

文章编号:1000-582X(2006)10-0082-04

B900FD-1型防弹钢板抗侵彻能力数值模拟*

常敬臻^{1,2},刘占芳¹,李建鹏¹,马鸣图³

(1. 重庆大学工程力学系,重庆 400030;2. 中国工程物理研究院结构力学研究所,四川 绵阳 621900;
3. 重庆汽车研究所,重庆 400039)

摘要:采用 ANSYS/LS-DYNA 有限元分析软件对 B900FD-1 型防弹钢板抗侵彻能力进行了数值模拟,对比分析了数值模拟结果与试验结果之间的异同,数值模拟结果表明采用 Johnson-Cook 本构模型能够较好地模拟金属类延性材料在强动载荷作用下的物理力学特性.进一步采用数值分析方法对不同厚度的 B900FD-1 型防弹钢板进行了侵彻模拟,得到了 500 m/s 子弹撞击速度下钢板的极限设计厚度.

关键词:防弹钢板;侵彻;数值模拟

中图分类号: O347.3

文献标识码: A

防弹运钞车是现代社会的必备运输工具,尤其是在市场经济条件下,现金流通量加大,各不同地区汇款是通过现代运钞车完成的.运钞车必须保证现金运输的安全,并具有遇劫匪抢劫时的保安押运人员的安全功能,即运钞车具有良好的防弹功能和车辆的重要部位如电池、发动机、水箱、油箱等具有防弹功能,遇枪击时,也能保证运钞车辆安全行驶的功能.运钞车除采用防弹玻璃外,还需要大量使用防弹钢板,防弹钢板是赋予运钞车防弹功能的关键材料之一.防弹钢板不仅用于运钞车的防护,还应用于防暴车,以及公安特种车辆.

运钞车用防弹钢板多按照 GA164-1997《专用运钞车防护技术条件》中相应防护级别需要进行枪击试验,要求 3 mm 厚度的防弹钢板在 500 m/s 的子弹射击下具备防护能力.目前,运钞车用防弹钢板设计多采用理论设计、枪击实验完成,在实验中考核设计成果,而采用数值分析方法对防弹钢板抗侵彻能力研究相关报道较少.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的研究途径,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同时,可采用数值模拟分析进行验证,适用范围广^[1].文中采用 ANSYS/LS-DYNA 对子弹侵彻 B900FD-型防弹钢板过程进行数值模

拟,分析了设计厚度为 3 mm 的钢板抗侵彻能力.并通过对不同厚度的钢板进行侵彻模拟,分析了防弹钢板在 500 m/s 子弹撞击速度下的极限设计厚度.

1 有限元分析模型

1.1 几何模型

按照 GA164-1997《专用运钞车防护技术条件》要求,对于防弹钢板将采用枪击试验,子弹质量为 5.56~5.69 g,子弹为钢芯弹,其几何模型见图 1.枪击试验中钢板长度为 305 mm × 305 mm,由于子弹直径仅为 7.62 mm,因此可视靶板为无限大,忽略靶板的边界效应.

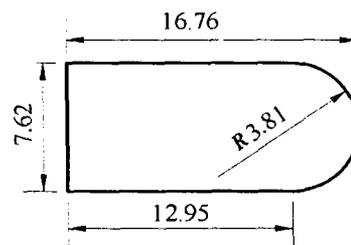


图1 子弹结构简图(单位:mm)

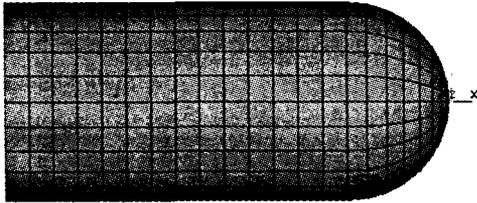
在进行数值分析时对钢板四周进行位移约束,对子弹施以速度载荷.采用三维实体单元进行建模,计算所建的子弹、靶板有限元分析模型见图 2 所示.网格划分时,考虑到弹靶尺寸上的差异,子弹网格及靶板中心

* 收稿日期:2006-05-17

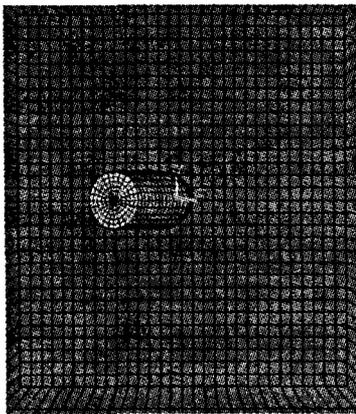
基金项目:国家自然科学基金委员会与中国工程物理研究院联合基金项目(10376046);国家自然科学基金项目(10572158)

作者简介:常敬臻(1978-),男,江苏徐州人,重庆大学硕士研究生,主要从事结构力学方向研究.

