DOI: 10.11883/bzycj-2017-0313

带模拟装药弹体高速冲击岩石靶时的断裂特性*

孙其然[1],孙宇新[1],李芮宇[2],邓国强[3],胡金生[3]
(1.南京理工大学瞬态物理国家重点实验室,江苏 南京 210094;
2.中国舰船研究设计中心,湖北 武汉 430064;
3.工程兵科研四所,北京 100850)

摘要:针对高速侵彻过程中的弹体破碎断裂问题,本文中设计 2 种不同壁厚的试验弹,进行约 1 000 m/s 着速的高强度岩体侵彻试验,试验表明:在该高着速条件下,两种结构的试验弹体均发生完全破碎且未能有效侵入岩石靶,而岩石靶体仅在表层产生粉碎性破坏;另外,高速侵彻岩石靶的弹体头部破碎情况与侵彻金属薄靶有所区别。在试验基础上,利用 Autodyn-3D 建立了弹体侵彻岩石靶的物理模型,结合 SPH 算法与 Mott 失效模型对弹体破坏过程进行了数值模拟,可有效地揭示弹体破碎机理,并进一步讨论模拟装药和小范围内不同高速对弹体破坏的影响。试验结果和建立的数值模型可为研究高速侵彻中弹体结构安全提供参考。

关键词:侵彻极限;高速;岩石;弹体破坏;Mott 模型
中图分类号:O383 **国标学科代码**:1303530 **文献标志码**:A

高速侵彻过程中,弹丸与靶板之间会产生强冲击载荷,形成复杂的高温、高压和高应变率受力环境,这会导致弹体发生破碎断裂,进而严重影响弹体的侵彻能力[1],因此学者们对高速侵彻过程中弹体的破碎断裂问题进行了相关研究[2-10]。Rakvag 等[3-4]研究了动能弹高速侵彻钢制装甲过程中碎片的形成和不同速度下 Taylor 杆的断裂失效模式,Jones 等[5]和 Hiermaier 等[6]详细分析了实体与壳体等在冲击下的结构屈曲形态与破坏响应,李硕等[1]和肖新科[7]分别开展了 35CrMnSi 和 38CrSi 合金钢材料的弹体失效与断裂行为的研究。这些相关研究中主要集中于实心杆弹对金属靶板侵彻的断裂问题,而对空心或带模拟装药的空心弹体结构研究较为缺乏,尤其是在高速侵彻岩石靶板的情况下[8-11]。

为了研究带模拟装药弹体高速侵彻岩石靶板的破坏机理,本文设计了两种不同壁厚的弹体,进行了着速约 3*Ma* 的现场岩石侵彻试验研究。在试验的基础上,考虑到弹体发生的完全破碎,通过 Autodyn-3D 软件对弹体采用 SPH 算法和 Mott 失效模型进行数值模拟,分析了弹药结构的破坏过程和机理,并且讨论了小范围内不同的高着速对弹体破坏的影响。

1 试 验

1.1 试验准备

设计了 2 种不同壁厚的弹体,结构如图 1 所示,其直径 80 mm、长 394 mm,而壁厚 h 分别为 17 和 22 mm,对应质量分别为 8.35 和 9.95 kg。弹体材料为 35CrMnSi,抗拉强度约 1.5 GPa。使用 125 mm 口径滑膛炮发射次口径弹丸撞击现场流纹岩靶体,共发射 2 种不同壁厚的试验弹各 2 枚,速度约 1 000 m/s。

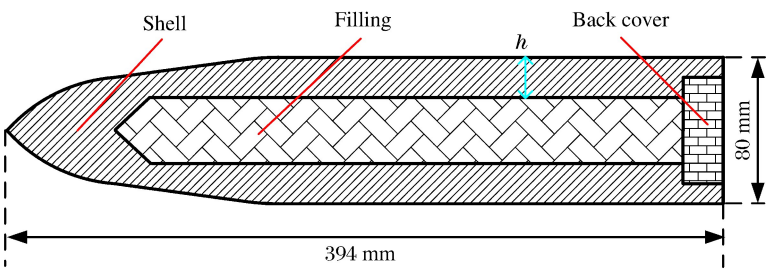


图 1 弹体结构示意图

Fig. 1 Sketch of projectile geometry

* **收稿日期**:2017-09-03;**修回日期**:2017-12-11
第一作者:孙其然(1991—),男,博士研究生;**通信作者**:孙宇新,yxsun01@163.com。

