

## 高速弹体对混凝土拱形靶体的侵彻效应分析\*

杨广栋<sup>1</sup>, 王高辉<sup>1,2</sup>, 卢文波<sup>1</sup>, 严鹏<sup>1</sup>, 陈明<sup>1</sup>

(1.武汉大学 水资源与水电工程科学国家重点实验室,湖北 武汉 430072;

2.中国水利水电科学研究院 流域水循环模拟与调控国家重点实验室,北京 100038)

**摘要:**混凝土拱结构由于其拱形受力特性,在高速弹体作用下其侵彻效应将与混凝土板梁结构存在一定的差异.为分析混凝土拱结构在高速侵彻荷载作用下的动力响应及侵彻效应特性,考虑弹体侵彻高加载率下混凝土的应变率效应,采用 SPH-Lagrange 耦合方法,建立了弹体高速冲击作用下的侵彻耦合模型,并且验证了该耦合模型对此类问题模拟的可靠性;同时采用该耦合模型研究了混凝土拱形靶体在高速弹体外拱及内拱冲击作用下的贯穿破坏发展过程,并分析了弹体侵入拱形靶体的非贯穿侵彻破坏效应.结果表明:拱效应对混凝土拱形靶体的侵彻破坏过程具有重要的影响;弹体从外拱侵彻引起拱形靶体的动力响应、破碎区深度以及弹体贯穿的残余速度均小于内拱侵彻.

**关键词:**弹体;拱效应;高速冲击;外拱侵彻;内拱侵彻

**中图分类号:**O383

**文献标志码:**A

## Penetration Resistance of Concrete Arch Targets Subjected to High Velocity Projectile

YANG Guangdong<sup>1</sup>, WANG Gaohui<sup>1,2†</sup>, LU Wenbo<sup>1</sup>, YAN Peng<sup>1</sup>, CHEN Ming<sup>1</sup>

(1.State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

**Abstract:** Due to the mechanical characteristics of arched concrete structures, some differences of the penetration effect subjected to high velocity projectile impact exists between arched structures and slab or beam structures. In order to study the dynamic response and damage characteristics of concrete arch structures subjected to high-speed penetrating load, the strain rate effect under impact load was taken into consideration for the establishment of the penetration model based on the coupling method of SPH and Lagrange. The reliability of the coupling model was also verified. Based on the coupling model, the perforation and penetration damage process of concrete arch targets subjected to impact load were studied. The results indicated that the arch effect had important influence on the damage process of concrete structures, the dynamic response of concrete arch targets and the length of fracture zone caused by high velocity impact from extrados were smaller than that from intrados, and the residual velocity of projectile from extrados was also smaller than that from intrados.

**Key words:** penetrator; arch effect; high impact; impact from extrados; impact from intrados

\* 收稿日期:2016-11-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51509189, 51339006), National Natural Science Foundation of China(51509189, 51339006); 湖北省技术创新专项重大项目(2017ACA102), Major Program of Technological Innovation of Hubei Province(2017ACA102); 长江科学院开放研究基金资助项目(CKWV2016383/KY), CRSRI Open Research Program(CKWV2016383/KY)

作者简介:杨广栋(1991—),男,江苏连云港人,武汉大学博士研究生

† 通讯联系人, E-mail: wanggaohui@whu.edu.cn

拱结构是指杆轴为曲线且在竖向荷载作用下能产生水平推力的结构,合理的拱结构内部弯矩很小,拱结构主要承受压力,对于混凝土这种抗压强度高、抗拉强度低的材料,拱结构能够充分发挥混凝土材料的特点. 混凝土拱结构被广泛地应用于房屋、大坝、桥梁等各种建筑物,其拱效应在常规静力荷载和地震荷载作用下的受力特性已被广泛认识,然而对拱结构在高速弹体侵彻、贯穿、爆炸等极端荷载作用下的拱效应及破坏特性的研究仍有待深入. 尤其像高拱坝这种具有重大政治、经济效益的建筑物,可能遭受来自上游或下游方向的制导弹体侵彻打击,一旦失事,后果不堪设想. 因此研究拱结构在弹体内拱及外拱方向冲击下的侵彻效应,对拱结构抗侵彻、抗爆的防护设计具有重要意义.

