DOI: 10.11883/bzycj-2017-0368

混凝土靶侵彻过程中空腔膨胀响应分区*

牛振坤[1],陈小伟[2,3],邓勇军[1,2],姚 勇[1,2]
(1.西南科技大学土木工程与建筑学院,四川 绵阳 621010;
2.工程材料与结构冲击振动四川省重点实验室,四川 绵阳 621010;
3.北京理工大学前沿交叉科学研究院,北京 100081)

摘要:利用 LS-DYNA 有限元软件对刚性弹正侵彻混凝土靶进行数值模拟,以混凝土极限压应变和极限拉应变两阈值为依据,对侵彻过程中混凝土靶空腔膨胀响应区域进行了识别划分,得到了侵彻过程中混凝土各响应区的区域大小。另外,还讨论了弹体侵彻速度对混凝土粉碎区和破裂区的影响,以及粉碎区和破裂区边界膨胀速度分别与侵彻速度的关系。计算结果表明,随着弹体侵彻速度的增大,混凝土粉碎区和破裂区界面速度都增大,粉碎区半径增大,而破裂区半径却减小;当侵彻速度达到某一特定值时,破裂区将会消失。

关键词:混凝土;侵彻;空腔;膨胀响应区;界面膨胀速度
中图分类号:O347 **国标学科代码**:13015 **文献标志码**:A

目前,在混凝土侵彻方面已做了大量的研究并取得了丰硕的成果[1-6],主要研究手段有实验研究、理论分析和数值模拟 3 方面。其中,相对成熟的侵彻理论模型为基于球形和柱形动态空腔膨胀的刚性弹动力学模型。根据球形空腔膨胀理论可知,混凝土在侵彻过程中将会产生不同的响应区,如图 1 所示,这些响应区的大小对于侵彻问题的研究有重要意义:一方面,各区域大小直接影响侵彻阻力的积分效应,从而影响侵彻过程中弹体的侵彻阻力;另一方面,各区域大小能够反映弹体侵彻过程中混凝土靶的破坏程度,从而判断混凝土的损伤状态。因此,有必要研究混凝土在侵彻过程中的空腔膨胀响应区域。

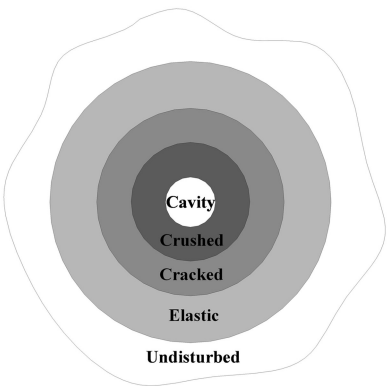


图 1 混凝土动态球形空腔膨胀响应区域
Fig. 1 Dynamic spherical cavity expansion response regions of concrete

Forrestal 等[6]给出的动态空腔膨胀理论模型中侵彻过程为一个动态平衡过程,无法直接得到各区域半径值。Rosenberg 等[7-8]、王一楠等[9]、李志康等[10]针对金属材料和混凝土脆性材料,根据空腔径向压力与速度之间的关系,采用数值模拟的方法,通过在材料表面施加恒定的压力计算得到稳态的结果,然后将应力作为不同区域的判据得到各区域的大小。

以上方法是在膨胀速度恒定的条件下得出各区域的大小,而实际侵彻过程中弹体侵彻速度(与膨胀速度相关)是不断变化的,上述方法并不能得到某一位置在侵彻过程中的最终区域大小。因此,本文中将采用 LS-DYNA 有限元软件对刚性弹正侵彻混凝土靶板进行数值模拟,探究侵彻条件下混凝土材料各响应区域的大小,并讨论侵彻速度对混凝土各响应区域的影响。

* **收稿日期**:2017-10-14;**修回日期**:2017-12-18
基金项目:国家自然科学基金项目(11225213,11390361,11390362);
西南科技大学研究生创新基金项目(16ycx089)
第一作者:牛振坤(1991—),男,硕士研究生,858767489@qq.com;
通信作者:陈小伟(1967—),男,博士,研究员,博士生导师,chenxiaoweintu@bit.edu.cn。

1　有限元模型验证

1.1　有限元模型

Hanchak 等[11]对弹体侵彻钢筋混凝土进行了实验研究。混凝土靶板尺寸为 610 mm×610 mm×178 mm。弹体直径 D=25.4 mm,弹头形状因子 ψ_{CRH}=3。钢筋混凝土的配筋率仅为 0.1%,对弹体侵彻影响很小,因此本文有限元模型中未考虑钢筋。为了减少计算时间,采用 1/2 模型,并在对称边界和靶体周围施加相应的边界约束。弹体和混凝土模型采用 8 节点实体单元(SOLID164),并对弹着点附近网格加密。在弹体和混凝土之间,定义侵蚀接触(ERODING)来考虑单元失效,当混凝土材料单元的变形满足失效准则时,单元删除,质量重新分布。本文中将通过控制最大主应变来判断混凝土单元失效(主应变取值 0.1),有限元模型如图 2 所示。

