

文章编号: 1001-1455(2010)01-0091-05

# 钨合金长杆弹侵彻约束 AD95 陶瓷复合靶\*

蒋东, 李永池, 于少娟, 邓世春

(中国科学技术大学近代力学系, 安徽 合肥 230027)

**摘要:** 以侵彻深度(depth of penetration, DOP)实验为基础, 利用 LS-DYNA 软件进行数值模拟, 对钨合金长杆弹侵彻 45 钢鉴证靶和约束 AD95 陶瓷复合靶进行了对比研究。通过数值模拟与实验结合的方法, 得到了 AD95 陶瓷的 JH-2 模型(Johnson-Holmquist ceramic material model)参数; 深入分析了钨合金长杆弹侵彻约束 AD95 陶瓷复合靶侵彻响应过程。

**关键词:** 爆炸力学; 侵彻; DOP 方法; AD95 陶瓷; JH-2 模型

**中图分类号:** O385 **国标学科代码:** 130·35 **文献标志码:** A

## 1 引言

陶瓷材料是目前唯一一种能够将轻质量和高硬度相结合的材料, 被用作装甲材料已有数十年的历史。由于陶瓷材料在抗未来射弹(速度 2.5~3.0 km/s)存在巨大潜力<sup>[1]</sup>, 因此对它的研究已经成为当前的热门。T. J. Holmquist 等<sup>[2-3]</sup>研究了碳化硼、碳化硅、AD85 氧化铝、AD995 氧化铝等一系列陶瓷的抗侵彻性能; 李英雷<sup>[4]</sup>研究了 AD95 氧化铝陶瓷的动态本构关系; 李平<sup>[5]</sup>研究了 AD90 氧化铝陶瓷的抗侵彻机理。研究陶瓷装甲抗侵彻性能主要有 3 种方法<sup>[6]</sup>: 实验、数值模拟和工程分析。由于实验条件所限, 陶瓷材料本身并没有被研究得十分透彻, 因此采用数值模拟和实验相结合的方法被越来越多地用于材料性能的研究。事实上, AD95 氧化铝陶瓷材料的参数并不齐全, 本文中在已有实验的基础上, 采用实验和数值模拟相结合的方法, 选用目前影响最广的 JH-2 模型, 对钨合金侵彻约束 AD95 陶瓷复合靶进行研究, 获得 AD95 陶瓷的 JH-2 本构参数以及约束 AD95 陶瓷复合靶抗侵彻响应过程。

## 2 实验

实验在南京理工大学进行, 采用常用的、行之有效的陶瓷弹道实验方法开展弹道实验。首先, 开展系列入射速度下的参照靶弹道实验, 参照靶由构成鉴证靶的同样板材多层叠加而成, 得出相应的侵彻深度; 然后, 进行由盖板、陶瓷靶、鉴证靶组成的复合靶的系列弹道实验, 得出射弹在鉴证靶中留下的侵彻深度。

陶瓷为 AD95 氧化铝陶瓷, 其组分(质量分数)为: 氧化铝 95%, 氧化硅 2.5%, 氧化钙 1.5%, 氧化镁 1%, 由山东中材高新材料股份有限公司加工。陶瓷靶由 2 块厚 2 cm 的陶瓷和 1 块厚 1 cm 的陶瓷叠合而成, 如图 1 所示。盖板和鉴证靶的材料为 45 钢, 其中盖板厚 2 mm, 密度 7.8 g/cm<sup>3</sup>; 弹材为钨合金, 直径 6.8 mm, 长 110 mm, 密度 17.6 g/cm<sup>3</sup>。

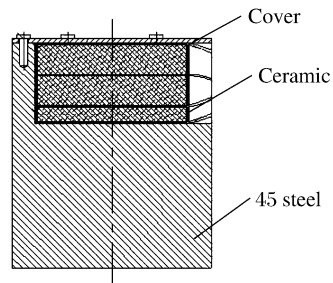


图 1 靶板示意图

Fig. 1 Sketch maps of targets

\* 收稿日期: 2008-08-08; 修回日期: 2009-02-24

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(10632080)

