文章编号：1000-5773(2011)01-0015-08

混凝土 HJC、RHT 本构模型的失效强度参数*

张若棋，丁育青，汤文辉，冉宪文

（国防科技大学理学院，湖南长沙 410073）

摘要：通过对 LS-DYNA、AUTODYN 数值软件中混凝土 HJC、RHT 本构模型失效强度参数的分析计算，发现原始失效强度参数在较高静水压下将导致混凝土失效强度降低。提出了利用混凝土的特征强度确定 HJC、RHT 失效强度参数的方法，并通过计算得出了校验后的失效强度参数值。最后，使用校验前后的失效强度参数进行了混凝土侵彻实验的数值模拟。计算结果表明：使用校验后参数的数值模拟结果与实验结果更为吻合。由于 HJC 本构模型中没有引入偏应力张量第三不变量，所以结果不够满意。

关键词：混凝土；HJC、RHT 本构模型；失效强度参数

中图分类号：O347.3；TU502.6 **文献标识码**：A

1 引 言

混凝土是由不同粒径骨料嵌埋于水泥砂浆中构成的一种复合材料。由于骨料和水泥砂浆的物理、力学性能差异明显，加之骨料的形状不规则和分布的随机性，以及含有大量的初始裂纹和空穴等原因，导致了混凝土动态力学性能的控制因素相当复杂。因此，准确确定混凝土的动态本构模型及其材料参数十分困难[1]。目前，在混凝土冲击、爆炸响应的数值计算中普遍使用 HJC、RHT 和 K&C 等经验性本构模型[2]，其中的材料参数一般取自国外相关文献的原始值，由于它们未经充分验证，因此使用这些参数值能否得到准确的计算结果，是必须研究的一个问题。

HJC、RHT 和 K&C 本构模型描述了混凝土在冲击和爆炸作用下呈现出的压缩效应、多轴应力效应、应变率效应和拉压损伤等特性，其材料参数大致可分为两类：即物态方程参数和强度模型参数，后者包括强度参数、应变率参数和损伤参数等。由于在建立混凝土的动态本构模型时，一般将应变率与其它变量分离开，并引入一个强化因子来表征应变率的强化效应；另一方面，影响混凝土冲击特性的关键因素是混凝土的静态本构特性[3-4]，因此一般认为，混凝土的失效强度参数和损伤参数是分析混凝土动态强度性能最重要的参数。2009 年，Z. Tu 等[5]对 RHT 本构模型的损伤参数进行了数值计算分析，他们指出，利用 AUTODYN 给定的参数值进行数值模拟将造成应变软化缓慢的不合理结果，因而对损伤参数值进行了修改。本工作中主要分析 HJC 和 RHT 两个本构模型中的失效强度（也称为极限强度）参数，指出存在的问题，然后讨论依据混凝土的特征强度参数计算失效强度参数的方法，并给出校验后的参数值。

2 混凝土的失效面

在爆炸与冲击作用下，混凝土处于复杂的多轴应力状态。实验结果表明，混凝土的失效强度不仅随平均压应力的增加而增大，而且应力状态的影响明显。例如，不同的侧向压应力会导致不等的三轴抗压

* **收稿日期**：2010-01-06；**修回日期**：2010-07-29

基金项目：国家“973”重大基础研究项目(61392010201)

作者简介：张若棋(1935—)，男，教授，博士生导师，主要从事冲击波物理研究. E-mail：yuqingding@nudt.edu.cn

强度;在三轴拉、压时,抗压强度会随着拉应力与压应力比值的变化而变化[6]。因此,在三维主应力空间中混凝土的失效面既不是圆柱面也不是圆锥面。图 1 概略地显示了混凝土失效面的形状。

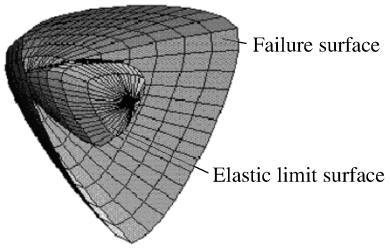


图 1 混凝土失效面示意图

Fig. 1 Failure surface of concrete

2.1 HJC 失效面[7]

HJC 本构模型综合考虑了混凝土在爆炸与冲击作用下压缩效应、应变率效应和损伤对失效强度的影响,但没有考虑偏应力张量第三不变量的影响。HJC 失效面方程为

$$\sigma_{\mathrm{eq}}^{*}(p,\dot{\varepsilon},D)=[A(1-D)+Bp^{*N}]\cdot[1+C\ln(\dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0)] \tag{1}$$

