DOI: 10.11883/bzycj-2016-0305
文章编号: 1001-1455(2018)01-0224-09

莫尔-库仑准则下高强度混凝土的临界爆裂蒸汽压力*

康亚明[1],贾 延[2],罗玉财[1],陈静波[3]
(1.北方民族大学化学与化学工程学院,宁夏 银川 750021;
2.北方民族大学数学与信息科学学院,宁夏 银川 750021;
3.宁夏旭日众粒环保科技有限公司,宁夏 银川 750200)

摘要: 高强度混凝土高温爆裂概率随含水率的增大而增大,表明蒸汽压力是诱发爆裂的重要因素之一,该压力通过改变有效应力影响了强度。为定量研究蒸汽压力对强度的影响,基于莫尔-库仑准则和有效应力原理,推导了临界爆裂蒸汽压力的求解公式,并从数理角度证明了其严密性,结果表明:(1)公式物理意义明确,并与现有的研究成果和实际工程灾害一致性好;(2)理论分析尚不能完全考虑材料物理特征对爆裂的影响,还需结合模型实验开展极端高温环境下理论模型中相关系数的测定;(3)应结合火灾后建筑物不同部位构件的破坏形态,从受力状态与破坏特征两方面去分析和反馈其中的机理,完善理论分析中的不足。

关键词: 高强度混凝土;高温爆裂;有效应力;临界蒸汽压力;莫尔-库仑准则;温度应力
中图分类号: O381;TU528 **国标学科代码**: 13035 **文献标志码**: A

正常温度下混凝土具有良好的抗火性能,但在火灾等极端高温环境下其物理力学性能会发生显著退化。特别是对于高强度混凝土,在极端高温环境下还有明显的爆裂倾向。近几年相继发生了多起火灾中建筑物突然倒塌的恶性事故,造成了消防官兵的重大伤亡。最有代表性的是 2003 年 11 月 3 日,湖南省衡阳市衡州大厦发生火灾,消防官兵在灭火时建筑物局部突然坍塌,造成 20 名消防官兵牺牲,16 人受伤,社会影响恶劣。事后专业的工程检测机构检测后认为该大厦结构体系基本合理,火灾中心附近底层框架没有发现严重不符合规范的地方,在正常情况下,该大厦主体结构是安全可靠的;再如 2015 年 1 月 2 日,黑龙江哈尔滨市道外区一仓库起火,起火约 8 小时后,过火仓库发生塌方,造成 5 名消防官兵遇难,13 人受伤,另有 1 名楼内保安受伤。

这两起事故的共同之处是灭火过程中局部结构的突然坍塌,这种突然性增加了消防战士避险的难度。从防震减灾角度来看,梁或柱子的倒塌其根源首先是极端高温引起混凝土和钢筋强度的下降,以及两者之间粘结力的下降;另外,过火区构件空间刚度的下降又引起了结构体系内力的重分布,内力重分布也是诱发局部倒塌的一个因素。

针对这些问题,工程界和学术界做了大量有价值的研究,部分成果也被相关标准或规范所采用,给建筑物的防灾减灾设计及施工提供了强有力的理论支持。但是,由于实验条件的限制,目前的研究多集中在火灾后混凝土强度的退化上,但火灾中和火灾后的强度是两个完全不同的概念。火灾中的混凝土除了强度和粘结力下降外,还存在不可忽略的温度应力。另外,高强度混凝土在高温下还存在爆裂现象,所以火灾中的混凝土可能存在温度应力、高压蒸汽压力、外力等物理力学场,是一个多场耦合问题,火灾后的强度只是单一的强度和粘结力劣化问题。如果以火灾后的强度退化特征去近似火灾中的退化特征,特别是对于高强度混凝土,往往会高估了火灾中高强度混凝土的实际情况,导致对灾害估计不足,两种环境下混凝土的受力特征和破坏机理有显著差异[1-3]。

* **收稿日期**: 2016-10-17; **修回日期**: 2017-03-08
基金项目: 国家自然科学基金项目(51369001,51569001)
第一作者: 康亚明(1980—),男,博士,副教授,硕士生导师,scu.kym@foxmail.com。

鉴于此，本文中尝试将蒸汽压力引入到应力分析中，并结合强度理论建立起外力与蒸汽压力之间的某种关系。

1　混凝土高温爆裂机理的普遍性解释

如前所述，目前多以火灾后的强度来近似火灾中的强度，两者之间虽有联系但区别更大。火灾后混凝土内部结构的劣化引起了强度的退化，而火灾中的强度问题是温度应力、强度退化和蒸汽压力等物理场的耦合问题，其结果不能简单地进行比对，这也是开展本文研究工作的初衷。

