文章编号:1000-5773(2011)06-0526-07

聚能射流对氧化铝陶瓷靶的侵彻特性研究*

任会兰,郭婷婷,宁建国

(北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室,北京,100081)

摘要:建立了考虑损伤的求解靶板阻力的理论模型,以此来评估陶瓷靶板的抗侵彻能力;数值模拟了长杆弹侵彻氧化铝陶瓷靶的破坏特性,结合实验结果确定了氧化铝陶瓷本构模型中的材料参数。建立了聚能射流侵彻氧化铝陶瓷靶的计算模型,对射流的形成机理及氧化铝陶瓷靶的抗侵彻性能进行研究,讨论了药型罩的几何尺寸对所形成的射流速度及侵彻深度的影响。结果表明:药型罩的锥角和壁厚增大,射流速度减小,壁厚对射流速度梯度的影响较大;同样,药型罩的锥角对侵彻深度也有较大的影响。

关键词:动态响应;聚能射流;陶瓷

中图分类号:O347.1　　**文献标识码**:A

1 引　言

对侵彻问题的研究,起始于19世纪初的法国军事工程学院,此后许多学者都投入到这一领域的研究中,而涉及的内容也更深更广。陶瓷材料具有高强度、高硬度、耐腐蚀、高耐磨性和重量轻的特点,不仅能消耗穿甲弹的动能,还可借助其高熔点制成各种曲面形状,可分散破甲弹的熔融金属射流,从而降低破甲弹的侵彻性能。与金属装甲相比,陶瓷装甲不仅在当前的弹丸速度水平(1 500～1 800 m/s)下可提供高效的抗侵彻能力,也可在未来的弹丸速度水平(2 500～3 000 m/s甚至更高)下有相当的抗侵彻防护潜力[1]。在众多陶瓷种类中,Al_2O_3陶瓷的抗弹性能并不是最高,但其具有烧结性能好,且制品尺寸稳定、表面光洁度高、价格便宜等优点,故它的应用最广泛。

对于陶瓷和陶瓷复合靶的高速侵彻动力学的研究,主要有3种方法:(1) 实验方法[2-6],其优点是精度较高,但是受实验条件的限制,实验研究问题的局限性较大;(2) 理论研究[7-11],建立简化的分析模型进行理论分析,将复杂的力学过程进行简化,可以分析实验中无法处理的问题,但是理论分析进行了假定和简化,多是针对某一特定条件下的问题,有一定的局限性;(3) 数值模拟方法[12-14],该方法可以提供大量的数据,以弥补实验和理论得不到的结果,但数值模拟的精确性依赖于程序算法及材料参数的选取。

本研究在准静态空腔膨胀理论的基础上,考虑陶瓷材料的损伤,建立了计算陶瓷材料抗射流侵彻的靶板阻力的损伤模型,结合不可压缩流体力学理论,预测了射流对靶板的侵彻速度。通过对长杆弹侵彻AD90陶瓷靶板进行的数值模拟及与已有实验结果的比较,确定了在模拟中AD90的材料参数设置。并将这些参数用于数值模拟聚能射流侵彻AD90陶瓷靶板中,研究了陶瓷靶板抗射流侵彻的性能,并验证了理论模型的正确性。

* **收稿日期**:2010-08-19;**修回日期**:2010-11-26

基金项目:国家自然科学基金(11032002)

作者简介:任会兰(1973—),女,博士,副教授,主要从事材料动力学行为研究. E-mail:huilanren@bit.edu.cn

2　射流侵彻陶瓷靶板的理论模型

高速射流侵彻靶板的定常不可压缩流体力学理论,其基本关系是 Bernoulli 方程。实验表明,靶板的强度对破甲过程有很大影响,特别是射流速度较低时,不能忽略靶板的强度。加入靶板强度项的伯努利方程可以表示为

$$\frac{1}{2}\rho_j\ (v_j - v_p)^2 = \frac{1}{2}\rho_t v_p^2 + R_t \tag{1}$$

式中:ρ_j 和 ρ_t 分别为射流和靶板的材料密度,v_j 和 v_p 分别为射流速度和侵彻速度(射流与靶板接触面的速度),R_t 为靶板阻力,是材料的一个强度参数。求解(1)式,可得侵彻速度 v_p 如下

$$v_p = \frac{v_j}{1-\rho_t/\rho_j}\left(1-\sqrt{\rho_t/\rho_j + (1-\rho_t/\rho_j)\frac{2R_t}{\rho_j v_j^2}}\right) \tag{2}$$