式中:$\sigma_{\mathrm{eq}}^{*}=\sigma_{\mathrm{eq}}/f_{\mathrm{c}}$,为归一化等效应力;$p^{*}=p/f_{\mathrm{c}}$,为归一化静水压力;$f_{\mathrm{c}}$ 为混凝土单轴抗压强度;$\dot{\varepsilon}$ 为等效应变率;$\dot{\varepsilon}_0=1.0\ \mathrm{s}^{-1}$,为参考应变率(下文中各变量的定义与此相同);$A$、$B$、$C$、$N$ 为由实验确定的材料常数,分别称为内聚力强度、压力强化系数、应变率强化系数、压力强化指数;D 为失效时的损伤变量,主要取决于混凝土在失效之前的变形过程中,塑性应变和塑性体应变的累积。值得指出的是,HJC 失效面方程(1)式在形式上与 HJC 本构方程相同,但 HJC 本构方程是描述混凝土从初始屈服-失效-软化的强度变化全过程,相应地损伤变量 D 从 0 变化到 1。所以,当用(1)式计算失效强度时需要确定失效时的损伤变量值,这是与 RHT 失效面方程、GZH(过镇海)失效面方程[6]的重要差别。后两者都只是描述失效强度的变化规律,所以在失效面方程中不必显含损伤变量 D。

2.2 RHT 失效面[8]

与 HJC 本构模型不同,RHT 本构模型引入了 3 个极限面,即弹性极限面、失效面和残余强度面,它们分别描述混凝土的初始屈服强度,失效强度及残余强度的变化规律。RHT 失效面方程为

$$\sigma_{\mathrm{eq}}^{*}(p,\theta,\dot{\varepsilon})=Y_{\mathrm{TXC}}^{*}(p)R_3(\theta)F_{\mathrm{rate}}(\dot{\varepsilon}) \tag{2}$$

式中:$Y_{\mathrm{TXC}}^{*}(p)$表示压缩子午线,$F_{\mathrm{rate}}(\dot{\varepsilon})$为应变率强化因子,它们分别为

$$Y_{\mathrm{TXC}}^{*}(p)=A[p^{*}-p_{\mathrm{spall}}^{*}F_{\mathrm{rate}}(\dot{\varepsilon})]^{N} \tag{3}$$

$$F_{\mathrm{rate}}(\dot{\varepsilon})=\begin{cases}(\dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0)^{\alpha} & p>f_{\mathrm{c}}/3,\quad \dot{\varepsilon}_0=30\times10^{-6}\ \mathrm{s}^{-1}\\ (\dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0)^{\delta} & p<f_{\mathrm{c}}/3,\quad \dot{\varepsilon}_0=3.0\times10^{-6}\ \mathrm{s}^{-1}\end{cases} \tag{4}$$

(2)式中:$R_3(\theta)$为角隅函数,是相似角 θ(也称为 Lode 角)以及偏平面上失效曲线(失效面被偏平面相截后形成的曲线)在拉、压子午线处的偏应力之比 Q_2 的函数,用于描述混凝土失效强度与偏应力张量第二不变量 J_2、第三不变量 J_3 及静水压力都有关的实验结果

$$R_3(\theta)=\frac{2(1-Q_2^2)\cos\theta+(2Q_2-1)[4(1-Q_2^2)\cos^2\theta+5Q_2^2-4Q_2]^{1/2}}{4(1-Q_2^2)\cos^2\theta+(1-2Q_2)^2} \tag{5}$$

其中

$$\theta=\frac{1}{3}\cos^{-1}\left(\frac{3\sqrt{3}J_3}{2J_2^{3/2}}\right)\qquad 0\leqslant\theta\leqslant\frac{\pi}{3} \tag{6}$$

$$Q_2=\frac{r_{\mathrm{t}}}{r_{\mathrm{c}}}=Q_0+B_{\mathrm{Q}}p^{*}\qquad 0.51\leqslant Q_2\leqslant1.0 \tag{7}$$