在冲击、爆炸等极端荷载作用下,混凝土所表现出的性质十分复杂. 研究表明,混凝土的抗侵彻能力与混凝土的强度以及应变率有关<sup>[1]</sup>. 目前,对于极端荷载作用下混凝土的动力响应和损伤特性的研究主要是通过现场试验和数值模拟等方法进行. 霍静思等<sup>[2]</sup>研究了钢管混凝土在高温后的抗多次冲击力学性能;Frew 等<sup>[3]</sup>通过弹体打击不同直径的混凝土靶试验,研究了混凝土靶体直径对弹体侵彻深度的影响以及弹体侵彻混凝土靶体的运动过程;Gomez 等<sup>[4]</sup>做了大量的弹体多次打击混凝土试验,总结出了弹体多次侵彻混凝土深度的经验公式及修正系数. 由于现场试验需要大量的人力、物力、财力,而且试验危险性高,因此经常采用现场试验的方法研究混凝土在冲击荷载作用下的性质显得不切实际. 随着高应变率下混凝土动态本构模型的提出以及数值模拟技术的发展,使得采用数值模拟方法研究高速弹体侵彻作用下的混凝土动态特性成为可能. 刘志林等<sup>[5]</sup>利用颗粒离散单元法,研究

了弹丸侵彻细观混凝土模型中弹丸受到介质的阻力与侵彻速度的关系;张群利等<sup>[6]</sup>采用显示动力有限元程序研究了不同结构类型棚洞的抗冲击性能,结果表明,全拱式和半拱式棚洞的抗冲击性能比门式结构有优势;张社荣等<sup>[7]</sup>研究了制导炸弹高速侵彻大体积混凝土重力坝坝头的破坏过程;宋顺成等<sup>[8]</sup>研究了弹丸侵彻混凝土的破坏发展过程. 以上研究成果主要集中在弹体侵彻混凝土板梁结构及大体积混凝土结构的动力响应和破坏过程,有关混凝土拱结构遭受高速弹体侵彻作用的研究成果较少.

本文采用 SPH-Lagrange 耦合方法,建立了弹体高速冲击作用下的侵彻耦合模型,研究了混凝土拱形靶体在弹体外拱及内拱冲击作用下的贯穿破坏发展过程,并分析了非贯穿情况下拱形靶体的侵彻效应,为拱结构的侵彻、爆炸分析及防护设计提供理论基础.

## 1 混凝土动态损伤本构模型

在冲击荷载作用下混凝土材料通常会出现应变率效应<sup>[9-10]</sup>. 已有研究表明,应变率对混凝土的抗压和抗拉强度的影响亦有不同. 本文采用 RHT 模型模拟混凝土拱结构在弹体冲击作用下的动力响应和破坏发展过程. RHT 模型是 Riedel 等<sup>[11]</sup>在 HJC 模型<sup>[12-13]</sup>基础上提出的,该模型考虑了压力依赖性、应变率敏感性以及偏应力张量第三不变量对破坏面形状的影响,同时引入了拉伸损伤和压缩损伤. 混凝土材料的初始屈服强度、失效强度和残余强度分别用弹性极限面、失效面及残余强度面控制.RHT 模型的主要参数见表 1.

表 1 RHT 模型主要参数

Tab.1 Parameters used in the RHT model for concrete

真实密度/ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	初始密度/ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	纵波速/ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	体积模量 $A_1/\text{GPa}$	剪切模量 $G/\text{GPa}$	抗压强度 $f_c/\text{MPa}$	拉压强度比/ ( $f_t/f_c$ )	剪压强度比/ ( $f_s/f_c$ )	失效面 常数 $A$
2.75	2.314	2 920	35.27	16.7	35	0.1	0.18	2.0 <sup>[14]</sup>
失效面 指数 $N$	拉、压子午线处 偏应力比 $Q_0$	脆韧转变 参数 $B_Q$	残余失效面 常数 $B$	残余失效面 指数 $M$	压缩应变率 指数 $\alpha$	拉伸应变率 指数 $\delta$	损伤常数 $D_1$	损伤常数 $D_2$
0.7 <sup>[14]</sup>	0.69	0.010 5	1.5 <sup>[14]</sup>	0.7 <sup>[14]</sup>	0.032	0.025 <sup>[14]</sup>	0.04	1.0

RHT 模型失效面方程为:

$$\sigma_{\text{eq}}^*(P, \theta, \dot{\epsilon}) = Y_{\text{txc}}^*(P) R_3(\theta) F_{\text{rate}}(\dot{\epsilon}). \quad (1)$$

式中:  $F_{\text{rate}}(\dot{\epsilon})$  为应变率强化因子;  $Y_{\text{txc}}^*(P)$  为压缩子午线强度.

$$Y_{\text{txc}}^*(P) = A [P^* - P_{\text{spall}}^* F_{\text{rate}}(\dot{\epsilon})]^N. \quad (2)$$

式中:  $P_{\text{spall}}^*$  为归一化层裂强度,  $P_{\text{spall}}^* = P_{\text{spall}}/f_c$ ;  $A$  为失效面常数;  $N$  为失效面指数.