作者简介: 蒋东(1982—), 男, 博士研究生。

### 3 陶瓷 JH-2 模型

JH-2 模型<sup>[2]</sup>由 JH-1 模型<sup>[7]</sup>发展而来,与 JH-1 模型相比,JH-2 模型有 2 点改进:一是增加了材料损伤的累积功能,允许损伤演化,随着损伤的累积,材料强度软化;二是材料强度模型由多段线型改为连续型,即非线性型。这 2 点改进是为了更好地描述不同加载情况下陶瓷材料的动态响应。

#### 3.1 陶瓷屈服强度

完整陶瓷(损伤参数  $D=0$ )材料强度定义为

$$\sigma_i^* = A(p^* + T^*)^N [1 + C \ln(\dot{\epsilon}/\epsilon_0)] \quad (1)$$

完全失效( $D=1$ )材料强度定义为

$$\sigma_i^* = B(p^*)^M [1 + C \ln(\dot{\epsilon}/\epsilon_0)] \quad (2)$$

当前材料强度定义为

$$\sigma^* = (1 - D)\sigma_i^* + D\sigma_i^* \quad (3)$$

式中: $\sigma_i^*$  是归一化的完整材料的等效强度, $\sigma_i^*$  是归一化的破坏材料的等效强度; $D$  是损伤量( $0 \leq D \leq 1$ ),陶瓷的屈服应力随损伤程度的增加而减小,损伤程度由损伤参数  $D$  描述; $p^*$  和  $T^*$  分别是归一化的静水压和最大静水拉伸强度, $p^* = p/p_{\text{HEL}}$ , $T^* = T/p_{\text{HEL}}$ ,其中  $p$  和  $T$  是实际的静水压和最大静水拉伸强度, $p_{\text{HEL}}$  是按照 Mises 准则由 HEL 得到的静水压; $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $M$  和  $N$  是待定的材料常数,一般地,参数  $A$ 、 $N$  和  $T^*$  可以通过拟合完整材料的压缩强度和层裂强度数据得到,参数  $C$  可以通过准静态和高应变率的压缩破坏强度与应变率的关系求出;而参数  $B$ 、 $N$  和可选最大破坏强度  $\sigma_{f,\text{max}}^*$  可以通过由 LUO Huiyang 等<sup>[8]</sup>提出的陶瓷在连续脉冲下的动态压缩响应实验得到,利用对侵彻测试实验的反复模拟对比得以验证。

#### 3.2 陶瓷损伤模型

损伤  $D$  定义为累计塑性应变和失效应变之比,即

$$D = \sum \Delta \epsilon_p / \epsilon_{p,f} \quad (4)$$

式中: $\Delta \epsilon_p$  为当前积分循环中的等效塑性应变增量, $\epsilon_{p,f}$  为当前量纲一压力( $p^* = p/p_{\text{HEL}}$ )下的失效应变,塑性应变, $\epsilon_{p,f} = D_1(p^* + T^*)^{D_2}$ , $D_1$  和  $D_2$  是材料常数,它们的值可以通过平面正碰撞实验和准静态实验结果得到。当流体静水压大于  $T$  时,与金属不同,由于氧化铝陶瓷为脆性材料,材料会发生瞬时拉伸断裂,即  $D=1$ 。

#### 3.3 陶瓷状态方程

陶瓷材料的流体静水压和体积关系为

$$p = \begin{cases} K_1 \mu + K_2 \mu^2 + K_3 \mu^3 & \mu = \rho/\rho_0 - 1 \geq 0 \\ K_1 \mu & \mu = \rho/\rho_0 - 1 < 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中: $K_1$  为体积模量, $K_2$ 、 $K_3$  为常数, $K_1$ 、 $K_2$  和  $K_3$  可以通过静高压实验(金刚石压砧)得到的静水压-比容关系拟合得到。