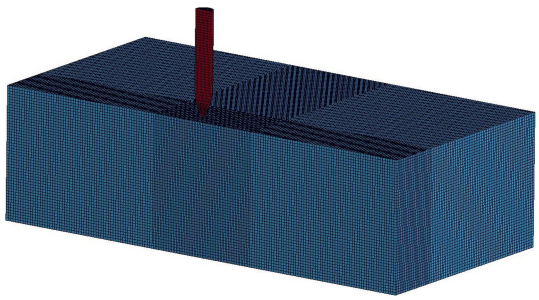


图 2　子弹和混凝土靶板的有限元模型

Fig. 2　The finite element model for projectile and concrete target

1.2　材料模型

混凝土靶板选用 K&C 材料模型(＊MAT_CONCRETE_DAMAGE_REL3)。K&C 模型是 Malvar 等[12]提出的混凝土塑性损伤模型,该模型引入了 3 个失效面,即初始屈服面、极限强度面和残余强度面,并将体积变形和形状变形分开考虑,可以考虑强化效应、拉伸和压缩损伤效应、体积变形损伤效应、应变率效应,能比较真实地反映混凝土材料的力学特性。根据 Hanchak 等[11]的实验情况,可知混凝土密度 ρ_{c}=2 440 kg/m^3,抗压强度 Y=48 MPa 和抗拉强度 σ_{t}=4 MPa。根据文献[13-14]对混凝土 K&C 模型具体参数的定义和描述,对实验中混凝土的参数进行了准确性标定,详细参数见表 1。弹体材料为高强度钢,在侵彻过程中弹体几乎不存在质量侵蚀和变形,因此,采用 MAT_RIGID 模型,具体参数见表 2[15]。

表 1　K&C 模型中混凝土的材料参数

Table 1　Material parameters of concrete in the K&C model

密度/(kg·m^{-3})	泊松比	σ_{t}/MPa	A_0/MPa	RSIZE	UCF
2 440	0.2	4	−48	3.94×10^2	145

表 2　弹体的材料参数[15]

Table 2　Material parameters of projectile[15]

密度/(kg·m^{-3})	弹性模量/GPa	泊松比	屈服强度/MPa	失效应变
7 910	210	0.3		

1.3　计算结果

图 3 给出弹体以速度 v_0=749 m/s 正侵彻混凝土靶板的破坏图,计算结果显示弹体穿甲过程中依次产生开坑区、隧道区和后坑区,模拟结果与实验结果一致。图 4 为混土靶板前后表面破坏形态的模拟结果和实验结果,从图 4 中可以看出模拟结果和实验结果基本相同。

表 3 给出了弹体以不同着靶速度侵彻混凝土靶时的剩余速度。着靶速度为 381 和 434 m/s 时,模拟结果和实验结果误差较大即为 15.4%和 9.3%;其他剩余速度的误差均在 2 %以内,其中着靶速度 v_0=301 m/s 时弹体未能穿透靶板。计算结果表明:当侵彻速度较高时(v_0>434 m/s),该有限元模型模拟结果和实验结果[11]吻合较好,该有限元模型可有效模拟混凝土靶侵彻。

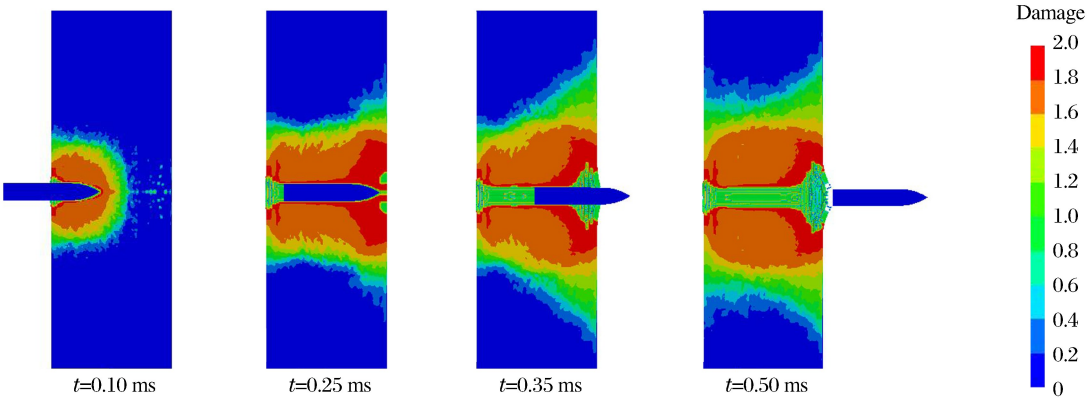


图 3　弹体以速度 $v_0=749$ m/s 正侵彻混凝土靶板的破坏状态

Fig. 3　Damage of a concrete target penetrated by the projectlie the the initial velocity 749 m/s at different moments