RHT 本构模型的损伤定义为:

$$D = \sum (\Delta \epsilon_{PL} / \epsilon_p^{failure}) , \quad (3)$$

$$\epsilon_p^{failure} = D_1 (P^* - P_{spall}^*) D_2 \geq \epsilon_f^{min} = 0.01. \quad (4)$$

式中:  $\Delta \epsilon_{PL}$  为等效塑性应变增量;  $D_1$ 、 $D_2$  为损伤常数;  $\epsilon_f^{min}$  为最小失效应变。

## 2 侵彻耦合模型验证

高速弹体侵彻破坏过程中将涉及结构的大变形问题,采用常规有限元法对其进行数值模拟时容易因网格高度畸变而导致计算中断或计算结果错误.光滑粒子流体动力学(Smoothed Particle Hydrodynamics)法采用相互作用的粒子组来描述连续的物质,每个粒子上承载各种物理量,包括质量、速度等,通过求解动力学方程组,以求得整个系统的力学行为.该方法可有效地模拟连续体结构的解体、碎裂等大变形问题,无需网格重构,并且能够保证计算精度<sup>[15]</sup>.因此,选用 SPH 法模拟混凝土拱结构在高速弹体冲击作用下的侵彻破坏特性.在常规速度范围(小于 800 m/s)内对混凝土类目标侵彻的弹体可视为刚体<sup>[16]</sup>,故本文不考虑弹体的变形,弹体采用 Lagrange 算法模拟,以提高计算效率.

为了验证侵彻耦合模型的可靠性,采用本文的侵彻耦合模型模拟 Hansson<sup>[17]</sup> 试验,并将模拟的结果与已有的研究成果和现场试验的结果进行对比. Hansson 试验模型示意图如图 1 所示,弹体为钢制材料,弹头蛋形曲率半径(CRH)为 3.0,弹体总长 225 mm,弹体直径 75 mm,密度 7 830 kg/m<sup>3</sup>,弹体质量 6.28 kg,垂直侵彻速度为 485 m/s.混凝土靶为直径 1.6 m、长度 2.0 m 的圆柱体,四周用钢圈包裹. Hansson 试验测得弹体垂直侵彻混凝土靶体深度为 655 mm,弹坑直径 800 mm.

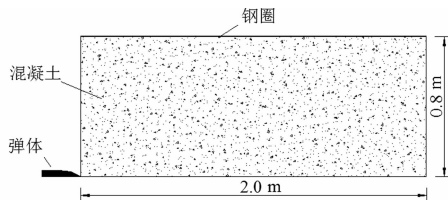


图 1 试验模型图

Fig.1 Model size of the experiment

因计算模型具有轴对称性,为节约计算时间,采用 AUTODYN-2D 进行数值模拟.采用 RHT 本构模型考虑混凝土材料在高速侵彻作用下的高应变率效应,利用 SPH 法进行数值模拟,粒子大小取 5 mm,粒子总数为 60 288,在混凝土靶体背面施加

法向约束,如图 2 所示.图 3 给出了 Hansson 试验的本文模拟结果与现场试验及已有数值结果的对比图.

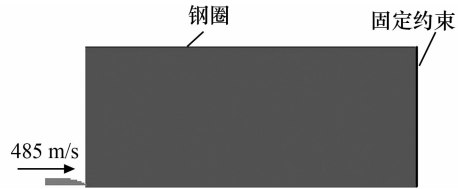


图 2 试验计算模型图

Fig.2 Computational model of the experiment

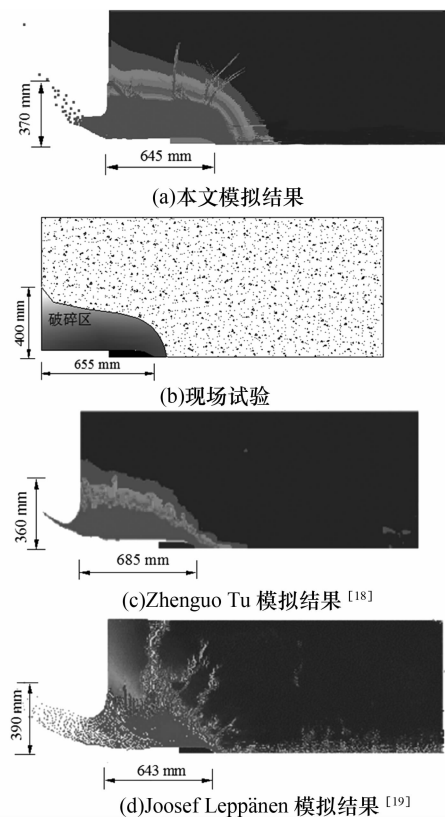


图 3 Hansson 试验模拟结果对比图

Fig.3 Comparison of final damage patterns of Hansson experiment

图 3(a)为本文模拟结果;图 3(b)为根据现场试验结果描绘出的混凝土破碎区分布图;图 3(c)为 Tu 等<sup>[18]</sup>采用拉格朗日(Lagrange)法模拟的侵彻结果;图 3(d)为 Leppänen<sup>[19]</sup>采用 SPH 算法得到的侵彻结果.由图 3 可看出,数值模拟的侵彻深度、弹坑直径及损伤分布与现场试验及已有数值模拟结果均吻合较好,说明采用 SPH-Lagrange 耦合方法建立的侵彻耦合模型可有效模拟高速弹体冲击作用于混凝土结构的侵彻破坏过程.