以上各式中:$p_{\mathrm{spall}}^{*}=p_{\mathrm{spall}}/f_{\mathrm{c}}$,是归一化层裂强度;$r_{\mathrm{t}}$ 是拉子午线处的偏应力,r_{c} 是压子午线处的偏应力(图 3)。A 为失效面常数、N 为失效面指数、α 为压缩应变率指数、δ 为拉伸应变率指数、Q_0 为拉压子午比,B_{Q} 为脆性韧性转变参数,它们都是由实验确定的材料常数。(7)式表明,Q_2 随着静水压力 p 的增大而增大,因此偏平面中的失效曲线将从三折对称的形状逐渐接近圆形。

2.3 GZH 失效面[9]

过镇海对国内外的混凝土静态多轴强度实验数据进行详细的对比分析后,提出了不考虑应变率效

应但能反映偏应力张量第三不变量影响的静态失效面方程

$$\frac{\tau_{\mathrm{oct}}}{f_{\mathrm{c}}}=6.9638\left[\frac{0.09-\sigma_{\mathrm{oct}}/f_{\mathrm{c}}}{C-\sigma_{\mathrm{oct}}/f_{\mathrm{c}}}\right]^{0.9297} \tag{8}$$

其中

$$C=12.2445\left(\cos\frac{3}{2}\theta\right)^{1.5}+7.3319\left(\sin\frac{3}{2}\theta\right)^{2} \tag{9}$$

式中:τ_{oct}为八面体剪应力,σ_{oct}为八面体正应力(拉应力为正)。式中 5 个参数值是用混凝土的 5 个特征强度实验值确定的,它们分别是单轴抗压强度$-f_{\mathrm{c}}$、$\theta=60°$,单轴抗拉强度 $f_{\mathrm{t}}=0.1f_{\mathrm{c}}$、$\theta=0°$;二轴等压强度 $f_{\mathrm{cc}}=-1.28f_{\mathrm{c}}$、$\theta=0°$;三轴压缩强度实验值 $\sigma_{\mathrm{oct}}=-4.0f_{\mathrm{c}}$,$\tau_{\mathrm{oct}}=2.7f_{\mathrm{c}}$、$\theta=60°$和三轴等拉强度 $f_{\mathrm{ttt}}=0.09f_{\mathrm{c}}$。由于(8)式和(9)式适用于混凝土结构设计的各种多轴应力范围,总体计算准确度较高,已列入我国混凝土结构设计规范 GB　50010−2002 的附录 C.4 中,供工程设计时参考。所以,将 HJC 失效面、RHT 失效面与 GZH 失效面进行分析比较,以指出 HJC、RHT 本构模型失效强度参数存在的问题,在第 3 节中讨论依据混凝土的特征强度参数计算失效强度参数的方法。

2.4　RHT、HJC、GZH 静态失效面的差异

在静载下,HJC、RHT 失效面的方程(1)和方程(2)分别为

$$\sigma_{\mathrm{eq}}^{*}(p,D)=A(1-D)+B(p^{*})^{N} \tag{10}$$

$$\sigma_{\mathrm{eq}}^{*}(p,\theta)=A(p^{*}-p_{\mathrm{spall}}^{*})^{N}R_{3}(\theta) \tag{11}$$

为了比较 3 个静态失效面方程(8)式、(10)式、(11)式之间的差异,可以通过计算考察它们的子午线和偏平面中的失效曲线。考察时所用的材料参数均取自商业软件中 HJC 本构模型或 RHT 本构模型的原始参数值(表 1)。依据表 1 中的 A、B、N 值及单轴压缩失效强度可以计算得出(10)式中的 $D=0.6594$。混凝土单轴压缩实验结果表明[6],应力小于 $40\%f_{\mathrm{c}}$ 时,应变近似按比例增长,$40\%f_{\mathrm{c}}$ 左右的应力水平可作为弹性极限。当应力超过弹性极限后,邻近骨料的界面微裂纹开始扩展、连接,继后砂浆微裂纹开始扩展并与界面微裂纹共同桥接而形成内部损伤,在后继屈服过程中损伤不断累积。所以,当应力水平达到混凝土的失效强度时,损伤已经十分明显,$D=0.6594$ 反映了这个事实。利用计算结果(本工作中压应力为正值)绘制的拉、压子午线如图 2 所示,图 3 给出了归一化静水压力 p^{*} 分别取为 1、3、5 时,3 个静态失效面在偏平面中的失效曲线。

表 1　HJC、RHT 本构模型中的原始失效强度参数[7-8]