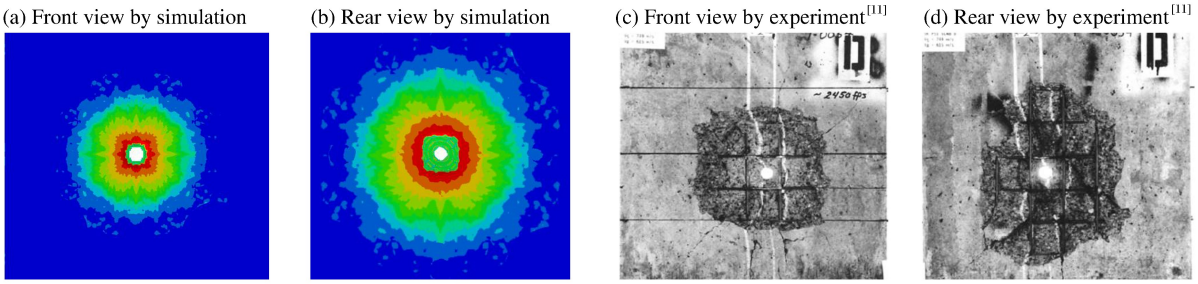


图 4　弹体侵彻混凝土靶板的数值模拟和实验[11]结果

Fig. 4　Numerical simulation and experimental[11] results of a projectile penetration into a concrete target

表 3　弹体剩余速度

Table 3　Residual velocities of projectiles

初始速度/(m·s^{-1})	剩余速度/(m·s^{-1})		初始速度/(m·s^{-1})	剩余速度/(m·s^{-1})	
	实验[11]	模拟		实验[11]	模拟
301	0	0	606	449	454
381	136	157	749	615	616
434	214	234	1 058	947	936

2　混凝土响应区划分方法

Forrestal 等[6]给出了混凝土在低速侵彻条件下将产生的 5 个响应区。(1)空腔区：大小一般为弹体直径；(2)粉碎区：混凝土各个方向(径向、环向)均发生破坏，环向拉伸断裂，径向压缩坍塌，形成完全破坏；(3)破裂区：混凝土环向应力达到其抗拉强度值，发生环向拉伸破坏，而径向一般情况未达到使混凝土发生破坏的应力值，不形成径向坍塌，最终仅表现为环向单向拉伸裂纹；(4)弹性区：混凝土处于弹性阶段；(5)未扰动区：弹性波未达到区域，即不受力区域。

根据这一特点，本文中采用径向压应变和环向拉应变作为响应区划分的依据，认为混凝土达到极限压应变或者极限拉应变时，将发生破坏，从而对混凝土各响应区域进行划分。例如：粉碎区混凝土径向和环向应变均达到极限拉/压应变，破裂区混凝土环向达到极限拉应变，但是径向未达到极限压应变。

对于混凝土在冲击荷载作用下的极限压应变和极限拉应变还没有统一的标准。匡志平等[13]针对混凝土 K&C 模型各参数进行了讨论，给出抗压强度为 39.5 MPa 的混凝土极限压应变和极限拉应变的取值分别为 $\varepsilon_r^c=3.95\times10^{-3}$ 和 $\varepsilon_\theta^c=1.00\times10^{-3}$。本文中通过大量的数值计算并结合已有的实验结果[16-17]，得到在本文的弹体侵彻问题中，当 $\varepsilon_r^c=3.30\times10^{-3}$ 和 $\varepsilon_\theta^c=2.00\times10^{-3}$ 时数值模拟结果与实验结果吻合较好。因此，本文中将以这 2 个值作为判断混凝土破坏的依据，以此来划分各响应区的大小。

3　混凝土动态空腔膨胀分区

3.1　响应区形成过程

本节分析中，弹靶尺寸参考 Forrestal 等的实验[6]。弹体总长度 L =237.6 mm，其中弹体直径 D=76.2 mm，弹头长度 H=85.2 mm，弹头弧形半径 S=114.3 mm，弹头形状因子 ψ_{CHR}=1.5。混凝土全靶尺寸选取 2 000 mm×2 000 mm×1 500 mm。由于模型尺寸比较大，计算机规模有限，因此采取 1/4 模型进行计算。弹体和混凝土靶单元类型和材料参数均与模型验证参数一致。

在弹体以速度 v_z 向下运动的过程中，周边的混凝土受到膨胀作用将会依次向外形成粉碎区、破裂区和弹性区。对于弹体侵彻混凝土靶时，想要得到混凝土靶在侵彻过程中各响应区域的具体大小，必需要确定某一截面位置或某一时刻。如图 5 所示，计算中选取位置 1、2 和 3 进行分析，其中位置 2 距离靶面 300 mm，3 个位置的高度差为弹头长度 H，c、c_1、c_2 分别为粉碎区、破裂区和弹性区边界的膨胀速度。

弹体以 800 m/s 的速度侵彻混凝土靶板，当弹尖运动到位置 2 时，侵彻深度为 300 mm，整个弹体进入隧道区，为了更清楚地看到损伤形貌，取混凝土靶局部损伤图进行分析，如图 6 所示。

