

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2011.03.012

陶瓷-钢板组合式防护层抗弹性能仿真研究

甄建伟¹, 安振涛¹, 陈玉成², 李金明¹

(1. 军械工程学院 弹药工程系, 石家庄 050003; 2. 石家庄陆军指挥学院 运筹中心, 石家庄 050084)

摘要: 依据 GJB 4300-2002《军用防弹衣安全技术性能要求》中 IV 级的防破片等级要求, 采用数值仿真方法对陶瓷-钢板组合式防护层的防弹性能进行研究。设定相应等级的初始速度, 通过改变陶瓷板和钢板的厚度进行建模仿真, 确定 2 种材料厚度对整体抗弹性能的影响。仿真结果表明, 当陶瓷靶较厚时, 钢板只起到整体支撑作用, 对抗弹性能几乎没有影响, 钢板的厚度可根据对靶板最大变形量的要求适当选取。因此, 要满足 GJB 4300-2002 中 IV 级的防破片等级要求, 陶瓷靶板的厚度应在 12 mm 以上。

关键词: 陶瓷; 钢板; 抗弹性能; 仿真

中图分类号: TJ391.9 **文献标志码:** A

Simulation Study of Bullet-Proof Performance of Ceramic-Steel Plate Target

Zhen Jianwei¹, An Zhen tao¹, Chen Yucheng², Li Jinming¹

(1. Dept. of Ammunition Engineering, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China;
2. Operational Center, Shijiazhuang Army Command College, Shijiazhuang 050084, China)

Abstract: According to standard IV fragment-proof grading requirements of GJB 4300-2002 Army Bullet-Proof Vest Safety Technology Requirement, use numerical simulation method to study the bullet-proof performance of ceramic/ steel targets. The initial velocity was set, and then through changing thickness of two materials, the entire bullet-proof performance of different states was confirmed. The results of simulation showed that, when the thickness of ceramic plate was large, the bullet-proof performance was effect slightly by steel plate. Then the thickness of steel plate can be selected following the demand of maximum deforming. The conclusion is that, if the demand of standard IV in GJB 4300-2002 could be met, the thickness of ceramic plate must be above 12mm. The results are useful to engineering application.

Keywords: ceramic; steel plate; bullet-proof performance; simulation

0 引言

陶瓷材料具有优良的力学性能, 如密度低、弹性模量大、压缩强度高、硬度高等特点, 在抗中、高速冲击时可发挥重要的作用^[1]。在防弹用陶瓷领域, 现主要使用特种陶瓷。根据主要构成成分和制作工艺的不同, 防护用特种陶瓷主要分为 Al_2O_3 、 SiC 、 B_4C 、 TiB_2 等, 其性能也有很大差别^[2]。但无论何种特种陶瓷材料, 在应用于防护工程领域时很少单独使用, 常常将其与其它材料进行组合。目前, 各国学者非常重视陶瓷/金属复合装甲的研究^[3-6]。故按照 GJB 4300-2002《军用防弹衣安全技术性能要求》中 IV 级的防破片等级要求, 对陶瓷-钢板组合式防护层的防弹性能进行仿真研究, 以确定最佳的防护层设计参数, 为工程应用提供数据参考。

1 模型的构建

1.1 模型的尺寸参数及初始条件

笔者应用爆炸冲击仿真软件 AUTODYN, 对破片

侵彻靶板进行仿真。破片按照 GJB 4300-2002 中模拟破片的尺寸建立, 破片的初始速度设定为 700 m/s, 与 IV 级的防破片等级相对应。靶板按照陶瓷-钢板的前后顺序建立, 陶瓷靶板紧贴钢板放置, 2 层靶板长度均为 160 mm, 钢板和陶瓷靶板的厚度待定, 并在钢板的端部施加固定约束。为减少计算量, 提高运算速度, 模型简化为二维模型, 并只建立 1/2 的模型, 如图 1。数值模拟时, 通过调节陶瓷靶板和钢板的厚度, 确保防护层可使破片的速度降为 0 m/s, 从而确定陶瓷靶板和钢板的最小厚度。