Table 1　Original failure strength parameters[7-8] of HJC and RHT models

HJC			RHT				
A	B	N	A	N	p_{spall}^{*}	Q_0	B_{Q}
0.79	1.60	0.61	1.60	0.61	0.1	0.6805	0.0105

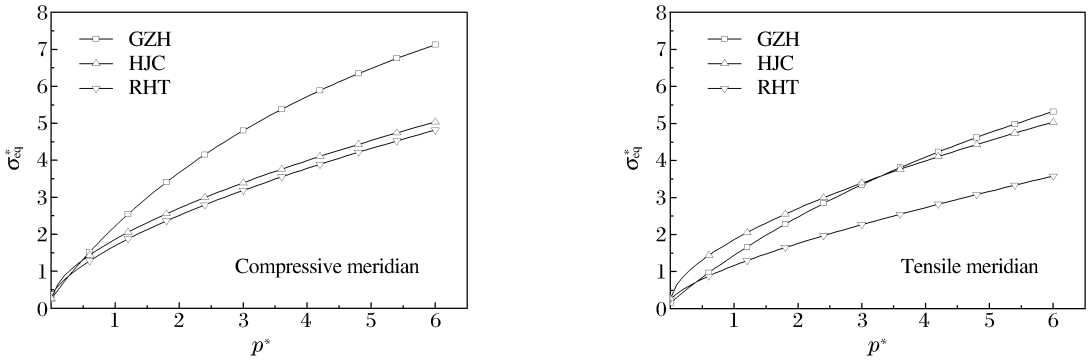
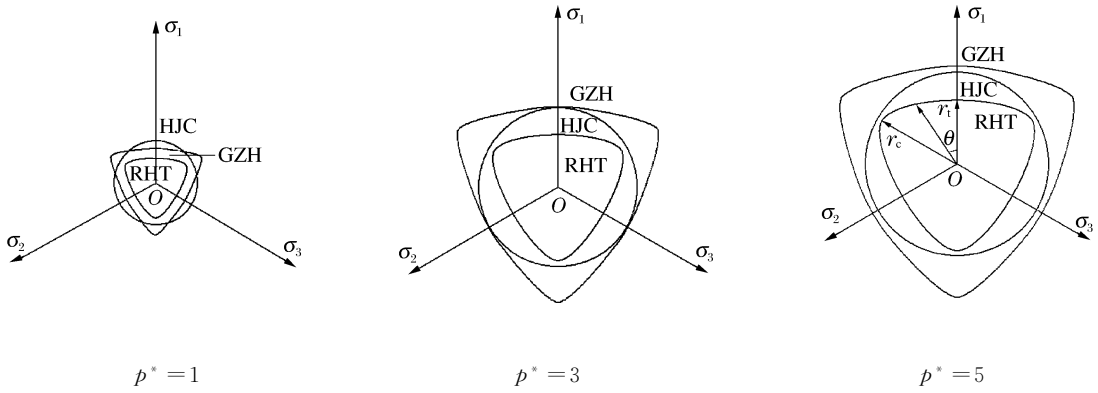


图 2　HJC、RHT 子午线与 GZH 子午线的比较

Fig. 2　Comparison among HJC, RHT and GZH meridians



$p^*=1$ $p^*=3$ $p^*=5$

图 3 在偏平面上 HJC、RHT 与 GZH 失效曲线的比较

Fig. 3 Comparison among HJC, RHT and GZH failure curves on deviatoric plane

图 3 表明，RHT、GZH 失效面在偏平面中的失效曲线呈现出三折对称特征，在拉应力或静水压力很小时，几乎是三角形，只有在静水压力很大时，才渐近于圆形，这与实验结果相一致。但是 HJC 本构模型因为沿用了 Johnson-Cook 本构关系，没有考虑应力偏量第三不变量的影响，致使偏平面中的失效曲线仅仅成为随静水压力增加而增大的圆(图 3)。另外，从图 2 和图 3 看出，RHT 和 HJC 的压子午线都明显低于 GZH 的压子午线，在较高静水压力下，偏平面中的 HJC、RHT 失效曲线也被 GZH 的失效曲线包围，这表明 RHT 和 HJC 本构模型的原始失效强度参数值将会导致混凝土失效强度降低。对混凝土冲击侵彻的数值模拟研究表明，它对计算结果的准确性造成了不可忽视的影响。因此有必要依据实验数据对商业软件中列出的混凝土 HJC、RHT 本构模型的原始失效强度参数值作出校验。

