DOI: 10.11883/bzycj-2017-0078
文章编号: 1001-1455(2018)05-1083-08

靶板厚度对卵形弹丸垂直贯穿中等厚度混凝土靶的影响*

刘志林,王晓鸣,李文彬,姚文进,宋梅利
(南京理工大学智能弹药技术国防重点学科实验室,江苏 南京 210094)

摘要: 为研究卵形弹丸贯穿中等厚度混凝土靶体的贯穿规律,开展直径 60 mm 尖卵形弹丸贯穿不同厚度混凝土靶体的侵彻实验,获得了不同撞击速度的弹丸贯穿不同厚度混凝土靶体的剩余速度规律。结合无网格 SPH 方法、RHT 混凝土本构以及状态方程,对贯穿实验进行数值模拟,对不同工况下的弹丸过载规律以及靶体的损伤过程的分析发现:弹丸贯穿中等厚度混凝土靶体的贯穿过程分为开坑阶段、隧道稳定侵彻阶段以及靶背影响出靶阶段,在相同初始撞击速度下的靶背影响区的厚度随着靶体厚度的增加而增大。实验结果与数值模拟结果对比,表明模型能够有效模拟弹丸贯穿混凝土介质问题,研究结果可为贯穿机理的研究提供参考。

关键词: 侵彻力学;靶板厚度;卵形弹丸;垂直贯穿
中图分类号: O385 **国标学科代码**: 1303530 **文献标志码**: A

与深侵彻研究类似,弹丸贯穿有限厚度靶的研究对先进钻地武器的研究和防护设计工程具有重要的意义。弹丸贯穿靶体是一个复杂的过程,当弹丸贯穿混凝土靶后,靶板破坏严重,靶板背面产生大面积崩落的混凝土碎块,从而对掩体内的人员和设备造成严重的次生破坏。现有的 ACE、NDRC 等经验公式[1]都可以对弹丸侵彻和贯穿混凝土介质的侵彻深度和弹道极限进行较为有效的工程预测,但由于使用范围的限制,很难得到更为广泛的应用。近年来很多方法,包括解析模型和数值分析模型,都可以对各种弹体贯穿薄靶进行预测,Hanchak 等[2]、Yankelevsky[3]、Dancygier[4]、葛涛等[5]都对弹丸贯穿混凝土问题做了研究。相对于半无限靶的深侵彻研究,有限靶的贯穿问题主要涉及到靶背效应问题,由于混凝土的拉伸强度远远小于其压缩强度,弹丸侵彻过程中会形成压缩波并向弹丸前进方向传播,当压缩波传播到靶体背面的自由面时,压缩波反射之后变为拉伸波。当应力超过混凝土的抗拉强度时,混凝土会发生断裂,并形成靶背的崩落现象。混凝土介质材料的动态力学性能主要由其状态方程、强度方程和失效准则三个方程表征。侵彻问题中的混凝土本构最常用的是 HJC 模型[6],HJC 模型主要综合考虑了大应变、高应变率、高压效应等因素,较为适合 Lagrangian 和 Euler 网格下的计算模拟,其等效屈服强度与静水压力、应变率以及损伤的函数,结合三阶段的状态方程,其模拟弹丸深侵彻问题十分适用,模拟结果精确。但此模型没有考虑第三不变应力张量的影响,且其不能很好地模拟开坑、剥落等现象。

为了研究卵形弹丸的贯穿中等厚度混凝土靶体的靶体厚度对剩余速度的影响规律,本文中利用火炮发射平台,采用次口径发射技术,开展了 60 mm 直径弹丸贯穿不同厚度混凝土靶的实验研究。结合无网格方法、考虑 3 个极限面的 RHT 混凝土本构和多孔介质 p-α 状态方程,对弹丸贯穿薄靶和厚靶的贯穿效应进行了模拟,分析了弹丸贯穿过程以及其损伤演化,获得了不同厚度靶对贯穿的影响规律。

1 实 验

1.1 实验方案

实验中以 105 mm 口径火炮为发射平台,利用次口径发射技术让弹丸有足够的撞击速度,图 1 为弹

* 收稿日期: 2017-05-13; 修回日期: 2017-07-08
基金项目: 国家自然科学基金项目(51278250)
第一作者: 刘志林(1988—),男,博士研究生,liuzhilin1017@163.com。