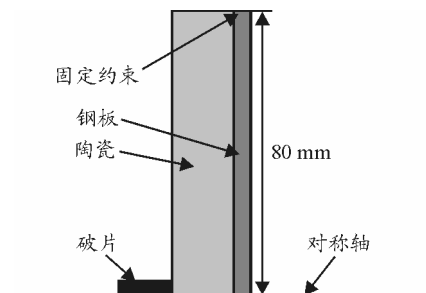


图 1 破片侵彻靶板计算模型

收稿日期: 2010-10-09; 修回日期: 2010-12-09

作者简介: 甄建伟 (1981—), 男, 河北人, 博士研究生, 讲师, 从事装备运用环境与防护技术研究。

1.2 材料模型及参数

数值模拟中涉及的模型有破片、陶瓷靶板和钢板，它们的材料分别设定为刚性铸铁、Al₂O₃ 陶瓷和低碳钢。在强冲击载荷作用下，材料将产生复杂的动力学响应，例如：应变硬化、应变率硬化、塌陷、破碎等现象。在 AUTODYN 软件中，这些现象一般可以由 3 个模型来描述，分别是状态方程、强度模型和破坏准则。针对各种材料性质的不同，仿真过程选用了不同的材料本构模型，如表 1。

表 1 材料的本构模型

模型	破片	陶瓷靶板	钢板
材料名称	刚性铸铁	Al ₂ O ₃ 陶瓷	低碳钢
状态方程	Shock	Polynomial	Shock
强度模型	Piecewise JC	Johnson-Holmquist	Piecewise JC
破坏准则	None	Johnson-Holmquist	None

下面分别对 3 种材料模型进行描述，并确定其主要参数。

1) 破片

破片采用 Shock 状态方程。Shock 状态方程可以描述为：

$$P = P_H + \Gamma \rho (e - e_H) \quad (1)$$

其中，假定 $\Gamma \rho = \Gamma_0 \rho_0 = \text{常数}$ (Γ 为 Gruneisen 常数)， P_H 和 e_H 分别为 Hugoniot 曲线上某点的压力和内能。破片的材料模型主要参数如表 2。

表 2 破片的材料模型参数

密度/(g·cm ⁻³)	Gruneisen 常数	剪切模量	屈服应变
7.833	1.67	6.41e-1Mbar	4.69e-3Mbar

2) 陶瓷颗粒

陶瓷颗粒采用 Johnson-Holmquist 强度模型来描述其强度行为。此模型由 Johnson&Holmquist 于 1993 年提出，分为分段式 (JH1) 和连续式 (JH2) 2 种形式。笔者采用 JH2 强度模型，该模型包含陶瓷材料未损伤和已完全损伤的强度。在损伤破碎状态下其强度表示为：

$$\sigma^* = \sigma_i^* - D(\sigma_i^* - \sigma_f^*) \quad (2)$$

其中， D 为损伤因子， σ_i^* 和 σ_f^* 分别表示完整 ($D=0$) 和破碎 ($D=1$) 状态时材料的无量纲等效应力。陶瓷颗粒的材料模型主要参数如表 3。

表 3 陶瓷靶板的材料模型参数

密度/(g·cm ⁻³)	体积模量/kPa	剪切模量/kPa	Hugoniot 弹性极限/kPa
3.89	2.31e8	1.52e8	6.57e6

3) 钢板

钢板采用和破片材料相同的状态方程和强度模

型。钢板的材料模型主要参数如表 4。

表 4 钢板的材料模型参数

密度/(g·cm ⁻³)	Gruneisen 常数	剪切模量	屈服应变
7.86	1.67	6.41e-1Mbar	4.69e-3Mbar

2 仿真结果及分析

通过改变陶瓷靶板和钢板的厚度，建立数个仿真模型，分别进行计算，计算的时间域设定为 0~0.1 ms。在 0.1 ms 时刻，模型中各种材料的状态如图 2~图 4。

