靶板动能吸收量的影响.由图 7 可以看出,当层间距由 0 变到 3 mm 的过程中,靶板吸能也呈现了明显的变化,由 172 J 减少到 155 J,可以看出间隙对靶板吸能的削弱作用.

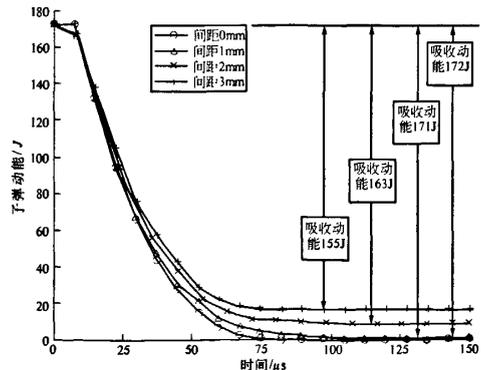


图 7 1/4 模型板间距对靶板吸收动能影响  
Fig.7 The impact of spacing on the absorption about fourth model

### 3 结论

利用非线性动态显式有限元分析软件 AN-

SYS 10.0/LS - DYNA, 建立子弹与防弹钢靶板的有限元模型, 通过计算得子弹速度与能量变化、钢板损坏形态等一系列计算结果. 通过对计算结果分析得出以下结论:

(1) 塑性随动强化模型和 Johnson-Cook 本构模型可以较好地模拟子弹对金属类延性材料的冲击侵彻问题.

(2) 采用 Johnson-Cook 材料模型来模拟 B900FD-1 型防弹钢板冲击载荷下的损伤, 可看出 B900FD-1 型防弹钢板具备良好的塑性强化特性, 在子弹冲击时钢板能够迅速达到塑性强化, 而子弹由于其材料性质决定不具备这种塑性强化特性, 在冲击钢板过程中子弹产生的塑性应变很快达到阈值, 产生侵蚀破坏.

(3) 靶板的变形吸能和破坏吸能是靶板吸收子弹能量的主要方式.

(4) 同等厚度的钢板, 结构分层会削弱其抗弹能力. 同时, 层间距的增加也不利于其对子弹动

能的吸收.

#### 参考文献:

- [1] 陈薇. 纤维复合材料及其组合靶板的抗破片机理及弹道特性研究[D]. 南京: 南京理工大学瞬态物理国家重点实验室, 2006: 2 - 13.
- [2] 常敬臻, 刘占芳, 李建鹏, 等. B900FD - 1 型防弹钢板抗侵彻能力数值模拟[J]. 重庆大学学报: 自然科学版, 2006, 29(10): 82 - 86.
- [3] SHAN Q H. Impact resistance of a rectangular polycarbonate armor plate subjected to single and multiple impacts[J]. International Journal of Impact Engineering, 2009, 36(9): 1128 - 1135.
- [4] QIAN L, QU M. Study on terminal effects of dense fragment cluster impact on armor plate. part II: numerical simulations[J]. International Journal of Impact Engineering, 2005, 31(6): 769 - 780.
- [5] 白金泽. LS-DYNA3D 理论基础与实例分析[M]. 北京: 科学出版社, 2005.

### Three - dimensional Damage Analysis of Bullet - proof Steel Plate under Impact Loading

LI Cheng, MA Zhi - lei, WANG Yong - tao

(School of Mechanical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** In order to consider the capacity and operational flexibility of bullet - proof equipment, nonlinear dynamic explicit finite element analysis software ANSYS10.0/LS - DYNA was used in this paper to simulate the penetration of armor plate by bullet. It reproduced the dynamic process of penetration. Further analysis has been made to make sure the role of stratification and the space. For a bullet - proof design, this paper provides a reference.

**Key words:** penetration; numerical simulation; stratification; space