道炮发射平台的实验现场布置图。实验弹体为 60 mm 直径，弹长为 300 mm，长径比为 5 的杆式弹丸。侵彻战斗部质量约为 4.15 kg，弹体壳体材料为 30CrMnSiNi2A，并经过淬火和回火热处理，热处理后的材料硬度 HRC 为 49～52，抗拉强度为 1 650 MPa。弹丸头部形状为尖卵形，弹头曲率比 CRH(caliber radius head)为 3。为了达到设计的弹丸撞击速度，采用次口径发射技术，选用合理的弹托结构可以保证发射时弹托与炮膛内壁配合良好，弹体在膛内运动稳定并达到预期的出膛速度，且出炮后迅速与弹体脱离，不影响弹体的后续飞行，本研究采用的是尼龙材料整体式弹托，弹丸与弹托的装配图见图 2。混凝土靶体为圆柱体，直径为 1.8 m(30 倍弹径)，靶体侧面边界用 8 mm 厚钢板箍紧，靶体厚度有 0.6、0.8、1.0、1.4、1.6 和 1.8 m(10～30 倍弹径)。靶体为 C40 素混凝土靶，实测单轴无侧限抗压强度 $f_c^{'}$ = 45.5 MPa。



图 1 实验场地布置图

Fig. 1 Layout of experimental site



图 2 弹体装配实物

Fig. 2 Photograph of assembled projectile

1.2 实验结果

弹丸贯穿混凝土的实验中，撞击速度和贯穿余速是实验中需要测量的重要参数。实验中采用高速摄像机用于弹丸入靶姿态捕捉和入靶前撞击速度的测量，以及弹丸穿透靶板后弹丸出靶姿态和出靶速度的测量。

表 1 实验结果

Table 1 Experimental results

实验编号	H/m	H/D	m/kg	v_i/(m·s^{-1})	v_r/(m·s^{-1})
1	0.6	10.0	4.152	639.6	308.0
2	0.8	13.3	4.153	650.2	203.8
3	1.0	16.7	4.152	643.0	0
4	1.4	23.3	4.134	1 077.8	534.7
5	1.6	26.7	4.157	1 070.0	471.0
6	1.8	30.0	4.133	1 047.0	349.5

实验结果如表 1 所示，结果显示弹丸的撞击速度与设计速度相当，除 3 号射击外其余 5 发射击实验的弹丸都贯穿了混凝土靶体，被贯穿后靶体的破坏状态如图 3～4 所示。