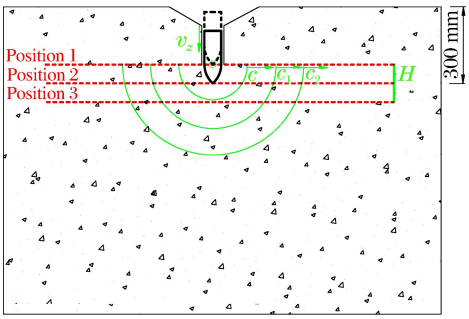


图 5　混凝土响应分区形成过程

Fig. 5　Formation process of concrete target response regions

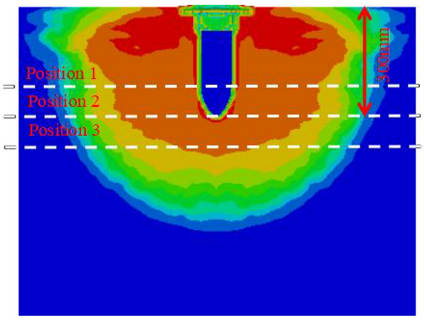


图 6　弹尖运动到位置 2 时混凝土的应变云图

Fig. 6　Strain diagram of the concrete when the projectile tip moves to position 2

以弹尖接触的位置为原点，取各横截面位置在纵剖面上混凝土单元径向坐标、径向应变和环向应变，计算得到混凝土的径向应变和环向应变随位置的变化曲线，并且以 $\varepsilon_r^{\mathrm{c}}$ 和 $\varepsilon_\theta^{\mathrm{c}}$ 作为阈值对混凝土响应区进行划分，如图 7 所示。由图 7(a)可知，横截面位置 1 处径向压应变和环向拉应变均随半径的增大而减小，且 R=420 mm 时，径向压应变和环向拉应变均为零，说明 420 mm 以外没有受到应力波的影响；另外，粉碎区和破裂区半径分别为 155 mm 和 169 mm，约是弹体直径 76.2 mm 的 2 倍，该结论与何丽灵等[18]的研究结果基本一致。

类似地，横截面位置 2 处径向压应变和环向拉应变均随半径的增大而减小，对应的粉碎区和破裂区半径分别为 114 mm 和 161 mm；而横截面位置 3 处环向拉应变仍然是随半径的增大而减小，但其径向应变随着半径的增大由负值变化到正值，可见该位置在半径 0 ～119 mm 内，混凝土径向和环向均处于受拉状态。原因在于当弹尖侵彻到横截面位置 2 时，横截面位置 3 在其前方，沿弹体侵彻方向混凝土为压实状态，由于泊松效应导致其前方截面横向膨胀，导致混凝土横截面位置 3 径向和环向在一定区域内均处于受拉状态。从分区上看，随着深度的增加，各个响应区域都有所减小，且粉碎区减小幅度最大，位置 2 和 3 处截面没有产生空腔区，位置 3 处没有产生粉碎区；相比较位置 1 和位置 2，粉碎区半径相差 41 mm，而破裂区半径仅相差 8 mm。

由于弹体侵彻过程中，混凝土受影响的区域半径为 500 mm 左右，因此，为了更清楚地描述计算结果，本文中选取 R =500 mm 的混凝土区域进行分析。根据图 7 给出的数据，可用等效应变云图对其结果进行表征。具体结果如图 8 所示：黑色虚线区域为粉碎区边界，半径分别为 155、114 和 0 mm；白色虚线区域边界为破裂区边界，半径分别为 169、161 和 32 mm；白色虚线和红色虚线之间为弹性区域，半径分别为 420、400 和 380 mm；蓝色区为未扰动区。