### 4 数值模拟与分析

数值模拟在 LS-DYNA 平台上进行,计算模型共 13 261 个节点,采用二维 shell 单元,轴对称算法,钨合金侵彻 45 钢时计算总能量为 6.99 kJ,沙漏能为 0。钨合金侵彻 AD95 陶瓷复合靶时计算总能量为 7.72 kJ,其中沙漏能为 7.3 J,小于总能量的 1%,说明沙漏能对数值模拟的影响可以忽略不计,计算结果可信。

AD95 氧化铝陶瓷的 JH-2 材料参数见表 1,表中  $\sigma_{\text{HEL}}$  是由 Hugoniot 弹性极限(HEL)得到的等效强度,其中  $\rho$ 、 $G$ 、 $T$  引自文献[4],由于 AD95 陶瓷的密度与文献[5]使用的氧化铝陶瓷(AD90)的密度比较接近,因此可以使用文献[5]中的静水压参数  $K_1$ 、 $K_2$ 、 $K_3$  值和 HEL 数据。在数值计算中发现,改变

$K_1, K_2, K_3$ , 侵彻深度变化很小。 $A, M, D_1, D_2, B, N$  等参数在参考文献[9]后通过数值模拟方法调节参数得到, 文献[9]中给出的氧化铝陶瓷为 AD95, 即陶瓷中氧化铝的质量分数为 99.5%, 其 JH-2 参数中:  $\rho=3.7 \text{ g/cm}^3, G=90 \text{ GPa}, K_1=130.95 \text{ GPa}, K_2=K_3=0, \sigma_{\text{HEL}}=2.79 \text{ GPa}, p_{\text{HEL}}=2.79 \text{ GPa}, D_1=0.005, D_2=1$ , 而  $A, B, C, M, N$  与本文一致。钨合金弹<sup>[10]</sup>和 45 钢<sup>[11]</sup>的参数见表 2, 表中  $E_t$  为材料的切线模型,  $\epsilon_f$  为单元的失效应变。文献[4]中指出 AD95 陶瓷材料的等效压缩破坏强度是应变率无关的, 而文献[8]通过连续脉冲下的动态压缩响应实验, 得到的结果是 AD95 陶瓷粉末的力学性能是应变率相关的。由此可知, 在强度模型公式(1)、(2)中的参数  $C$  并非同一个值, 粉碎陶瓷和完整陶瓷的应变率效应应该区别对待, 这是 JH-2 模型应该改进的地方。在数值模拟的过程中发现, 参数  $C$  对侵彻深度的影响并不大, 因此本文中参考文献[9]取  $C=0$ 。

表 1 AD95 陶瓷材料参数

Table 1 Material parameters for AD95 ceramics

$\rho/(\text{g/cm}^3)$	$G/\text{GPa}$	$A$	$B$	$C$	$M$	$N$	$\sigma_{\text{HEL}}/\text{GPa}$	$p_{\text{HEL}}/\text{GPa}$	$T/\text{GPa}$	$D_1$	$D_2$	$K_1/\text{GPa}$	$K_2/\text{GPa}$	$K_3/\text{GPa}$
3.68	118.1	0.93	0.31	0	0.6	0.6	3.6	2.9	0.262	0.02	0.83	228.6	191.4	111.5

表 2 钨杆弹和钢板的模型参数

Table 2 Material parameters for tungsten and 45 steel

材料	$\rho/(\text{g/cm}^3)$	$E/\text{GPa}$	$\nu$	$\sigma_y/\text{MPa}$	$E_t/\text{GPa}$	$\epsilon_f$
Tungsten	17.60	350	0.284	785	1.18	0.7
45 steel	7.83	207	0.300	500	15.10	0.7