(a) Front surface

(b) Back surface

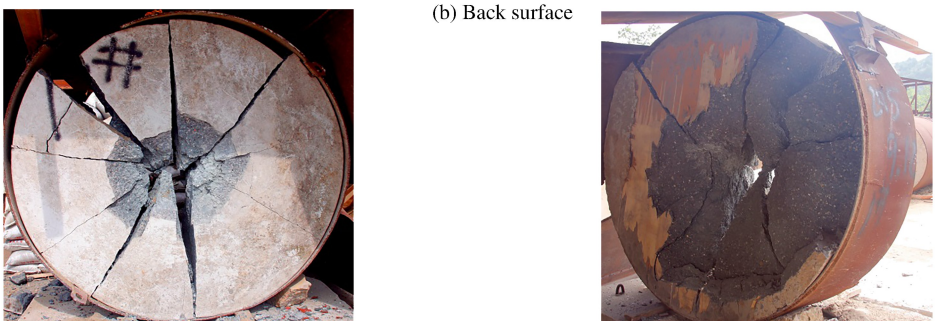


图 3 1 号工况下靶体破坏图

Fig. 3 Failure of concrete target after impact under case 1

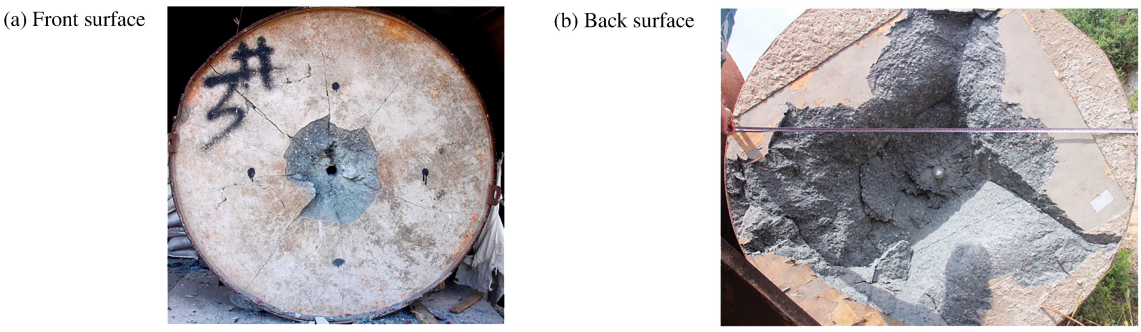


图 4　3 号工况下靶体破坏图

Fig. 4　Failure of concrete target after impact under case 3

从图 3～4 中可以看出靶体呈整体破坏，且多处径向扩展的宏观裂纹发展到靶体侧面，迎弹面有漏斗形开坑区。靶背有大面的崩落区，崩落区的面积与深度明显大于迎弹面的开坑面积和深度。其他 4 种贯穿射击后的靶体破坏与 1 号射击工况类似。3 号射击工况与其他 5 发射击结果不同，实验后的弹丸停留在靶体背面，靶体的背面有很大崩落区，弹丸的头部裸露在靶体外，如图 4(b)所示。靶体的迎弹面和其他靶体的现象类似，有类似于圆形的开坑区。3 号射击工况结果显示，此发射击条件下靶板的厚度非常接近此侵彻速度下的靶板的震塌破坏临界厚度。

2　数值模型

2.1　侵彻模型

图 5 为本文数值模拟采用的侵彻模型，模型尺寸与实验尺寸比为 1∶1，弹丸采用 Lagrangian 网格，见图 6；靶板采用 SPH 粒子单元，粒子间距为 2.5 mm，计算模型采用轴对称模型。

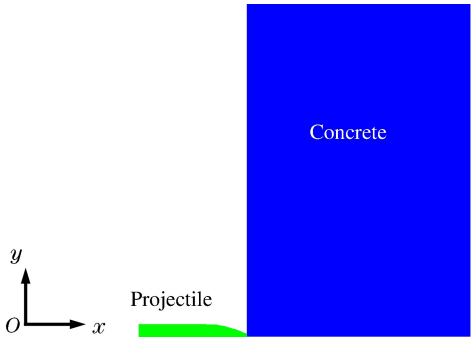


图 5　侵彻模型

Fig. 5　Penetration model

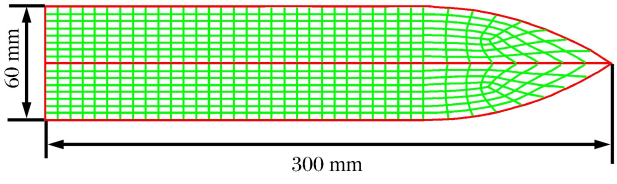


图 6　弹体网格划分

Fig. 6　Mesh division of projectile calculation model

2.2　混凝土本构及参数

选用 RHT 模型[7]作为贯穿模拟的混凝土介质本构，RHT 模型最早是由 Riedel 等提出的混凝土本构模型，其是由 3 个极限面(弹性极限面、失效面、剩余强度面)来描述混凝土的动态力学性能。该模型考虑了第三不变应力偏张量的影响，在预测混凝土深侵彻方面结果理想，且在描述侵彻过程中的混凝土损伤变化有一定的优势。本文中结合 SPH 方法和 RHT 混凝土本构以及多孔介质 p-α 状态方程，模拟弹丸侵彻贯穿混凝土过程，研究弹丸开坑和崩落现象发生过程，同样为研究贯穿工程模型提供数据支持，混凝土材料的具体参数可参考文献[8-10]。

3　结果与讨论

3.1　贯穿过程分析

数值模拟以复现贯穿实验为目的，主要是研究弹丸在同一速度下撞击不同厚度靶体后的弹丸余速的规律。计算中的靶板厚度在 10～30D 范围内，速度有 650 m/s 低速和 1 100 m/s 高速。此工况下，弹丸的贯穿过程分为 3 个阶段穿透，分别为开坑段、隧道段和出靶段。

图 7 显示了弹丸以 650 m/s 速度撞击 0.8 m 厚混凝土靶板的数值计算结果的损伤演化过程图，损伤云图中红色代表材料完全损伤，蓝色代表未损伤，在 RHT 模型中的损伤 δ 是材料的塑性应变增量的积累与材料失效塑性应变的比值，其值在 0 到 1 范围内。取 $t=2.6$ ms 时刻的靶板损伤为最终损伤状态，在 $t=2.6$ ms 时刻，靶板的开坑区、隧道区和冲切区都非常明显。2 号射击工况的弹丸余速比 1 号射击工况的低，弹丸与冲切区混凝土的相互作用持续的时间较长，冲切区的混凝土冲出的速度较 1 号射击工况的小，1 号射击工况测得的弹丸余速为 308 m/s，数值计算弹丸余速结果为 379 m/s，弹丸在冲切段与混凝土的响应主要以局部响应为主，弹丸贯穿了损伤后的冲切区的混凝土，弹丸头部会穿透整个靶面，且继续向外飞行，与混凝土完全分离。冲切区混凝土在与弹丸分离后向外飞散，且离隧道区近的碎片速度较大，这一结果与实验结果完全一致。在靶背影响区域内的弹丸消耗的能量情况见表 2，结果显示了弹丸余速越小，弹丸在靶背影响区域消耗的动能越大，表明弹丸余速越小，与混凝土作用时间越长，损失的能量越大。