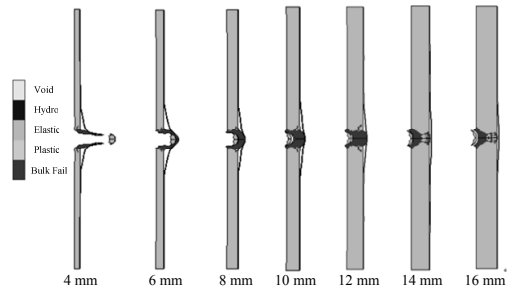


图 2 钢板为 0.5 mm 的不同厚度靶板状态图

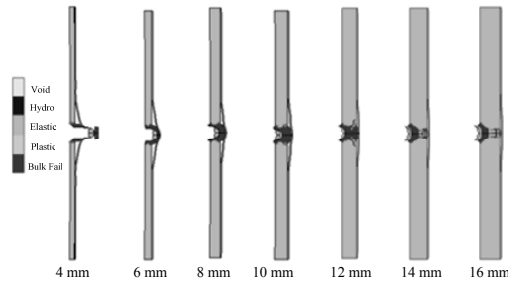


图 3 钢板为 1 mm 的不同厚度靶板状态图

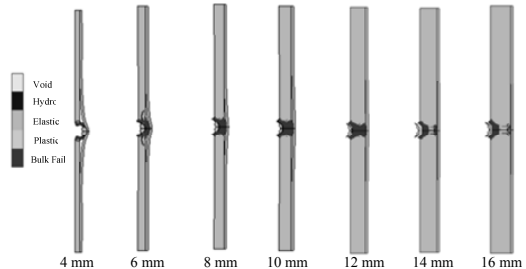


图 4 钢板为 2 mm 的不同厚度靶板状态图

图 2 为钢板厚度为 0.5 mm，陶瓷靶板为不同厚度的工况下材料的状态图，从图 2 中可以发现，当陶瓷靶板为 4 mm 时，破片可以轻易穿透防护层；随着陶瓷靶板厚度的增加，破片穿过陶瓷靶板后的余速逐渐变小，当陶瓷靶板为 12 mm 时，破片在撞击陶瓷靶后速度将迅速为零，但会有陶瓷锥形成；当陶瓷靶板为 14 mm 时，破片不能穿透陶瓷靶板，没有产生陶瓷锥；当陶瓷靶厚度进一步增大时，会产生明显的破片反弹现象。图 2~图 4 中，钢板厚度分别为 0.5 mm、1 mm 和 2 mm，将计算结果相比较可以发现：不同厚度的钢板对陶瓷靶的破坏程度

基本没有影响, 当陶瓷靶厚度较小 (4 mm) 时, 对于 3 种不同厚度钢板的情况, 破片均能穿透陶瓷靶; 当陶瓷靶厚 12 mm 时, 均有陶瓷锥产生; 但当陶瓷靶厚度增大为 14 mm 时, 3 种情况均没有产生陶瓷锥, 但在陶瓷靶背面会有少量陶瓷碎片崩落, 钢板的变形量也略有不同。