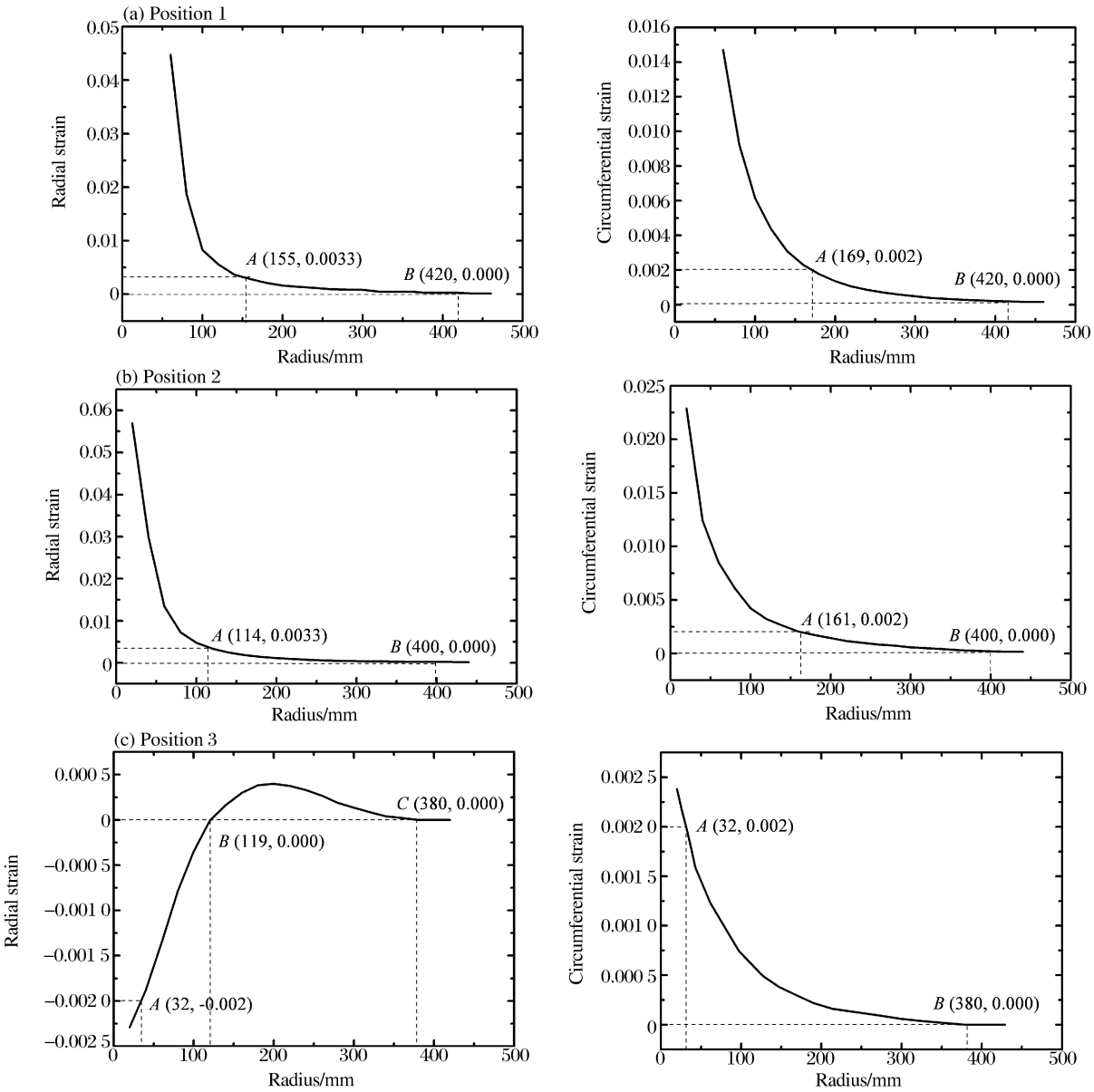


图 7　位置 1、2 和 3 处截面径向应变和环向应变随半径的变化曲线

Fig. 7　Variation curves of radial strain and circumferential strain with radius at positions 1, 2 and 3

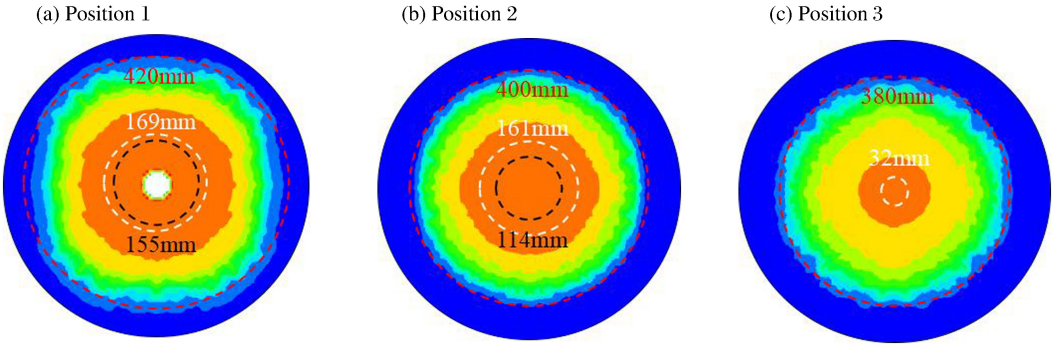


图 8　各位置横剖切面计算结果以及分区大小

Fig. 8　The results of each position cross section and the size of response regions

3.2　侵彻过程中空腔膨胀区域的变化过程

弹体以 800 m/s 的速度侵彻混凝土靶，t=0.4，1.0，2.0 ms 时弹体侵彻混凝土靶纵剖面等效应变如图 9 所示。根据第 2 节对混凝土靶响应区的划分方法，给出不同时刻混凝土靶粉碎区和破裂区的大小。由图 9 可知，弹体侵彻的整个过程中，混凝土靶的粉碎区域随着侵彻深度的增加而减小，整体形貌呈类似于 V 字；相反，混凝土靶破裂区域的大小随着侵彻深度的增加反而有所增大，整体形貌类似于上小下大的花瓶。当侵彻深度较小时（侵彻速度较大），粉碎区边界和破裂区边界出现了重合，即破裂区消失；随着侵彻深度的增加（侵彻速度减小），破裂区边界远大于粉碎区边界，且两者差值呈增大趋势。