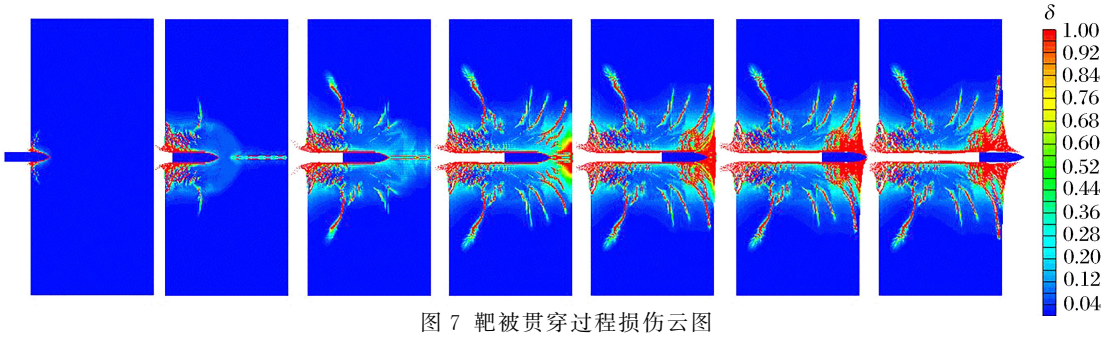


图 7 靶被贯穿过程损伤云图

Fig. 7 Damage contour of target during penetration process

表 2 靶背影响区弹丸消耗的能量情况

Table 2 Energy consumption of projectile in rear free surface effectzone

实验编号	H/D	进入靶背影响区的速度/(m·s^{-1})	弹丸消耗的能量/J
1	10.0	460	1.4×10^5
2	13.3	434	2.8×10^5
3	16.7	428	3.8×10^5
4	23.3	630	2.0×10^5
5	26.7	541	2.2×10^5
6	30.0	502	3.2×10^5

在 6 发射击的贯穿过程中，除 3 号射击工况外，其余 5 发贯穿的余速都相对比较高(大于200 m/s)，其贯穿过程与 1 号射击情况工况类似。将 3 号发射工况的靶背最终破坏情况的数值模拟结果(图 8)与实验结果(图 9)进行对比发现，数值模拟结果与实验一致，此工况下的弹丸停留在靶体内部，且靶后有大质量块混凝土被冲切出靶体。弹丸的侵彻深度为 74.2 cm(实验值为 79.5 cm)，冲切出的靶体的飞溅速度在 6 m/s。3 号射击工况的弹丸的余速为零，实验中 3 号射击工况高速录像靶后破坏过程见图 9(b)，靶后有大体积混凝土块向外冲出，且混凝土块整体以一速度向外飞出(混凝土块的飞出速度约为 17 m/s)，可以判断，混凝土块发生冲切破坏。图 9(a)显示了 3 号射击工况的靶板背面的破坏形态，中间发光物体的为停留在靶体中的弹丸，弹丸头部裸露在空气中，弹身埋没在靶体中。结果表明在弹丸冲击厚靶时，当弹丸在靶背影响区时弹丸速度很小时，冲出靶体的混凝土块与弹丸的响应以整体响应为主。

