

高温作用下混凝土热-水-力 耦合损伤分析模型*

李忠友, 刘元雪

(后勤工程学院 军事建筑工程系, 重庆 401311)

摘要: 以混合物理论为基础建立了高温作用下混凝土的热-水-力耦合损伤分析模型。将混凝土视为由固体骨架、液态水、水蒸气、干燥气体和溶解气体共5种组分构成的混合物,模型的宏观平衡方程包括各组分的质量守恒方程、整体的能量守恒方程及动量守恒方程,模型所需的状态方程及本构关系全部给出,最后给出基于4个主要参数(固体骨架位移、气压力、毛细压力和温度)的控制方程。模型考虑了混凝土在高温作用下,水分的蒸发与冷凝、胶结材料的水化及脱水、溶解气的溶解与挥发等相变过程;从材料变形破坏过程中能量耗散特征入手,基于Lemaitre应变等价性假说和能量守恒原理得到力学损伤演化方程,并考虑了高温引起的热损伤对材料力学性能及力学损伤演化规律的影响,建立了热-力耦合损伤本构模型。

关键词: 混凝土; 高温; 热-水-力; 损伤模型

中图分类号: TL942 **文献标志码:** A

DOI: 10.3879/j.issn.1000-0887.2012.04.006

引 言

近年来,欧洲发生的几场严重的隧道火灾事故(如 Mont Blanc, Tauern, St. Gotthard 等)表明,一旦发生火灾,大火除了对隧道内的人员造成巨大伤害外,还会由于高温破坏洞室结构,降低衬砌的承载力和隧道的稳定性,甚至诱发坍塌破坏^[1-3]。隧道火灾的危害与混凝土的高温力学性能密切相关。混凝土在高温作用下,热传导过程、流体的流动过程和力学过程之间存在复杂的交叉影响作用,对材料的内部结构及力学性能有很大影响^[4-5]。因而为考虑火灾等高温作用对隧道承载力及稳定性的影响,有必要对高温作用下混凝土的热-水-力耦合行为进行分析。

隧道火灾具有升温速度快,持续时间长等特点,高温不但会引起衬砌结构的强度劣化,有时甚至会导致爆裂现象的发生。混凝土的爆裂是影响隧道结构稳定性的重要因素^[5],但当前对混凝土爆裂的机理还没有统一的认识。一般认为混凝土的爆裂与高温引起的热膨胀及高孔压有关^[6-8],因而仅仅考虑热-力耦合无法反映上述现象的发生。近年来,由于隧道火灾事故的频发,为了研究混凝土的高温性能和爆裂行为,部分学者提出了热-水-力耦合模型^[9-15]。

混凝土是由水泥等胶结材料和砂石等骨料,加水并掺入适量外加剂和掺合料拌制而成的

* 收稿日期: 2011-04-13; 修订日期: 2011-12-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50979112)

作者简介: 李忠友(1983—),男,辽宁阜新人,博士生(E-mail: lizhongyou0726@sina.com);

刘元雪(1969—),男,教授,博士生导师(联系人, E-mail: lyuanxew@vip.sina.com)。

结构材料,被公认是一种孔隙尺寸细小,包含固相、液相和气相的非饱和多孔多相介质和吸湿材料^[16]。其中固相由稳定的骨料、胶结材料组成;液相由液态水(包括结合水和毛细水)和溶解气组成;气相由干燥空气、水蒸气组成。当混凝土受到火灾等剧烈高温作用时,各相及各相之间会发生一系列物理化学变化,对孔压的变化、物质的迁移和温度的传播等现象具有重要的影响。

孔隙中水的蒸发与冷凝是影响混凝土中温度传播及爆裂现象发生的重要因素。一方面,混凝土在高温作用下,孔隙中的水由于蒸发效应,由液态水转变为水蒸气,吸收大量的热,限制了混凝土温度的迅速升高;另一方面,高温引起部分水蒸气向混凝土内部移动,不断降低的温度又使水蒸气凝结形成饱和水层阻止水蒸气的迁移,即所谓的热阻现象^[17],此时由于混凝土的低渗透率和饱和水层限制,孔隙中的气压迅速增高,进而诱发混凝土的爆裂^[7,18]。

混凝土的水化和脱水反应是混凝土在高温作用下的一种特殊相变过程。混凝土在温度小于95℃时会发生水化反应,形成硅酸盐凝胶,是混凝土微观结构的组成部分。当混凝土所受温度超过110℃时,脱水反应将逐渐开始,混凝土中的结晶水在持续高温作用下将不断析出^[19]。在混凝土发生脱水反应的过程中,将会吸收大量的热,影响混凝土的水-热状态;另外大量的脱水将引起混凝土微观结构下孔隙度的增大,使混凝土的弹性模量和强度显著降低,这也是混凝土高温损伤的一种主要形式^[6]。

混凝土中的空气(不包括水蒸气)可以分为两部分,即存在于气相中的干燥气体和存在于水中的溶解气体。当温度和压力变化时,溶解气的溶解与挥发就会发生,这个过程十分复杂,对孔隙气体的压力有着重要的影响。许多研究表明,非饱和多孔介质中空气的流动主要受两方面控制,即由压力梯度引起的对流和溶解气随孔隙水的流动^[20]。

本文在 Gawin 等^[5,10-11]和 Li 等^[13]的研究基础上提出了一个高温作用下的混凝土热-水-力耦合损伤模型。模型中不仅考虑了混凝土在高温作用下,水份的蒸发与冷凝,胶结材料的水化及脱水等相变过程,而且结合混凝土在高温作用下处于非饱和状态,进一步考虑了溶解气的溶解与挥发过程。另外,温度荷载与力学荷载都会引起混凝土的结构损伤,一般将二者引起的损伤定义为热损伤和力学损伤^[11,21],本文在此基础上从材料变形破坏过程中能量耗散特征入手,基于 Lemaitre 应变等价性假说和能量守恒原理得到力学损伤演化方程,并抛弃了二者引起的材料劣化过程是相互独立的假设,考虑高温引起的热损伤对材料力学性能及力学损伤演化规律的影响,建立了混凝土热-力耦合损伤模型。模型的控制方程选用了以下4个状态变量为未知量^[10]:固体框架的位移矢量 \mathbf{u} ,气压力 p_g ,毛细压力 p_c 和温度 T 。

混凝土内部的组成及物理化学变化复杂,为简化问题,特作如下基本说明:① 在传热过程中,满足热力学局部平衡;② 孔隙流体(气体和液体)视为理想流体,且水、气各自连通、流动缓慢;③ 液态水与水蒸气之间存在相变(蒸发与冷凝)过程;④ 结晶水与孔隙水之间存在相变(水化与脱水)过程;⑤ 溶解气与液态水之间存在相变(溶解与挥发)过程。

1 宏观平衡方程

整个模型的宏观平衡包含各组分(固体骨架、液态水、水蒸气、干燥气体和溶解气)质量守恒方程、能量热量守恒方程和动量守恒方程。

1.1 质量守恒方程

混凝土单元体内固相的质量可以写为

$$M_s = \int_V (1 - n) \rho_s dV, \quad (1)$$

式中, n 为孔隙率; ρ_s 为混凝土中固相的密度.

考虑到混凝土在高温作用下发生的水化和脱水等相变过程会引起的固相质量变化, 根据质量守恒定律及体积分的物质导数公式, 有^[22]

$$\frac{DM_s}{Dt} = \frac{D}{Dt} \int_V (1 - n) \rho_s dV = \int_V \left\{ \frac{\partial [(1 - n) \rho_s]}{\partial t} + \nabla \cdot [(1 - n) \rho_s \mathbf{v}_s] \right\} dV = \int_V \dot{m}_s dV, \quad (2)$$

式中, \dot{m}_s 为相变引起的固相质量改变率; \mathbf{v}_s 为固相的速度, 在本文中物质导数定义为

$$\frac{D(*)}{Dt} = \frac{\partial(*)}{\partial t} + \nabla(*)^T \mathbf{v}, \quad \mathbf{v} = \dot{\mathbf{u}} = \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t}, \quad (3)$$

由式(2)可以得到

$$\frac{D[(1 - n) \rho_s]}{Dt} + (1 - n) \rho_s (\nabla \cdot \mathbf{v}) + \nabla \cdot [(1 - n) \rho_s (\mathbf{v}_s - \mathbf{v})] = \dot{m}_s, \quad (4)$$

式中, \mathbf{v} 为混凝土整体的速度.