目前，关于混凝土的高温爆裂有 3 种代表性的理论[4-8]：蒸汽压力理论、温度梯度应力理论和热开裂理论。这 3 种理论都各有侧重，但实际火灾中一个完整的爆裂过程这 3 种机理都有。从目前研究的结果来看，有一些较一致的看法，也即爆裂倾向与混凝土中含水率有直接联系。石东升等[9]的研究成果表明：高强度混凝土的爆裂与含水率有直接关系，且存在一个相对稳定的临界值，当含水率低于 3%时，含水率的高低对混凝土爆裂影响不大；含水率高于 3%时，高温爆裂的概率和含水率基本成正比。所以，这里先只考虑蒸汽压力下的临界爆裂特征。

2　高温爆裂物理模型的构建

混凝土中分布有大量微孔洞，这些微孔洞及微裂隙大多是不贯通的。为了研究火灾等极端高温下混凝土中蒸汽压力引起的爆裂，这里引入当量孔洞的概念，也即将某一截面上所有的微孔洞综合起来，等效成一个大的宏观的孔洞，等效条件为这个大孔洞在这一截面上所占的面积等于微孔洞所占面积的和，如图 1 所示。

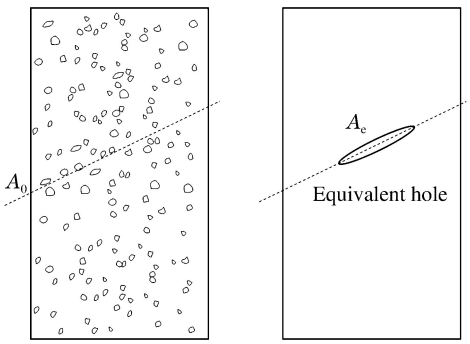


图 1　横截面上微孔洞面积的等效

Fig. 1　Effective area of micro-holes on the cross section

图 1 中，A_0 为任一横截面面积，A_e 为该横截面上所有微孔洞面积之和，即：

$$A_e = \sum A_i \qquad i = 1,2,3,\cdots,n \qquad (1)$$

这样，该横截面上的净面积为两者的差值，即为 $A_0 - A_e$，而 A_e 的大小能综合反映混凝土的孔隙特征。

3　自由状态下的临界爆裂蒸汽压力

如图 2 所示，在极端高温下赋存于混凝土中的水分迅速汽化，部分高压蒸汽通过与外界相通的微裂隙从混凝土中排出，大部分高压水蒸气被封闭在互不贯通的微孔洞中。蒸汽压力产生的膨胀劈裂效应导致混凝土产生拉应力，当此拉应力大于混凝土的极限抗拉强度时，这些微孔洞逐渐开裂贯通，最终引起混凝土的破坏，极端情况下可能引起混凝土的爆裂。

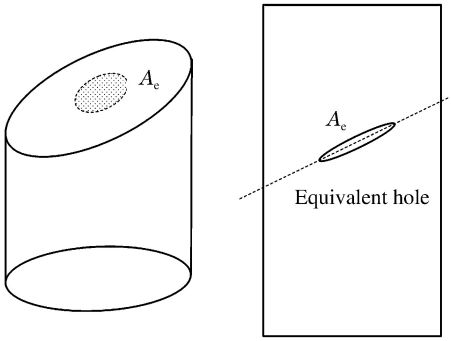


图 2　混凝土不受外力时的高温爆裂

Fig. 2　High temperature burst of concrete subjected to free state

由于是不受外力的自由状态，所以此时的爆裂不受外部荷载的引导或抑制。高压蒸汽促使了微裂隙的出现和发展，直至发生贯通的破裂面，最终发生脆性特征明显的爆裂。此时混凝土爆裂条件为蒸汽压力引起的拉应力大于退化后的混凝土实际抗拉强

度,判别式为:

$$A_e p \geqslant (A_0 - A_e) R_t \tag{2}$$

式中:p 为蒸汽压力,R_t 为退化后的混凝土实际抗拉强度。

这样,混凝土发生高温爆裂的临界蒸汽压力 p_{cr} 可表示为:

$$p_{cr} = \frac{A_0 - A_e}{A_e} R_t \tag{3}$$

在式(3)中,$A_0 - A_e$ 为斜截面净面积,显然,当量孔洞面积 A_e 越大,自由状态下高温混凝土爆裂的临界压力值 p_{cr} 就越小。其原因是,高温汽化后的水蒸气储存在次微孔洞中,一定数量密闭的微孔洞的存在是发生爆裂的条件之一。这也与已有的研究成果一致[10-11]。

4 空间应力状态下的临界爆裂蒸汽压力

4.1 空间应力状态下的力学模型

(1)力学模型的简化

柱是混凝土结构中的基本构件之一,受力以轴向压缩为主,柱中常配置箍筋,其作用是提供横向约束。在箍筋的约束下,让混凝土处于空间应力状态,所以柱中混凝土多处于三轴受压状态,力学模型如图 3 所示。