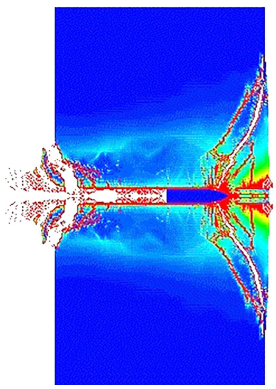


图 8 靶被贯穿破坏的数值模拟结果

Fig. 8 Simulation results of concrete target damage

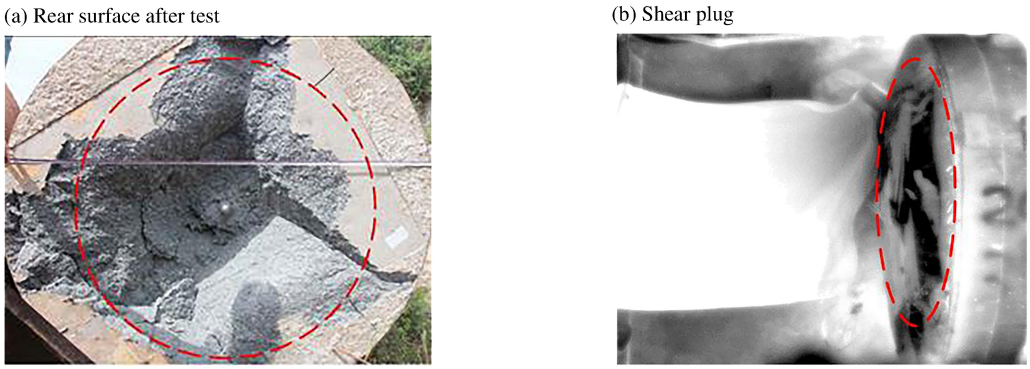


图 9　靶被贯穿破坏的实验结果

Fig. 9　Experimental results of concrete target damage

3.2　过载分析

图 10～11 所示分别为在实验条件下的弹丸的速度和过载变化历程数值模拟结果，6 条曲线分别代表了实验的 6 发射击工况。数值模拟中弹丸的撞击速度分为 2 种，为 650 和 1 100 m/s，靶板厚度有 6 种，分别为 0.6、0.8、1.0、1.4、1.6 和 1.8 m。速度变化曲线显示，同一撞击速度下，随着靶板厚度的增加，弹丸的余速呈下降趋势；靶板厚度继续增加时，余速逐渐趋向于零，即弹丸没有贯穿靶板。相同撞击速度撞击不同厚度靶板的速度变化曲线图中，弹丸在撞击靶板后的速度曲线基本重合，在弹丸接近靶板靶背的自由面时，速度变化趋于平缓，直至弹丸贯穿整个靶板，速度趋于恒定值，也就是弹丸的贯穿余速，结果表明计算值与实验值吻合较好。