同理可得, 混凝土孔隙内气体和液体的质量守恒方程为

$$\frac{D(nS_l \rho_l)}{Dt} + nS_l \rho_l (\nabla \cdot \mathbf{v}) + \nabla \cdot [nS_l \rho_l (\mathbf{v}_l - \mathbf{v})] = \dot{m}_l, \quad (5)$$

$$\frac{D(nS_g \rho_g)}{Dt} + nS_g \rho_g (\nabla \cdot \mathbf{v}) + \nabla \cdot [nS_g \rho_g (\mathbf{v}_g - \mathbf{v})] = \dot{m}_g, \quad (6)$$

式中, S_l , ρ_l , \dot{m}_l 和 S_g , ρ_g , \dot{m}_g 分别为孔隙中液体及气体的饱和度、密度和质量改变率.

对式(4)~(6)进行整理, 可以得到混凝土中各相的表观质量守恒方程一般形式为

$$\frac{D\rho^\pi}{Dt} + \rho^\pi (\nabla \cdot \mathbf{v}) + \nabla \cdot (\rho^\pi \mathbf{w}_\pi) = \dot{m}_\pi, \quad (7)$$

式中, $\mathbf{w}_\pi = \mathbf{v}_\pi - \mathbf{v}$ 为各相的相对速度; \dot{m}_π 为相变引起的质量改变率; $\rho^\pi = \phi_\pi \rho_\pi$ 为表观密度; ρ_π 为真实密度; ϕ_π 为体积分数, 各相的体积分数分别为

$$\phi_s = 1 - n, \quad \phi_w = nS, \quad \phi_v = \phi_a = \phi_g = n(1 - S), \quad \phi_{aw} = \eta nS, \quad (8)$$

式中, 脚标 π 取 s, w, v, a, g, aw, 分别代表混凝土中的固相、液态水、水蒸气、干燥气体、气相及溶解气; n, S 分别为土的孔隙率与饱和度, η 为溶解气的体积可溶性系数.

根据式(7)和(8), 混凝土固相的质量守恒方程可以写为

$$\frac{1 - n}{\rho_s} \frac{D\rho_s}{Dt} - \frac{Dn}{Dt} + (1 - n) \nabla \cdot \mathbf{v} = - \frac{\dot{m}_h}{\rho_s}, \quad (9)$$

式中, \dot{m}_h 为脱水过程引起的固相质量丧失率.

同理可得, 液态水(包括自由水和结合水)的质量守恒方程可以写为

$$\frac{Dn}{Dt} + \frac{n}{S} \frac{DS}{Dt} + \frac{n}{\rho_w} \frac{D\rho_w}{Dt} + n(\nabla \cdot \mathbf{v}) + \frac{\nabla \cdot (nS\rho_w \mathbf{w}_w)}{S\rho_w} = \frac{\dot{m}_h - \dot{m}_v}{S\rho_w}, \quad (10)$$

式中, \dot{m}_v 表示水份蒸发引起的液相质量丧失率. 结合式(9), 消去 Dn/Dt 可以得到

$$\frac{1 - n}{\rho_s} \frac{D\rho_s}{Dt} + \frac{n}{\rho_w} \frac{D\rho_w}{Dt} + \frac{n}{S} \frac{DS}{Dt} + \frac{\nabla \cdot (nS\rho_w \mathbf{v}_w)}{S\rho_w} + \nabla \cdot \mathbf{v} = \frac{\dot{m}_h - \dot{m}_v}{S\rho_w} - \frac{\dot{m}_h}{\rho_s}. \quad (11)$$

按照上述方法, 水蒸气、干燥气体和溶解气体的质量守恒方程可以写为

$$\frac{1 - n}{\rho_s} \frac{D\rho_s}{Dt} + \frac{n}{\rho_v} \frac{D\rho_v}{Dt} - \frac{n}{1 - S} \frac{DS}{Dt} +$$

$$\frac{\nabla \cdot [n(1-S)\rho_v \mathbf{w}_g + \mathbf{J}_g^v]}{(1-S)\rho_v} + \nabla \cdot \mathbf{v} = \frac{\dot{m}_v}{(1-S)\rho_v} - \frac{\dot{m}_h}{\rho_s}, \quad (12)$$

$$\frac{1-n}{\rho_s} \frac{D\rho_s}{Dt} + \frac{n}{\rho_a} \frac{D\rho_a}{Dt} - \frac{n}{1-S} \frac{DS}{Dt} + \frac{\nabla \cdot [n(1-S)\rho_a \mathbf{w}_g + \mathbf{J}_g^a]}{(1-S)\rho_a} + \nabla \cdot \mathbf{v} = -\frac{\dot{m}_d}{(1-S)\rho_a} - \frac{\dot{m}_h}{\rho_s}, \quad (13)$$

$$\frac{1-n}{\rho_s} \frac{D\rho_s}{Dt} + \frac{n}{\rho_{aw}} \frac{D\rho_{aw}}{Dt} + \frac{n}{S} \frac{DS}{Dt} + \frac{\nabla \cdot (\eta n S \rho_{aw} \mathbf{w}_w + \mathbf{J}_w^{aw})}{\eta S \rho_{aw}} + \nabla \cdot \mathbf{v} = \frac{\dot{m}_d}{\eta S \rho_{aw}} - \frac{\dot{m}_h}{\rho_s}, \quad (14)$$

式中, \dot{m}_d 表示气体溶解引起的干燥气体质量变化率, \mathbf{J}_g^v 和 \mathbf{J}_g^a 分别表示水蒸气和干燥气体在混合气相中的扩散流量, 定义为

$$\mathbf{J}_g^v = n(1-S)\rho_v(\mathbf{v}_v - \mathbf{v}_g), \quad (15)$$

$$\mathbf{J}_g^a = n(1-S)\rho_a(\mathbf{v}_a - \mathbf{v}_g), \quad (16)$$

式中, \mathbf{J}_w^{aw} 表示溶解气在液相中的扩散流量, 定义为

$$\mathbf{J}_w^{aw} = n(1-S)\rho_{aw}(\mathbf{v}_{aw} - \mathbf{v}_w). \quad (17)$$

1.2 能量守恒方程

在不考虑应力做功与扩散阻力做功所产生的热效应后, 混凝土中各相表观能量守恒方程的一般形式为^[22]

$$(\rho^\pi C_p^\pi) \frac{DT_\pi}{Dt} = \rho^\pi h_\pi - \nabla \cdot \mathbf{q}_\pi + \rho^\pi R_H^\pi - H^\pi \dot{m}_\pi, \quad (18)$$

式中, C_p^π 为比定压热容; $\rho^\pi h_\pi$ 为分布内热源(如反应热等)对 π 相的热量供给量; \mathbf{q}_π 为热流密度矢量; $\rho^\pi R_H^\pi$ 为与其它相之间的能量交换; H^π 为物质比焓。