3 用特征强度确定 HJC、RHT 的失效强度参数

3.1 HJC 失效强度参数

用(10)式计算 HJC 失效强度参数 A、B、N 需要确定失效时的损伤变量 D，在一般应力状态下是无法预测的。但是如 2.4 节中所述，在单轴压缩失效时，D 为 0.659 4，可将它推广到一般应力状态，这是因为随着 p^* 的增大，$A(1-D)\ll B(p^*)^N$，D 值的大小对(10)式的计算结果影响不大。由(10)式得

$$\sigma_{\mathrm{eq}}^*=A(1-0.659\,4)+B(p^*)^N \tag{12}$$

式中

$$\sigma_{\mathrm{eq}}^*=\frac{3\tau_{\mathrm{oct}}}{\sqrt{2}f_{\mathrm{c}}}=\frac{1}{\sqrt{2}f_{\mathrm{c}}}\sqrt{(\sigma_1-\sigma_2)^2+(\sigma_2-\sigma_3)^2+(\sigma_3-\sigma_1)^2} \tag{13}$$

$$p^*=\frac{1}{3f_{\mathrm{c}}}(\sigma_1+\sigma_2+\sigma_3) \tag{14}$$

根据(12)式～(14)式，并利用混凝土的 5 个特征强度实验值可以确定 HJC 失效强度参数。为了使 A 的数值计算结果与其内聚力强度的物理含义相一致，分两步求解 HJC 失效强度参数。首先求解 A，为此将单轴抗压强度 f_{c}、三轴等拉强度 $f_{\mathrm{ttt}}=-0.09f_{\mathrm{c}}$ 和三轴压缩强度实验[9] $p^*=1.5$ 时的归一化八面体剪应力 $\tau_{\mathrm{oct}}^*=\tau_{\mathrm{oct}}/f_{\mathrm{c}}=1.42$ 分别代入(13)式和(14)式，并依据(12)式，得到

$$0.340\,6A+0.333^NB=1,\quad 0.340\,6A-0.09^NB=0,\quad 0.340\,6A+1.5^NB=\frac{3\times 1.42}{\sqrt{2}}$$

由此求出的 A、B、N 值中取 $A=0.717$。第二步利用 $A=0.717$ 及三轴压缩强度实验值[9]：$p^*=4.0$，$\tau_{\mathrm{oct}}^*=2.7$和 $p^*=5.5$，$\tau_{\mathrm{oct}}^*=3.3$ 重新拟合参数 B 和 N，即由

$$0.340\,6A+4^NB=\frac{3\times 2.7}{\sqrt{2}},\quad 0.340\,6A+5.5^NB=\frac{3\times 3.3}{\sqrt{2}}$$

求出 $B=2.21$,$N=0.656$。依据上述强度参数绘制的 HJC 子午线和偏平面中的失效曲线如图 4 和图 5 所示,HJC 和 GZH 本构模型的压子午线相当一致,两个本构模型在偏平面中 $\theta=60°$附近的失效曲线也明显趋近,但拉子午线和 $\theta=0°$附近的失效曲线相差较大,这是 HJC 本构模型没有考虑偏应力张量第三不变量 J_3 的必然结果。HJC 本构模型的这个缺点同样引起了国外学者的关注,2008 年,M. Polanco-Loria 等[10]提出了改进的 HJC 本构模型(MHJC),他们在 HJC 本构模型的基础上引入了与 RHT 本构模型相似的函数 $R_3(\theta)$,用以描述 J_3 的影响。