1.2　试验结果

图 2 所示为试验现场的岩石靶破坏形态，可以发现岩石靶体表面在弹体高速冲击后形成明显的放射性裂纹，靶表面岩石呈较为规则的块体脱落。然而，弹体仅在靶表面撞击后形成粉碎性破坏，未能有效侵入靶体。

试验中，2 种不同壁厚的各 2 发试验弹的弹体结构均发生破碎，散布于试验现场，收集到的弹片很少，如图 3 所示。从图 3 中可以看出，收集到的较大尺寸的弹片主要是弹体靠后的部分，尤其是弹尾（带螺纹），而越靠近弹头部分收集到的弹片越小，破碎的越严重。另外，弹尾部收集到的破片几乎可拼凑出完整的弹尾，这意味着弹壳体后段呈现四瓣或更多瓣裂开。此外未收集到其他大尺寸的弹尖头位置的碎片，可以认为弹头部由于严重塑性变形而破碎。图 3 中第 2、3 列破片表现出了较为明显的外翻形态，证明该段壳体发生了径向位移。

此外，从图 4 中弹片断裂面可以看出以下两点：壳体轴向断裂面不够规则，呈现不稳定拉伸破坏；壳体环向断裂面大体上呈现 45°破坏，可以断定为剪切破坏。



图 2　弹体冲击后岩石靶体正表面

Fig. 2　Rock target's impacted surface

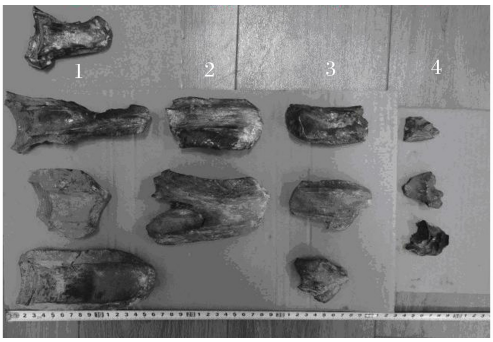


图 3　试验现场收集的弹片

Fig. 3　Collection of projectile fragments in field test



图 4　两种典型破坏断面

Fig. 4　Two typical broken sections

值得注意的是，试验中弹体头部发生完全破碎（图 3 中第 4 列），与文献[6-8]中薄壁弹体撞击有限厚金属靶后呈现弹头完整现象有明显区别，这是因为后者弹头与靶作用时间较短，在严重变形之前就已经穿透；试验中，靶体为半无限厚，岩石一直挤压甚至刨蚀弹头，导致弹头部破碎而无法保持完整。

2　数值模拟

2.1　离散模型

根据图 1 给出的弹体几何尺寸，在 Truegrid 3D 中建立模型并导入 Autodyn 软件中。岩石靶取为圆形靶，直径 1 200 mm，厚 800 mm。对整个弹体（弹壳、后盖、填充物）均使用 SPH 方法进行离散，粒子尺寸取为 2 mm，粒子数目约为 100 000；对靶体使用有限元网格离散，靶体中心网格尺寸为 4 mm，向外比例扩大；此外为了减小边界效应，使用 20 mm 厚钢圈围住岩石靶，有限元单元总数约为 650 000。由

于侵彻过程中弹体材料随机失效，呈现不对称性，弹体可能发生偏转，所以需要建立二分之一模型，在软件中建立的模型如图 5 所示。

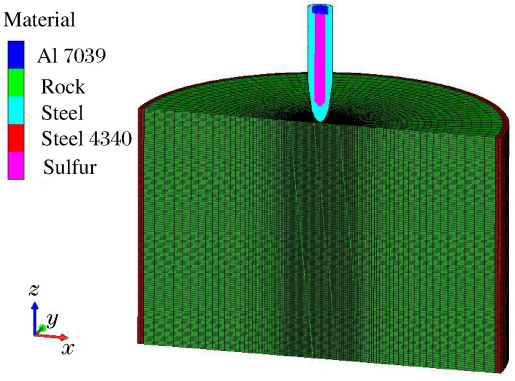


图 5 计算模型

Fig. 5 Simulation model

2.2 材料模型

2.2.1 金属材料

使用 Johnson-Cook 本构模型[12]来描述弹体、铝后盖及钢圈等金属材料的屈服强度：

$$\sigma_y=(A+B\varepsilon^n)\left(1+C\ln\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right)\left[1-\left(\frac{T-T_0}{T_m-T_0}\right)^m\right] \tag{1}$$