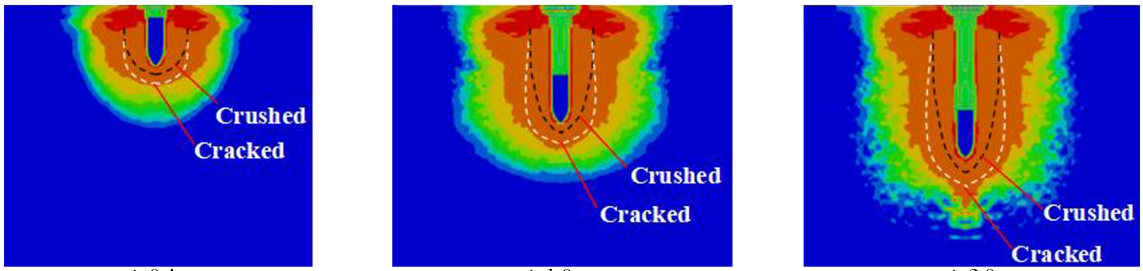


图 9　混凝土靶纵剖切面图以及分区情况

Fig. 9　Longitudinal section and response regions of concrete targets

4　参数讨论

4.1　侵彻速度对空腔膨胀响应区域的影响

根据文献[6]可知，弹体的侵彻速度直接影响各响应区域的大小。为了讨论侵彻速度对空腔膨胀响应区域的影响，以图 5 位置 1 处为研究截面，当弹尖接触该位置时，选取此时弹体速度为该位置的侵彻速度，本节选取侵彻速度为 400、516、596、656、716 和 824 m/s。当整个弹头穿过该位置时，采用第 2 节对混凝土响应区域划分方法，讨论不同侵彻速度下该截面混凝土各响应区域的大小。对各侵彻速度下混凝土横剖面位置 1 区域大小进行划分，如图 10 所示：白色虚线代表混凝土破裂区域大小，黑色虚线代表粉碎区域大小；中间白色圆孔代表空腔区，半径约为 38.1 mm（弹体半径）；深蓝色代表扰动区。

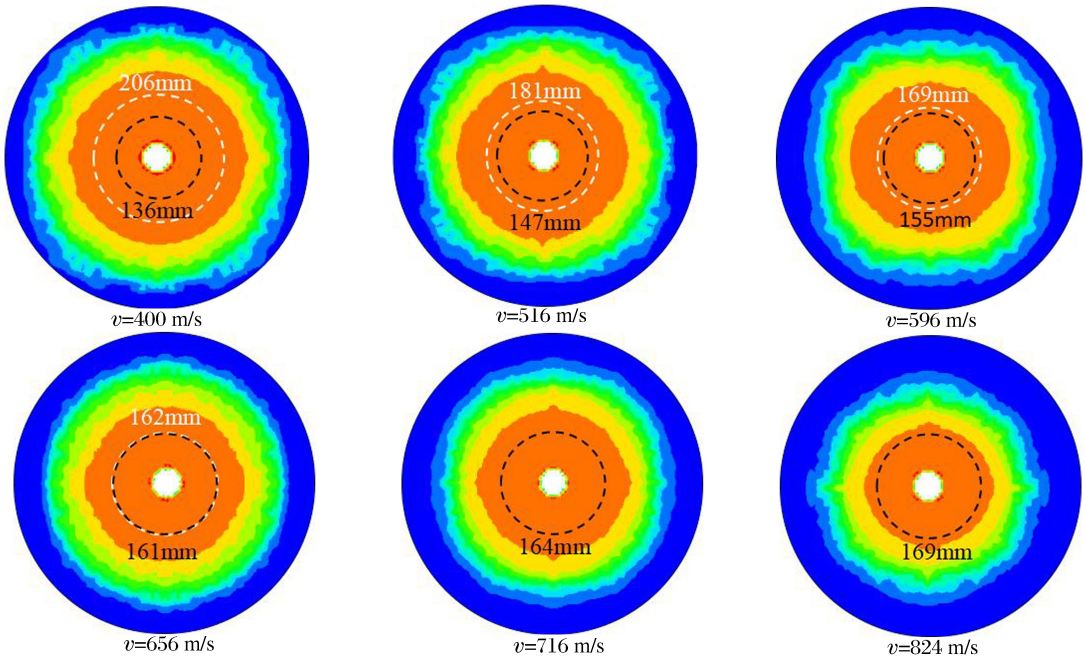


图 10　不同侵彻速度下的混凝土横剖切面位置 1 等效应变云图

Fig. 10　The equivalent strain diagrams of concrete under different penetration velocities at position 1

将 6 种侵彻速度下混凝土粉碎区和破裂区大小数据用图 11 来表示，图中对混凝土分区和侵彻速度进行无量纲化，分别为 R/D 和 $v/(Y\cdot\rho_c^{-1})^{1/2}$。根据图 10、11 可以得到以下变化趋势。(1)空腔区：弹体直径相当，且不受速度的影响。(2)破裂区：计算所得的破裂区半径随侵彻速度的增高呈减小的趋势；(3)粉碎区：粉碎区半径随侵彻速度的增高而增大。特别地，当弹尖侵彻速度约为 660 m/s 时，破裂区半径开始小于粉碎区半径，表明该侵彻速度及以上，该横截面位置将不会出现破裂区。根据混凝土粉碎区和破裂区的变化趋势，可以得到混凝土在侵彻过程中破坏(损伤)的范围，当侵彻速度较低时，损伤边界由破裂区边界控制；当侵彻速度超过某一特定值时，破裂区完全消失，此时混凝土的损伤边界由粉碎区边界控制。