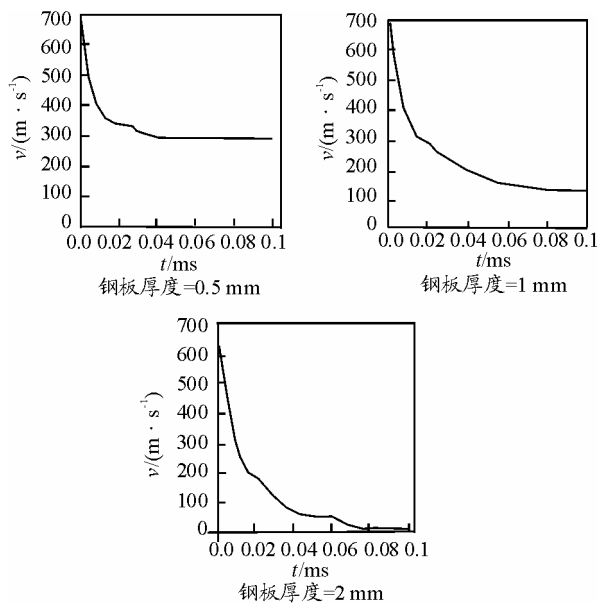


图 5 陶瓷靶板为 4 mm 时破片的速度/时间曲线

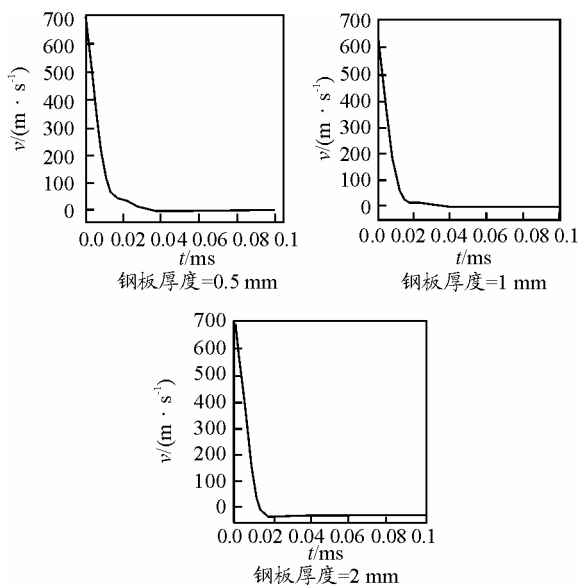


图 6 陶瓷靶板为 12 mm 时破片的速度/时间曲线

图 5~图 7 分别为不同厚度陶瓷靶和钢板工况下, 破片的速度/时间曲线。从图 5 中可以发现, 当陶瓷靶厚度为 4 mm 时, 陶瓷层将不能有效防御破片的侵彻, 在这种情况下钢板将起到重要作用, 随着钢板厚度的增加, 破片的余速将逐渐降低。但当陶瓷靶板的厚度较大时, 如图 6 中的陶瓷靶为 12 mm, 钢板的厚度将基本对破片速度的变化不造成

任何影响。当陶瓷靶板的厚度为 14 mm 时, 如图 7, 不同厚度钢板工况下, 破片速度曲线几乎相同。

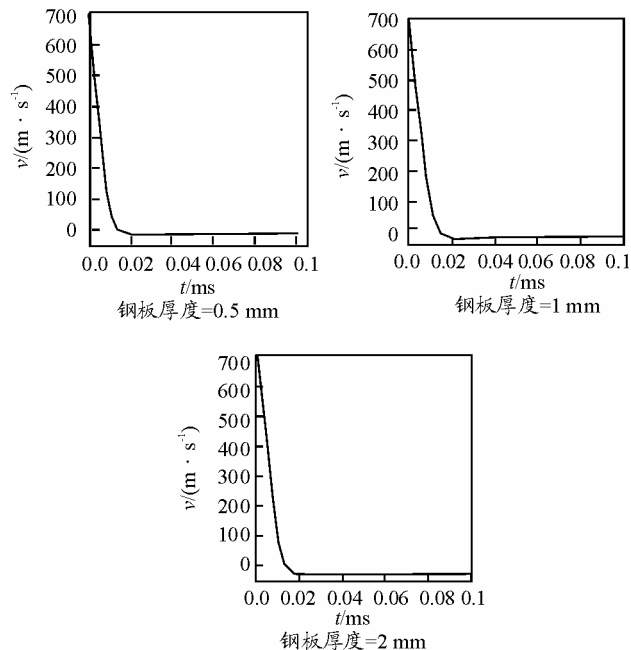


图 7 陶瓷靶板为 14 mm 时破片的速度/时间曲线

3 结论

1) 随着陶瓷靶厚度的增加, 其破坏形式由最初的被贯穿, 到产生陶瓷锥。当厚度达到一定值时, 陶瓷靶的着弹面产生一定深度的弹坑, 并在背弹面有少量陶瓷碎片崩落。

2) 当陶瓷靶较厚时, 钢板对陶瓷靶板只起到支撑的作用, 对抗弹性能几乎没有影响。因此, 针对 GJB 4300-2002 中 IV 级的防破片等级要求, 陶瓷靶板的厚度应在 12 mm 以上, 即在标准破片的侵彻作用下不会产生贯穿现象和形成陶瓷锥, 而支撑钢板的厚度可根据对最大变形量的限制适当选取。

参考文献:

- [1] 侯海量, 朱锡, 阚于龙. 陶瓷材料抗冲击响应特性研究进展[J]. 兵工学报, 2008, 29(1): 94-99.
- [2] 刘志翔. 陶瓷/纤维复合板抗侵彻特性研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2008: 9-10.
- [3] 陈斌, 罗夕容, 曾首义. 穿甲子弹侵彻陶瓷/钢靶板的数值模拟研究[J]. 弹道学报, 2009, 21(1): 14-18.
- [4] Goncalves D P, Melo F C L, Klein A N. Analysis and investigation of ballistic impace on ceramic/metal composite armour[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacturing, 2004, 44(1): 307-316.
- [5] 申志强, 蒋志刚, 曾首义. 陶瓷金属复合靶板工程模型及耗能分析[J]. 工程力学, 2008, 25(9): 229-234.
- [6] 张晓晴, 杨桂通, 黄小清. 弹体侵彻陶瓷/金属复合靶板问题的研究[J]. 工程力学, 2006, 23(4): 155-159.