部分网格尺寸大小为 0.6 mm,靶板厚度纵向网格划分为 3 层单元. 子弹划分为 2 736 个单元,节点数为 2 853;数值模拟了多种厚度的靶板抗侵彻能力,靶板的单元总数为 6 600 ~ 9 900,节点总数为 10 083 ~ 13 444. 计算时间设置为 300 μs,时间步长为 2 μs.



(a) 子弹有限元分析模型



(b) 弹-靶有限元分析模型

图 2 有限元模型

1.2 强动载下材料模型

数值模拟中采用塑性随动强化模型和 Johnson-Cook 材料模型进行建模分析,并结合 Grüneisen 状态方程来描述材料在高速冲击下的物理特性. 塑性随动强化模型本构关系为^[2]:

$$\sigma_y = \left[1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{c} \right)^{1/p} \right] (\sigma_0 + \beta E_p \epsilon), \quad (1)$$

式中,β为材料硬化参数;ε̇和ε为应变率和等效塑性应变;σ₀为材料静态屈服应力,Pa;E_p为材料塑性硬化模量,Pa;c,p为 Cowper-Symonds 应变率参数.

子弹采用塑性随动强化材料模型描述子弹的动态塑性特性,相关材料参数列于表 1 中.

表 1 子弹塑性随动强化模型材料参数

材料	E/ GPa	ρ/ kg/m ³	ν	E _p / GPa	c	p	ε	σ _c / MPa	β
普通钢	210	7 850	0.3	2.10	1.0	100.0	0.3	380	1.0

在 Johnson-Cook 模型中,采用流动应力和失效应变来描述材料的动态力学特性^[3]:

$$\sigma = (A + B\epsilon^n)(1 + C \ln \dot{\epsilon})(1 - t^{*m}), \quad (2)$$

$$\epsilon_r = [D_1 + D_2 \exp D_3 \sigma^*][1 + D_4 \ln \dot{\epsilon}][1 + D_5 T^*], \quad (3)$$

上式中 ε 为等效塑性应变,ε̇*为无量纲等效塑性应变率(ε̇₀一般取为 1.0/s),σ*为压力和有效应力的比值(σ* = P/σ_{eff}),而材料的融化温度 T* 为:

$$T^* = \frac{T - T_r}{T_m - T_r}, \quad (4)$$

式中,T_r为参考温度(一般为室温),而 T_m为材料的熔点温度.文献[3]中,被取为室温,但也有人认为 T_r应该为使用时材料的最低温度或是试验的最低温度^[4].由于 T* 一般不能为负数,所以 T 必须大于 T_r,如果 T_r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 = ∑ Δε/ε_r)的值达到 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^[5]:

$$p = \begin{cases} \frac{\rho_0 C_0^2 \mu [1 + (1 - \gamma_0/2)\mu - \frac{a}{2}\mu^2]}{[1 + (S_1 - 1)\mu - S_2 \frac{\mu_2}{\mu + 1} - S_3 \frac{\mu_3}{(\mu + 1)^2}]^2} + (\gamma_0 + a_\mu)E_0 & \mu \geq 0 \\ \rho_0 C_0^2 \mu + (\gamma_0 + a_\mu)E_0 & \mu < 0 \end{cases} \quad (5)$$

式(5)中,μ = P/ρ₀,E₀为原单位体积的初始内能.