式中:v_j、ρ_j 和 ρ_t 都能通过实验测定,而 R_t 只能通过计算得到。陶瓷在受到冲击后,根据其损伤状态,可将响应区进行如图 1 的划分:空腔区、粉碎区、径向裂纹区、弹性区和未响应区。

根据陶瓷靶板的受力特点及抗压强度大于抗拉强度等力学特性,可知:在弹性区和未响应区的交界处,靶板无应力,即 $\sigma_r|_{r=b} = 0$;弹性区的环向应力为拉应力[10],而陶瓷材料的拉应力强度较小,所以当环向应力达到拉伸强度时,材料产生径向裂纹,即 $\sigma_\theta|_{r=c} = \sigma_f$;径向裂纹区的材料只能承受径向压缩应力,当裂纹区材料的径向应力达到材料的压缩强度时,材料将粉碎,即 $\sigma_r|_{r=a} = -Y$;粉碎区的材料服从摩尔-库伦本构关系,即没有粘结强度。其中 r 为半径,h、a、c 和 b 如图 1 所示,σ_r 为径向应力,σ_θ 为环向应力,σ_f 为单轴拉伸强度,Y 为单轴压缩强度。

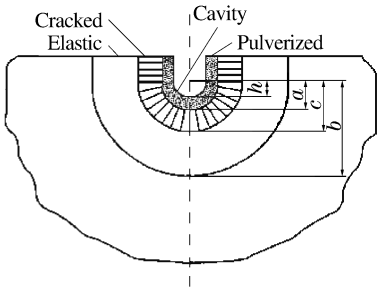


图 1　陶瓷靶板的响应区

Fig. 1　Response regions in the ceramic target

本研究的损伤模型以传统的准静态空腔膨胀理论[10]为基础。在传统空腔膨胀模型中,假设径向裂纹区的材料仅存在径向裂纹,即材料在径向仍使用未损伤的本构关系描述。但实际在径向是存在损伤的,本研究提出损伤因子形式及其满足的条件如下

$$D = 1 - \frac{r^3}{c^3}, \qquad \begin{cases} 0 < D < 1, & r = a \\ D = 0, & r = c \end{cases} \tag{3}$$

则应力表达式为

$$\sigma_r = E_0\,(1-D)\varepsilon_r \tag{4}$$

根据传统空腔膨胀模型理论的求解办法,可以求得考虑损伤的半无限靶板的靶板阻力为

$$R_t = Y\left[\frac{E_0/(3Y)}{(1+\nu)\sqrt{\sigma_f/(2Y)} + \frac{1}{4}\left(\sqrt{Y/(2\sigma_f)}\right)^3 - \frac{1}{4}\left(\sqrt{2\sigma_f/Y}\right)^2}\right]^{2\alpha/3} \tag{5}$$

式中:$\alpha = 6\lambda/(3+4\lambda)$,$\lambda$ 为材料的压减系数,ν 是泊松比,E_0 为初始弹性模量,ε_r 为径向应变。由(5)式可知,靶板阻力只与靶板的材料特性有关。

3　数值模拟

3.1　长杆弹侵彻陶瓷靶板的数值模拟

本节对长杆弹侵彻陶瓷靶的实验[15]进行了数值模拟,长杆弹侵彻陶瓷靶的结构模型如图 2 所示,因模型的对称性,为了减小计算区域,本研究仅取结构模型的一半。整个模型采用 Lagrange 方法求解,用侵蚀应变控制网格的失效,即当网格变形达到侵蚀应变时该网格将被删除。模型的几何参数如下:平头钨杆弹的直径和长度分别为 4.5 mm 和 45 mm,钢套筒的外径和内径分别为 97 mm 和 180 mm,钢盖

板和后效靶的厚度分别为 10 mm 和 100 mm。

AD90 陶瓷采用 JH2 模型来描述其材料行为，侵蚀应变为 1.5[16]，其参数见表 1。其中 ρ_0 为密度，A 和 N 是未损伤材料强度参数，C 和 B 为损伤材料强度参数，G 是剪切模量，σ_{HEL} 为雨贡纽弹性极限，T 为拉伸强度，D_1 和 D_2 为损伤参数，Y 为压缩强度，β 为体积常数，K_1、K_2 和 K_3 为压力参数。长杆弹的材料为钨合金，盖板和后效靶的材料为 45 钢。考虑到 45 钢和钨不存在压缩损伤现象，故在数值模拟计算中可以直接采用考虑屈服应力的 Johnson-Cook 本构模型和 Mie-Grüneisen 状态方程。钨和 45 钢的材料参数为 AUTODYN 自带参数。

