

陶瓷预制破片侵彻特性研究^{*}

江雅莉¹, 陈智刚¹, 陈秀文², 申孝立²

(1 中北大学机电工程学院, 太原 030051; 2 二炮驻 519 厂军代室, 山西长治 046012)

摘要:为了研究陶瓷破片对有生力量的毁伤效能及在爆炸作用下的侵彻特性,以破片垂直侵彻靶板的实验为基础,采用 LS-Dyna 程序,对陶瓷破片以四种不同初速垂直侵彻松木靶进行了三维数值模拟。根据模拟结果,分析了侵彻过程各个阶段的物理现象和弹靶作用特征;绘制了不同侵彻初速对侵彻结果的影响曲线,可以为陶瓷破片在不同初速下的毁伤效能研究提供参考依据。结果表明,陶瓷破片在炸药爆炸冲击波作用下,其强度性能满足使用要求;三维数值模拟方法能够揭示陶瓷球垂直侵彻靶板的细节和初速对侵彻结果的影响情况,与实验结果吻合。

关键词:陶瓷破片;侵彻;数值模拟

中图分类号: TJ410.33 **文献标志码:** A

The Research of Penetration Characteristics of Preformed Ceramic Fragments

JIANG Yali¹, CHEN Zhigang¹, CHEN Xiuwen², SHEN Xiaoli²

(1 School of Mechatronics Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China;

2 Military Representative Office of the Second Artillery in No. 519 Factory, Shanxi Changzhi 046012, China)

Abstract: For researching damage effect and penetration capability of ceramic fragments, the three-dimensional simulation of fragments penetrating target at four different velocities was conducted with the LS-DYNA program based on experimental results. According to the simulation result, the penetration profile was obtained, and the process of penetration was analyzed, the curves affected by different initial velocity were drawn, which can provide reference for the study of damage effect of ceramic fragments. The results show that the intensity of ceramic fragment can meet the requirement; the 3-D numerical simulation can visually display the penetrating process of ceramic fragments. The numerical simulation result is consistent with the experimental results.

Keywords: ceramic fragment; penetration; numerical simulation

0 引言

陶瓷材料的应用已有几千年的历史,具有密度低、硬度高、抗压强度高特点,同时它还具有很高的高温强度,在高温下可以保持形状尺寸不变。因此陶瓷材料在军事领域的应用受到国内外普遍关注。 Al_2O_3 基陶瓷具有较好的力学性能,成本低且易于实现工程化生产,通过增韧处理的 Al_2O_3 还可以提高韧性和增加强度。利用其质量小,可控制存速,且对人体无持久影响的特点,可以用于近距离对有生力量的杀伤,尽量减少附带伤害。

文中以 25mm 松木靶作为人体模拟靶,在爆炸加载下陶瓷破片侵彻松木靶板实验的基础上,采用 LS-DYNA 程序,对陶瓷破片的侵彻过程进行了模拟研究,得到了不同初速下破片的穿靶过程,再现了侵彻过程中陶瓷破片的破坏及靶板的穿孔。

1 试验装置及试验结果

1.1 试验装置

如图 1 实验装置简图所示,试验用破片为经过增韧处理的圆形 Al_2O_3 陶瓷球,直径 5mm,质量 0.3g。松木靶架放置在爆炸塔内,在其表面

^{*} 收稿日期:2008-10-17

作者简介:江雅莉(1974-),女,河北涉县人,硕士研究生,研究方向:高效毁伤战斗部设计及数值仿真。

粘贴一张 500mm × 300mm 的有色手工纸,两片测速线靶粘贴在靶板中心,靶心距地面 1m。图 2 为陶瓷破片及装药结构,64 枚破片

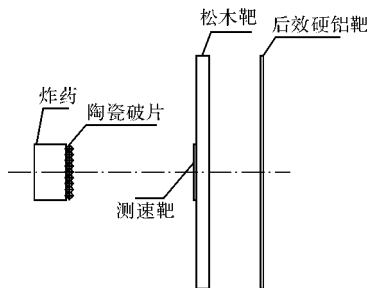


图 1 实验装置简图

片固粘在 Φ50mm 的泡沫塑料上,一端与药柱端面紧密贴合,药柱另一端表面压合一层塑-4 炸药后,将 Φ50mm 的泡沫塑料雷管固定座压紧在其上面。装配弹体横向放置在试验架上,其弹体中心与靶板中心水平对正;试验弹距靶板 1.3m,在靶板后侧 400mm 处放置一 400mm × 400mm × 2mm 的后效硬铝靶。弹体上缠有测速金属丝,作为初速网靶,由电起爆器起爆。