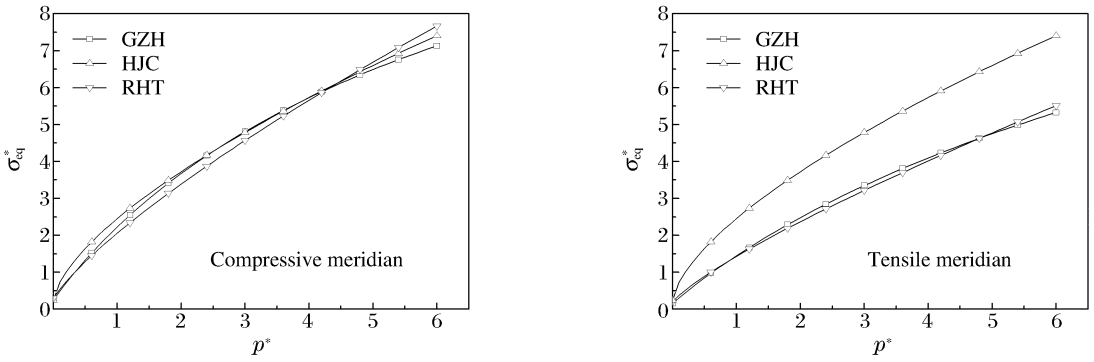


图 4　校验后 HJC、RHT 子午线与 GZH 子午线的比较

Fig. 4　Comparison among modified HJC, RHT and GZH meridians

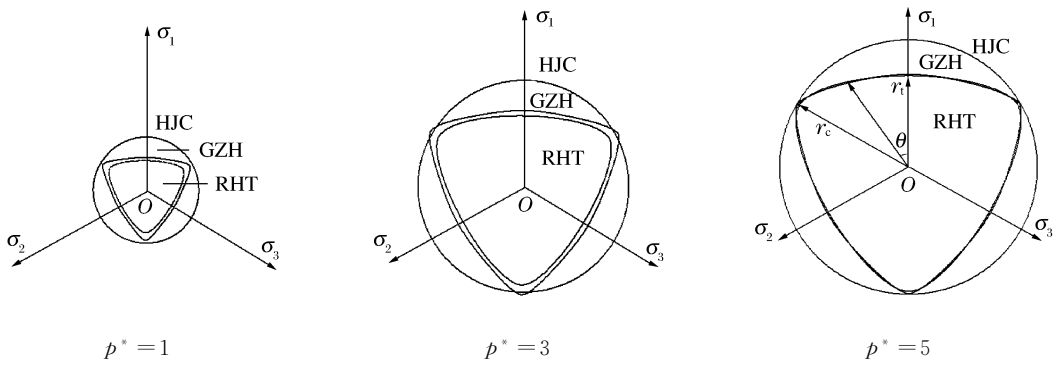


图 5　校验后在偏平面上 HJC、RHT 失效曲线与 GZH 失效曲线的比较

Fig. 5　Comparison among modified HJC, RHT and GZH failure curves on deviatoric plane

3.2　RHT 失效强度参数

RHT 失效强度参数为 A、N、Q_0 和 B_Q,其中用于表征压子午线的参数 A、N 是采用单轴抗压强度 f_c 和三轴压缩强度实验值[9] $p^*=5.5$,$\tau^*_{oct}=3.3$ 求出的。由(11)式可得

$$A(0.3333+0.09)^N=1,\quad A(5.5+0.09)^N=\frac{3\times 3.3}{\sqrt{2}}$$

由此解得:$A=1.929$,$N=0.764$。

Q_0 和 B_Q 用于确定 Q_2。在拉子午线上,(11)式变为

$$\sigma^*_{eq}=A(p^*-p^*_{spall})^N(Q_0+B_Q\cdot p^*) \tag{15}$$

采用双轴等压强度实验值[9] $p^*=0.853$,$\tau^*_{oct}=0.603$ 和三轴拉压强度实验值[9] $p^*=4.3$,$\tau^*_{oct}=2.0$ 可以求出 Q_0 和 B_Q。即由

$$1.929\times 0.943^{0.764}(Q_0+0.853B_Q)=\frac{3\times 0.603}{\sqrt{2}},\quad 1.929\times 4.39^{0.764}(Q_0+4.3B_Q)=\frac{3\times 2.0}{\sqrt{2}}$$

得到 $Q_0=0.69$,$B_Q=0.0048$。

至此,计算得出了校验后的 HJC、RHT 本构模型的失效强度参数(见表 2)。依据表 2 列出参数绘制的 HJC、RHT 拉、压子午线和偏平面中的失效曲线如图 4 和图 5 所示,它们的压子午线、RHT 的拉子午线以及偏平面中的失效曲线和 GZH 本构模型的相应曲线符合得相当好。

表 2 校验后的 HJC、RHT 本构模型失效强度参数

Table 2 Modified failure strength parameters of HJC and RHT models

HJC			RHT				
A	B	N	A	N	p^*_{spall}	Q_0	B_{Q}
0.717	2.21	0.656	1.929	0.764	0.09	0.69	0.0048