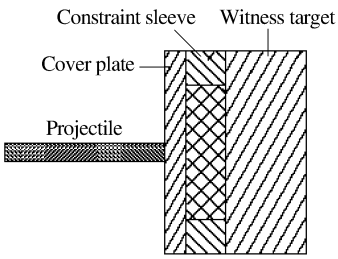


图 2 陶瓷复合靶的结构

Fig. 2 Structure of the ceramic composite

表 1 AD90 陶瓷的 JH2 模型参数

Table 1 JH2 parameters of AD90 ceramic

ρ/(g/cm^3)	G/(GPa)	σ_{HEL}/(GPa)	Y/(GPa)	T/(GPa)	K_1/(GPa)	K_2/(GPa)	K_3/(GPa)
3.625	109.7	5.300	2.62	0.262	228.6	191.4	111.5
D_1	D_2	β	A	N	C	M	B
0.020	0.830	1.0	0.880	0.64	0.007	0.6	0.280

表 2 为数值模拟结果和实验结果的对比，其中 w_f 是长杆弹未着靶的速度，d_{cover} 和 t_c 分别为钢盖板和陶瓷片的厚度，P_{TE} 和 P_{TS} 为侵彻深度的实验结果和数值模拟结果。从表 2 可以看出，数值模拟结果和实验结果较一致，由此可以证明本研究在数值模拟中对材料参数和控制参数的选取是合理的，从而可以通过数值模拟对陶瓷靶的弹道性能进行进一步的研究。

表 2 数值模拟结果和实验结果的对比

Table 2 Comparison between simulated and experimental results

No.	w_f/(km/s)	d_{cover}/(mm)	t_c/(mm)	P_{TE}/(mm)	P_{TS}/(mm)
1	2.310	10.2	12.1	64.0	57.6
2	2.298	10.3	18.2	69.5	62.7
3	2.312	10.2	24.2	73.4	71.7
4	2.315	10.2	29.9	69.3	64.9

3.2 射流侵彻陶瓷靶板的数值模拟

本节对射流侵彻 AD90 陶瓷靶的过程进行了数值模拟。在实验中，为了节省成本，通常在有限靶板的径向加套筒约束来实现半无限大靶板的目的；而在数值计算中，为了减小计算区域，节省计算时间(计算成本)，在靶板的径向施加“透射边界”(Transmit)来实现半无限大靶板的目的。射流侵彻陶瓷靶板的结构模型如图 3 所示。本研究对 9 种工况的药型罩侵彻 AD90 陶瓷靶进行了模拟，药型罩的锥角分别为 60°、80°和 100°，药型罩厚度分别为 1.8、2.4 和 3.6 mm。各模型相同的几何参数为：炸高为120 mm，装药高度为 61.45 mm，药型罩口径为 60 mm，靶板厚度为 400 mm，靶板直径为 100 mm。

计算模型(图 4)被划分为 4 部分：空气、炸药、药型罩和 AD90 陶瓷靶板。聚能装药成型及侵彻过程具有高应变率和大变形等特点，所以炸药、药型罩和空气采用 Euler 算法进行离散；陶瓷靶板在侵彻

过程中变形较小,采用 Lagrange 算法进行离散。在保证计算精度的前提下,为了节省计算时间,计算模型和网格数应尽量减少,为此,在有限的 Euler 区域外边界施加了“Flow-out”边界,靶板径向施加了“Transmit”边界,计算模型中靠近对称轴的区域进行了网格加密,其余区域网格较疏。实验中靶板总是置于地面,在模拟中对靶板底部施加固定边界。模型被划分为 422 100 个 Euler 网格和 21 320 个 Lagrange网格。

本研究的药型罩材料为冲击下的铜材料,炸药为 TNT,空气为理想气体,均采用程序自带材料参数。

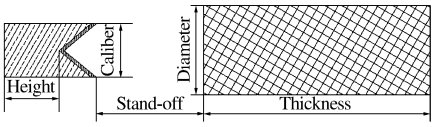


图 3　射流侵彻陶瓷靶板的结构模型

Fig. 3　Structure model of jet penetrating into ceramic target

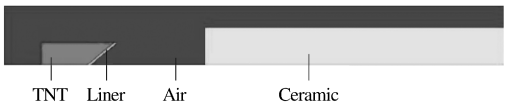


图 4　射流侵彻陶瓷靶板的计算模型

Fig. 4　Calculation model

3.2.1　射流形成

当爆轰波传播至药型罩顶部时,药型罩开始发生变形,如图 5(a)所示;药型罩变形的速度低于所形成的射流的速度,这时药型罩会发生翻转,如图 5(b)所示;随着变形的药型罩不断汇聚于对称轴,射流即成型,如图 5(c)所示;射流沿其长度方向存在速度梯度(图 6),所以射流在着靶前将被拉伸(图 5(d))。