表 2 钢板 Johnson-Cook 材料参数^[3]

	密度 ρ/kg · m ⁻³	弹性模量 E/GPa	泊松比 ν	剪切模量 G/GPa	A/GPa	B/GPa
	7 830	210	0.3	80.8	0.792	0.51
B900FD	n	C	m	熔点温度 T _m /K	室温 T _r /K	比热 C _p /J/kg · K
-1 钢板	0.26	0.014	1.03	2066	298	477
	D ₁	D ₂	D ₃	D ₄	D ₅	
	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0	

表 3 钢板 Grüneisen 状态方程参数^[5]

材料	C ₀ /m · s ⁻¹	S ₁	S ₂	S ₃	γ ₀	a	E ₀	μ ₀
B900FD-1 钢板	5 900	1.49	0	0	2.17	0.46	0.0	1.0

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(5)中的材料参数 C_0 、 S 分别为材料的 Hugoniot 曲线 $\mu_c - \mu_p$ 的截距和斜率, γ_0 是 Grüneisen 参数, a 是其一阶体积修正,分别在表 2、表 3 中给出数值模拟所用的相关参数.

1.3 数值分析工况

在进行数值模拟分析时,首先对照枪击试验对子弹以 504 m/s 速度撞击 3 mm 厚度的钢板进行数值分析,并与试验结果进行对比.为了探讨 500 m/s 子弹枪击时钢板极限设计厚度,对钢板厚度为 2~2.4 mm 时子弹侵彻过程进行了数值分析,分析了钢板的极限设计厚度,具体的计算工况列于表 4 中.

表 4 计算工况列表

工况编号	钢板厚度/mm	子弹撞击速度/ $m \cdot s^{-1}$	钢板边长/mm
工况 1	3	504	305 mm × 305 mm
工况 2	2	500	
工况 3	2.1		
工况 4	2.2		
工况 5	2.3		
工况 6	2.4		

2 数值分析结果与讨论

2.1 子弹侵彻 3 mm 厚度钢板数值模拟结果

图 3 为子弹侵彻 3 mm 厚度的钢板过程图,数值模拟结果可以发现子弹在以 500 m/s 的速度侵彻钢板时,钢板由于子弹的撞击产生弹伤鼓包,背面弹伤鼓包高度为 8.1 mm,而枪击试验得到的背面弹伤鼓包高度为 8.6 mm^[6].数值模拟结果与枪击试验结果相比,钢板未损坏,现象相同,得到的背面弹伤鼓包高度数据也比较接近,误差为 5.8%.

通过观察发现子弹撞击钢板后剩余速度为 0,可以判断 3 mm 厚度的 B900FD-1 钢板对于 500 m/s 的子弹具有防护能力,满足设计要求.在数值分析中采用塑性强化材料模型和 Johnson-Cook 材料模型来分别模拟子弹与 B900FD-1 型防弹钢板的动态力学特性,数值模拟的结果表明,B900FD-1 型防弹钢板在抗击子弹的侵彻过程中具备良好的塑性强化特性,从而在厚度为 3 mm 的情况下能够抗击子弹的侵彻而不被穿透.数值分析中子弹采用普通钢建模分析,在侵彻过程中子弹所产生的塑性应变很快达到数值分析所设定的等效塑性应变,不具备良好的塑性强化特性,子弹产生侵蚀破坏.