### 3 混凝土拱形靶体侵彻效应特性分析

对于许多拱形建筑物来说,弹体多数情况下会从外拱方向进行侵彻打击,但是对于类似于混凝土双曲高拱坝的建筑物,由于其上游蓄水,多数情况下弹体可能从下游方向进行打击.因此研究拱结构在弹体外拱、内拱方向的侵彻效应,对拱结构的防护设计及安全性评价都具有重要的意义.

#### 3.1 混凝土拱形靶体的侵彻耦合模型

弹体侵彻混凝土拱结构的侵彻效应受多种因素影响,如弹体的形状、弹体速度、侵彻角、拱结构尺寸、形状等.本文在保证弹体和拱形靶体的形状、尺寸不变的情况下,分析了混凝土拱形靶体在弹体外拱及内拱冲击作用下的贯穿破坏发展过程,并研究了非贯穿情况下混凝土拱形靶体的侵彻效应.

选取的混凝土拱形靶体如图 4(a)所示,拱形靶体中心角取  $180^\circ$ ,外径 5.0 m,内径为 4.0 m,拱厚为 1.0 m,在拱端施加固定约束.弹体采用球形弹头,弹头直径 150 mm,弹身总长 325 mm,密度  $7\ 830\ \text{kg/m}^3$ ,弹体质量 41.51 kg.为了对比分析高速弹体贯穿和非贯穿混凝土拱形靶体的侵彻破坏特性,本文选取弹体的速度分别为 485 m/s 和 300 m/s.弹体分别从外拱和内拱方向垂直侵彻该混凝土靶体,同时用该弹体以相同速度侵彻与混凝土拱形靶体轴线长度相同、厚度相同的混凝土板结构,如图 4(b)所示.混凝土板长 14.0 m,厚度 1.0 m.因结构具有轴对称性,故选取一半模型进行分析.混凝土材料均采用 SPH 算法,粒子大小取 20 mm,拱形靶体粒子总数 17 620,混凝土板粒子总数 17 500,弹体采用拉格朗日网格,不考虑弹体变形.

#### 3.2 拱形靶体的高速侵彻贯穿破坏过程

弹体以 485 m/s 的速度分别从外拱和内拱方向垂直侵彻混凝土拱形靶体,如图 4(a)所示;同时以 485 m/s 的速度侵彻混凝土板结构,如图 4(b)所示.

图 5 所示为弹体贯穿混凝土靶体的损伤发展过程图.由图 5 可知,高速弹体从外拱和内拱方向垂直侵彻混凝土拱形靶体,与垂直侵彻混凝土板的侵彻破坏过程之间存在较大的差别.当弹体开始作用于混凝土靶体时,由于弹体高速冲击作用,使得弹体周围的混凝土受到强烈挤压,其值远大于混凝土的动抗拉、抗压强度,弹头附近混凝土产生压剪破坏.当冲击波传播到靶体背面时将反射形成拉伸波,出现受拉损伤区.随着弹体侵彻深度的增加( $t$

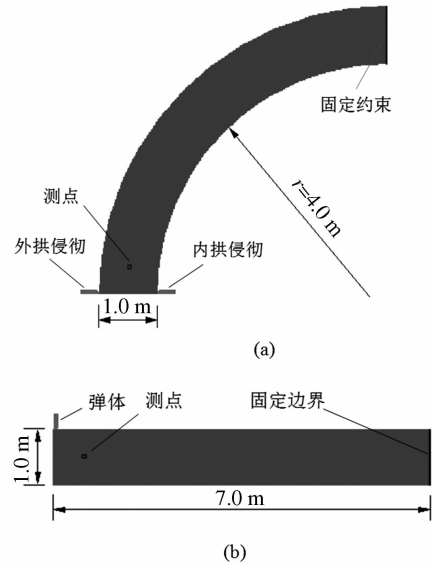


图 4 计算模型示意图

Fig.4 Computational model subjected to projectile impact

$=0.9\ \text{ms}$ ),内拱侵彻条件下混凝土拱形靶体出现贯通裂隙,如图 5(c)所示;而外拱侵彻的拱形靶体及板结构在背面虽出现较大的损伤区,但破碎区并未贯穿,如图 5(a)(b)所示.当  $t=1.5\ \text{ms}$  时,内拱侵彻的拉裂区明显增大,并形成较大的连通破碎区;侵彻混凝土板的破碎区则刚刚贯通;而外拱侵彻所引起的破碎区尚未贯通.当  $t=2.0\ \text{ms}$  时,3 种侵彻方式所形成的破碎区均已贯通.当  $t=6.5\ \text{ms}$  时,弹体已经贯穿混凝土靶体.