(a) 12 μs　(b) 18 μs　(c) 33 μs　(d) 45 μs

图 5　射流的形成过程

Fig. 5　Formation process of a jet

图 6 为起爆后 48 μs 时的射流速度云图,从图 6 中可以看到,射流的速度沿头部到尾部的方向减小,这是因为爆轰波在其传播过程中不断衰减,到达药型罩顶部时,其压力最强,使得药型罩顶部的变形也最快,而随着爆轰波的衰减,压力越来越小,药型罩的变形速度也越慢,所产生的射流速度亦越慢。

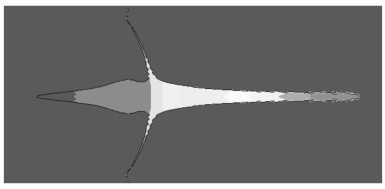


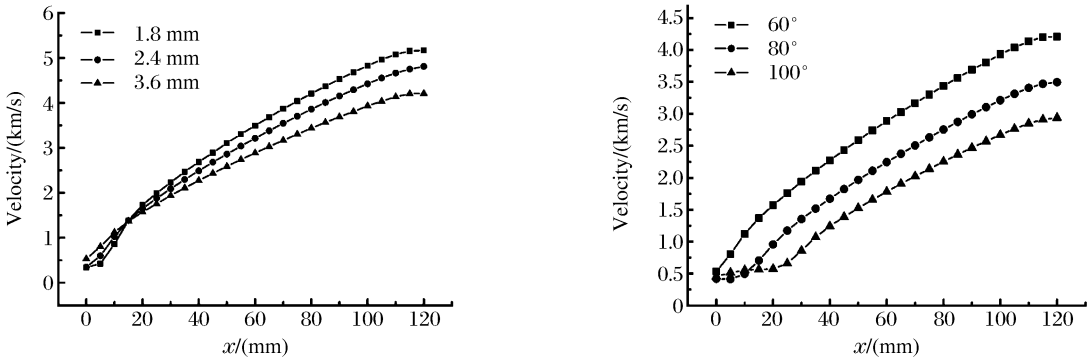
图 6　射流速度云图

Fig. 6　Velocity contour of the jet

射流的速度分布曲线如图 7 所示。从图中可以看出:(1) 射流速度和速度梯度随着药型罩壁厚的增加而减小,如图 7(a)所示;(2) 射流的速度随着药型罩锥角的增加而减小,如图 7(b)所示;(3) 药型罩的壁厚相同时,不同锥角所产生的射流梯度是相似的,如图 7(b)所示。说明速度梯度受壁厚影响较大。

3.2.2　射流侵彻陶瓷靶板的结果

AD90 陶瓷靶板在受到锥角为 100°、壁厚为 2.4 mm 的药型罩所产生的射流的侵彻后,其损伤状态如图 8 所示。从图中可以发现:在射流头部和靶板接触的区域,空腔和损伤区均接近球型,这也正是球型空腔膨胀理论适用的依据(图 8(a));侵彻的初期,是射流对靶板的开坑阶段,靶板在短时间内其状态发生急剧变化,该阶段为侵彻不稳定阶段,孔径也非均匀平滑(图 8(b));当侵彻进一步深入,则进入准定常阶段,此时侵彻速度和孔径的变化都较小(图 8(c));到侵彻后期,靶板对射流的阻力以及靶板碎粒对射流的干扰,使得射流的速度不足以对靶板进一步侵彻,将在空腔的底部堆积,而且不断堆积的射流使空腔底部孔径变大(图 8(d))。