(2)混凝土柱中一点的应力状态

如图 4 所示,从混凝土柱中任取一微元体,考虑到箍筋对柱体横向约束的对称性,横向约束力可以近似认为是相等的,因此取 $\sigma_2 = \sigma_3$。

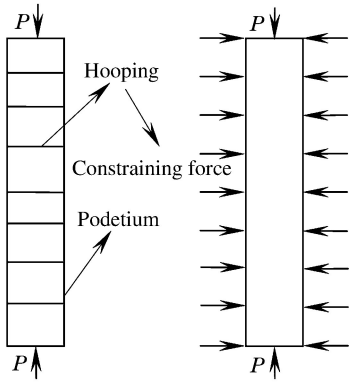


图 3 柱中混凝土的受力特征

Fig. 3 Stress characteristics of concrete column

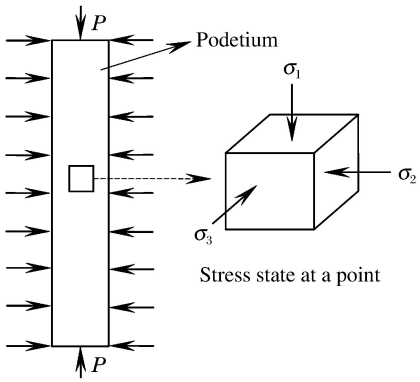


图 4 轴压约束共同作用下桩体中一点的应力状态

Fig. 4 Stress state at a point subjected to axial compression and lateral restraint in the cylinder

4.2 带有抗拉强度切割的莫尔-库仑准则与包络线

莫尔强度理论是目前在岩土力学中应用最多的一种强度准则,可表示如下:

$$\tau \geqslant \tau_f = c + \sigma \tan\varphi \tag{4}$$

式中:c 为岩土类材料的黏聚力,φ 为岩土类材料的内摩擦角,τ 为岩土内任一平面上的剪应力。

该准则还可用大、小主应力 σ_1 和 σ_3 来表示,于是滑动面上的正应力 σ 和 τ 可改写为[12]:

$$\sigma = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos(2\beta) \tag{5}$$

$$\tau = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin(2\beta) \tag{6}$$

式中:β 为 σ_3 方向与滑动面所在面的夹角。

将式(5)中的 σ 以及式(6)中的 $\tau=\tau_f$ 代入式(4)中，得：

$$\sigma_1=\frac{2c+\sigma_3[\sin(2\beta)+\tan\varphi(1-\cos(2\beta)]}{\sin(2\beta)-\tan\varphi[1+\cos(2\beta)]} \tag{7}$$

对于破坏面，$\sin(2\beta)=\cos\varphi$，$\cos(2\beta)=-\sin\varphi$，式(7)可改写为：

$$\sigma_1=\frac{2c\cos\varphi+\sigma_3(1+\sin\varphi)}{1-\sin\varphi} \tag{8}$$

式(8)在 $\sigma_1-\sigma_3$ 平面内的关系如图 5 所示，注意到这一直线的斜率与角度 φ 有关，可表示为：

$$\tan\varphi=\frac{1+\sin\varphi}{1-\sin\varphi} \tag{9}$$

在式(8)中令 $\sigma_3=0$，则单轴抗压强度的公式：

$$\sigma_1=R_c=\frac{2c\cos\varphi}{1-\sin\varphi} \tag{10}$$

若令式(10)中的 $\sigma_1=0$，则可得表观抗拉强度：

$$R_t'=\frac{2c\cos\varphi}{1+\sin\varphi} \tag{11}$$

需要指出的是，R_t'是直线在 σ_3 轴线上的截距，不同于实际测定的抗拉强度 R_t。因此，有人建议将包络线改为图 6 所示的形式。

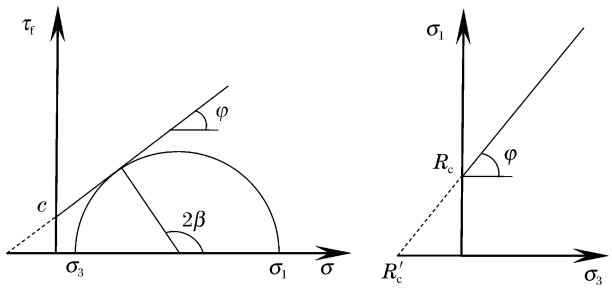


图 5 莫尔-库仑准则中的主应力关系

Fig. 5 Relationship between the principal stress in the Mohr-coulomb criterion

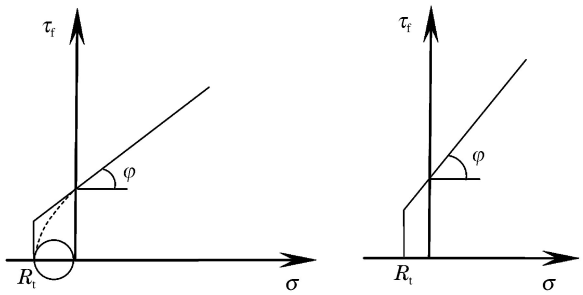


图 6 带有抗拉强度切割的莫尔-库仑包络线

Fig. 6 Mohr-coulomb criterion envelope with cross line of tensile strength

这样，用 σ_1 和 σ_3 来表示的莫尔-库仑准则的另一种有用形式可通过几何关系得到：

$$\sin\varphi=\frac{\sigma_1-\sigma_3}{\sigma_1+\sigma_3+2\cot\varphi} \tag{12}$$