以上分析表明弹体从外拱和内拱侵彻混凝土拱形靶体的破坏过程有着明显的不同,这主要是因为拱形靶体的拱效应作用.当弹体从外拱方向侵彻拱形靶体时,冲击荷载使得拱形靶体整体处于受压状态,越靠近内拱部位压力越大,因此随着弹体侵彻深度的增加,受到的阻力增大,侵彻过程中破碎区发展较慢;当弹体从内拱侵彻混凝土拱形靶体时,在冲击荷载作用下外拱部位易出现拉应力,因此随着弹体侵彻深度的增加,弹体遭受结构的阻力较外拱侵彻小,侵彻过程中破碎区发展较快.弹体从外拱侵彻时,贯穿点附近的混凝土受到弹体的挤压,因此背面产生的弹坑直径较小;内拱侵彻时,贯穿点附近的混凝土受到弹体的冲击,因此在靶体背面产生的弹坑直径较大.如图 5 所示,弹体从外拱侵彻引起靶体背面弹坑直径为 562 mm,内拱侵彻引起弹坑直径为 815 mm,侵彻混凝土板引起弹坑直径为 770 mm.

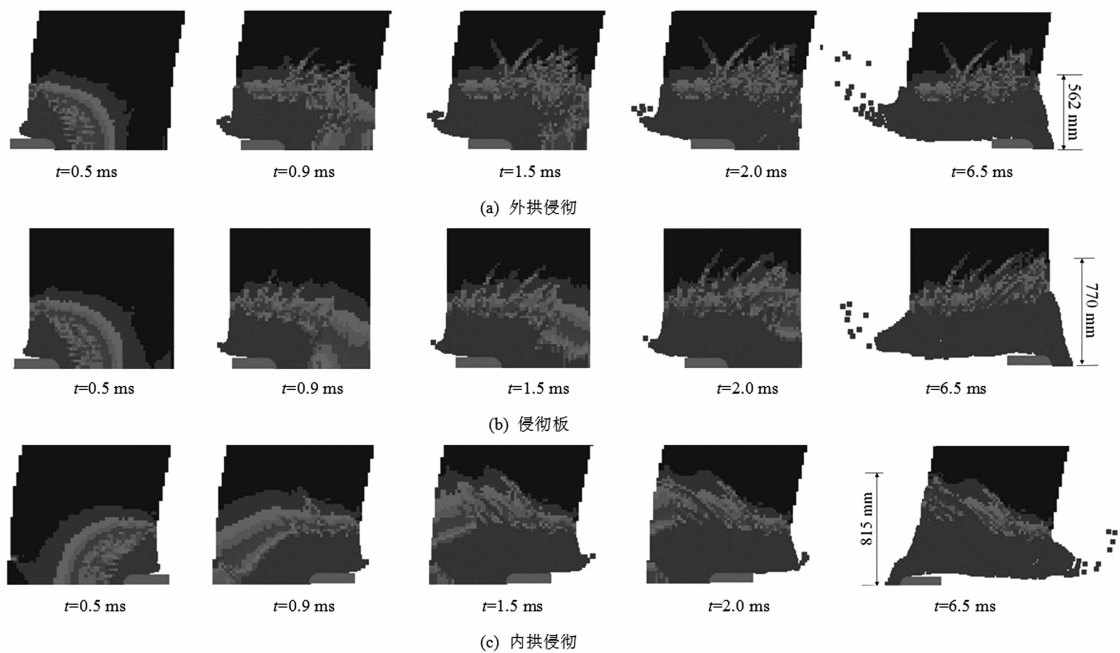


图5 混凝土靶体的侵彻贯穿破坏特性

Fig.5 Perforation damage characteristics of concrete target

在距离侵彻方向 0.5 m 处的靶体轴线上布置测点,如图 4 所示. 图 6 为测点振速随时间变化图. 由图 6 可知,外拱侵彻引起测点最大振速为 0.75 m/s; 侵彻板引起测点最大振速 1.45 m/s; 内拱侵彻引起测点最大振速 1.40 m/s. 弹体从内拱侵彻引起测点的最大振速明显大于从外拱侵彻引起测点的最大振速. 在 0~7 ms,各测点振速变化强烈. 随着时间的推移,在 10 ms 以后,弹体从外拱侧侵彻引起的靶体振动已趋于稳定,振速呈周期性衰减;弹体侵彻混凝土板的测点振速也呈周期性波动,但振幅要明显大于外拱侵彻引起的测点振速的振幅;弹体从内拱侧侵彻混凝土靶体引起的测点振动波动最大,在 50 ms 时尚未出现规律性的波动. 从测点的最大振速以及振速随时间的变化过程可以看出,弹体从内拱侧侵彻混凝土拱形靶体所引起的动力响应要明显大于弹体从外拱侧侵彻所引起的动力响应.