(a) Angle 60° (b) Thickness 3.6 mm

图 7 射流沿其长度方向的速度分布

Fig. 7 Velocity distribution of the jets



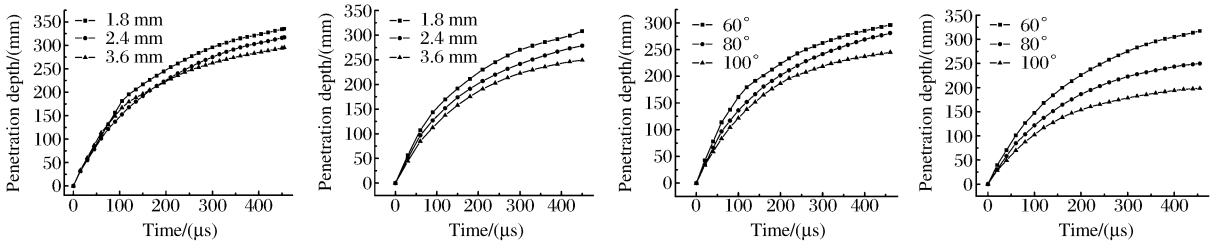
(a) 3 μs (b) 69 μs

(c) 319 μs (d) 569 μs

图 8 陶瓷靶板的损伤状态

Fig. 8 Damage status of the ceramic target

从图 9 的侵彻深度曲线，可以得到以下结论：(1) 如果药型罩的锥角相同，则壁厚越大所产生的射流对靶板的侵彻深度越小，且锥角越大，侵彻深度因壁厚产生的差异越大，如图 9(a)和图 9(b)所示；(2) 如果药型罩的壁厚相同，则锥角越大所产生的射流对靶板的侵彻深度越小，且壁厚越大，侵彻深度因锥角产生的差异越大，如图 9(c)和图 9(d)所示。



(a) Angle 60° (b) Angle 80° (c) Thickness 2.4 mm (d) Thickness 3.6 mm

图 9 侵彻深度随时间的变化

Fig. 9 Curves of penetration versus time

3.3 计算结果及讨论

将材料参数及数值模拟所得的射流速度代入(2)式和(5)式，便求得侵彻速度的理论值 v_p^*，与模拟结果 v_p 作比较，其结果列于表 3。从表 3 中可以得出：高速侵彻时，侵彻速度的理论值与模拟值较接近，但理论值略小；低速侵彻时，侵彻速度的理论值远小于模拟值，且速度越低两者的差距越大。表明在高速侵彻时，靶板阻力对抗侵彻能力的贡献较小，而低速侵彻时，靶板阻力是影响靶板抗侵彻阻力的重要因素。本研究的损伤模型对损伤考虑仍然偏小。在计算靶板阻力的模型中考虑损伤是十分必要的，特别是在计算低速侵彻时。

表 3　数值模拟结果和理论结果的对比

Table 3　Comparison between simulated and theoretical results

Angle/(°)	Thickness/(m)	v_j/(m/s)	v_p/(m/s)	v_p^*/(m/s)	Error
60	0.0018	5165	3002	2897	3.62%
	0.0024	4725	2973	2665	11.5%
	0.0036	4209	2926	2478	18.1%
80	0.0018	4381	2943	2934	0.31%
	0.0024	4018	2905	2487	16.8%
	0.0036	3521	2831	2335	21.2%
100	0.0018	3790	2874	2659	8.08%
	0.0024	3440	2816	2301	22.4%
	0.0036	2953	2497	1940	28.7%

4　结　论

本研究考虑损伤对靶板阻力的影响,提出了一个评估靶板的抗侵彻能力的理论模型,并结合流体力学理论预测了射流对陶瓷靶的侵彻速度。建立了钨杆弹侵彻 AD90 陶瓷靶板的数值模型,将模拟结果与实验结果进行对比,验证了模拟中所选材料参数的合理性。进一步对射流侵彻 AD90 陶瓷靶板的过程进行了模拟,研究了药型罩的几何参数对射流速度、侵彻深度的影响。结果表明:药型罩的锥角和壁厚越大,所形成的射流速度越低,对靶板的侵彻能力越低;药型罩的锥角越大,侵彻深度因壁厚产生的差异也越大;壁厚越大,侵彻深度因锥角产生的差异越大。将数值模拟结果与理论结果进行了对比,结果表明,本研究所建立的考虑损伤的模型是合理的,但在低速侵彻时考虑的损伤仍然偏小,说明在计算靶板阻力时考虑损伤是必要的。

References:

[1] Hohler V, Stilp A J, Weber K. Hypervelocity Penetration of Tungsten Sinter-Alloy Rods into Alumina [J]. Int J Impact Eng, 1995, 17: 409-418.

[2] Hornemann U, Holzwarth A. Shaped Charge Penetration in Alumina Targets [J]. Int J Impact Eng, 1997, 20: 375-386.