图 2 破片及装药

1.2 试验结果

在 100g 海萨尔炸药爆炸冲击波作用下,Φ5 球形破片以 2034m/s 的着靶速度,穿透 25mm 松木靶板,并穿透 2mm 后效硬铝靶,且在距靶板 600mm 的爆炸洞钢质墙壁上有较强的后效作用,穿透靶板的陶瓷球形破片数为 24 个,见图 3。

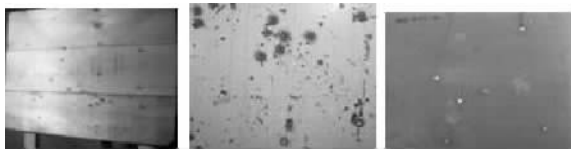


图 3 陶瓷破片的侵彻作用

实验结果表明陶瓷球形破片在炸药爆炸冲击波作用下,其强度性能满足使用要求。

Φ5 陶瓷球形破片,破片以初速 v_0 飞出,经距离 x 后,速度下降为:

$$v_x = v_0 \exp\left(-\frac{C_D \rho_a S}{2m_f} x\right) \quad (1)$$

式中: x 为破片飞行距离; ρ_a 为当地空气气体密度; C_D 为气动阻力系数,球形一般取 0.97; S 为破片迎风面积^[1]。

令 $\alpha = -\frac{C_D \rho_a S}{2m_f}$,称 α 为破片速度衰减系数。

根据式(1),当着靶速度为 2034m/s 时,初速计算为 2112.7m/s;在 1.3m 处的杀伤动能为 620.5J;比动能为 790.54J/cm²;当取人员动能杀伤标准为 78J 时,比动能标准为 160.J/cm²^[1]。

2 数值模拟

2.1 有限元模型

前处理采用 TrueGrid 有限元网格生成软件,建立陶瓷球侵彻松木靶板有限元模型,然后利用 LS-DYNA970 进行计算分析。在建模过程中,将陶瓷球、松木靶及后效硬铝靶均剖分成八节点六面体网格。

为更直观地观察陶瓷球对靶板的侵彻过程,且因结构、形状和载荷的对称性,取 1/2 结构进行模拟计算。实际建模时采用 Φ5 的陶瓷球,松木靶板尺寸为 50mm × 25mm × 25mm,硬铝靶尺寸为 50mm × 25mm × 2mm,为提高计算精度,在靶板中部对网格进行加密处理。陶瓷球、松木靶及硬铝靶几何模型及有限元模型见图 4。

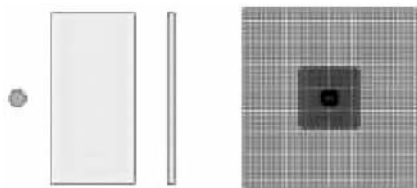


图 4 球、靶几何及有限元模型

陶瓷球与靶板间的接触采用 CONTACT_ERODING_SURFACE_TO_SURFACE,采用节点施加速度载荷方式来获得破片的初始速度。文中通过在靶板四周边界施加位移约束的方式来模拟靶板四周被固定的情况。计算时间 100μs,每 1μs 输出一组结果数据文件。

计算中所采用的单位系统为:长度(cm);质量(g);时间(μs);导出单位:密度(g/cm³);应力(Mbar);压力(Mbar);速度(cm/μs)。

2.2 材料模型及参数

本研究中采用直径为 5mm 的 Al₂O₃ 陶瓷球破片,分别以 2500m/s、2000m/s、1500m/s 以及 1000m/s 的速度对松木靶的垂直侵彻进行了三维数值模拟,并在松木靶后放置铝质后效靶。松木属中等阻抗材料,其靶的厚度为 25mm,硬铝靶的厚度为 2mm。陶瓷破片材料模型采用

MAT_JOHNSON_HOLMQUIST_CERAMICS 材料模型,即 JH2 模型;松木靶采用 MAT_ELASTIC 材料模型并添加失效模型 MAT_ADD_EROSION,硬铝靶采用 MAT_JOHNSON_COOK 材料模型和 EOS_GRUNEISEN 状态方程,材料参数见表 1~表 3。