图 2 为数值模拟结果与实验结果对比图, 图 2(a)为弹速 1 142 m/s 的钨合金弹侵彻 45 钢, 图 2(b)为弹速 1 192 m/s 的钨合金侵彻 AD95 陶瓷复合靶。钨合金侵彻 45 钢实验值与数值模拟值基本一致, 包括开孔大小与侵彻深度: 图 2(a)的实验侵彻深度为 41 mm, 数值模拟侵彻深度为 43 mm; 图 2(b)中鉴证靶的实验侵彻深度为 19 mm, 数值模拟侵彻深度为 23 mm, 比实验值稍大。

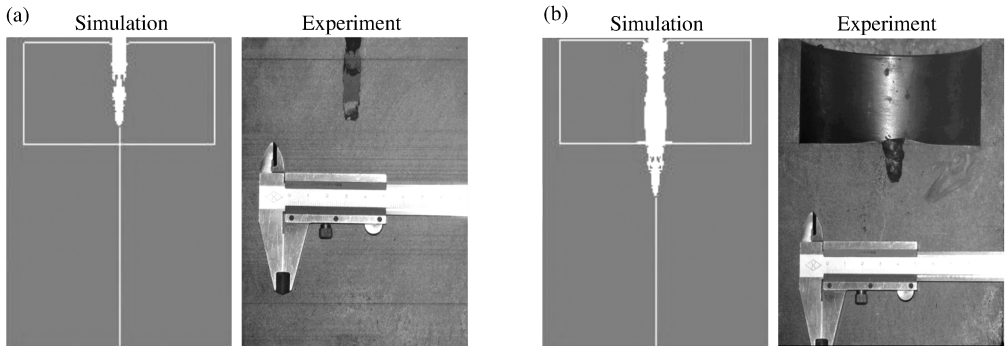


图 2 侵彻深度的数值模拟与实验对比图

Fig. 2 DOP comparisons between numerical simulations and experiments

表 3 给出了 1 发钨合金弹侵彻 45 钢和 3 发钨合金弹侵彻 AD95 陶瓷复合靶的实验与数值模拟比较结果, 表中  $v_p$  为弹速,  $H_e$  为实验侵彻深度,  $H_c$  为计算侵彻深度,  $\epsilon$  为误差。从表中可以看出数值模拟结果和实验结果符合良好, 最大误差为 5%, 因此本文中所获得 AD95 陶瓷的 JH-2 参数是可信的。

表 3 DOP 实验与数值模拟比较

Table 3 Comparisons between DOP experiments and numerical simulations

靶材料	$v_p/(\text{m/s})$	$H_e/\text{mm}$	$H_c/\text{mm}$	$\epsilon/\%$
45 steel	1 142	41	43	4
alumina/steel	1 192	71	75	5
alumina/steel	1 257	79	78	1
alumina/steel	1 372	93	88	5

当长杆弹侵彻陶瓷时,强烈的冲击载荷在长杆弹前沿的陶瓷材料中产生一个高度损伤区(事实上是粉碎区),图3为钨合金侵彻陶瓷复合靶历程图,从图3可以清晰地看到钨合金长杆弹前沿出现的高度损伤区。射弹前方被粉碎的陶瓷粉末在射弹前沿急剧流动并沿着长杆弹向后射出,侵蚀长杆弹。整个侵彻过程中,陶瓷粉末始终与长杆弹直接接触。陶瓷粉碎之后,陶瓷粉末呈现近似流动的行为,侵彻过程中,被粉碎的陶瓷粉末来不及散开,仍然具有承载能力。当陶瓷受到约束时,陶瓷粉末的流动性降低,相应地,陶瓷粉末的承载能力会增大。式(2)就描述了这种承载能力。