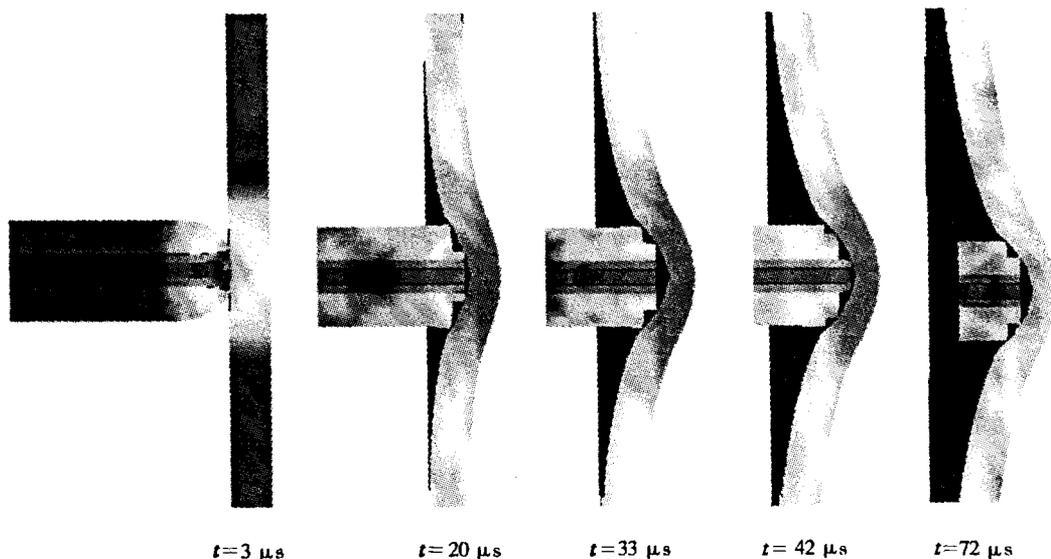


图 3 3 mm 钢板侵彻过程图

2.2 钢板极限设计厚度结果分析

通过对几种不同工况下子弹以 500 m/s 撞击不同厚度的钢板,得到了弹靶最终状态图(图 4).从图 4 中可以看出子弹以 500 m/s 的速度撞击钢板时,厚度为 2 mm 和 2.1 mm 的钢板都被子弹穿透;而厚度为 2.2 mm、2.3 mm 的钢板,虽然子弹也将其击破,但是由于

子弹所剩动能较低,没有穿透,只是使钢板背部产生了崩落;对于厚度为 2.4 mm 的钢板,子弹没有使其产生破坏,只是产生了一个弹坑,各种工况下子弹的剩余速度及侵彻结果列于表 5 中.

从数值模拟的结果来看,B900FD-1 型防弹钢板在承受 500 m/s 速度的子弹撞击时,2.2 mm 和 2.3 mm 厚

度的钢板能够防止子弹侵彻,子弹的剩余速度为 1.88 m/s 和 0 m/s,但钢板背部产生了崩落;而厚度为2.4 mm 的钢板能够防止子弹以 500 m/s 速度撞击,钢板未损坏,子弹剩余速度为 0. 因此可以判断,按照 GA164 -

1997《专用运钞车防护技术条件》要求,B900FD-1 型防弹钢板承受 500 m/s 的子弹枪击的极限设计厚度为 2.4 mm.

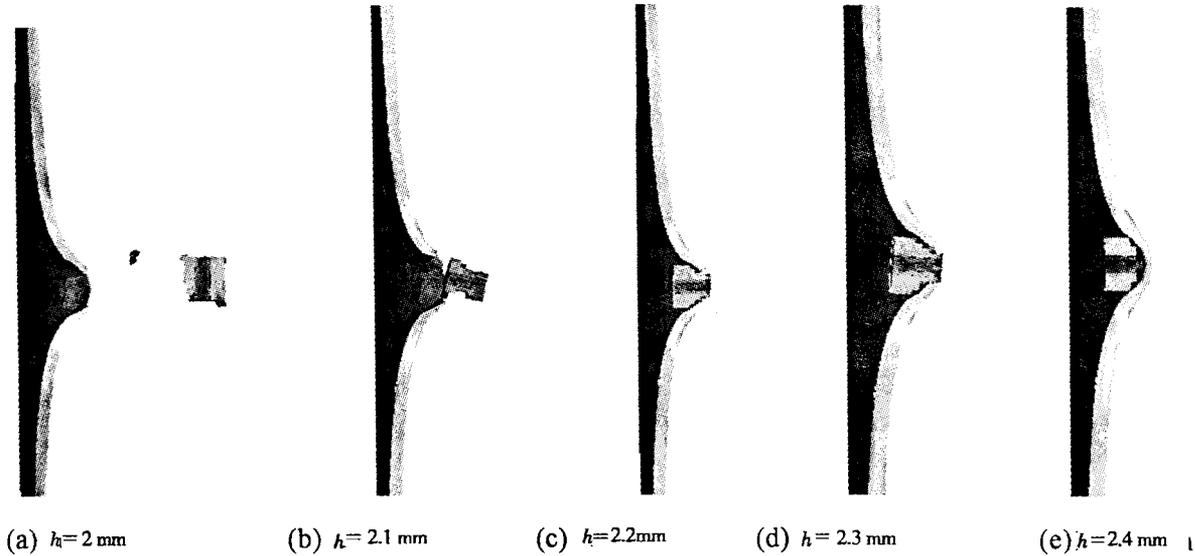


图4 不同厚度的钢板抗子弹侵彻最终状态图

表5 各种工况下子弹剩余速度列表

工况号	子弹剩余速度/ $m \cdot s^{-1}$	侵彻结果
工况2	105.40	完全穿透
工况3	32.40	完全穿透
工况4	1.88	钢板背面崩落
工况5	0	钢板背面崩落
工况6	0	钢板产生弹坑、未损坏