式中：A、B、n、C、m 分别为屈服强度、硬化强度、应变硬化系数、应变率硬化系数、温度系数，可通过实验测定；σ_y、ε、$\dot{\varepsilon}$、$\dot{\varepsilon}_0$ 对应屈服应力、等效应变、等效应变率和参考应变率；T_0、T_m 分别为参考温度和材料融化温度，T 为材料瞬时温度。材料参数如表 1 所示，其中 ρ_0 和 G 分别为密度和剪切模量。

表 1 金属材料主要参数

Table 1 Main parameters of metal material

位置	材料	ρ_0/(kg·m^{-3})	G/GPa	A/GPa	B/GPa	n	C
弹体	35CrMnSi	7.93	81.8	1.500	0.500	0.26	0.014
后盖	7039 铝	2.77	27.6	0.337	0.345	0.41	0.010
钢圈	4340 钢	7.83	81.8	0.792	0.510	0.26	0.014

从试验结果分析可以看出，弹体侵彻岩石靶后呈现了破碎现象，弹片较多，所以在模拟时有必要考虑弹材的随机破坏特性。Mott 随机失效模型[12-14]是依托大量的试验数据而建立起来的经验性模型，具有广泛的适用性，并且在 Autodyn 计算软件中可以直接应用，是当前模拟金属材料随机失效的较多的方法。Mott 模型选择材料弱化点破坏概率在[0,1]范围内，对不同的失效塑性应变取概率分布：

$$P=1-\exp\left(-\frac{D}{\gamma}e^{\gamma\varepsilon^*}\right) \tag{2}$$

式中：P 为比例塑性应变为 ε^* 时的单元失效概率，D 和 γ 取决于材料性质的常数。γ 值越大，材料均匀性越强。

对弹材添加 Mott 失效模型，失效模式为主应力失效，失效阈值设为屈服强度(1.5 GPa)，取 $\gamma=10$，设定随机失效从破坏应力的 50%开始[13-14]。

2.2.2 岩石

JH-2 模型[15-16]是目前模拟脆性类材料使用较为广泛的一种本构模型，该模型考虑了压力、应变率和损伤对材料强度的影响，可以在 AUTODYN 软件材料库中直接使用[17]。JH-2 模型针对原始 HJC 模型[18-19]无法反应材料的软化特性和部分参数无法准确得到的缺点进行了改进[15]，其强度模型的无量纲形式为：

$$\bar{\sigma}=\bar{\sigma}_i-D(\bar{\sigma}_i-\bar{\sigma}_f) \tag{3}$$

$$\bar{\sigma}_i=A\,(\bar{p}+\bar{T})^N\,[1+C\ln(\dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0)] \tag{4}$$

$$\bar{\sigma}_f=B\bar{p}^M\,[1+C\ln(\dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0)] \tag{5}$$

式中：A、B、C、M 和 N 均为材料常数，$\bar{\sigma}$、$\bar{\sigma}_i$ 和 $\bar{\sigma}_f$ 分别为无量纲等效应力、无损伤的材料强度($D=0$)和破碎的材料强度($D=1$)，$\bar{p}$ 为无量纲静水压，$\bar{T}$ 为无量纲的静水拉伸强度，D 为材料损伤($0\leqslant D\leqslant 1$)。

考虑到：(1)流纹岩和花岗岩的成分基本一致，而流纹岩的 HJC 参数研究较少，花岗岩的研究比较丰富；(2)靶体流纹岩取样实测密度为 2.66 g/cm^3，单轴抗压强度 178 MPa，这与文献[16]试验所用的巴利花岗岩(Barre granite)的密度(2.66 g/cm^3)和单轴抗压强度(167.1 MPa)均较为相近；(3)着重探

讨弹体的破坏而非高强度的靶体响应。故本文中流纹岩石 JH-2 模型参数重点参考文献[16]。

2.2.3　填充物质(硫磺)