混凝土在高温作用下, 可以忽略内热源 $\rho^\pi h_\pi$ 的作用^[11], 假设混凝土各相在任何局部点处于热动力平衡状态, 即认为土中各组分的温度是相同的 ($T_\pi = T$), 因而只存在 1 个独立的能量守恒方程。将式(18)中各相表观能量守恒方程累加, 并考虑到

$$\frac{DT_\pi}{Dt} = \frac{\partial T_\pi}{\partial t} + (\nabla \cdot T_\pi) \cdot \mathbf{v}_\pi = \frac{\partial T}{\partial t} + (\nabla \cdot T) \cdot \mathbf{v} + (\nabla \cdot T) \cdot \mathbf{w}_\pi = \frac{DT}{Dt} + (\nabla \cdot T) \cdot \mathbf{w}_\pi, \quad (19)$$

$$\sum \rho^\pi R_H^\pi = 0, \quad (20)$$

不计体积分布热源供热量时, 有

$$\left[\sum (\rho^\pi C_p^\pi) \right] \frac{DT}{Dt} + \left[\sum (\rho^\pi C_p^\pi \mathbf{w}_\pi) \right] \cdot \nabla T + \nabla \cdot \left[\sum (\mathbf{q}_\pi) \right] = -\Delta H_v \dot{m}_v - \Delta H_h \dot{m}_h - \Delta H_d \dot{m}_d, \quad (21)$$

式中, ΔH_v , ΔH_h 和 ΔH_d 分别为蒸发焓、脱水焓和气的溶解焓。

1.3 动量守恒方程

不考虑惯性力的作用, 混凝土各相表观线动量守恒方程的一般形式为^[23]

$$\nabla \cdot \boldsymbol{\sigma}_\pi + \rho^\pi \mathbf{g} + \hat{\mathbf{p}}_\pi = 0, \quad (22)$$

式中, $\boldsymbol{\sigma}_\pi$ 为各相应力张量; \mathbf{g} 为单位质量体力(本文中即为重力加速度), $\hat{\mathbf{p}}_\pi$ 流动时所受的扩散阻力。考虑到 $\sum \hat{\mathbf{p}}_\pi = 0$, 对各相表观线动量守恒方程进行求和, 可以得到

$$\nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} + \rho \mathbf{g} = 0, \quad (23)$$

式中, $\boldsymbol{\sigma} = \boldsymbol{\sigma}' - \alpha p_s \mathbf{I}$ 为总应力张量; $\boldsymbol{\sigma}'$ 为 Bishop 应力; $\alpha = 1 - K_l/K_s$ 为 Biot 常数; K_l 和 K_s 分别表示混凝土固相和骨架的体积模量; $\rho = \sum \phi_\pi \rho_\pi$ 为多孔介质的平均密度。

2 状态方程及本构关系

2.1 热动力平衡关系

毛细压力可以反映孔隙水与孔隙混合气体之间的相互作用^[24]。当孔隙介质温度 $T < T_{cr}$ ($T_{cr} = 647.3 \text{ K}$ 为水的临界温度) 以及 $S > S_{ssp}$ (S_{ssp} 为固相饱和点, 当 $S > S_{ssp}$ 时存在毛细水, 当 $S < S_{ssp}$ 时仅存在吸附在固体表面的结合水) 时, 毛细压力定义为

$$p_c = p_g - p_w, \quad (24)$$

式中, p_g 为混合气体的压力, 由分压定律可知, $p_g = p_a + p_v$; p_a 为干燥气压力; p_v 为水蒸气压力; p_w 为孔隙水压力。利用 Kelvin 方程可以得到 p_c 与 p_v 之间的关系式^[25]:

$$p_c = -\frac{RTp_w}{M_w} \ln\left(\frac{p_v}{p_{vs}}\right), \quad (25)$$

式中, p_{vs} 为标准大气压下自由水面上方的饱和蒸汽压, Hyland 等^[26] 给出了以下经验公式:

$$p_{vs} = \exp\left[\sum_{i=0}^4 a_i T^{i-1} + a_5 \ln T\right], \quad (26)$$

式中, a_i ($i = 1, 2, \dots, 5$) 为常系数, 当 $T \geq T_{cr}$ 时, $p_{vs} = p_{cr} = 22.09 \text{ MPa}$ 。

当 $T \geq T_{cr}$, $S < S_{ssp}$ 时, 式(26) 不再成立, 需要用水的势函数 Ψ_c 来描述结合水和水蒸气之间的热动力平衡状态^[11]:

$$\Psi_c = \frac{RT}{M_w} \ln\left(\frac{p_v}{f_{vs}}\right), \quad (27)$$

式中, R 为通用气体常数; T 为绝对温度; M_w 为水分子的克分子量; f_{vs} 为结合水表面水蒸气逸度。当 $T < T_{cr}$, $S < S_{ssp}$ 时, 水的势函数 Ψ_c 中的 f_{vs} 要用饱和蒸汽压 p_{vs} 代替。由于毛细水压力公式及水的势函数 Ψ_c 公式之间的相似性, 并且使用范围不相互重合, 因而为简化计算, 可以用 p_c 表示 Ψ_c , 即

$$p_c = -\rho_w \Psi_c. \quad (28)$$

饱和度与毛细压力之间的关系滞回曲线可以由实验得到, 本文定义其表达式为

$$S = S(p_c, T). \quad (29)$$

2.2 密度本构方程

在高温条件下, 固相的密度与温度、压缩性、体积应变率有关, 当考虑到固相脱水对密度的影响时, 其表达式为^[11]

$$\rho_s = \rho_s(p_s, \text{tr} \boldsymbol{\sigma}', T, \Gamma_h), \quad (30)$$

式中, Γ_h 表示脱水度; $\text{tr} \boldsymbol{\sigma}'$ 为等效应力第一不变量; p_s 为作用于固体骨架的孔隙混合流体压力^[27]:

$$p_s = p_w S + p_g (1 - S), \quad (31)$$

因而固相的密度变化可以表示为

$$\frac{D\rho_s}{\rho_s Dt} = \frac{Dp_s}{K_s Dt} + \frac{D \text{tr} \boldsymbol{\sigma}'}{3(n-1)K_s Dt} - \beta_s \frac{DT}{Dt} + \frac{1}{\rho_s} \frac{D\rho_s}{D\Gamma_h} \frac{D\Gamma_h}{Dt}, \quad (32)$$

其中

$$\frac{1}{\rho_s} \frac{\partial \rho_s}{\partial p_s} = \frac{1}{K_s}, \quad \frac{1}{\rho_s} \frac{\partial \rho_s}{\partial \text{tr} \boldsymbol{\sigma}'} = \frac{1}{3(n-1)K_s}, \quad \frac{1}{\rho_s} \frac{\partial \rho_s}{\partial T} = -\beta_s. \quad (33)$$

等效应力第一不变量的变化率可以表示为^[23]

$$\frac{D \text{tr} \boldsymbol{\sigma}'}{Dt} = 3K_t \left(\nabla \cdot \mathbf{v}_s + \frac{Dp_s}{K_s Dt} - \beta_s \dot{T} \right). \quad (34)$$

将式(34)代入固相的密度变化方程(32), 有

$$\frac{D\rho_s}{\rho_s Dt} = \frac{\alpha - n}{1 - n} \frac{Dp_s}{K_s Dt} - \frac{1 - \alpha}{1 - n} \nabla \cdot \mathbf{v} - \frac{\alpha - n}{1 - n} \beta_s \dot{T} + \frac{1}{\rho_s} \frac{\partial \rho_s}{\partial \Gamma_h} \frac{\partial \Gamma_h}{\partial t}, \quad (35)$$

式中, $\alpha = 1 - K_t/K_s$ 为 Biot 常数, K_s 和 K_t 分别表示混凝土固相和骨架的体积模量.