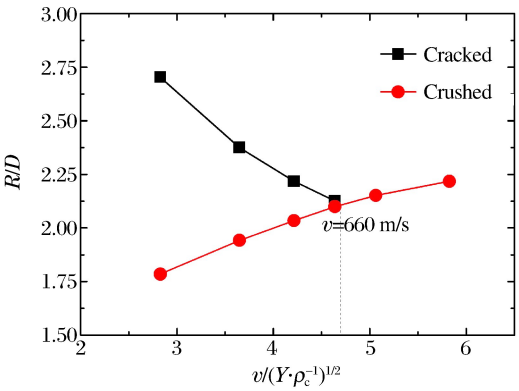


图 11　混凝土粉碎区和破裂区半径与侵彻速度的关系

Fig. 11　Sizes of crushed /cracked regions varying with penetration velocity

4.2　粉碎区和破裂区界面速度与侵彻速度的关系

弹体侵彻混凝土靶的过程中，粉碎区和破裂区都在不断地膨胀变化，而它们边界的膨胀速度和弹体侵彻速度有直接的关系。首先定义界面速度的计算方法：弹体以初速度 v 向下侵彻，以某一时刻为基准，计算出弹体向下移动 Δt 时间内各边界移动的距离为 Δr，进而可以得到各边界的膨胀速度 $c=\Delta r/\Delta t$。本节给出粉碎区和破裂区边界速度与弹体侵彻速度的无量纲关系曲线，如图 12 所示。由图 12 可以看出，粉碎区和破裂区边界速度随侵彻速度的增高而增高，当侵彻速度较低时($v<$ 490 m/s)，同一侵彻速度下的破裂区膨胀速度大于粉碎区膨胀速度，但是粉碎区边界膨胀速度的增高幅值比破裂区边界膨胀速度的增高幅值要大；当侵彻速度 $v=$ 490 m/s左右时，两者的膨胀速度相等，此时对应的边界膨胀速度为1 040 m/s；当侵彻速度 $v>$490 m/s 时，粉碎区膨胀速度超过了破裂区膨胀速度，使得粉碎区边界逐渐向破裂区边界逼近，直到破裂区完全消失。

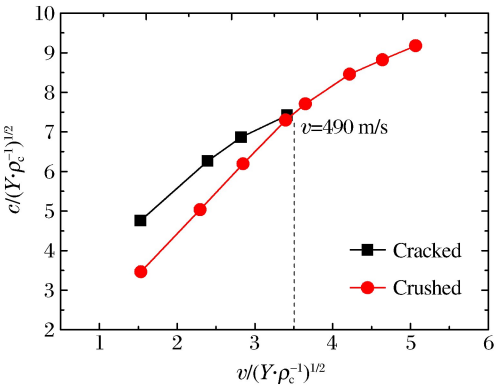


图 12　粉碎区和破裂区边界膨胀速度与侵彻速度的关系

Fig. 12　Boundary expansion velocity of crushed/cracked regions varying with penetration velocity

5　结　论

基于混凝土材料 K&C 模型，采用 LS-DYNA 有限元软件对抗压强度为 48 MPa 的混凝土靶进行了侵彻计算，获得了刚性弹体正侵彻混凝土靶板的过程。基于空腔膨胀理论，对混凝土空腔动态膨胀响应区域进行了划分，并讨论弹体侵彻速度对混凝土粉碎区和破裂区的影响，本次计算中得到以下结论：

(1)采用混凝土极限拉应变和极限压应变两阈值对混凝土空腔膨胀响应区进行划分，分区结果与实际实验结果吻合较好。

(2)随着弹体侵彻速度的增高，混凝土粉碎区半径增大，而破裂区半径却减小。当弹体侵彻速度达到某一特定值时，混凝土破裂区半径开始小于粉碎区半径。这说明侵彻速度较高时，混凝土破裂区将会消失，损伤边界将由粉碎区边界控制。

(3)随着弹体侵彻速度的增高，混凝土粉碎区和破裂区边界速度也随之增高。弹体侵彻速度较低时，混凝土破裂区边界速度大于粉碎区边界速度，当弹体侵彻速度达到某一特定值后，混凝土粉碎区边界的膨胀速度大于其破裂区边界的膨胀速度。

参考文献：

[1] FREW D J, FORRESTAL M J, CARGILE J D. The effect of concrete target diameter on projectile deceleration and penetration depth[J]. International Journal of Impact Engineering, 2006,32(10):1584-1594. DOI:10.1016/j.ijimpeng.2005.01.012.

[2] 武海军,黄风雷,金乾坤,等.弹体贯穿钢筋混凝土数值模拟[J].爆炸与冲击,2003,23(6):545-550.
WU Haijun, HUANG Fenglei, JIN Qiankun, et al. Numerical simulation on perforation of reinforced concrete targets[J]. Explosion and Shock Waves, 2003,23(6):545-550.

[3] 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, 1994,15(4):395-405. DOI:10.1016/0734-743X(94)80024-4.

[4] CHEN Xiaowei, FAN S C, LI Qingmin. Oblique and normal perforation of concrete targets by a rigid projectile [J]. International Journal of Solids and Structures, 2004,30(6):617-637. DOI:10.1016/j.ijimpeng.2003.08.003.

[5] FORRESTAL M J, LUK V K. Penetration into soil targets[J]. International Journal of Impact Engineering, 1992,12(3):427-444. DOI:10.1016/0734-743X(92)90167-R.

[6] FORRESTAL M J, TZOU D Y. A spherical cavity-expansion penetration model for concrete targets[J]. International Journal of Solids and Structures, 1997,34(31):4127-4146. DOI:10.1016/S0020-7683(97)00017-6.