试验中弹体内部使用硫磺作为模拟装药进行填充,Autodyn 软件材料库[17]自带硫磺参数,如表 3 所示,使用 SHOCK 状态方程,无强度方程。

表 2 硫磺材料参数

Table 2 Material parameters of sulfur

材料	ρ_0/(kg·m^{-3})	Grüneisen 系数	c/(m·s^{-1})	S_1
硫磺	2.02	0	2.7	0.95

2.3　模拟结果

2.3.1　壳体失效的机理分析

图 6 给出了弹体高速冲击岩石(着速 1 000 m/s)的侵彻过程,展现了弹体变形的过程以及岩石靶破坏及裂纹扩展的过程,与现场试验中(图 2)岩石靶表面放射性裂纹现象吻合。从图 6 中可以看出,侵彻过程中(t=300 μs)由于应力集中导致弹体薄弱位置塑性屈服,弹体头肩部位置首先发生了明显的径向膨胀随后断裂,随着侵彻过程的继续(t=300 μs),弹体圆柱段径向扩张加剧。

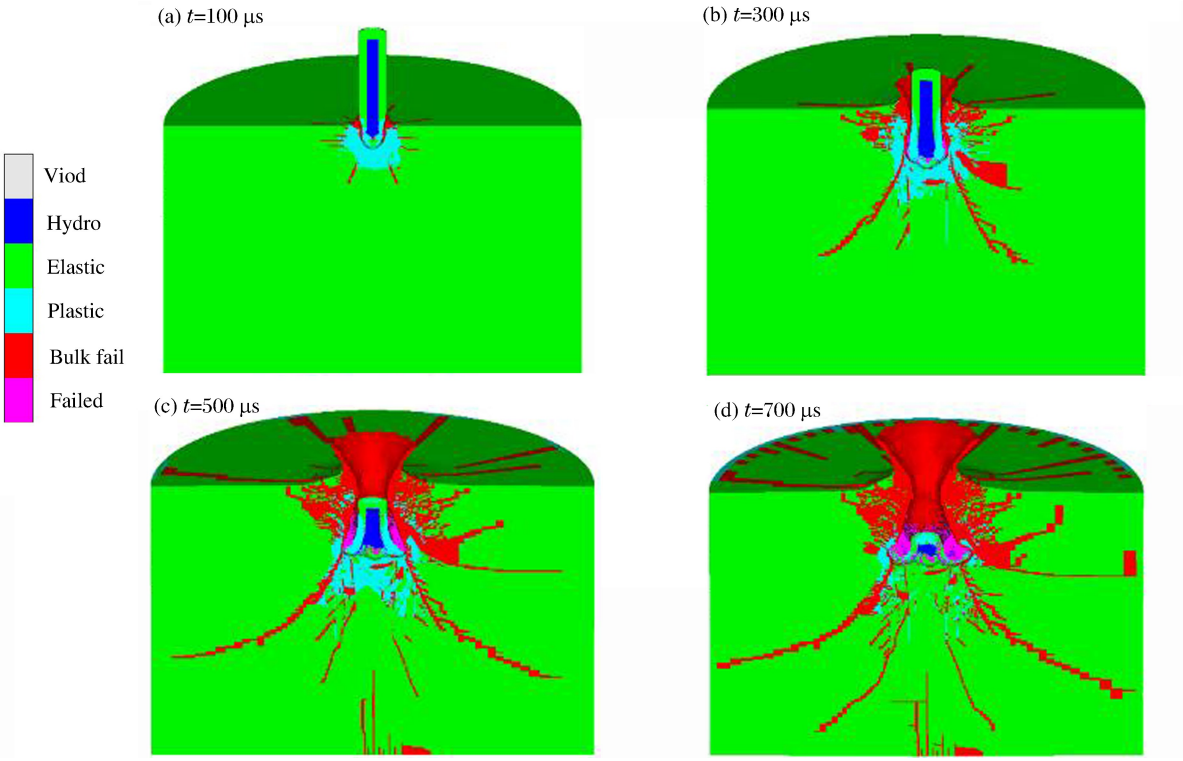


图 6 弹体侵彻岩石靶过程

Fig. 6 Simulation of penetration into rock

图 7 单独给出了弹壳的破坏过程:由于弹体的着速高和岩石靶体的强度高,弹头表面材料破坏严重,同时弹头与后段壳体过渡处由于其壁厚较小,承受的应力超出了材料的屈服极限,进而失效直至断裂。分析原因如下:内部装填的硫磺密度低,强度低,受到了靶体与破碎弹头的高度挤压,使得壳体径向膨胀并产生了明显的裂纹(见图 8),最后壳体沿轴向及环向破坏形成了外翻撕裂型破片(t=700 μs)。试验收集到的在尾部的破片也呈现四瓣(及以上)裂开模式,图中模拟结果明显可见的花瓣数为 4 个,与试验结果基本相符。