将式(35)固相质量守恒方程(9), 可以得到

$$\frac{Dn}{Dt} = (\alpha - n) \left(\frac{Dp_s}{K_s Dt} - \beta_s \dot{T} + \nabla \cdot \mathbf{v} \right) + \frac{1}{\rho_s} \left[(1 - n) \frac{\partial \rho_s}{\partial \Gamma_h} \frac{\partial \Gamma_h}{\partial t} + \dot{m}_h \right], \quad (36)$$

当温度 $T \geq T_{h0}$ ($T_{h0} = 393.15$ K) 时, 混凝土的质量改变率 \dot{m}_h 与温度的增长率成比例关系^[28]:

$$\dot{m}_h = \frac{\partial m_h}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial t} = A_h \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (37)$$

式中, $A_h = -(0.04 - 0.08) \text{ kg/m}^3 \cdot \text{K}$ 为脱水系数.

根据式(37), 混凝土的脱水度可以写为

$$\Gamma_h = -\frac{A_h}{m_{h0}} (T - T_{h0}), \quad (38)$$

式中, m_{h0} 为初始结晶水的质量.

在发生脱水后, 单位体积混凝土的固相质量为

$$(1 - n)\rho_s = (1 - n_0)\rho_{s0} - \Gamma_h m_{h0}, \quad (39)$$

式中, n_0 为初始孔隙率; ρ_{s0} 为初始固相密度.

脱水过程可以引起孔隙度的改变, 根据实验数据, 混凝土孔隙率随温度的变化的拟合表达式为^[29]

$$n = n_0 + A_\phi (T - T_n), \quad (40)$$

式中, A_ϕ 为混凝土类型相关参数; $T_n = 273.15$ K 为参考温度.

结合式(38)和(39), 可以得到

$$\frac{\partial [(1 - n)\rho_s]}{\partial T} = \frac{\partial [(1 - n_0)\rho_{s0} - \Gamma_h m_{h0}]}{\partial T} = -\frac{\partial \Gamma_h}{\partial T} m_{h0} = A_h. \quad (41)$$

在不考虑混凝土的孔隙压力和应力荷载的作用时, 存在以下关系式:

$$\frac{\partial [(1 - n)\rho_s]}{\partial T} = -\frac{\partial n}{\partial T} \rho_s + (1 - n) \frac{\partial \rho_s}{\partial T}, \quad \frac{\partial \rho_s}{\partial T} = \frac{\partial \rho_s}{\partial \Gamma_h} \frac{\partial \Gamma_h}{\partial T}, \quad \frac{\partial n}{\partial T} = -A_n, \quad (42)$$

结合式(41)和(42)可以得到

$$\frac{\partial \rho_s}{\partial \Gamma_h} \frac{\partial \Gamma_h}{\partial T} = \frac{A_h + A_n \rho_s}{1 - n}. \quad (43)$$

根据式(35), 式(36), 式(40)和式(43)可以得到混凝土的密度及孔隙率公式为

$$\rho_s = \frac{\exp(-\Delta \varepsilon_{ii})(1 - n_0)\rho_{s0}}{1 - \alpha + (\alpha - n_0) \exp[-(\Delta p_s/K_s - \beta_s \Delta T + \Delta \varepsilon_{ii})]} - \frac{A_h H_h(\Delta T) + A_\phi \Delta T \rho_{s0}}{1 - n_0 + A_\phi \Delta T}, \quad (44)$$

$$n = \alpha - (\alpha - n_0) \exp[-(\Delta p_s / K_s - \beta_s \Delta T + \Delta \varepsilon_{ii})] + A_\phi \Delta T, \quad (45)$$

式中, $H_n(\Delta T) = H_n(T - T_{h_0})$ 为 Heaviside 函数。

当温度接近临界温度 ($T_{cr} = 647.3 \text{ K}$) 时, 水的密度与温度之间的具有强非线性关系, 对混凝土高温作用下水-热现象有显著的影响^[11]。Furbish 根据实验给出如下拟合表达式^[30]:

$$\rho_w = \sum_{i=0}^5 b_i T^i + (p_{wl} - p_{wr}) \sum_{i=0}^5 c_i T^i, \quad (46)$$

式中, b_i 和 c_i 为常系数, $p_{wl} = 10 \text{ MPa}$, $p_{wr} = 20 \text{ MPa}$ 。

水蒸气、干燥气体和混合气体的密度均可由理想气体状态方程求得

$$\rho_v = \frac{p_v M_v}{RT}, \quad \rho_a = \frac{p_a M_a}{RT}, \quad \rho_g = \frac{p_g M_g}{RT}, \quad (47)$$

式中, $p_g = p_v + p_a$ 。

由于满足热力学局部平衡, 且认为孔隙气体为理想气体, 因而干燥气体和溶解气体的热力学参量完全相同^[31]:

$$\rho_a = \rho_{aw}, \quad P_a = P_{aw}. \quad (48)$$

2.3 流体的渗流本构方程

混凝土中的孔隙结构复杂, 包括凝胶孔洞、裂纹等尺寸不同形状各异连通或不连通的孔隙, 但在宏观层面上, 仍可采用 Darcy 定律, 孔隙流体(液态水和混合气体)的流动与流体的压力梯度、温度梯度有关, 其表达式分别为^[32]

$$n S w_w = - \frac{k_{rw} \mathbf{k}}{\mu_w} [\nabla p_w - \rho_w \mathbf{g}] - \mathbf{k}_{wT} \nabla T, \quad (49)$$

$$n(1 - S) w_g = - \frac{k_{rg} \mathbf{k}}{\mu_g} \nabla p_g - \mathbf{k}_{gT} \nabla T, \quad (50)$$

式中, \mathbf{k} 为固有渗透率张量, 对于各向同性多孔介质有 $\mathbf{k} = k \mathbf{I}$, \mathbf{I} 为单位矩阵; k_{rw} 和 k_{rg} 分别为液态水和混合气体相对渗透率系数; \mathbf{k}_{wT} 和 \mathbf{k}_{gT} 分别为温度梯度引起的液态水和混合气体渗透率系数; μ_w 和 μ_g 分别为液态水和混合气体动态粘滞系数。

通常假设固有渗透率系数为温度、压力、孔隙率的函数^[10-11, 13], 但这些量并不是直接影响着固有渗透系数的变化。对于多孔介质, 孔隙度是一个非常重要的参数, 可以反映材料其它力学性能的变化, 更可以直接影响固有渗透系数的变化。本文定义固有渗透系数为孔隙度的函数, 其表达式如下:

$$k = k_0 \cdot (n/n_0)^{A_n}, \quad (51)$$

式中, k_0 为初始孔隙率 n_0 时的渗透率系数; A_n 为混凝土类型参数。

液态水和混合气的相对渗透率系数为^[33]

$$k_{rw} = \left(\frac{S - S_{ir}}{1 - S_{ir}} \right)^{A_w}, \quad S > S_{ir}, \quad (52)$$

$$k_{rg} = 1 - \left(\frac{S}{S_{cr}} \right)^{A_g}, \quad S < S_{cr}, \quad (53)$$

式中, S_{ir} 为不可约减饱和度(小于此值, 孔隙中将没有液体流动); S_{cr} 为临界饱和度(超过此值, 孔隙中将不存在气体流动); A_w, A_g 为常数, 通常取值在 $[1, 3]$ 之间^[10, 33]。

将温度梯度引起的渗透率系数 \mathbf{k}_{wT} 和 \mathbf{k}_{gT} 看作是饱和度的线性函数, 可以表示为^[32]

$$\mathbf{k}_{wT} = \tilde{S} \tilde{k}_{wT} \mathbf{I}, \quad (54)$$

$$\mathbf{k}_{gT} = (1 - S) \tilde{k}_{gT} \mathbf{I}, \quad (55)$$

式中, \tilde{k}_{wT} 和 \tilde{k}_{gT} 分别为 $S = 1, 0$ 时温度梯度引起的渗透率系数。

动态粘滞系数 μ_w 和 μ_g 可以采用如下表达式^[32]:

$$\mu_w = 0.6612(T - 229)^{-1.562}, \quad (56)$$

$$\mu_g = \mu_0 \frac{411.15}{T + 120} \left(\frac{T}{291.15} \right)^{1.5}, \quad (57)$$