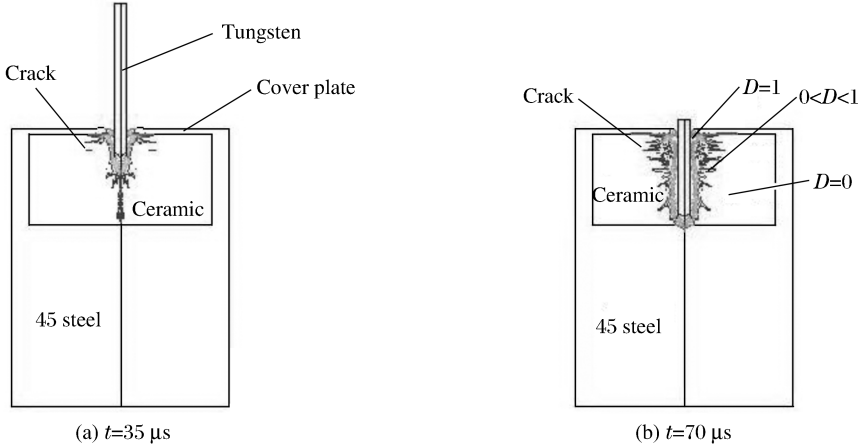


图3 钨合金侵彻 AD95 陶瓷

Fig. 3 Penetration of the tungsten alloy rod into the AD95 ceramic target

从图3可以看出,与45钢靶板不同的是,陶瓷靶板出现了明显的从碰撞处向外发散的径向裂纹,从图中可以明显看出这种情况,这与文献[12-13]实验结果一致。图3还给出了不同时刻的陶瓷裂纹分布,可以看出,随着侵彻的进行,裂纹在扩展。图3(b)中给出了 $D=0$ 、 $0<D<1$ 和 $D=1$ 等3种情况的分布,在离弹的轴对称中心很近的区域为陶瓷的粉碎区,稍远一些是裂纹区,更远一些区域的陶瓷并未损坏。实验也可以发现,离中心越远,陶瓷的碎粒尺寸越大,数值计算的结果与实验相符。在数值计算中发现,JH-2本构模型中某些参数对 $1.0\sim 1.5$  km/s速度范围内的侵彻深度影响不大,尝试改变 $K_1$ 、 $K_2$ 、 $K_3$ ,结果发现侵彻深度变化很小;但是,某些本构参数至关重要,如涉及到材料屈服的参数 $M$ 、 $N$ 。此外,即使是同一种材料,不同学者给出的参数也不尽相同,例如4340钢的Johnson-Cook失效参数,文献[2]与文献[7]给出的参数就不一样。

## 5 结论

利用LS-DYNA软件模拟了钨合金长杆弹侵彻45钢鉴证靶和约束AD95陶瓷复合靶的实验,深入分析了钨合金长杆弹侵彻约束AD95陶瓷复合靶侵彻响应过程,与45钢靶板不同的是,陶瓷靶板出现了明显的从碰撞处向外发散的径向裂纹,数值模拟结果显示长杆弹前沿的陶瓷材料中产生了粉碎区,整个侵彻过程中,陶瓷粉末始终与长杆弹直接接触,侵蚀长杆弹。在计算中发现,JH-2模型中的参数 $K_1$ 、 $K_2$ 、 $K_3$ 和 $C$ 对 $1.0\sim 1.5$  km/s速度范围内的侵彻深度影响不大;本构参数 $A$ 、 $B$ 和损伤参数 $D_1$ 、 $D_2$ 对侵彻深度影响较大。此外,由于本文中的DOP实验数据有限,部分材料参数引自文献而非实验获得,为了得到精确的材料参数,还需进行大量材料实验和DOP实验,以便对材料参数进一步修正。

## 参考文献:

- [1] Westerling L, Lundberg P, Lundberg B. Tungsten long-rod penetration into confined cylinders of boron carbide at and above ordnance velocities[J]. International Journal of Impact Engineering, 2001,25(3):703-714.
- [2] Holmquist T J, Templeton D W, Rajendran A M, et al. Constitutive modeling of aluminum nitride for large strain, high-strain rate, and high-pressure applications[J]. International Journal of Impact Engineering, 2001,25

(3):211-231.