计算表明本文对弹体使用的 Mott 随机失效模型及参数具有较高的可信性,本文中数值模拟可以真实地还原弹高速撞击岩石靶时的失效过程。

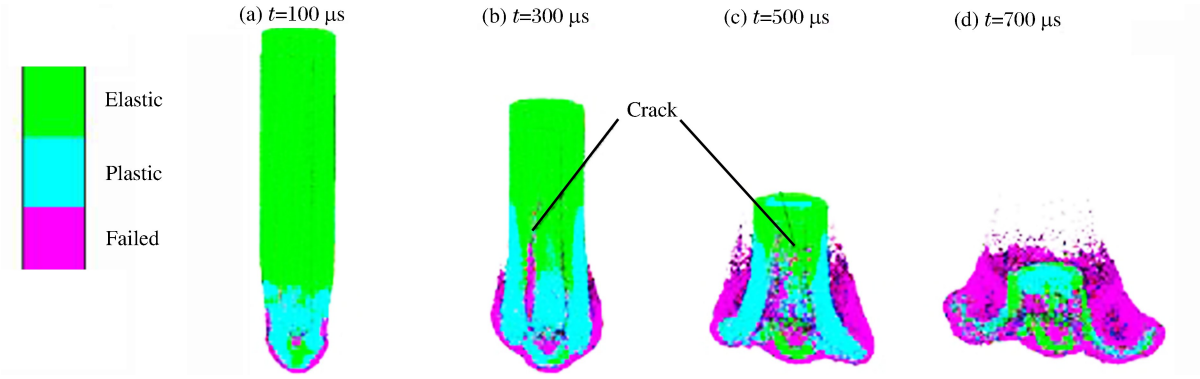


图 7　弹壳破碎过程

Fig. 7　Projectile fracture process

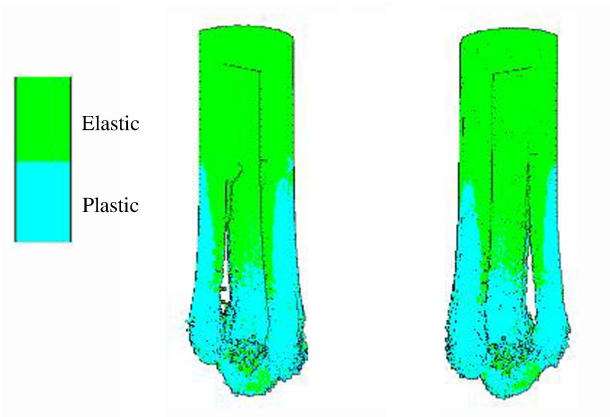


图 8　$t=300\ \mu s$ 时刻弹壳轴向裂纹

Fig. 8　Axial crack in projectile ($t=300\ \mu s$)

2.3.2　装填物对弹体破坏的影响

上小节分析中提到：壳体的轴向及径向断裂是由于内部装填物（模拟装药）挤压的作用结果，由于该分析不是通过对比试验得出，这里在其它条件不变的情况下仅去掉装填物来进行数值对比试验，验证提出的该分析并进一步探讨弹体的破碎机理。

图 9 给出了对比验证模拟，展示了无装填物时壳体的破坏过程，可以发现：没有装填物时，弹体在薄弱处断裂后变成近似圆柱壳体，在高速冲击下不断地外翻撕裂并伴随连续失效破坏，而没有表现出图 8 中所示的明显裂纹，最终弹体破坏形态即为变短的筒体，也非花瓣形破片，这显然与试验中弹体最终状态不符。这进一步确认了试验中装填物对弹体破坏的重大影响。