通过三角运算，还可以写成另一种形式：

$$\frac{\sigma_3+c\cot\varphi}{\sigma_1+c\cot\varphi}=\frac{1-\sin\varphi}{1+\sin\varphi}=\tan^2\left(45^\circ-\frac{\varphi}{2}\right) \tag{13}$$

若令：

$$\tan^2\left(45^\circ-\frac{\varphi}{2}\right)=\frac{1}{N_\varphi} \tag{14}$$

得到：

$$\frac{\sigma_3+c\cot\varphi}{\sigma_1+c\cot\varphi}=\frac{1}{N_\varphi} \tag{15}$$

经过整理，式(15)可改写为：

$$\sigma_1=\sigma_3N_\varphi+2c\sqrt{N_\varphi} \tag{16}$$

而式(16)中的 $2c\sqrt{N_\varphi}$ 即为单轴抗压强度 R_c，因此，式(16)最终可简写为：

$$\sigma_1=\sigma_3N_\varphi+R_c \tag{17}$$

4.3　有效应力原理下的临界爆裂蒸汽压力

极端高温环境下，蒸汽压力对混凝土强度的影响与孔隙水压力对岩石强度的影响类似(除水有软化效应外)，孔隙水对岩石的强度影响机理目前已经有较一致的认识。认为在荷载作用下若饱水岩石中的孔隙水不能及时排出，则孔隙水就会产生孔隙水压力 p_w，岩石所承受的应力将相应地减少，强度也随之降低[12-15]。

在高温混凝土的爆裂过程中，当混凝土中液相的水迅速变为气相后，高压蒸汽被封闭在混凝土的孔隙或裂隙中，此时其受力机理与孔隙水压力机理一致，于是，可以引入有效应力原理：

$$\sigma' = \sigma - p \tag{18}$$

式中：σ 为总应力，p 为蒸汽压力。

如图 7 所示，根据莫尔-库仑准则，考虑到内部蒸汽压力的作用，高温混凝土的抗剪强度 τ_f 可以用下式表示：

$$\tau_f = c + \sigma' \tan\varphi \tag{19}$$

或者：

$$\tau_f = c + (\sigma - p)\tan\varphi \tag{20}$$

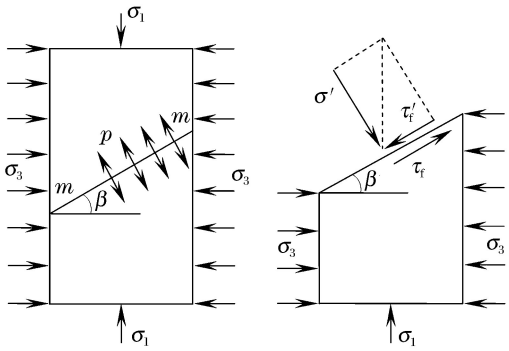


图 7 空间应力状态下压剪破坏时的受力图

Fig. 7 Force diagram subjected to compression and shear failure in three-dimensional stress state

可见，混凝土中蒸汽压力使得其抗剪强度强度降低，而降低的多少与蒸汽压力 p 的有关。

如前所述，实际工程中的混凝土常处于三轴应力状态，为了在莫尔-库仑准则中考虑蒸汽压力对强度的影响，只需在该准则中用有效主应力 σ_1' 和 σ_3' 分别来代替主应力 σ_1 和 σ_3。于是，将有效主应力代入式(17)中有：

$$\sigma_1' = \sigma_3' N_\varphi + R_c \tag{21}$$

或者：

$$(\sigma_1' - \sigma_3') = \sigma_3'(N_\varphi - 1) + R_c \tag{22}$$

因为：

$$\sigma_1' = \sigma_1 - p, \qquad \sigma_3' = \sigma_3 - p \tag{23}$$

所以式(22)可写为：

$$\sigma_1 - \sigma_3 = (\sigma_3 - p)(N_\varphi - 1) + R_c \tag{24}$$

在式(24)中，定义混凝土达到爆裂时所需的最小蒸汽压力为临界蒸汽压力，记为 p_{cr}，则根据式(24)可得 p_{cr} 计算公式为：

$$p_{cr} = \sigma_3 - \frac{[(\sigma_1 - \sigma_3) - R_c]}{N_\varphi - 1} \tag{25}$$