- [3] Holmquist T J, Rajendran A M, Templeton D W, et al. A ceramic armor material database[R]. US Army Tank Automotive Research, Development and Engineering Center. AMSTA-TR-R(MS 263), 1999.
- [4] 李英雷. 装甲陶瓷的本构关系和抗弹机理研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2003.
- [5] 李平. 陶瓷材料的动态力学响应及其抗长杆弹侵彻机理[D]. 北京: 北京理工大学, 2002: 86-89.
- [6] 孙宇新, 李永池, 于少娟, 等. 长杆弹受约束 AD95 陶瓷靶的实验研究. 弹道学报[J], 2005, 17(2): 38-41.  
SUN Yu-xin, LI Yong-chi, YU Shao-juan, et al. An experimental study on the penetration confined AD95 ceramic targets[J]. Journal of Ballistics, 2005, 17(2): 38-41.
- [7] Quan X, Clegg R A, Cowler M S, et al. Numerical simulation of long rods impacting silicon carbide targets using JH-1 model[J]. International Journal of Impact Engineering, 2006, 33(1-12): 634-644.
- [8] LUO Hui-yang, CHEN Wei-nong. Dynamic compressive responses of intact and damaged AD995 alumina[J]. International Journal of Applied Ceramic Technology, 2004, 1(3): 254-260.
- [9] Cronin D S, Bui K, Kaufmann C, et al. Implementation and validation of the Johnson-Holmquist ceramic material model in LS-DYNA[C]//4th European LS-DYNA Users Conference. Germany, 2003.
- [10] Zhang W D, Chen L J, Xiong J J. Ultra-high  $g$  deceleration-time measurement for the penetration into steel target [J]. International Journal of Impact Engineering, 2007, 34(3): 436-447.
- [11] Wu J, Liu J B, Du Y X. Experimental and numerical study on the flight and penetration properties of explosively-formed projectile[J]. International Journal of Impact Engineering, 2007, 34(7): 1147-1162.
- [12] 宋顺成, 王军, 王建军. 钨合金长杆弹侵彻陶瓷层合板的数值模拟[J]. 爆炸与冲击, 2005, 25(2): 102-106.  
SONG Shun-cheng, WANG Jun, WANG Jian-jun. Numerical simulation for penetration of ceramic composite plate by long-rod projectile of tungsten alloy[J]. Explosion and Shock Waves, 2005, 25(2): 102-106.
- [13] 李平, 李大红, 宁建国. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷复合靶抗长杆弹侵彻性能和机理实验研究[J], 2003, 23(4): 289-294.  
LI Ping, LI Da-hong, NING Jian-guo. Experimental study on the ballistic performance and mechanism of confined ceramic targets against long rod penetrators[J]. Explosion and Shock Waves, 2003, 23(4): 289-294.

## Penetration of confined AD95 ceramic composite targets by tungsten long rods\*

JIANG Dong, LI Yong-chi, YU Shao-juan, DENG Shi-chun

(Department of Modern Mechanics, University of Science and Technology of China,  
Hefei 230027, Anhui, China)

**Abstract:** DOP (depth of penetration) tests were performed to study the ballistic penetration characteristics of confined AD95 ceramic targets by tungsten long rods. Based on the experimental data, numerical simulations of tungsten long rods penetration into 45 steel and confined AD95 ceramic targets were compared, using LS-DYNA software. The computational results are in good agreement with the experimental results. The material constants of AD95 ceramic were obtained for the JH-2 model. The response of confined AD95 ceramic targets was investigated by finite element simulations.

**Key words:** mechanics of explosion; penetration; DOP method; AD95 ceramic; JH-2 model

\* Received 8 August 2008; Revised 24 February 2009

Supported by the National Natural Science Foundation of China (10632080)

Corresponding author: LI Yong-chi, ycli@mail.ustc.edu.cn