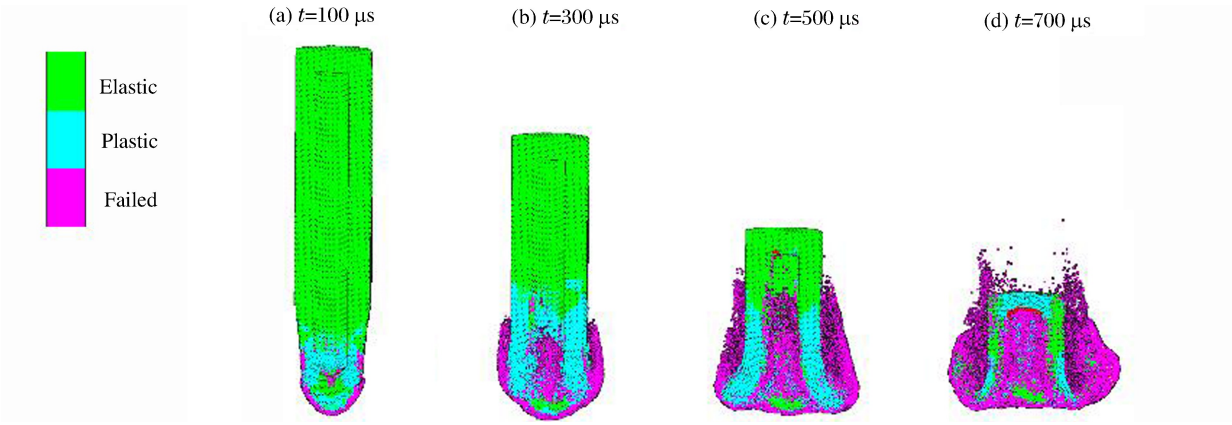


图 9　无装填物的弹壳破坏过程

Fig. 9　Crush process of projectile without filling

空心弹体内部是否含有装填物的对比数值模拟表明：(1)高速侵彻过程中，弹体发生破碎与是否携带装填物无关，但装填物对弹壳的破坏形态有着显著的影响；(2)进一步确认了弹体破坏是由于壳体头肩部薄弱处严重塑性变形至断裂，内部低阻抗装填物受到高度挤压进而使壳体径向膨胀所致。这与文献[8-10]中薄壁弹体撞击有限厚金属靶后呈现的动屈曲破坏模式存在着本质的区别。

2.3.3　弹速对弹体破坏的影响

图 10 给出了不同弹速时的弹壳体最终破坏形态的比较，可以看出：800～1 000 m/s 的着速下，弹壳体裂纹均发展到了壳体末端，着速越高壳体外翻撕裂破坏越严重。另外，800 和 1 000 m/s 着速下，壳体呈现四瓣裂开，而 900 m/s 速度下壳体呈现六瓣裂开，该计算结果初步表明：800～1 000 m/s 的着速下，壳体的裂开瓣数与速度大小及其变化没有直接相关性但花瓣式的裂开模式与试验结果比较一致。

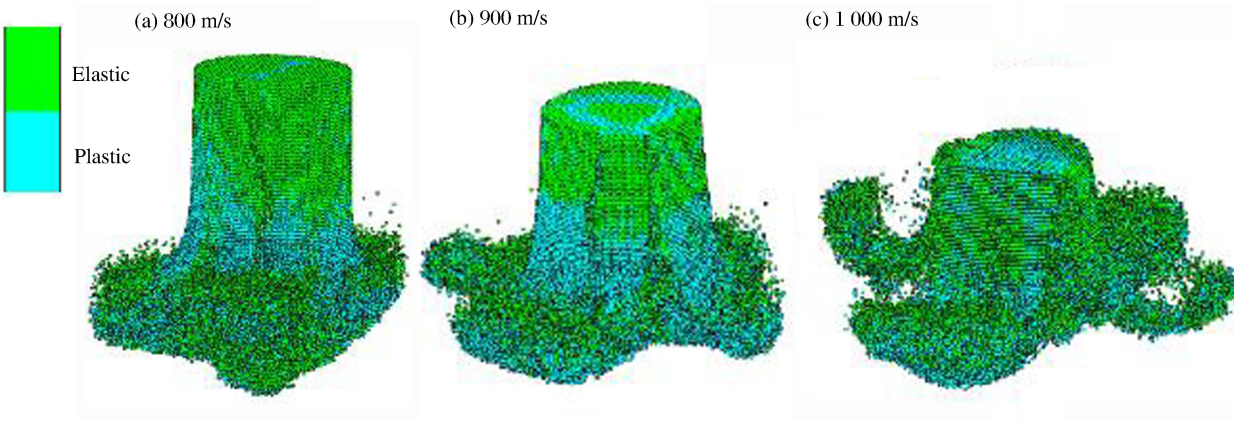


图 10　不同弹速下弹壳破坏比较

Fig. 10　Comparison of projectile crush at different velocites

3　结　论

进行着速约 1 000 m/s 的 2 种不同壁厚的弹药结构对高强度岩石靶的侵彻试验，试验表明：薄壁弹体高速冲击岩石靶后，弹头部分完全破碎，这与撞击有限厚金属靶后呈现的弹头完整现象有所区别。另外，弹体部分有明显的外翻撕裂和剪切破坏，弹尾则分为几乎完整的 4 瓣破片。