式中, $\mu_0 = 1.827 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 。

2.4 流体各组分的扩散方程

混凝土中的孔隙流体(液相和气相)可以看作是理想流体,因而水蒸气和干燥气体在混合气体中的扩散满足 Fick 定律:

$$\mathbf{J}_g^a = -\rho_g \frac{M_a M_v}{M_g^2} \mathbf{D}_\rho \nabla \left(\frac{p_a}{p_g} \right) - \mathbf{D}_T^a \nabla T, \quad (58)$$

$$\mathbf{J}_g^v = -\rho_g \frac{M_a M_v}{M_g^2} \mathbf{D}_\rho \nabla \left(\frac{p_v}{p_g} \right) - \mathbf{D}_T^v \nabla T. \quad (59)$$

结合式(15)和(16)及关系式 $\rho_g = \rho_a + \rho_v$, 根据质量守恒定律,有

$$\mathbf{J}_g^a = -\mathbf{J}_g^v. \quad (60)$$

根据式(58)~(60)及关系式 $p_g = p_a + p_v$, 可以得到以下关系:

$$\mathbf{D}_T^a = -\mathbf{D}_T^v. \quad (61)$$

式(58)和(59)中的等效扩散系数可以写为^[10]

$$\mathbf{D}_\rho = n(1 - S)^{A_v} f_s D_{\rho 0} \left(\frac{T}{T_0} \right)^{B_v} \frac{p_0}{p_g} \mathbf{I}, \quad (62)$$

其中, $A_v = 1$, $B_v = 1.667$, $f_s = 0.01$, $D_{\rho 0} = 0.258 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ 。

干燥气体在液相中的扩散与密度梯度及温度梯度有关,可以表示为

$$\mathbf{J}_w^{\text{aw}} = -\mathbf{D}_h \nabla \rho_{\text{aw}} - \mathbf{D}_T^{\text{aw}} \nabla T, \quad (63)$$

其中, \mathbf{D}_h 和 \mathbf{D}_T^{aw} 分别为与溶解气密度梯度和温度梯度相关的参数张量。

2.5 热传导本构方程

混凝土整体的热传导本构方程可以利用 Fourier 热传导定律加以描述:

$$\mathbf{q} = \sum \mathbf{q}_\pi = \sum (-\lambda_\pi \nabla T). \quad (64)$$

假设在传热过程中,满足热力学局部平衡,即各相温度梯度相同,因而有

$$\mathbf{q} = - \left(\sum \lambda_\pi \right) \nabla T = -\lambda_{\text{eff}} \nabla T, \quad (65)$$

式中, $\lambda_{\text{eff}} = \sum \lambda_\pi = \lambda_s + \lambda_w + \lambda_g$ 定义为等效热传导系数,与温度和孔隙饱和度有关,可以表示为^[10]

$$\lambda_{\text{eff}} = \lambda_d(T) \left[1 + \frac{4n\rho_w}{(1-n)\rho_s} \right], \quad (66)$$

式中, $\lambda_d(T)$ 为在干燥状态下的混凝土热传导系数,其表达式为^[28]

$$\lambda_d(T) = \lambda_{d0} [1 + A_\lambda (T - T_\lambda)], \quad (67)$$

式中, $\lambda_{d0} = 1.67 \text{ W/mK}$, $A_\lambda = -1.017 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$, $T_\lambda = 298.15 \text{ K}$ 。

3 混凝土热-力耦合损伤本构模型

混凝土为准脆性材料,在荷载作用下其损伤主要指内部的裂纹、孔隙等微缺陷在外荷载作用下萌生、发展和贯通,并导致材料宏观力学性能劣化的复杂过程,因而从材料细观缺陷的变化来推导损伤对宏观力学性能的影响十分困难。为此,部分学者^[34-36]从能量的角度出发,分析和描述了准脆性材料的变形破坏行为,并取得了显著的成绩。损伤的形式多样,变化各异,但它们都有一个共同的特点,即都是需要耗散能量的不可逆过程,因此从材料变形破坏过程中的能量耗散特征研究损伤对宏观力学性能的影响,建立损伤本构模型是切实可行的。

3.1 混凝土损伤耗能机理

由热力学定律可知,能量转化是物质物理过程的本质特征,物质破坏是能量驱动下的一种状态失稳现象^[36]。材料单元在力学荷载作用下,外力做功所产生的总输入能量将转化为材料内部的弹性应变能和耗散能,其中耗散能是由材料内部结构损伤及塑性流动产生的不可恢复的能量,由热力学第一定律得

$$W = U^e + \Phi^d + \Phi^p, \quad (68)$$

式中, W 为外力做功, U^e 为弹性应变能, Φ^d 为损伤耗能, Φ^p 为塑性流动耗能。将式(68)中的弹性应变能分为两部分,为与损伤和塑性流动耗能相对应,令 $U^e = U_b^e + U_p^e$, 从而得到

$$W = (U_b^e + \Phi^d) + (U_p^e + \Phi^p). \quad (69)$$

因而外力做功产生的总输入能量可以分为两部分:

$$W_b = U_b^e + \Phi^d, \quad (70)$$

$$W_p = U_p^e + \Phi^p. \quad (71)$$

上式表明,材料变形破坏过程中,外力做功产生的总输入能量由式(70)和(71)两部分共同承担。式(70)可视为脆弹性材料在变形破坏过程中的能量守恒关系,如图1所示,外力做功产生的总输入能量转化为材料内部的弹性应变能和损伤耗能。当材料完全破坏后(即损伤变量 $\omega = 1$ 时),将不再具备任何承载能力。式(71)可视为理想弹塑性材料变形破坏过程中的能量守恒关系,如图2所示,外力做功产生的总输入能量转化为材料内部的弹性应变能和塑性流动耗能。当材料屈服后,随应变的增加,材料的弹性应变能将保持不变,外力做功将全部转化为塑性流动耗能。

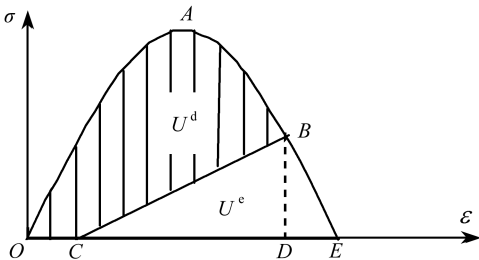


图1 脆弹性材料变形过程中的能量关系

Fig. 1 Energy relationship of elastic-brittle materials

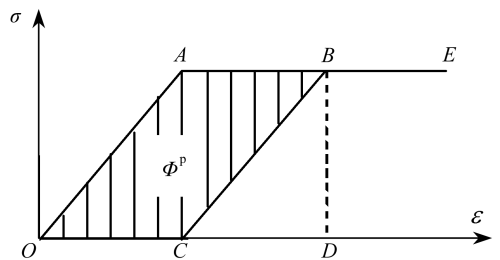


图2 理想弹塑性材料变形过程中的能量关系

Fig. 2 Energy relationship of ideal elastic-plastic materials

3.2 混凝土两组分合成模式

基于前文分析,本文提出一种可以较为直观的反映材料变形过程中的两种耗能行为的混凝土力学损伤本构模型,模型视混凝土材料为仅有损伤耗能的脆弹性部分和仅有塑性流动耗能的理想弹塑性部分共同组成,其中脆弹性部分起骨架的作用,在破坏后不再具有任何承载能

力. 根据应变协调原理, 两部分与整体之间的应力应变关系为

$$\begin{cases} \boldsymbol{\varepsilon} = \boldsymbol{\varepsilon}_b = \boldsymbol{\varepsilon}_p, \\ \boldsymbol{\sigma} = \boldsymbol{\sigma}_b + \boldsymbol{\sigma}_p. \end{cases} \quad (72)$$

值得注意的是, 混凝土在广义拉伸状态下(即以压为正时, 最小主应力 $\sigma_3 < 0$) 呈明显的脆性张拉破坏, 材料破坏后的承载力可忽略不计, 因而此时式(72)中的 $\boldsymbol{\sigma}_p = 0$, 即混凝土可以认为仅由脆弹性部分组成.