表 1 Al₂O₃ 陶瓷材料 JH2 模型参数

参数	参数值	参数	参数值
密度 ρ / (g/cm ³)	3.7	雨贡纽弹性限 HEL/GPa	2.79
剪切模量 G/GPa	90.16	雨贡纽弹性限压力 PHEL/GPa	1.46
A	0.93	D1	0.005
B	0.31	D2	1.0
m	0.6	体积模量 K1/GPa	130.95
n	0.6	T	0.0027

表 2 松木靶材料参数

参数	参数值	参数	参数值
密度 ρ / (g/cm ³)	0.460	弹性模量 E/GPa	11.68
泊松比 PR	0.31	屈服应力 SIGP1/GPa	0.29

表 3 硬铝靶材料模型参数

参数	参数值	参数	参数值
密度 ρ / (g/cm ³)	2.7	N	0.34
剪切模量 G/GPa	28.6	C	0.0015
泊松比 PR	0.22	D1	0.13
A	0.00265	D2	0.13
B	0.00426	SPALL	3.0

3 模拟结果及分析

3.1 侵彻过程

侵彻作用过程可分为 3 个阶段:开坑阶段、准定常侵彻阶段和穿透阶段。

1)开坑阶段。从球体与靶板接触瞬间开始,接触表面产生了很多的压力,分别向靶板和球体内传播。向靶板内传播的冲击波引起碰撞点周围靶板材料以很大的变形速度作径向流动,向球体前进方向挤压推进,造成了靶板材料的破坏,开孔迅速扩展。

2)准定常侵彻阶段。继开坑阶段之后,球体继续向前推进,该阶段的冲击运动相对于整个侵彻过程来说是最稳定的,因为在该阶段各侵彻参数的变化缓慢,故常常将这一阶段的运动按不可压准定常处理。在该阶段中,球体仍有较高的运动速度,在向前推进过程中对靶板材料向侧向挤压,形成一个不断加深的深孔。

3)穿透阶段。在高速碰撞条件下,若靶板背面出现塑性变形时,球体的剩余速度仍然很高,这时侵彻过程就会进入到下一个阶段——穿透阶段。在该阶段,球体受到的阻力随着球体穿出程度的增加而逐渐减小,球体速度的减小趋势也逐渐缓和。靶板背面剧烈变形,在侵彻阶段形成的靶板材料破碎物经穿透孔高速飞出,且穿透孔的直径较侵彻阶段略大。

图 5 为 2500m/s 速度下陶瓷球侵彻松木靶及铝质后效靶的模拟结果与实验结果对比。其中,图 5(a)与图 5(b)分别为侵彻后松木靶与硬铝靶的模拟结果;图 5(c)、图 5(d)分别为侵彻后松木靶和硬铝靶的实验结果;图 5(e)为侵彻后松木靶的背板照片,从图中可以清晰地看到松木靶背板的剥落。

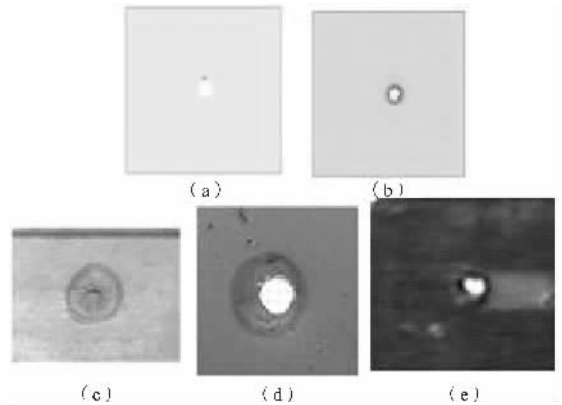


图 5 模拟结果与实验结果对比

3.2 时间历程曲线分析

如图 6 所示,选取 2500m/s 速度下陶瓷球内第 286 单元,输出它的速度变化曲线。观察曲线,3~22 μ s 时间段内,球体的速度下降趋势相对缓慢,这一段