在试验基础上，结合三维数值模拟分析弹药结构的破坏机理，进一步确认弹体破坏是由于壳体头肩部薄弱处严重塑性变形至断裂，内部低阻抗装填物受到高度挤压进而使壳体径向膨胀所致，结果表明：

(1)结合 SPH 和 Mott 随机失效的数值模型可以真实地还原弹高速撞击岩石靶时的失效过程，具有较高的可信度，可以对弹体极限设计的数值模拟提供参考；

(2)高速侵彻过程中，弹体发生破碎与是否携带装填物无关，但装填物对弹壳的破坏形态有着显著的影响；

(3)通过不同速度侵彻模拟初步表明：800～1 000 m/s 速度下，弹体花瓣式的裂开模式与高速冲击岩石靶试验结果比较一致，但是裂开瓣数没有与速度的大小及其变化表现出直接的相关性。

本文中的试验数据和具有可信度的数值模型可为进一步探讨高速侵彻岩石混凝土靶板的弹体的结构安全提供有效参考。

参考文献：

[1]　李硕. 强冲击载荷下 35CrMnSi 动态力学行为与断裂机理研究[D]. 中北大学，2015：5-20.

[2]　JENA P K，MISHRA B，RAMESHBABU M，et al. Effect of heat treatment on mechanical and ballistic properties of a high strength armour steel[J]. International Journal of Impact Engineering，2010，37(3)：242-249. DOI：10.1016/j. ijimpeng. 2009. 09. 003.

[3]　RAKVAG K G，BØRVIK T，WESTERMANN I，et al. An experimental study on the deformation and fracture modes of steel projectiles during impact[J]. Materials and Design，2013，51(5)：242-256. DOI：10. 1016/j. matdes. 2013. 04. 036.

[4]　RAKVAG K G，BØRVIK T，HOPPERSTAD O S，et al. Experimental and numerical studyon fragmentation of steel projectiles[C]// EPJ Web of Conferences. EDP Sciences，2012：04020. DOI：10. 1051/epjconf/20122604020.

[5]　JONES N. Structural impact[M]. Cambridge：Cambridge University Press，1997：390-394. DOI：10. 1017/

cbo9780511820625.023.

[6] HIERMAIER S J. Structures under crash and impact[M]. Springer, 2008:1-10. DOI:10.1007/978-0-387-73863-5.

[7] 肖新科. 双层金属靶的抗侵彻性能和 Taylor 杆的变形与断裂[D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2010:2-10.

[8] 王琳，王富耻，王鲁，等. 贝氏体钢和 35CrMnSi 空心弹体侵彻金属靶板的比较研究[J]. 兵工学报，2003，24(3):419-423. DOI:10.3321/j.issn:1000-1093.2003.03.032.
WANG Lin, WANG Fuchi, WANG Lu, et al. Comparative study of penetration performances of steel projectile plates[J]. Acta Armamentarii, 2003,24(3):419-423. DOI:10.3321/j.issn:1000-1093.2003.03.032.

[9] 陈小伟，张方举，徐艾民，等. 细长薄壁弹体的屈曲和靶体等效分析[J]. 爆炸与冲击，2007，27(4):296-305. DOI:10.3321/j.issn:1001-1455.2007.04.002.
CHEN Xiaowei, ZHANGFangju, XU Aimin, et al. Buckling analysis of earth penetrating warhead andequivalent conditions of targets[J]. Explosion and Shock Waves, 2007,27(4):296-305. DOI:10.3321/j.issn:1001-1455.2007.04.002.

[10] 屈明，陈小伟，陈刚. 细长薄壁弹体撞击钢靶屈曲的数值分析[J]. 爆炸与冲击，2008，28(2):116-123. DOI:10.3321/j.issn:1001-1455.2008.02.004.
QU Ming, CHEN Xiaowei, CHEN Gang. Numerical study on dynamic plastic buckling of deep penetrating projectile[J]. Explosion and Shock Waves, 2008,28(2):116-123. DOI:10.3321/j.issn:1001-1455.2008.02.004.