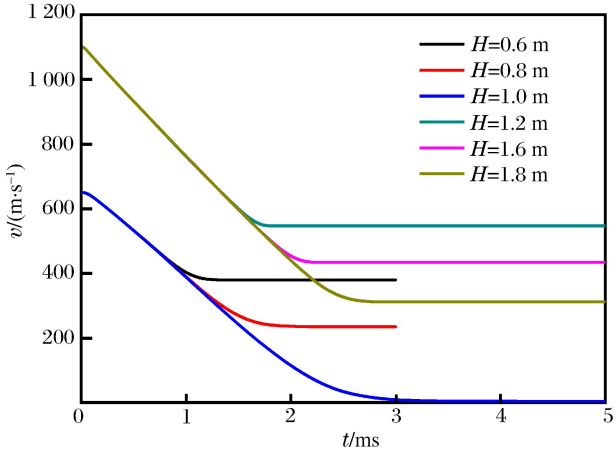


图 10　弹丸速度时程曲线

Fig. 10　Velocity-time curve of projectile

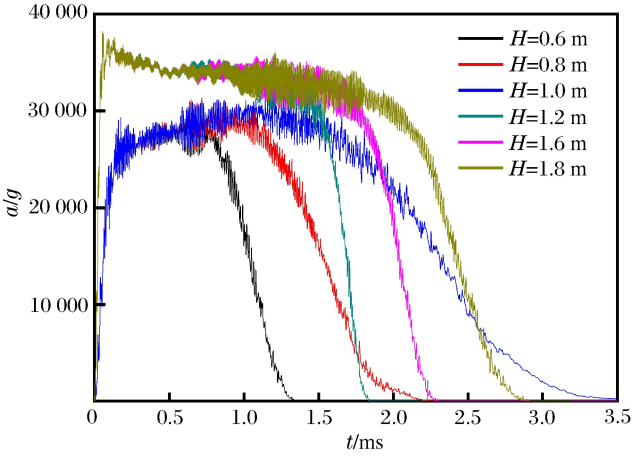


图 11　弹丸过载时程曲线

Fig. 11　Acceleration-time curve of projectile

图 12 所示为弹丸撞击不同厚度靶的过载随时间的变化，弹丸撞击靶板后弹丸过载陡然上升直至稳定侵彻阶段，稳定侵彻阶段弹丸过载趋于恒定值，650 m/s 速度下弹丸稳定侵彻的过载接近 30 000g，1 100 m/s速度下约为 35 000g。Rosenberg 等[11]和 Chen 等[12]在对混凝土的常阻力假设的适用的初始撞击速度阈值达到 1 200 m/s，本文的数值计算结果也就印证了这一结果。在弹丸继续侵彻，并接近靶背自由面时，弹丸的过载开始降低，并缓慢将至零，表明弹丸停止运动，或是弹丸完全贯穿混凝土靶。图 12(a)为弹丸贯穿 0.6 m 厚靶的弹丸过载随弹丸位移的曲线图，过载可以分为 3 个阶段：开坑阶段、隧道阶段(稳定侵彻阶段)和靶背自由面影响阶段。侵彻实验中，弹丸的开坑深度的散布较大，Forrestal 等[13]建议开坑区的深度为 2D，数值模拟结果显示，弹丸从开坑阶段进入稳定侵彻阶段的过渡区域也在深度 2D 处附近，本文取 2D 作为开坑阶段与稳定侵彻阶段的分界线；稳定侵彻阶段的弹丸过载接近为恒定值，稳定侵彻阶段结束的分界线由靶背自由面的影响区域决定，数值模拟中 0.6 m 的靶板的贯穿的自由面影响区域约在 3.1D。自由面影响区域内，弹丸的过载逐渐降低直至为零。特别的，当弹丸头

部运动至靶体背面的自由面时($Z=10D$),弹丸的过载还并未降至零,表明被弹丸冲出混凝土靶体的混凝土介质对弹丸还会有作用力。这 3 个分界时刻的损伤云图见图 13,从损伤云图中可以发现,弹丸在开坑段以及稳定侵彻的过程中,离靶背 3.1D 厚度的区域内损伤积累相对于其他区域较为严重,当弹丸行至此区域时,弹丸过载稳步降低直至为零。