$\sigma_3 = 0$ 时，为单轴应力状态，是一种特殊情况，式(25)变为：

$$p_{cr} = \frac{f_c - \sigma_1}{N_\varphi - 1} \tag{26}$$

$\sigma_3 \neq 0$ 时，为空间应力状态，为了对比横向约束力对临界爆裂蒸汽压力的影响，将式(25)做简单变换：

$$p_{cr} = \frac{R_c - \sigma_1}{N_\varphi - 1} + \frac{\sigma_3}{N_\varphi - 1} + \sigma_3 \tag{27}$$

显然，σ_3 有拉压之分，岩石力学中习惯规定压为正，拉为负，分别讨论如下：

(1)$\sigma_3 > 0$(压)，也即压-压组合

图 7 中混凝土的受力即为压-压组合，为了证明横向约束对爆裂的抑制作用，只要证明式(27)中 $\frac{\sigma_3}{N_\varphi - 1} + \sigma_3 \geqslant 0$ 即可，若能证明 $N_\varphi - 1 \geqslant 0$，也即 $N_\varphi \geqslant 1$，则通过放缩法即可证明横向约束力确实起到了抑制爆裂的作用，而 $N_\varphi = \frac{\sigma_1 + c\cot\varphi}{\sigma_3 + c\cot\varphi}$，要证明 $N_\varphi \geqslant 1$，只须证明：

$$\sigma_1 + c\cot\varphi \geqslant \sigma_3 + c\cot\varphi \tag{28}$$

显然，式(28)等价于：

$$\sigma_1 \geqslant \sigma_3 \tag{29}$$

σ_1、σ_3 分别代表着最大和最小主应力，因此式(29)是成立的，所以，反推回去后即可证明 $\frac{\sigma_3}{N_\varphi-1}+\sigma_3 \geqslant 0$ 是成立的，也就是横向约束能降低临界爆裂蒸汽压力。这一点从已有研究成果也能得到验证，配了箍筋的混凝土抗爆裂能力要比素混凝土强一些。对于有爆裂风险的柱等重要构件，可增加构造配筋。

(2)$\sigma_3<0$(拉)，也即拉-压组合

拉-压组合下，$\frac{\sigma_3}{N_\varphi-1}+\sigma_3<0$ 恒成立，因为 $\sigma_1 \geqslant \sigma_3$ 是恒成立的，所以 $N_\varphi \geqslant 1$ 也是恒成立的。此时，σ_3 不但没有抑制爆裂的发生，还降低了临界爆裂蒸汽压力，加速了爆裂的发生。正因为如此，在高强度混凝土中掺加纤维，可以抑制拉应力作用下裂纹的扩展，提高混凝土抗爆裂能力。

4.4　不同应力组合下的破裂形态与工程措施

(1)$\sigma_3>0$(压)，也即压-压组合

在压-压组合下，主应力 σ_1 和 σ_3 之间的比值有两种特殊情况，此时在轴向压力 σ_1 和横向约束 σ_3 共同作用下，混凝土的强度和破裂形态也对应有两种特殊情况。

①σ_1/σ_3 接近于 1，此时无明显主压应力，也即 2 个方向压应力相当，在工程中对应于箍筋数量足够多，柱体在受到轴向压缩时箍筋能有效约束横向变形，最终柱体的破坏模式常表现为挤压流动，如图 8(*a*)所示。其力学特征是混凝土三轴受压，且 σ_1 和 σ_3 都大，3 个方向的主应变均为压缩变形。在很高的压应力作用下，混凝土内的部分水泥砂浆和软弱粗骨料将因更高、且不均匀的微观应力而发生局部破碎，产生很大的压缩变形和剪切移动，混凝土的塑性变形大增。在火灾等极端高温环境下，混凝土内部结构发生退化，还有不可忽略的温度应力。对于高强度混凝土，还可能存在高压蒸汽压力，裂隙发展的进程会加快。

②σ_1/σ_3 远大于 1，σ_1 为主压应力，即两个方向压应力相差悬殊。在工程中相当于轴向压力 σ_1 大，而提供横向约束的箍筋数量不足，导致 σ_3 较小，柱体在受到轴向压缩时箍筋不能有效约束混凝土横向变形。破坏模式常表现为柱状压坏如图 8(b)所示，或斜剪破坏如图 8(c)所示。

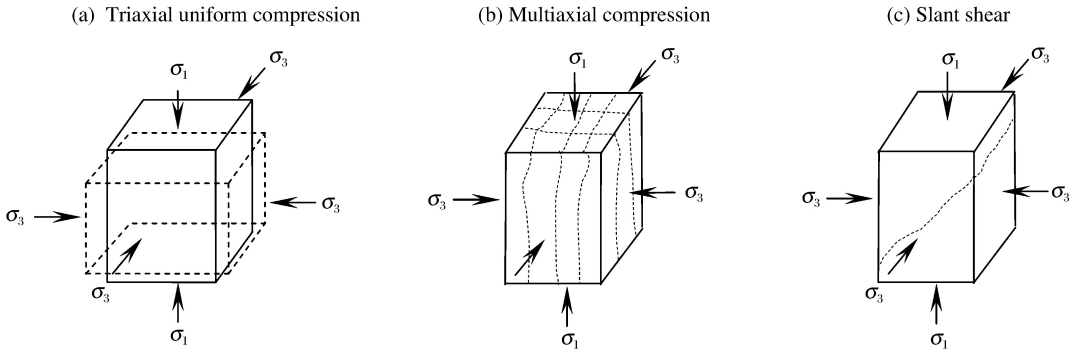


图 8　三向均衡和不均衡受压时的挤压变形和破坏特征

Fig. 8　Extrusion deformation and failure characteristics subjected to triaxial uniform and nonuniform compressions