3.3 弹脆性部分热-力耦合损伤演化方程

混凝土单元中脆弹性部分在荷载作用下的能量耗散仅由损伤引起, 因而定义损伤变量为脆弹性部分在加载过程中的能量耗散量与材料完全破坏时的能量耗散量之比:

$$\omega = \Phi^d / \Omega, \quad (73)$$

其中, Ω 为材料完全破坏时内部结构单元破损所需的能量耗散量.

混凝土在不同的力学荷载作用下, 脆弹性部分的损伤破坏形态也不相同: 在单轴拉伸、双向拉压或拉伸等广义拉伸状态下, 弥散在材料内部的裂纹、孔洞等微观缺陷不断萌生、发展, 从无序分布逐渐向有序转变, 最后汇合形成垂直于受拉方向、平行于受压方向的宏观裂纹带(如图3所示), 进而导致材料呈脆性断裂破坏; 在三轴剪切等广义压缩状态下(即最小主应力 $\sigma_3 \geq 0$), 随围压的增大, 材料逐渐从脆性破坏转为延性破坏, 最后破坏过程中会形成较为明显的剪切带(如图4所示). 材料破坏形态不同, 引起的损伤耗能也不同, 因而分别定义广义拉伸和广义压缩状态下, 材料完全破坏时的能量耗散量为 Ω_t 和 Ω_c .

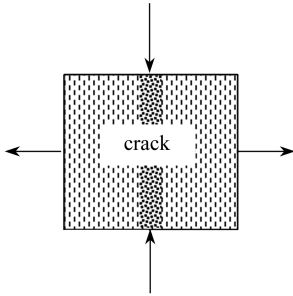


图3 广义拉伸状态下损伤示意图

Fig.3 Sketch map of damage under generalized tension loading

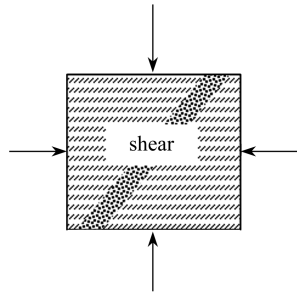


图4 广义压缩状态下损伤示意图

Fig.4 Sketch map of damage under generalized compression loading

对于脆弹性部分, 在不考虑材料损伤后的承载力时, 根据 Lemaitre 应变等价性假设^[37], 损伤后的弹性模量可以表示为

$$E_b^d = (1 - \omega) E_b, \quad (74)$$

式中, E_b, E_b^d 分别为弹脆性部分的初始弹性模量和损伤后的弹性模量.

在受荷变形过程中, 脆弹性部分承受的外力做功可以表示为

$$W_b = \sum_{i=1}^3 \int \sigma_{bi} d\varepsilon_i, \quad (75)$$

式中, $\sigma_{bi} (i = 1, 2, 3)$ 为脆弹性部分 3 个主应力方向上的主应力, $\varepsilon_i (i = 1, 2, 3)$ 为相应的主应变.

在广义拉伸状态下, 脆弹性部分损伤后的可释放弹性应变能表示为

$$U_b^e = \frac{[\sigma_{b1}^2 + \sigma_{b2}^2 + \sigma_{b3}^2 - 2\nu(\sigma_{b1}\sigma_{b2} + \sigma_{b2}\sigma_{b3} + \sigma_{b3}\sigma_{b1})]}{2(1 - \omega_t)E_b} = \frac{\bar{U}_b^e}{1 - \omega_t}, \quad (76)$$

式中, \bar{U}_b^e 为等效弹性应变能, ω_t 为广义张拉状态下的损伤变量. 将式(73)和式(75)及式(76)代入式(70), 可以得到

$$W_b = \frac{\bar{U}_b^e}{1 - \omega_t} + \omega_t \Omega_t. \quad (77)$$

考虑到损伤不能为负, 根据上式可以得到广义拉伸状态下的损伤演化方程为

$$\omega_t = \frac{\left(\sum_{i=1}^3 \int \sigma_{bi} d\varepsilon_i + \Omega_t\right) - \sqrt{\left(\sum_{i=1}^3 \int \sigma_{bi} d\varepsilon_i - \Omega_t\right)^2 + 4\Omega_t \bar{U}_b^e}}{2\Omega_t}. \quad (78)$$

在广义压缩状态下, 脆弹性部分承受的外力做功可以进一步表示为体积功和剪切功为

$$W_b = \int p_b d\varepsilon_v + \int q_b d\varepsilon_s, \quad (79)$$

式中, p_b 和 q_b 分别为脆弹性部分所受的球应力和广义剪应力; ε_v 和 ε_s 分别为体应变和广义剪应变. 相应地将式(70)中的损伤耗能也分为两部分, 体积损伤耗能 Φ_v^d 和剪切损伤耗能 Φ_s^d , 考虑到球应力作用下的压碎破坏较为困难, 因而可假设 $\Phi_v^d = 0$, 即式(70)可以表示为

$$\int q_b d\varepsilon_s = q_b^2 / (6G_b^d) + \Phi_s^d, \quad (80)$$

式中, $G_b^d = (1 - \omega)G_b$ 为脆弹性部分损伤后的剪切模量.

同理, 考虑到损伤不能为负, 根据上式可以得到广义压缩状态下的损伤演化方程为

$$\omega_c = \frac{\left(\int q_b d\varepsilon_s + \Omega_c\right) - \sqrt{\left(\int q_b d\varepsilon_s - \Omega_c\right)^2 + 2\Omega_c q_b^2 / (3G_b)}}{2\Omega_c}. \quad (81)$$

岩石、混凝土等脆性材料的三轴压缩试验表明, 材料在破坏时, 裂纹方向、数量及形状特征随围压的不同而不同, 因而剪切变形作用下材料内部结构单元剪裂所需能量耗散量 Ω_c 与围压有关, 研究表明剪切断裂能随围压呈线性规律变化^[38]:

$$\Omega_c = \Omega_c^0 + \eta \sigma_3, \quad (82)$$

式中, Ω_c^0 为单轴压缩时的材料破坏所需能量耗散量, η 为与围压有关的材料参数, 可由不同围压下的三轴压缩试验拟合求得.

高温引起的热损伤一方面会加剧材料力学性能的进一步劣化 ($\omega(T) = 1 - (1 - \omega)(1 - \Lambda)$), 另一方面, 会导致材料在力学荷载作用下损伤耗能量的变化 ($\Omega(T) = (1 - \Lambda)\Omega$), 因而考虑热损伤作用后的混凝土热-力耦合损伤演化方程可以表示为

$$\omega_t(T) = 1 - \frac{\left[(1 - \Lambda)\Omega_t - \sum_{i=1}^3 \int \sigma_{bi} d\varepsilon_i\right] + \sqrt{\left[(1 - \Lambda)\Omega_t - \sum_{i=1}^3 \int \sigma_{bi} d\varepsilon_i\right]^2 + 4\Omega_t \bar{U}_b^e}}{2\Omega_t}, \quad (83)$$

$$\omega_c(T) = 1 - \frac{\left[(1 - \Lambda)\Omega_c - \int q_b d\varepsilon_s\right] + \sqrt{\left[(1 - \Lambda)\Omega_c - \int q_b d\varepsilon_s\right]^2 + 2\Omega_c q_b^2 / (3G_b)}}{2\Omega_c}, \quad (84)$$

式中, $\Lambda = 1 - E(T)/E$ 为热损伤变量, 根据混凝土整体在不同温度下的压缩试验拟合得到.