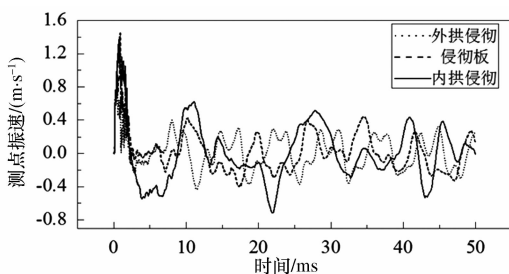


图6 测点振速随时间变化图

Fig.6 Vibration velocity-time history

弹体贯穿混凝土靶体的残余速度如图 7 所示. 弹体从外拱侧侵彻混凝土拱形靶体的残余速度为 80.3 m/s; 弹体穿过混凝土板的残余速度为 88.3 m/s; 从内拱侧侵彻穿透拱形靶体的残余速度为 116.5 m/s. 弹体从内拱侧侵彻混凝土靶体的残余速度明显大于弹体从外拱侧侵彻的残余速度,而弹体贯穿相应混凝土板的残余速度则介于弹体从外拱、内拱侵彻的残余速度之间. 主要原因是:当弹体从外拱侵彻时,由于拱结构的作用,破碎区贯通较晚,而且破碎区的混凝土受弹体的挤压仍能承受较大的压力,阻碍弹体的运动;弹体从内拱侵彻拱形靶体时,连通破碎区形成较早,一旦破碎区连通,弹体所受的阻力就会大大减小,因此弹体从内拱侵彻贯穿靶体的残余速度要大于弹体从外拱侧侵彻贯穿靶体的残余速度.

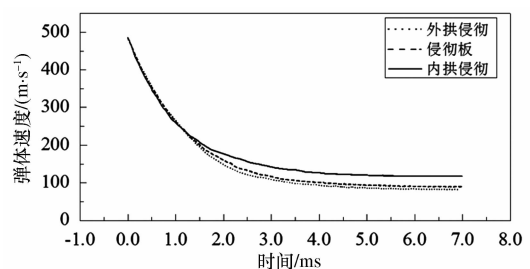


图7 弹体速度随时间变化图

Fig.7 Variation of projectile velocity

### 3.3 拱形靶体的高速非贯穿侵彻效应

为了研究弹体侵入拱形靶体的非贯穿侵彻破坏效应,本节给出弹体以 300 m/s 的速度侵彻拱形靶体和混凝土板的破坏结果,如图 8 所示.

图 8 为弹体侵入混凝土靶体引起的损伤分布图. 在弹体高速撞击过程中,靠近弹头的混凝土介质在冲击波的作用下,产生很大的径向应力和切向应力,弹头附近混凝土受到强烈的压缩,使得周围的混凝土产生了粉碎性破坏. 弹体从外拱侵彻引起的弹坑直径(如图 8(a)所示)要明显大于弹体从内拱侵彻引起的弹坑直径(如图 8(c)所示),主要是因为拱结构外拱是外凸构造,弹体从外拱侵彻时,侵

彻点周围混凝土所受的约束较内拱侵彻时小,易出现损伤区. 从混凝土靶体的损伤区可看出,弹体从内拱侵彻混凝土时损伤区的面积和破碎区的深度(如图 8(c)所示)明显大于外拱侵彻引起的损伤区面积和破碎区深度(如图 8(a)所示). 主要是因为拱效应作用,当弹体从外拱侧侵彻靶体时,使得拱形靶体处于受压状态,而混凝土的抗压强度很高,所以损伤区面积小;当弹体从内拱侵彻混凝土拱形靶体时,弹体前端混凝土容易出现较大的拉应力,而混凝土抗拉强度低,所以损伤区的面积较大. 弹体侵彻混凝土板的损伤面积则介于从外拱、内拱侵彻引起的损伤区面积之间.