对于柱状压坏，其应力特征是混凝土在多轴受压状态下，当主压应力 σ_1 的数值远大于 σ_3 的数值时，横向产生拉应变。当此拉应变超过混凝土的极限值后，在远离柱两端的柱体中，箍筋约束范围内的核心受压区混凝土形成平行于 σ_1 方向的裂缝面，裂缝面逐渐扩展和增宽，最终构成分离的短柱群而破坏。引起柱状压坏的主要因素是 σ_1，另 σ_3 的作用是影响柱体的侧向应变，即影响裂缝面的形成和扩展。σ_3 在一定程度上减小了侧向应变，因此可以提高抗压强度。

σ_1/σ_3 远大于 1 还有可能发生斜剪破坏，混凝土三轴受压。因 σ_1 和 σ_3 的差值大，这使得剪应力$(\sigma_1-\sigma_3)/2$ 较大，破坏发生在远离柱两端的某一薄弱段处。箍筋约束范围内的核心受压区混凝土出现斜裂缝面，与 σ_1 有一个夹角，沿斜裂缝面有剪切错动和碾压、破碎的痕迹。

不管是柱状压坏或者剪切破坏,都是由箍筋数量不足或配置不当引起的,导致对混凝土的约束力不足,都有脆性特征,这违背了“强剪弱弯”的设计原则。

所以,建筑抗震设计规范中对于箍筋构造配置与轴压比之间的关系有明确和严格的限制,如:沿柱全高采用井字复合箍,且箍筋间距不大于 100 mm,肢距不大于 200 mm,直径不小于 12 mm;或沿柱全高采用复合螺旋箍,且螺距不大于 100 mm,肢距不大于 200 mm,直径不小于 12 mm;或沿柱全高采用连续复合矩形螺旋箍,且螺距不大于 80 mm,肢距不大于 200 mm,直径不小于 10 mm 时,轴压比限值均可按表中数值增加 0.10。也就是说,有了这些严格的构造配置,保证了箍筋的横向约束效应,这样框架柱的延性在原有基础上有一定提高,所以轴压比限值可以略微提高。

但是对于有潜在火灾危险的建筑物,或者在安全级别要求很高的情况下,为了保证可靠性,轴压比限值应专门研究并采取特殊构造措施。因为在火灾情况下,劣化后的抗压强度 f_c 存在不确定性,如有研究结果表明:采用螺旋箍筋、连续复合矩形螺旋箍筋等配筋方式,还能在一般复合箍筋的基础上进一步提高对核心混凝土的约束效应。所以,火灾等极端高温环境下,通过提高保护层厚度等措施及特殊构造措施,尽可能确保箍筋的约束效应也是防灾减灾的有效措施。

(2)$\sigma_3<0$(拉),也即拉-压组合

在拉-压组合下,根据 σ_1 和 σ_3 之间的主应力比关系,也有两种特殊情况:①$\sigma_1/|\sigma_3|$ 接近于 1,σ_3 为拉应力,但数值较大,无明显主压应力或主拉应力,其破坏模式也常表现为柱状压坏。②$\sigma_1/|\sigma_3|$ 远大于 1,σ_3 为拉应力,但数值较小,σ_1 为主压应力,其破坏模式也常表现为柱状压坏。拉-压组合时的这两种情况,本质上是前文压-压组合中 σ_1/σ_3 远大于 1 时的特例。共同点在于引起破坏的主要因素也是 σ_3,而 σ_3 为拉应力时,增大了侧向拉应变,多轴抗压强度必降低,而 σ_3 越大,这种强度降低越明显。这种情况仅是从应力状态角度进行的理论分析,实际工程中箍筋总能提供一定的横向约束应力。需要指出的是,当 σ_3 为拉应力且较大时,相对于压-压组合,混凝土的破坏模式有从压剪破坏到拉剪破坏过渡的趋势,此时强度理论采用格里菲斯理论更符合实际情况[16-19]。