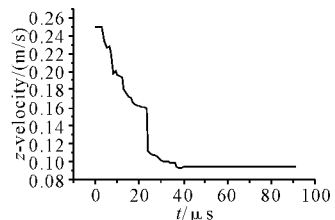


图 6 2500m/s 初速破片速度变化

时间是球体开始撞击松木靶板到球体全部穿出松木靶板的过程;在球体撞击硬铝靶到球体全部穿出硬铝靶这一时段(22~26 μ s),由于铝的密度远大于松木,且陶瓷球撞击硬铝靶的初速小于撞击松木的初速,因此动能也远小于撞击松木靶前,速度下降趋势增大,几乎呈直线下降;球体全部穿出硬铝靶板后,速度曲线趋于平稳。破片余速仍保持在 956m/s。

3.3 不同初速对侵彻结果的影响

随着球体初速度的减小,其动能大幅减小。图 7 为各种速度下球体单元的时间历程曲线,A、B、C、D 分别表示陶瓷球在 2500m/s、2000m/s、1500m/s 以及 1000m/s 初速下穿靶过程速度的变化。球体初速越大,其动能越大,穿透靶板所用的时间越少。

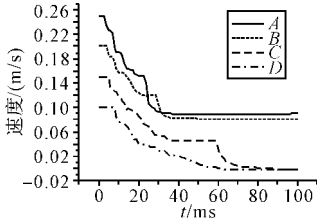


图 7 破片在不同初速下的时间历程曲线

根据表 4 所列模拟结果,陶瓷球在 2500m/s 及 2000m/s 的速度下可穿透松木靶及铝质后效靶,并有较

大余速;在 1500m/s 速度下仅能穿透松木靶;而在 1000m/s 速度下两靶均未穿透。根据穿甲理论:侵彻体低速侵彻靶板时,其侵彻速度越低,侵

(上接第 114 页)

[5] 周宁,任辉启,沈兆武,等. 弹丸在多层复合介质中的爆炸破坏效应研究[J]. 中国工程科学,2006,8(8):55-60.

[6] 周宁,任辉启,沈兆武,等. 半穿甲弹丸在复合靶中爆炸破坏效应的实验研究[J]. 含能材料,2007,15(3):253-256.

[7] AUTODYN User Manual Revision 3[Z]. Century Dynamics Inc, 1997.

[8] 董海山. 炸药及相关物性[M]. 绵阳:《中国工程物

彻深度越小,当破片初始侵彻速度小于极限穿透速度时,破片将不再对目标造成有效毁伤。由模拟结果可以看出:陶瓷球破片速度应大于等于 1500m/s 才能对目标造成毁伤。

4 结论

实验结果表明,陶瓷材料在爆炸冲击波作用下,强度性能满足要求,可以作为破片使用。

通过对不同初速下陶瓷球垂直侵彻松木靶板的数值模拟可以得出,初速度是影响陶瓷破片毁伤效能的重要因素之一。随着初速的减小,破片动能大幅下降,因此可以通过控制破片初速限制其毁伤半径;另外在后续研究中,还可通过减小破片质量等其他方式控制其毁伤半径,

数值模拟方法能够揭示陶瓷球侵彻靶板过程,反映破片初速对侵彻结果的影响。有关试验数据验证了该方法的可行性,计算模型合理,可以为多材料及多用途破片毁伤效应设计提供依据。

参考文献:

[1] 隋树元,王树山. 终点效应学[M]. 北京:国防工业出版社,2000.

[2] Duane S Cronin, khahn Bui, Christian Kaufmann, et al. Implementation and validation of the Johnson-Hoimquist ceramic material model in LS-Dyna [C]// 4th European LS-DYNA Users Conference.

[3] 周玉. 陶瓷材料学[M]. 北京:科学出版社,2004.

[4] LS-DYNA KEYWORD USER'S MUNUAL. Livermore Software Technology Corporation [Z]. Version 970, April 2003.

[5] 董永香. 钨球打钢靶数值仿真研究[J]. 弹道学报,2002,14(3)69-74.

理研究院科技丛书》编辑部,2005.

[9] 黎剑华. 条形药包碉室控制爆破仿真研究及其在高等级路基工程中的应用[D]. 长沙:中南大学,2005.

[10] Riedel W, Thoma K, Hiermaier S, Schmolinske E. Penetration of reinforced concrete by BETA-B-500 numerical analysis using a new macroscopic concrete model for hydrocodes[C]// 9th International Symposium, Interaction of the Effects of Munitions with Structures, Mai,1999.