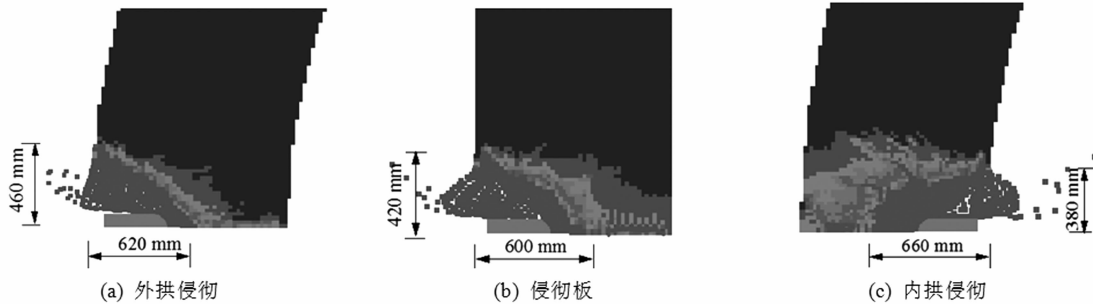


图 8 混凝土靶体的侵彻非贯穿破坏特性

Fig.8 Non-perforation damage characteristics of concrete target

图 9 给出了弹体以 300 m/s 速度冲击下,距侵彻方向垂直距离 0.5 m 处拱形靶体和混凝土板结构的测点振速随时间变化图. 外拱侵彻引起测点最大振速为 0.51 m/s;侵彻板引起测点最大振速 0.64 m/s;内拱侵彻引起测点最大振速 0.74 m/s;弹体从内拱侵彻引起测点的最大振速明显大于从外拱侵彻引起测点的最大振速. 从测点的最大振速以及振速随时间的变化过程也可看出,弹体侵入混凝土拱形靶体内部时,从内拱侵彻引起拱形靶体的动力响应要明显大于弹体从外拱侵彻所引起的动力响应.

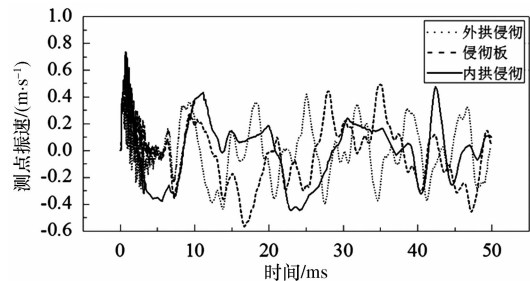


图 9 测点振速随时间变化图

Fig.9 Vibration velocity-time history

在与拱结构接触之前,弹体的动能是一定的. 弹体侵入拱结构之后,引起了拱结构的振动,同时使得弹体周围的混凝土材料产生破碎和损伤. 拱结构的动力响应越大,破碎区、损伤区面积越大,说明拱结构吸收弹体的能量越多,根据能量守恒,弹体的剩余动能就越小. 从测点的振速变化情况以及弹体侵彻引起混凝土靶体的损伤区域面积大小可看出:弹体从内拱侵彻混凝土靶体时,引起混凝土靶体的动力响应及损伤区面积最大,故弹体从内拱侵彻混凝土靶体的侵彻深度最小. 图 10 给出了弹体以 300 m/s 的速度从外拱、内拱方向垂直侵彻混凝土拱形靶体以及侵彻混凝土板的侵彻深度随时间

变化图,弹体外拱侵彻的深度为 440 mm,侵彻混凝土板的深度为 384 mm,内拱侵彻的深度 370 mm.

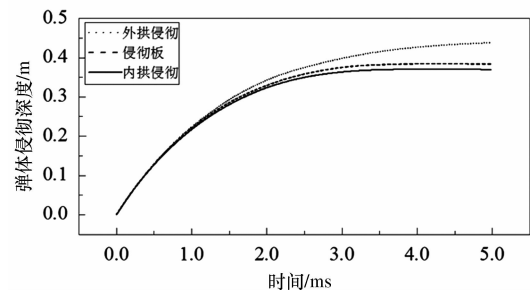


图 10 弹体侵彻深度随时间变化图

Fig.10 Variation of projectile depth

## 4 结 论

通过建立弹体高速冲击作用下的侵彻耦合模型,研究了混凝土拱形靶体在弹体外拱及内拱冲击作用下的侵彻贯穿破坏发展过程,并分析了弹体侵入混凝土拱形靶体的非贯穿侵彻破坏效应. 主要得出以下结论:

1)采用 SPH-Lagrange 耦合方法建立的侵彻耦合模型可以有效模拟混凝土结构的高速侵彻破坏过程.

2)高速弹体侵彻混凝土拱形靶体存在明显的拱效应,内拱侵彻引起靶体的动力响应大于外拱侵彻.

3)当弹体贯穿混凝土拱形靶体时,内拱侵彻引起的破碎区比外拱侵彻先贯通,弹体内拱侵彻的残余速度大于外拱侵彻;当弹体非贯穿混凝土拱形靶体时,内拱侵彻引起混凝土破碎区深度大于外拱侵彻.

弹体侵彻混凝土拱结构的侵彻效应受多种因素的影响,本文只是简单地探讨了弹体贯穿与非贯穿拱形靶体的毁伤发展过程,分析了弹体侵彻混凝土拱形靶体的破坏机理. 对于弹体形状、尺寸、速度、侵彻角以及拱结构的形状、尺寸等因素对弹体侵彻拱结构的毁伤效应影响,尚需进一步的研究.