3.4 两组分应力应变关系

由式(72)可知, 混凝土在外力作用下, 弹脆性部分和弹塑性部分分别遵循不同的应力应变关系. 对于弹脆性部分, 其损伤本构关系可以表示为

$$\boldsymbol{\sigma}_b = [1 - \omega(T)] \mathbf{D}_{e_b} \boldsymbol{\varepsilon}, \quad (85)$$

式中, \mathbf{D}_{e_b} 为脆弹性部分初始弹性刚度矩阵.

当脆性岩土材料进入残余强度时, 无结构单元破损, 外力做功将全部转化为理想塑性部分的弹性应变能和塑性流动引起的耗散能, 因而可以根据进入残余强度时的应力应变关系建立理想弹塑性模型, 残余强度即为屈服强度. 对于弹塑性部分, 考虑到热损伤的影响后, 屈服前的应力应变关系可以表示为

$$\boldsymbol{\sigma}_p = (1 - \Lambda) \mathbf{D}_{e_p} \boldsymbol{\varepsilon}, \quad (86)$$

式中, $\mathbf{D}_{e_p} = \mathbf{D}_e - \mathbf{D}_{e_b}$ 为脆弹性部分的弹性刚度矩阵, \mathbf{D}_e 为整体初始弹性刚度矩阵.

杨圣奇等^[38]给出的试验结果表明, 残余强度与围压呈线性关系, 可采用 Mohr-Coulomb 准则描述, 考虑到热损伤的影响后, 即可以表示为

$$F(T) = \sigma_{pl} - \sigma_{p3} \tan^2 \alpha' - 2(1 - \Lambda) c \tan \alpha', \quad (87)$$

式中, $\alpha' = 45^\circ + (1 - \Lambda)\varphi/2$, c , φ 分别为理想弹塑性部分的初始粘聚力和内摩擦角, 可通过进入残余强度后的试验数据回归分析求得.

4 控制方程

根据第1节给出的宏观平衡方程, 通过推导, 可以得到包含4个未知量(固体骨架位移、气压力、毛细压力和温度)的控制方程表达式. 控制方程所需的其它的物理量及其状态方程和本构方程在第2节中全部给出.

利用式(11)和(12)及式(35), 忽略 $\nabla p_s \cdot \mathbf{v}$ 和 $\nabla [S\rho_w + (1 - S)\rho_v] \cdot \mathbf{v}$ 相, 可以得到液态水和水蒸气的质量守恒方程(其中考虑了固体骨架的质量守恒)为

$$\begin{aligned} & [S\rho_w + (1 - S)\rho_v] \left\{ (\alpha - n) \left(\frac{\partial p_s}{K_s \partial t} - \beta_s \dot{T} \right) + \frac{1}{\rho_s} \left[(1 - n) \left(\frac{\partial \rho_s}{\partial \Gamma_h} \frac{\partial \Gamma_h}{\partial t} \right) + \dot{m}_h \right] \right\} - \\ & \dot{m}_h + n(\rho_w - \rho_v) \frac{\partial S}{\partial t} + nS \frac{\partial \rho_w}{\partial t} + n(1 - S) \frac{\partial \rho_v}{\partial t} + \\ & \alpha [S\rho_w + (1 - S)\rho_v] (\nabla \cdot \mathbf{v}) + \nabla \cdot (\rho^w \mathbf{w}_w + \rho^v \mathbf{w}_g + \mathbf{J}_g^v) = 0. \end{aligned} \quad (88)$$

根据式(13)和(14)及式(35), 并忽略 $\nabla p_s \cdot \mathbf{v}$ 和 $n \nabla [(\eta S + 1 - S)\rho^a] \cdot \mathbf{v}$ 相, 可以得到干燥气与溶解气质量的守恒方程为

$$\begin{aligned} & (\eta S + 1 - S)\rho_a \left\{ (\alpha - n) \left(\frac{\partial p_s}{K_s \partial t} - \beta_s \dot{T} \right) + \frac{1}{\rho_s} \left[(1 - n) \left(\frac{\partial \rho_s}{\partial \Gamma_h} \frac{\partial \Gamma_h}{\partial t} \right) + \dot{m}_h \right] \right\} + \\ & n\rho_a (\eta - 1) \frac{\partial S}{\partial t} + (\eta S + 1 - S)n \frac{\partial \rho_a}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho^{pw} \mathbf{w}_w + \mathbf{J}_w^{aw} + \rho^a \mathbf{w}_g + \mathbf{J}_g^a) + \\ & \alpha (\eta S + 1 - S)\rho_a \nabla \cdot \mathbf{v} = 0. \end{aligned} \quad (89)$$

通过式(11)和(13), 忽略 ΔH_{ad} 的影响, 能量守恒方程可以写为

$$\begin{aligned} & \left[\sum (\phi_\pi \rho_\pi C_p^\pi) \right] \frac{\partial T}{\partial t} + \left[\sum (\phi_\pi \rho_\pi C_p^\pi \mathbf{w}_\pi) \right] \cdot \nabla T - \nabla \cdot (\lambda_{\text{eff}} \nabla T) + \\ & (\Delta H_h + \Delta H_v) \dot{m}_h - \end{aligned}$$

$$\Delta H_v S \rho_w \left\{ (\alpha - n) \left(\frac{\partial p_s}{K_s \partial t} - \beta_s \dot{T} \right) + \frac{1}{\rho_s} \left[(1 - n) \left(\frac{\partial \rho_s}{\partial \Gamma_h} \frac{\partial \Gamma_h}{\partial t} \right) + \dot{m}_h \right] \right\} - \Delta H_v \left[n \rho_w \frac{\partial S}{\partial t} + n S \frac{\partial \rho_w}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_w \mathbf{w}_w) + \alpha S \rho_w (\nabla \cdot \mathbf{v}) \right] = 0. \quad (90)$$

整体动量守恒方程可以写为

$$\nabla \cdot (\boldsymbol{\sigma}' - \alpha p_s \mathbf{I}) + [(1 - n) \rho_s + n S \rho_w + n(1 - S) \rho_g] \mathbf{g} = 0. \quad (91)$$

控制方程(88) ~ (90)中质量变化率的 Euler 描述 R_g, R_w 和 R_T 分别为

$$R_w = w_1 (\nabla \cdot \mathbf{v}) + w_2 \frac{\partial p_g}{\partial t} + w_3 \frac{\partial p_c}{\partial t} + w_4 \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (92)$$

$$R_g = g_1 (\nabla \cdot \mathbf{v}) + g_2 \frac{\partial p_g}{\partial t} + g_3 \frac{\partial p_c}{\partial t} + g_4 \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (93)$$

$$R_T = t_1 (\nabla \cdot \mathbf{v}) + t_2 \frac{\partial p_g}{\partial t} + t_3 \frac{\partial p_c}{\partial t} + t_4 \frac{\partial T}{\partial t} + t_5 \nabla T. \quad (94)$$

式中所需参数见附录。

5 结 语

本文综合考虑孔隙水的蒸发与凝结、胶凝材料的水化与脱水和溶解气的溶解于挥发等相变过程,发展了一个新的混凝土高温热-水-力耦合损伤本构模型,论文主要成果有:

1) 考虑到混凝土在高温作用下,其内部处于非饱和状态,气体的溶解和传播对混凝土的物理化学变化存在一定的影响,因而合理考虑了溶解气的影响,揭示了气体与液体之间的耦合行为,完善了混凝土高温作用下的相变过程,将使混凝土高温下破坏分析更合理;

2) 固有渗透系数是得到流体渗流本构方程的基础,本文结合孔隙度的变化,新建了固有渗透系数的表达式;另外,结合混凝土高温作用下的物理化学变化过程,推导了考虑温度、压缩性、体积应变率及脱水等因素的固相密度方程;