[11] 陈小伟. 动能深侵彻弹的力学设计(Ⅰ)：侵彻/穿甲理论和弹体壁厚分析[J]. 爆炸与冲击，2005，25(6):499-505.
CHEN Xiaowei. Mechanics of structural design of EPW (Ⅰ): The penetration/perforation theory and the analysis on the cartridge of projectile[J]. Explosion and Shock Waves, 2005,25(6):499-505.

[12] JOHNSON G R, COOK W H. Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures, and pressures[J]. Engineering Fracture Mechanics, 1985,21(1):31-48. DOI:10.1016/0013-7944(85)90052-9.

[13] GLANVILLE J P, FAIRLIE G, HAYHURST C, et al. Numerical simulation of fragmentation using AUTODYN-2D and 3D in explosive ordnance safety assessment[C]// The 6th International Explosive Ordnance Symposium. Canberra, Australia, 2003:29-31.

[14] 蒋建伟，张谋，门建兵，等. PELE 弹侵彻过程壳体膨胀破裂的数值模拟[J]. 计算力学学报，2009，26(4):568-572. DOI:10.7511/jslx20094022.
JIANG Jianwei, ZHANG Mou, MEN Jianbing, et al. Three dimensional simulation of expanding motion and fracture of ductile metal ring[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2009,26(4):568-572. DOI:10.7511/jslx20094022.

[15] JOHNSON G R, HOLMQUIST T J. An improved computational constitutive model for brittle materials[C]// American Institute of Physics, 1994:981-984. DOI:10.1063/1.46199.

[16] BANADAKI M M D, MOHANTY B. Numerical simulation of stress wave induced fractures in rock[J]. International Journal of Impact Engineering, 2012,41(2):16-25. DOI:10.1016/j.ijimpeng.2011.08.010.

[17] Century Dynamics. Autodyn theory manual revision 4.3[M]. Concord, California, USA: Century Dynamics Inc., 2005.22-30.

[18] HOLMQUIST T J, JOHNSON G R, COOK W H. A computational constitutive model for concrete subjected to large strains, high strain rates and high pressures[C]// The International Symposium on Ballistics. Canada, 1993:591-600. DOI:10.1115/1.4004326.

[19] 孙其然，李芮宇，赵亚运，等. HJC 模型模拟钢筋混凝土侵彻实验的参数研究[J]. 工程力学，2016，33(8):248-256. DOI:10.6052/j.issn.1000-4750.2014.12.1094.
SUN Qiran, LI Ruiyu, ZHAO Yayun, et al. Investigation on parameters of HJC model applied to simulate perforation experiment of reinforced concrete[J]. Engineering Mechanics, 2007,33(8):248-256. DOI:10.6052/j.issn.1000-4750.2014.12.1094

Simulation of explosive simulant filled with high-velocity projectiles crushing onto rock

SUN Qiran[1], SUN Yuxin[1], LI Ruiyu[2], DENG Guoqiang[3], HU Jinsheng[3]

(1. *National Key Laboratory of Transient Physics, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing* 210094, *Jiangsu, China*;
2. *China Ship Development and Design Center, Wuhan* 430064, *Hubei, China*;
3. *No.* 4 *Engineering Research Institute, General Staff Headquarters of PLA, Beijing* 100850, *China*)

Abstract: Addressing the projectile crush during high-speed penetration, we designed projectiles with two different shell thicknesses and conducted experiment for penetrating high-strength rock target at 1 000 m/s. The experimental results showed that projectiles with different shell thicknesses were completely broken and failed to effectively penetrate the rock target while the rock target was only comminuted on the surface, and that the fragmentation of the projectile tip during high-speed penetration in rock target was different from that in the thin metal target. In addition, based on the experimental results, we established the simulation model of the projectile penetrating the rock target using Autodyn-3D. Combining the SPH method with the Mott distribution failure model, we performed the numerical simulation of the projectile's crush process and revealed the mechanism of the projectile's breaking. Furthermore, we examined the influence of the simulated charge and the small range of different high velocities on the projectile's crush. The experimental results and the proposed numerical method can serve as reference for further study of the projectile's structure during high velocity penetration.

Keywords: penetration limitation; high velocity; rock; projectile crush; Mott distribution

(责任编辑　王易难)