5 结 束 语

高强度混凝土的高温爆裂现象是多个物理场共同耦合的结果,将有效应力原理引入到高温混凝土的爆裂问题中来,基于莫尔-库仑准则建立了临界蒸汽压力的求解公式,主要结论如下:(1)混凝土特别是高强度混凝土的高温爆裂是一个很复杂的问题,既有力学方面的诱发机制,又受混凝土本身物理特征的影响,内外两个因素的叠加,造成了极端高温下混凝土的爆裂。基于有效应力原理,得到了计算临界爆裂蒸汽压力的理论解,该解析解物理意义明确,现有的研究成果和实际工程灾害也能验证本公式的可行性。(2)理论分析尚不能充分考虑材料物理属性差异对爆裂的影响,因此开展混凝土材料爆裂实验和数值模拟是标定理论分析中相关系数的基础。目前,这方面的实验仪器还需要加紧研发,还需要解决极端高温下蒸汽压力的直接或间接测试方法与技术。(3)应加强对火灾事故现场的调查,研究火灾后建筑物不同部位构件的破坏形态与特征,从构件的受力状态与最终的破坏形态两方面去分析其中的机理,再结合室内模型实验,完善理论分析中不足及标定其中的系数;(4)开展建筑结构火灾模型实验,特别是针对混凝土结构系统中某一构件受到破坏后,整体强度和空间刚度的变化,以及应力重新分布特征,这些研究最终为火灾下建筑物的倒塌的预防与设计提供基础理论支撑。

如前所述,混凝土的高温爆裂是多因素共同作用的结果,那么反过来,临界蒸汽压力就要受到这些因素的影响,因此本文中推导的公式还需要辅助以修正系数。这就需要大量的模型实验来反复标定,涉及到的因素主要有混凝土的含水率、孔隙率及其分布特征、应力状态、温度应力等。通过对影响临界爆裂蒸汽压力因素的研究得出一些修正系数,对本文得到的公式进行有效的修正是笔者今后研究的一个重点;另外,还可以探索求解蒸汽压力间接的办法,如 Travis 等[20]研究了弹性模量和渗透性之间的关系,这为蒸汽压力的测定提供了一种思路。

参考文献：

[1] 鞠杨，刘红彬，田开培，等. RPC 高温爆裂的微细观孔隙结构与蒸汽压变化机制的研究[J]. 中国科学：技术科学，2013，43(2)：141-152.
JU Yang, LIU Hongbin, TIAN Kaipei, et al. An investigation on micropore structures and the vapor pressure mechanism of explosive spalling of RPC exposed to high temperature[J]. Science China: Technological Sciences, 2013, 43(2): 141-152.

[2] TERRASI G P, BISBY L, BARBEZAT M, et al. Fire behavior of thin CFRP pretensioned high-strength concrete slabs[J]. Journal of Composites for Construction, 2012, 16(4): 381-394.

[3] KANÉMA M, PLIYA P, NOUMOWÉ A, et al. Spalling, thermal, and hydrous behavior of ordinary and high-strength concrete subjected to elevated temperature[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2011, 23(7): 921-930.

[4] 唐世斌，唐春安，李连崇，等. 脆性材料热-力耦合模型及热破裂数值分析方法[J]. 计算力学学报，2009，26(2)：172-179.
TANG Shibin, TANG Chun'an, LI Lianchong, et al. Numerical approach on the thermo-mechanical coupling of brittle material[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2009, 26(2): 172-179.

[5] 柳献，袁勇，叶光，等. 高性能混凝土高温爆裂的机理探讨[J]. 土木工程学报，2008，41(6)：61-68.
LIU Xian, YUAN Yong, YE Guang, et al. Investigation on the mechanism of explosive spalling of high performance concrete at elevated temperature[J]. China Civil Engineering Journal, 2008, 41(6): 61-68.

[6] 刘红彬，鞠杨，孙华飞，等. 活性粉末混凝土的高温爆裂及其内部温度场的试验研究[J]. 工业建筑，2014，44(11)：126-130.
LIU Hongbin, JU Yang, SUN Huafei, et al. Experiment on the spalling and temperature field distribution of reactive powder concrete under high temperature[J]. Industrial Construction, 2014, 44(11): 126-130.

[7] GUERRIERI M, FRAGOMENI S. Mechanisms of spalling of concrete panels of different geometry in hydrocarbon fire[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2016, 28(12): 04016164.

[8] 李荣涛，李锡夔. 混凝土中化学-热-湿-力耦合过程的数值方法[J]. 力学学报，2006，38(4)：471-479.
LI Rongtao, LI Xikui. Mathematical model and numerical method for simulation of coupled chemo-thermo-hydro-mechanical process in concrete subjected to fire[J]. Chinese Journal of Theroretical and Applied Mechanics, 2006, 38(4): 471-479.

[9] 石东升，王海波，刘曙光. 影响火灾下混凝土爆裂因素的试验研究[J]. 内蒙古工业大学学报(自然科学版)，2007，26(2)：129-135.
SHI Dongsheng, WANG Haibo, LIU Shuguang. Experimental studies of factors affecting spallation of concrete subjected to fire[J]. Journal of Inner Mongolia University of Technology (Natural Science Edition), 2007, 26(2): 129-135.