4 数值模拟验证

对 HJC、RHT 本构模型失效强度参数有效性的数值模拟检验方法之一是,分别使用校验前后的失效强度参数对混凝土靶正侵彻实验结果进行数值模拟。我们依据 H. Hansson 等[11]发表的实验结果,该实验用的侵彻弹体材料为 4340 钢,弹头为卵形,曲径比(CRH)为 2.5,直径为 15.2 cm,弹体长度为 55.2 cm,碰靶速度为 459 m/s。混凝土靶单轴抗压强度为 92 MPa,靶体直径为 240 cm,厚度为 75 cm。数值模拟时,用 DYNA-3D 验证 HJC 的失效强度参数,用 AUTODYN-2D 验证 RHT 的失效强度参数。失效强度的原参数和校验的参数分别取自表 1 和表 2,其它材料参数(4340 钢和混凝土)都取自文献[11],销蚀应变和摩擦效应等选项则保持不变。数值模拟得出的侵彻速度衰减曲线与实验结果之间的比较如图 6、图 7 所示。图中的粗实线为实验曲线,细实线为使用原始失效强度参数计算得出的曲线,虚线为使用校验的失效强度参数计算得出的曲线。计算结果表明,使用校验后的参数模拟得出的侵彻速度衰减曲线更接近实验结果。但是,HJC 模型的侵彻速度衰减曲线在侵彻后期衰减过快,与实验曲线之间的差别偏大,其原因主要是由于 HJC 本构模型没有引入偏应力张量第三不变量,不能区分拉、压子午线,而且高估了拉子午线附近的剪切强度。相比之下,RHT 本构模型能够较为准确地描述弹体速度衰减的全过程。

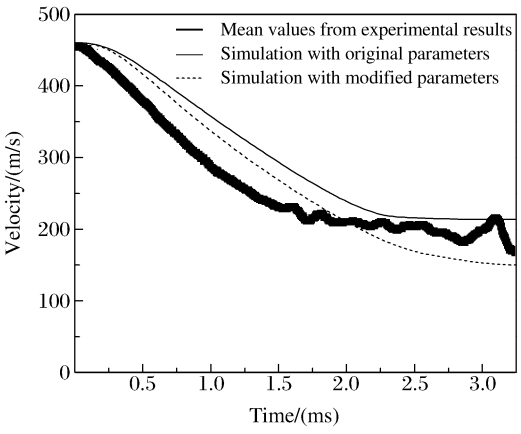


图 6 用 HJC 模型计算的侵彻速度衰减曲线与实验曲线的比较

Fig. 6 Comparison between simulation predictions using HJC model and experimental data for velocity-time histories

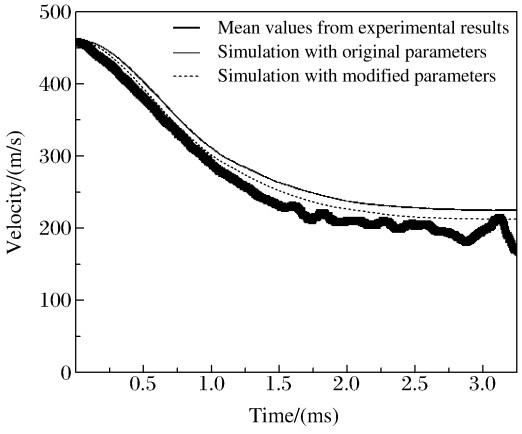


图 7 用 RHT 模型计算的侵彻速度衰减曲线与实验曲线的比较

Fig. 7 Comparison between simulation predictions using RHT model and experimental data for velocity-time histories

5 结　论

描述混凝土冲击特性的 HJC、RHT 本构模型是广泛应用的两个混凝土材料模型。对这两个模型的失效强度参数进行了分析计算,指出了 LS-DYNA 和 AUTODYN 商业软件中列出的失效强度参数值将会导致在较高静水压下混凝土失效强度降低。它对混凝土冲击侵彻数值模拟结果的准确性将产生不可忽视的影响。本文中给出了用混凝土的特征强度确定 HJC、RHT 失效强度参数的方法,并校验了 HJC 失效强度参数和 RHT 失效强度参数。通过对混凝土靶板侵彻实验的数值模拟,对校验前后失效强度参数进行了数值验证,验证结果表明,校验后的失效强度参数在描述混凝土材料动态力学行为方面更为准确。但是,由于 HJC 本构模型没有引入偏应力张量第三不变量,不能区分拉、压子午线,所以,仅仅校验失效强度参数不可能得到很满意的结果。另外,本文中给出的失效强度参数的可靠性与所取的特征强度实验值及其精度有关,所以对于某种特殊情况,仍需要另行设定若干特征强度并尽可能准确地测得其结果,再用本文中的方法计算出相应的失效强度参数。