[7] ROSENBERG Z, DEKEL E. A numerical study of the cavity expansion process and its application to long-rod penetration mechanics[J]. International Journal of Impact Engineering, 2008,35(3):147-154. DOI:10.1016/j.ijimpeng.2007.01.005.

[8] ROSENBERG Z, DEKEL E. Analytical solution of the spherical cavity expansion process[J]. International Journal of Impact Engineering, 2009,36(3):193-198. DOI:10.1016/j.ijimpeng.2007.12.014.

[9] 王一楠,黄风雷.混凝土材料动态球形空腔膨胀的数值模拟[J].北京理工大学学报,2010,30(1):5-9. DOI:10.15918/j.tbit1001-0645.2010.01.010.
WANG Yinan, HUANG Fenglei. Numerical simulation of dynamic spherical cavity expansion for concrete materials[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2010,30(1):5-9. DOI:10.15918/j.tbit1001-0645.2010.01.010.

[10] 李志康,黄风雷.混凝土材料的动态空腔膨胀理论[J].爆炸与冲击,2009,29(01):95-101. DOI:10.11883/1001-1455(2009)01-0095-06.
LI Zhikang, HUANG Fenglei. A dynamic spherical cavity-expansion theory for concrete materials[J]. Explosion and Shock Waves, 2009,29(1): 95-101. DOI:10.11883/1001-1455(2009)01-0095-06.

[11] HANCHAK S J, FORRESTAL M J, YOUNG E R, et al. Perforation of concrete slabs with 48MPa (ksi) and 140MPa (20ksi) unconfined compressive strengths[J]. International Journal of Impact Engineering, 1992,12(1):1-7. DOI:10.1016/0734-743X(92)90282-X.

[12] MALVAR L J, CRAWFORD J E, WESEVICH J W, et al. A plasticity concrete material model for DYNA3D [J]. International Journal of Impact Engineering, 1997,19(9/10):847-873. DOI:10.1016/S0734-743X(97)00023-7.

[13] 匡志平,陈少群.混凝土 K&C 模型材料参数分析与模拟[J].力学季刊,2015,36(3):517-526. DOI:10.15959/i.cnki.0254-0053.2015.03.019.
KUANG Zhiping, CHEN Shaoqun. Analysis and simulation for the material parameters of K&C concrete model [J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 2015,36(3):517-526. DOI:10.15959/i.cnki.0254-0053.2015.03.019.

[14] Livermore Software Technology Corporation. LS-DYNA keyword user's manual(971)[M]. Livermore: Livermore Software Technology Corporation, 2007.

[15] 邓勇军,陈小伟,姚勇,等.基于细观混凝土模型的刚性弹体正侵彻弹道偏转分析[J].爆炸与冲击,2017,37(3):377-386. DOI:10.11883/1001-1455(2017)03-0377-10.
DENG Yongjun, CHEN Xiaowei, YAO Yong, et al. On ballistic trajectory of rigid projectile normal penetration based on a meso-scopic concrete model[J]. Explosion and Shock Waves, 2017,37(3):377-386. DOI:10.11883/

1001- 1455(2017)03-0377-10.
[16] 朱伯龙，董振祥. 钢筋混凝土非线性分析[M]. 上海：同济大学出版社，1985：1-26.
[17] 吕西林，金国方，吴晓涵. 钢筋混凝土非线性有限元理论与应用[M]. 上海：同济大学出版社，1997：7-34.
[18] 何丽灵，陈小伟，徐伟芳，等. 加速度计预埋法测量弹体侵深的机理分析[J]. 防护工程，2014，36(2)：21-25.
HE Liling, CHEN Xiaowei, XU Weifang, et al. Analysis on mechanism of pre-buried accelerometer method for DOP measurement[J]. Protective Engineering, 2014, 36(2): 21-25.

Cavity expansion response of concrete targets under penetration

NIU Zhenkun[1], CHEN Xiaowei[2,3], DENG Yongjun[1,2], YAO Yong[1,2]
(1. *School of Civil Engineering and Architecture, Southwest University of Science and Technology, Mianyang* 621010, *Sichuan, China*;
2. *Shock and Vibration of Engineering Materials and Structures Key Laboratory of Sichuan Province, Mianyang* 621010, *Sichuan, China*;
3. *Advanced Research Institute for Multidisciplinary Science, Beijing Institute of Technology, Beijing* 100081, *China*)

Abstract: The LS-DYNA was used to simulate the process of a rigid projectile normally penetrating into a concrete target. Based on the two threshold values of ultimate compressive strain and ultimate tensile strain of the concrete, the cavity expansion response regions of the concrete target were identified and the size of each concrete response region in the penetration process was obtained. The effect of the penetration velocity on the crushed and cracked regions of the concrete was analyzed. The relationships between the boundary expansion velocity of the crushed /cracked regions and the penetration velocity were discussed. The results indicate that with increasing the initial impacting velocity, the interface velocities of the crushed/cracked regions and the radius of the crushed region increase, but the radius of the cracked region decreases. At last, the cracked region may disappear when the penetration velocity achieves a certain critical value.

Keywords: concrete; penetration; cavity; expansion response region; interface expansion velocity

（责任编辑　张凌云）