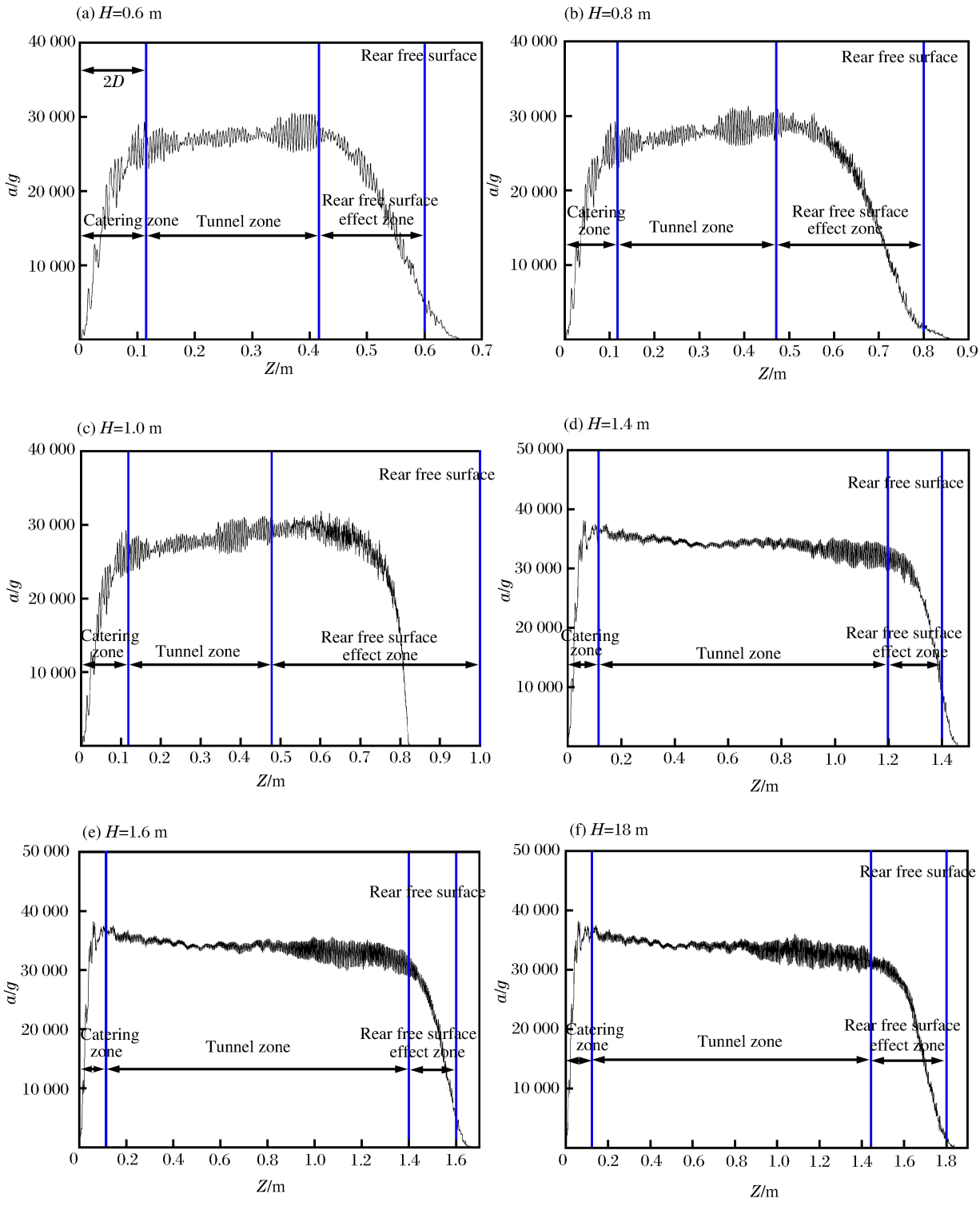


图 12 弹丸过载与位移关系

Fig. 12 Relation between acceleration and displacement

厚度为 0.8 m 靶被贯穿的 3 个阶段与厚度为 0.6 m 靶被贯穿的过程类似，但靶背影响区域较厚度为 0.6 m 的靶有一定的增加(约 5.6D)，弹丸贯穿厚度为 1.4、1.6、和 1.8 m 靶的过载随位移的变化图见图 12(d)～(f)，高速贯穿的过载曲线与低速相比，弹丸的开坑区域的厚度相对减小，表明弹丸更快的进入稳定侵彻阶段，但其减小的幅值有限，因开坑段不是本文研究的重点，本文中还是取 2D 作为开坑区的深度。随着靶板厚度的增加，隧道区域的厚度逐渐增加，靶背影响区的厚度也逐渐增加，弹丸的余速逐渐减小，隧道区的长度与靶背影响区的长度的数值模拟结果见表 3。

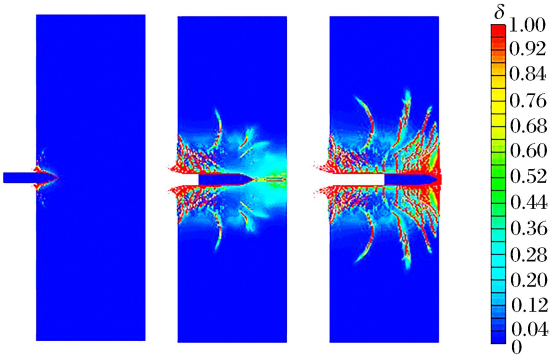


图 13　3 个分界时刻的损伤云图

Fig. 13　Damage contour of different stages in penetration process at three instants of time

表 3　侵彻过程中 3 个阶段厚度的数值模拟结果

Table 3　Simulation results of thickness of three stages in penetration process

实验	H/D	开坑区/D	隧道区/D	靶背影响区/D
1	10.0	2.0	4.9	3.1
2	13.3	2.0	5.7	5.6
3	16.7	2.0	6.0	8.7
4	23.3	2.0	18.1	3.2
5	26.7	2.0	20.9	3.8
6	30.0	2.0	21.9	6.1

4　结　论

开展 60mm 直径弹丸的贯穿中等厚度混凝土介质靶实验，靶体厚度在 10～30D 范围内，撞击速度为 650 和 1 100 m/s，得到弹丸以相同速度撞击不同厚度混凝土介质靶体的弹丸余速变化规律。结合 SPH 无网格方法以及 RHT 混凝土本构以及考虑多孔特性的 p-α 状态方程，对实验工况进行的数值模拟，对实验结果和数值模拟结果进行分析总结，得出以下结论：

(1)采用的 SPH 无网格法结合 RHT 混凝土本构和考虑多孔特性的 p-α 状态方程方法，可以很好地模拟靶板的开坑与崩落失效响应，在弹丸贯穿混凝土介质问题的研究中取得较好的结果。

(2)贯穿实验表明：弹丸的剩余速度随着混凝土靶体厚度的增加而降低；隧道区和靶背影响区的厚度随着靶体整体厚度的增加而增加。

(3)数值模拟结果表明：在弹丸出靶速度低于阈值时，混凝土靶背发生冲塞现象；弹丸余速较大时，弹丸出靶时与冲切区的混凝土继续作用，弹丸在此过程中的过载稳步下降直至弹丸头部穿透靶板，过载降为零。

参考文献：

[1]　文鹤鸣. 混凝土靶板冲击响应的经验公式[J]. 爆炸与冲击，2003，23(3)：267-274.
WEN Heming. Empirical equations for the impact response of concrete targets[J]. Explosion and Shock Waves，2003，23(3)：267-274.