感谢张舵博士、荆松吉博士在数值模拟工作中给予的帮助。
本文曾在 2009 年 8 月第九届全国冲击动力学学术会议上交流。

References:

[1] Ning J G, Shang L, Sun Y X. The Developments of Dynamic Constitutive Behavior of Concrete [J]. Advances in Mechanic, 2006, 36(3): 389-405. (in Chinese)
宁建国,商　霖,孙远翔. 混凝土材料动态性能的经验公式、强度理论与唯象本构模型 [J]. 力学与进展, 2006, 36(3): 389-405.

[2] Malvar L J, Crawford J E, Wesevich J W, et al. A Plasticity Concrete Material Model for DYNA3D [J]. Int J Impact Eng, 1997, 19(9-10): 847-873.

[3] Chen D N, Yin Z H, Yu Y Y, et al. Description of Properties of Concrete under Impact [J]. Explosion and Shock Waves, 2001, 21(2): 88-96. (in Chinese)
陈大年,尹志华,俞宇颖,等. 混凝土的冲击特性描述 [J]. 爆炸与冲击, 2001, 21(2): 88-96.

[4] Bischoff P H, Perry S H. Compressive Behavior of Concrete at High Strain Rates [J]. Materials Structure, 1991, 4(144): 425-450.

[5] Tu Z G, Lu Y. Evaluation of Typical Concrete Material Models Used in Hydrocodes for High Dynamic Response Simulations [J]. Int J Impact Eng, 2009, 36(1): 132-146.

[6] Guo Z H. Concrete Strength and Constitutive Relations—Principles and Applications [M]. Beijing: China Building Industry Press, 2004: 184-190. (in Chinese)
过镇海. 混凝土的强度和本构关系——原理与应用 [M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2004: 184-190.

[7] 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 [A]//14th International Symposium on Ballistics [C]. Quebec, Canada, 1993: 591-600.

[8] Riedel W, Thoma K, Hiermaier S. Penetration of Reinforced Concrete by BETA-B-500-Numerical Analysis Using a New Macroscopic Concrete Model for Hydrocodes [A]//Proceedings of 9th International Symposium on Interaction of the Effect of Munitions with Structures [C]. Berlin-Strausberg, Germany, 1999: 315-322.

[9] Guo Z H, Wang C Z. Investigation on the Strength and Failure Criterion of Concrete under Multi-Axial Stresses [J]. China Civil Engineering Journal, 1991, 24(3): 1-14. (in Chinese)
过镇海,王传志. 多轴应力下混凝土的强度和破坏准则研究 [J]. 土木工程学报, 1991, 24(3): 1-14.

[10] Polanco-Loria M, Hopperstad O S, Børvik T, et al. Numerical Predictions of Ballistic Limits for Concrete Slabs Using a Modified Version of the HJC Concrete Model [J]. Int J Impact Eng, 2008, 35(5): 290-303.

[11] Hansson H, Skoglund P. Simulation of Concrete Penetration in 2D and 3D with the RHT Material Model [R]. Sweden: Tumba, Swedish Defence Research Agency, 2002.

The Failure Strength Parameters of HJC and RHT Concrete Constitutive Models

ZHANG Ruo-Qi, DING Yu-Qing, TANG Wen-Hui, RAN Xian-Wen

(*College of Science, National University of Defense Technology, Changsha* 410073, *China*)

Abstract: The analyzed and calculated results indicate that the concrete failure strength will decrease under higher hydrostatic pressure, when the original failure parameters of HJC and RHT models implemented in LS-DYNA and AUTODYN are adopted. A new method is introduced which using the characteristic strength of concrete to confirm the modified failure parameters of HJC and RHT models. The same physical experiment of concrete penetration was simulated using the modified HJC and RHT failure parameters respectively, and the numerical results demonstrated that the RHT model matched the experiments much better. But the numerical results with the HJC modified failure parameters were not enough satisfied, because the third invariant of the deviated stress tensor was not considered in the HJC model.

Key words: concrete; HJC/RHT constitutive model; failure strength parameter