[10] 雪凯旺，苗苗，周健. 高强混凝土高温爆裂行为改善措施的研究进展[J]. 硅酸盐学报，2016，35(10)：3209-3214.
XUE Kaiwang, MIAO Miao, ZHOU Jian. Improvement measures of high temperature explosive spalling of high strength concrete[J]. Bulletin of The Chinese Ceramic Society, 2016, 35(10): 3209-3214.

[11] 王里，刘红彬，鞠杨，等. 高强高性能混凝土高温爆裂机理研究进展[J]. 力学与实践，2014，36(4)：403-412.
WANG Li, LIU Hongbin, JU Yang, et al. Mechanism of explosive spalling of high strength and high performance concrete exposed to elevated temperature[J]. Mechanics in Engineering, 2014, 36(4): 403-412.

[12] 徐志英. 岩石力学[M]. 北京：水利水电出版社，1993：47-59.

[13] 俞茂宏. 岩土类材料的统一强度理论及其应用[J]. 岩土工程学报，1994，16(2)：1-10.

[14] 郭少华，周绍青，邹春伟. 压缩荷载条件下岩石类材料的断裂模式研究[J]. 实验力学，2008，23(2)：149-156.
GUO Shaohua, ZHOU Shaoqing, ZOU Chunwei. Research on fracture mode of rock-type materials under compressive loading[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2008, 23(2): 149-156.

[15] JIN Tao, YONG Yuan, LUC Taerwe. Compressive strength of self-compacting concrete during high-temperature exposure[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2010, 22(10): 1005-1011.

[16] 丁文龙,曾维特,王濡岳,等. 页岩储层构造应力场模拟与裂缝分布预测方法及应用[J]. 地学前缘,2016,23(2):63-74.
DING Wenlong, ZENG Weite, WANG Ruyue, et al. Empirical strength criterion for rock mass and its application [J]. Earth Science Frontiers, 2016,23(2):63-74.

[17] 昝月稳,俞茂宏,王思敬. 岩石非线性统一强度准则[J]. 岩石力学与工程学报,2002,21(10):1435-1441.
ZAN Yuewen, YU Maohong, WANG Sijing. Nonlinear unified strength criterion of rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2002,21(10):1435-1441.

[18] 郑安兴,罗先启. 压剪应力状态下岩石复合型断裂判据的研究[J]. 岩土力学,2015,36(7):1892-1898.
ZHENG Anxing, LUO Xianqi. Research on combined fracture criterion of rock under compression-shear stress [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015,36(7):1892-1898.

[19] 刘泉声,魏莱,刘学伟,等. 基于 Griffith 强度理论的岩石裂纹起裂经验预测方法研究[J]. 岩石力学与工程学报,2017,36 (7):1561-1569.
LIU Quansheng, WEI Lai, LIU Xuewei, et al. A revised empirical method for predicting crack initiation based on Griffith strength criterion[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017,36(7):1561-1569.

[20] TRAVIS Q B, ASCE M, MOBASHER B. Correlation of elastic modulus and permeability in concrete subjected to elevated temperatures[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2010,22(7):735-740.

Critical vapour pressure for explosive spalling of high-strength concrete based on Mohr-Coulomb criterion

KANG Yaming[1], JIA Yan[2], LUO Yucai[1], CHEN Jingbo[3]

(1. *School of Chemistry and Chemical Engineering, North Minzu University, Yinchuan* 750021, *Ningxia, China*;
2. *School of Mathematics and Information Science, North Minzu University, Yinchuan* 750021, *Ningxia, China*;
3. *Ningxia Xu Ri Zhong Li Environmental Protection Technology Co., LTD, Yinchuan* 750200, *Ningxia, China*)

Abstract: The explosive spalling probability of high-strength concrete will increase with the increase of water content, which shows that the vapour pressure is one of the main factors causing the explosive spalling, and this pressure affects the strength through changing the effective stress. To determine the effect of vapour pressure on strength quantitatively, a formula of critical vapour pressure was obtained on the basis of the principle of effective stress and Mohr-Coulomb criterion, and its logical rigor was proved from the aspect of mathematics. The main conclusions are as follows. (1) The theoretical formula has a clear physical meaning, and has a good consistency with the existing research results and the practical engineering disaster. (2) The influences of material physical properties on the crack cannot be fully considered in theoretical analyses, so the mechanical tests of concrete at extreme high temperature are the bases for determining the relevant coefficients of theory analysis. (3) Fire accidents should be investigated on the spot. Meanwhile, the destruction form and characteristics of different parts of the building should be analyzed after the fire. On the basis of these, the mechanism is clarified from the two aspects of the stress state and the ultimate failure characteristic of the component. Finally, the deficiencies were improved in theoretical analysis.

Keywords: high-strength concrete; high-temperature explosive spalling; effective stress; critical vapour pressure ; Mohr-Coulomb criterion; temperature stress

(责任编辑 张凌云)