3 结 语

通过采用 ANSYS/LS-DYNA 有限元软件对 B900FD-1 型防弹钢板进行数值分析,较好地再现了试验现象,并得到了以下结论:

1) 对于 3 mm 的 B900FD-1 型防弹钢板,数值分析的得到其背面弹伤鼓包高度为 8.1 mm,与试验所得的背面弹伤鼓包高度为 8.6 mm 相比,误差 5.8% ;

2) 采用 Johnson-Cook 材料模型来模拟 B900FD-1 型防弹钢板在子弹侵彻过程中的动态力学特性表明,B900FD-1 型防弹钢板具备良好的塑性强化特性,在子弹侵彻过程中钢板能够较快地达到塑性强化,而子弹由于其材料性质决定不具备这种塑性强化特性,在侵彻钢板的过程中子弹产生的塑性应变很快得到数值分析所设定的等效塑性应变值,产生侵蚀破坏;

3) 数值模拟的结果表明,按照 GA164 - 1997《专用运钞车防护技术条件》要求,B900FD-1 型防弹钢板的极限设计厚度为 2.4 mm,但需进一步进行试验验证.

参考文献:

- [1] 李英雷. 装甲陶瓷的本构关系和抗弹机理研究[D]. 博士学位论文. 合肥:中国科学技术大学,2003: 114.
- [2] LS-DYNA USER MANUAL. Version 970 [Z]. LSTC, Livermore Software Technology Corporation,2003.
- [3] Johnson G R, Cook W H. A constitutive model and data for metals subjected to large strain, high strain rates and high temperatures[Z]. 7th International Symposium on Ballistics. Netherlands: Hague, 1983. 541 - 547.
- [4] LIANG RIQIANG. Elastic - plastic constitutive modeling of tantalum and Aermet 100 steel due to quasi-static and dynamic loading[D]. Doctoral dissertation. USA: University of Maryland, 1999.
- [5] ASAY J R, CHHABIALDAS L C. Shock waves and high - strain - rate phenomena in metals[M]. New York: Plenum Press,1981.
- [6] B900FD-1 型防弹钢板检验报告[R]. 公安部安全与警用电子产品质量检测中心,2004.

(下转第95页)

Investigation on Abrasive Belt Grinding of Stainless Steel

WANG Wei-lang¹, PAN Fu-sheng¹, CHEN Yan-jun², HUANG Yun², XU Chun-xia¹

(1. College of Materials Science and Engineering;

2. College of Mechanical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract: The stainless steel has excellent properties, but it is difficult-to-grind material. Because belt grinding shows many advantages, grinding experiments with four kinds of abrasive grain on stainless steel are carried out. The correlation mechanism between the abrasive grits and the workpiece, and influence factors on material removal rate are discussed. A scanning electric microscope was used to investigate the surface micro-shape characteristics of abrasive grit and workface. The material removal mechanism and the wearing types of abrasive belt are also analyzed.

Key words: abrasive belt grinding; stainless steel; wearing of abrasive belt; material removal mechanism; surface shape

(编辑 张小强)

~~~~~  
(上接第85页)

## Numerical Simulation for B900FD-1 Bulletproof Armor Plate Against Penetration

CHANG Jing-zhen<sup>1,2</sup>, LIU Zhan-fang<sup>1</sup>, LI Jian-peng<sup>1</sup>, MA Ming-tu<sup>3</sup>

(1. Department of Engineering Mechanics, Chongqing University, Chongqing 400030, China;

2. Institute of Structure Mechanics of China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China;

3. Chongqing Motor Research Institute, Chongqing 400039, China)

**Abstract:** ANSYS/LS-DYNA is used to simulate the penetration process of B900FD - 1 bulletproof armor plate, Comparisons and analysis were made between numerical simulation and experiment results. The numerical simulations shows that the Johnson-Cook constitutive model could simulate the physical and mechanical behaviors of ductile materials under shock-loaded. The ultimate-thickness of B900FD-1 bulletproof armor plate under 500m/s impact velocity is analyzed by more numerical simulations.

**Key words:** Bulletproof armor plate; Penetration; Numerical simulation

(编辑 陈移峰)