[3] Zhang X F, Li Y C. Constraining and Toughening Effects on Anti-Penetration Properties of Alumina Ceramic Targets to Shaped Charge Jets [J]. Explosion and Shock Waves, 2009, 29(2): 149-154.
张先锋,李永池. 约束及增韧对氧化铝陶瓷抗射流侵彻性能的影响 [J]. 爆炸与冲击, 2009, 29(2): 149-154.

[4] Tan D W, Xie P H. Experimental Studies of Alumina Ceramic against a Shaped-Charge Jet Penetration [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 1997, 11(2): 145-150. (in Chinese)
谭多望,谢盘海. 射流侵彻陶瓷力学特性实验研究 [J]. 高压物理学报, 1997, 11(2): 145-149.

[5] Zhang X F, Li Y C, Yu S J. An Experimental Study On Anti-Penetration Process of Zirconia Toughened Alumina Ceramic Target to Shaped Charge Jet [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2007, 22(6): 631-636. (in Chinese)
张先锋,李永池,于少娟. 氧化锆增韧陶瓷抗射流侵彻实验研究 [J]. 实验力学, 2007, 22(6): 631-636.

[6] Charles E, Anderson J R. Ballistic Performance of Confined 99.5%-Al_2O_3 Ceramic Tiles [J]. Int J Impact Eng, 1997, 19(8): 703-713.

[7] Tate A. Further Results in the Theory of Long Rod Penetration [J]. J Mechan Phys Solids, 1969, 17: 141-150.

[8] Sternberg J. Material Properties Determine the Resistance of Ceramics to High Velocity Penetration [J]. J Appl Phys, 1989, 65(7): 3417-3424.

[9] Forrestal M J. Longcope D B. Target Strength of Ceramic Materials for High-Velocity Penetration [J]. J Appl Phys,1990,67(6):3669-3672.

[10] Satapathy S,Bless S J. Calculation of Penetration Resistance of Brittle Material Using Spherical Cavity Expansion Analysis [J]. Mechan Mater,1996,23:323-330.

[11] Satapathy S. Dynamic Spherical Cavity Expansion in Brittle Ceramics [J]. Int J Solids Struct,2001,38:5833-5845.

[12] Zhang X F,Li Y C. Numerical Study of Penetration Process of Ceramic Target by Shaped Charge Jets [J]. J Syst Simulat,2009,21(9):2546-2549.

[13] Zhang X Q,Yao X H,Yang G T,et al. Numerical Simulation of Penetration of Composite Ceramic/Metal Armors [J]. Journal of South China University of Technology(Natural Science Edition),2005,33(4):69-72. (in Chinese)
张晓晴,姚小虎,杨桂通,等. 陶瓷/金属复合靶板侵彻问题的数值模拟 [J]. 华南理工大学学报(自然科学版),2005,33(4):69-72.

[14] Han Y Y,Zhao G Z,Fang Q,et al. Numerical Simulation of KE Projectile Penetration into Multilayered Ceramics [J]. Engineering Mechanics,2006,23(8):182-186. (in Chinese)
韩永要,赵国志,方 清,等. 动能弹侵彻多层陶瓷靶板数值模拟研究 [J]. 工程力学,2006,23(8):182-186.

[15] Li Ping. Dynamic Response and the Mechanism of Ceramic against Long Rod Penetration [D]. Beijing:Beijing Institute of Technology,2002. (in Chinese)
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.

[16] Ren H L,Guo T T. Numerical Simulation of Jet Penetration into a Ceramic Target [J]. Int J Nonlin Sci Num,2010,11:235-239.

Failure Characteristics of Alumina Penetrated by Shaped Charge Jet

REN Hui-Lan,GUO Ting-Ting,NING Jian-Guo

(*State Key Laboratory of Explosion Science and Technology,Beijing Institutive of Technology,Beijing* 100081,*China*)

Abstract:A theory model to calculate the target resistance is established to evaluate the ballistic properties; the parameters used in the numerical simulations were determined by simulating the experiment of long rod penetration into alumina ceramic target; the theoretical model is proved to be reasonable by simulating the penetration of shaped charge jet into alumina ceramic. The impact of the geometric size of the shaped charge on the jet velocity and penetration results was studied. It can be concluded that the bigger the angle and the thickness of the shaped charge are, the lower the jet velocity is, and the impact of the thickness on the velocity gradient is severe; the angle of the shaped charge has a significant influence on the penetration depth.

Key words:dynamic response;shaped charge jet;ceramic