## 参考文献

- [1] ZHANG M H, SHIM V P W, LU G, *et al.* Resistance of high-strength concrete to projectile impact[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2005, 31(7): 825-841.
- [2] 霍静思, 何明远, 肖莉平, 等. 高温后钢管混凝土抗多次冲击力学性能试验研究[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2012, 39(9): 6-10.
- [3] HUO J S, HE M Y, XIAO L P, *et al.* Experiment study on the dynamic behavior of concrete-filled steel tube after exposure to high temperatures under multiple impact loadings[J]. *Journal of Hunan University(Natural Sciences)*, 2012, 39(9): 6-10. (In Chinese)
- [4] FREW D J, FORRESTAL M J, CARGILE J D. The effect of concrete target diameter on projectile deceleration and penetration depth[J]. *Proceedings of Speech Prosody*, 2006, 32(10): 1584-1594.
- [5] GOMEZ J T, SHUKLA A. Multiple impact penetration of semi-infinite concrete[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2001, 25(10): 965-979.
- [6] 刘志林, 孙巍巍, 王晓鸣. 基于颗粒流离散元模型的弹丸侵彻细观混凝土数值模拟方法研究[J]. *振动与冲击*, 2016, 35(4): 162-175.
- [7] LIU Z L, SUN W W, WANG X M. Numerical simulation for projectile penetrating meso-scale concrete based on particle flow discrete element model[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2016, 35(4): 162-175. (In Chinese)
- [8] 张群利, 王全才, 吴清, 等. 不同结构类型棚洞的抗冲击性能研究[J]. *振动与冲击*, 2015, 34(3): 72-76.
- [9] ZHANG Q L, WANG Q C, WU Q, *et al.* Anti-impact performances of different kinds of shed-tunnel structures[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2015, 34(3): 72-76. (In Chinese)
- [10] 张社荣, 王高辉. 混凝土重力坝抗爆性能及抗爆措施研究[J]. *水利学报*, 2012, 43(10): 1202-1213.
- [11] ZHANG S R, WANG G H. Study on the antiknock performance and measures of concrete gravity dam[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2012, 43(10): 1202-1213. (In Chinese)
- [12] 宋顺成, 才鸿年. 弹丸侵彻混凝土的 SPH 算法[J]. *爆炸与冲击*, 2003, 23(1): 56-59.
- [13] SONG S C, CAI H N. SPH algorithm for projectile penetrating into concrete[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2003, 23(1): 56-59. (In Chinese)
- [14] 曾梦澜, 彭珊, 黄海龙, 等. 纤维沥青混凝土动力性能试验研究[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2011, 38(12): 1-6.
- [15] ZENG M L, PENG S, HUANG H L, *et al.* Experimental study of the dynamic properties of fiber reinforced asphalt concrete[J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2011, 38(12): 1-6. (In Chinese)
- [16] PRAKASH A, SRINIVASAN S M, RAO A R M. Numerical investigation on steel fibre reinforced cementitious composite panels subjected to high velocity impact loading[J]. *Materials & Design*, 2015, 83: 164-175.
- [17] RIEDEL W, THOMA K, HIERMAIER S, *et al.* Penetration of reinforced concrete by BETA2B2500 numerical analysis using a new macroscopic concrete model for hydrocodes[C]// *Proceedings of 9th International Symposium, Interaction of the Effects of Munitions with Structures*. Berlin-Strausberg: IBMAC, 1999: 315-322.
- [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]// *Proceedings of the 14th International Symposium on Ballistics*. Arlington: American Defense Preparedness Association, 1993: 591-600.
- [19] JOHNSON G R. Computed radial stresses in a concrete target penetrated by a steel projectile[C]// *Proceedings of the 5th International Conference on Structures under Shock and Impact*. Southampton: Computational Mechanics Publications, 1998: 793-806.
- [20] NYSTROM U, GYLLTOFT K. Comparative numerical studies of projectile impacts on plain and steel-fibre reinforced concrete[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2011, 38(2/3): 95-105.
- [21] MCCORMICK C S, MILLER T F. Application of smoothed particle hydrodynamics to fluid flow involving solid boundaries; No. TR96-006 [R]. Pennsylvania: Applied Research Laboratory, The Pennsylvania State University, 1996: 96-006.
- [22] CHEN X W, LI Q M. Transition from non-defomable projectile penetration to semi hydrodynamic penetration[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2004, 130(1): 123-127.
- [23] HANSSON H. Numerical simulation of concrete penetration; Technical Report FOA 98-00816-311-SE [R]. Tumba, Sweden: Defense Research Establishment, 1998: 17.
- [24] TU Z G, LU Y. Modifications of RHT material model for improved numerical simulation of dynamic response of concrete[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2010, 37(10): 1072-1082.
- [25] 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.