[2]　HANCHAK S J，FORRESTAL M J，YOUNG E R，et al. Perforation of concrete slabs with 48 MPa (7 ksi) and 140 MPa (20 ksi) unconfined compressive strengths[J]. International Journal of Impact Engineering，1992，12(12)：1-7.

[3]　YANKELEVSKY D Z. Local response of concrete slabs to low velocity missile impact[J]. International Journal of Impact Engineering，1997，19(4)：331-343.

[4]　DANCYGIER A N. Rear face damage of normal and high-strength concrete elements caused by hard projectile impact[J]. Aci Structural Journal，1998，95(3)：291-304.

[5] 葛涛,刘保荣,王明洋. 弹体侵彻与贯穿有限厚度混凝土靶体的力学特性[J]. 爆炸与冲击,2010,30(2):159-163.
GE Tao, LIU Baorong, WANG Mingyang. Penetration and perforation of concrete targets with finite thickness by projectiles[J]. Explosion and Shock Waves, 2010,30(2):159-163.

[6] HOLMQUIST T J, JOHNSON G R. A computational constitutive model for glass subjected to large strains, high strain rates and high pressures[J]. Journal of Applied Mechanics, 2011,78(5):051003.

[7] RIEDEL W, THOMA K, HIERMAIER S, et al. Penetration of reinforced concrete by BETA-B-500 numerical analysis using a new macroscopic concrete model for hydrocodes[R]. 1999.

[8] 张若棋,丁育青,汤文辉,等. 混凝土 HJC、RHT 本构模型的失效强度参数[J]. 高压物理学报,2011,25(1):15-22.
ZHANG Ruoqi, DING Yuqing, TANG Wenhui, et al. The failure strength parameters of HJC and RHT concrete constitutive models[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2011,25(1):15-22.

[9] 林华令,丁育青,汤文辉. 混凝土侵彻数值模拟的影响因素[J]. 爆炸与冲击,2013,33(4):425-429.
LIN Hualing, DING Yuqing, TANG Wenhui. Factors influencing numerical simulation of concrete penetration[J]. Explosion and Shock Waves, 2013,33(4):425-429.

[10] LEPPÄNEN J. Concrete subjected to projectile and fragment impacts: Modelling of crack softening and strain rate dependency in tension[J]. International Journal of Impact Engineering, 2006,32(11):1828-1841.

[11] ROSENBERG Z, DEKEL E. The deep penetration of concrete targets by rigid rods-revisited[J]. International Journal of Protective Structures, 2010,1(1):125-144.

[12] CHEN Xiaowei, LI Jicheng. Analysis on the resistive force in penetration of a rigid projectile[J]. Defence Technology, 2014,10(3):285-293.

[13] FORRESTAL M J, ALTMAN B S, CARGILE J D, et al. An empirical equation for penetration depth of ogive-nose projectiles into concrete targets[J]. International Journal of Impact Engineering, 1992,15(4):395-405.

Numerical and experimental study of an ogival projectile vertical perforating a medium thickness concrete target

LIU Zhilin, WANG Xiaoming, LI Wenbin, YAO Wenjin, SONG Meili

(*Ministerial Key Laboratory of ZNDY, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing* 210094, *Jiangsu, China*)

Abstract: In order to understand the law dominating the process of an ogival projectile perforating a medium thickness concrete target, the tests of the ogival projectiles of 60 mm diameter perforating concrete targets of (10-30)D thickness were carried out. The effect of concrete thickness on residual velocity was obtained in the tests. The meshless SPH method, combing the RHT concrete constitutive model and the p-α equation of state, was used to simulate perforation tests. Simulation results on perforation acceleration and damage process reveal that there are three stages in the perforation process, including catering, tunneling, and rear effect zone. Furthermore, the range of rear effect zone increases with increasing concrete thickness at the same projectile velocity. The comparison between the experimental results and the simulation results show that the current simulation model is able to simulate projectiles perforating concrete targets, and the simulation results provide insight into the perforation mechanisms.

Keywords: penetration mechanics; target plate thickness; ogival projectile; vertical perforating

(责任编辑 王易难)