3) 从能量耗散角度出发,推导了热-力耦合损伤演化方程,并在此基础上建立了混凝土损伤本构模型。

附 录

式(92) ~ (94)中的系数为

$$w_1 = \alpha [S \rho_w + (1 - S) \rho_v],$$

$$w_2 = (\alpha - n) [S \rho_w + (1 - S) \rho_v] / K_s,$$

$$w_3 = n(1 - S) \frac{\partial \rho_v}{\partial p_c} + n(\rho_w - \rho_v) \frac{\partial S}{\partial p_c} - w_2 \left(S + \frac{\partial S}{\partial p_c} p_c \right),$$

$$w_4 = n S \frac{\partial \rho_w}{\partial T} - w_2 K_s \beta_s - \frac{\partial m_h}{\partial T} + n(1 - S) \frac{\partial \rho_v}{\partial T} + \frac{w_1}{\alpha} \left[\frac{1 - n}{\rho_s} \frac{\partial \rho_s}{\partial \Gamma_h} \frac{\partial \Gamma_h}{\partial T} + \frac{1}{\rho_s} \frac{\partial m_h}{\partial T} \right],$$

$$g_1 = \alpha (\eta S + 1 - S) \rho_a,$$

$$g_2 = (\eta S + 1 - S) \left[n \frac{\partial \rho_a}{\partial p_g} + \frac{(\alpha - n) \rho_a}{K_s} \right],$$

$$g_3 = n(\eta - 1) \rho_a \frac{\partial S}{\partial p_c} + (\eta S + 1 - S) n \frac{\partial \rho_a}{\partial p_c} - \frac{(\eta S + 1 - S)(\alpha - n) \rho_a}{K_s} \left(S + \frac{\partial S}{\partial p_c} p_c \right),$$

$$g_4 = (\eta S + 1 - S) n \frac{\partial \rho_a}{\partial T} - \rho_a (\eta S + 1 - S) (\alpha - n) \beta_s + \frac{g_1}{\alpha} \left[\frac{(1 - n)}{\rho_s} \frac{\partial \rho_s}{\partial \Gamma_h} \frac{\partial \Gamma_h}{\partial T} + \frac{1}{\rho_s} \frac{\partial m_h}{\partial T} \right],$$

$$\begin{aligned}
t_1 &= -\alpha S \Delta H_v \rho_w, \\
t_2 &= -(\alpha - n) S \Delta H_v \rho_w / K_s, \\
t_3 &= -n \rho_w \Delta H_v \frac{\partial S}{\partial p_c} - t_2 \left(S + \frac{\partial S}{\partial p_c} p_c \right), \\
t_4 &= \left[\sum (\phi_\pi \rho_\pi C_p^\pi) \right] + (\Delta H_h + \Delta H_v) \frac{\partial m_h}{\partial T} - n S \Delta H_v \frac{\partial \rho_w}{\partial T} - t_2 K_s \beta_s - \\
&\quad \frac{t_1}{\alpha} \left[\frac{1-n}{\rho_s} \frac{\partial \rho_s}{\partial T} \frac{\partial \Gamma_h}{\partial T} + \frac{1}{\rho_s} \frac{\partial m_h}{\partial T} \right], \\
t_5 &= \sum (\phi_\pi \rho_\pi C_p^\pi w_\pi).
\end{aligned}$$

致谢 感谢后勤工程学院研究生创新基金对本文的资助。

参考文献 (References) :

- [1] Schrefler B A, Brunello P, Gawin D, Majorana C E, Pesavento F. Concrete at high temperature with application to tunnel fire[J]. *Computational Mechanics*, 2002, **29**(1): 43-51.
- [2] Guian S K. Fire and life safety provisions for a long vehicular tunnel[J]. *Tunneling and Underground Space Technology*, 2004, **19**(4/5): 316.
- [3] Christian F, Matthias A, Günter H. Numerical simulation of the load-carrying behavior of RC tunnel structures exposed to fire[J]. *Finite Elements in Analysis and Design*, 2009, **45**(12): 958-965.
- [4] Bazant Z P, Kaplan M F. *Concrete at High Temperatures: Material Properties and Mathematical Models*[M]. Longman: Harlow Press, 1996.
- [5] Gawin D, Pesavento F, Schrefler B A. Towards prediction of the thermal spalling risk through a multi-phase porous media model of concrete[J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2006, **195**(41/43): 5707-5729.
- [6] Ulm F J, Coussy O, Bazant Z P. The “Chunnel” fire— I : chemoplastic softening in rapidly heated concrete[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1999, **125**(3): 272-282.
- [7] Kalifa P, Menneveau F D, Quenard D. Spalling and pore pressure in HPC at high temperatures [J]. *Cement and Concrete Research*, 2000, **30**(12): 1915-1927.
- [8] Kodur V K R, Phan L. Critical factors governing the fire performance of high strength concrete systems[J]. *Fire Safety Journal*, 2007, **42**(6/7): 482-488.
- [9] Baggio P, Majorana C E, Schrefler B A. Thermo-hygro-mechanical analysis of concrete[J]. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 1995, **20**(6): 573-595.
- [10] Gawin D, Majorana C E, Schrefler B A. Numerical analysis of hygro-thermal behaviour and damage of concrete at high temperature [J]. *Mechanics of Cohesive-Frictional Materials*, 1999, **4**(1): 37-74.
- [11] Gawin D, Pesavento F, Schrefler B A. Modelling of hygro-thermal behaviour of concrete at high temperature with thermo-chemical and mechanical material degradation [J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2003, **192**: 1731-1771.
- [12] Tenchev R, Purnell P. An application of a damage constitutive model to concrete at high temperature and prediction of spalling[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2005, **42**(26): 6550-6565.
- [13] LI Xin-kui, LI Rong-tao, Schrefler B A. A coupled chemo-thermo-hygro-mechanical model of concrete at high temperature and failure analysis [J]. *International Journal for Numerical*

- and Analytical Methods in Geomechanics*, 2006, **30**(7): 635-681.
- [14] Bary B, Ranc G, Durand S, Carpentier O. A coupled thermo-hydro-mechanical-damage model for concrete subjected to moderate temperatures[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2008, **51**(11/12): 2847-2862.
- [15] Luzio G D, Cusatis G. Hygro-thermo-chemical modeling of high performance concrete— I : theory[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2009, **31**(5): 301-308.
- [16] Pont S D, Meftah F, Schrefler B A. Modeling concrete under severe conditions as a multi-phase material[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2011, **24**(3): 562-572.
- [17] Harmathy T Z. Effect of moisture on the fire endurance of building elements[J]. *ASTM Special Technical Publication*, 1965, **385**: 74-95.
- [18] Anderberg Y. Cracking phenomena of HPC and OC[C]//Phan L T, Carino N J, Duthinh D, Garboczi E. *Proceedings of Workshop on Fire Performance of High-Strength-Concrete*. Gaithersburg, NIST, 1997: 69-73.
- [19] Schrefler B A, Khoury G A, Gawin D, Majorana C E. Thermo-hydro-mechanical modelling of high performance concrete at high temperatures[J]. *Engineering Computations*, 2002, **19**(7): 787-819.
- [20] Thomas H R, Sansom M R. Fully coupled analysis of heat, moisture and air transfer in unsaturated soil[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1995, **121**(3): 392-405.
- [21] Nechnech W, Meftah F, Reynouard J M. An elasto-plastic damage model for plain concrete subjected to high temperature[J]. *Engineering Structures*, 2002, **24**(5): 597-611.
- [22] Bowen R M. *Theory of Mixtures*[M]. New York: Academic Press, 1976.
- [23] Lewis R W, Schrefler B A. *The Finite Element Method in the Static and Dynamic Deformation and Consolidation of Porous Media*[M]. Chichester: Wiley & Sons, 1998.
- [24] Gawin D, Schrefler B A. Thermo-hydro-mechanical analysis of partially saturated porous materials[J]. *Engineering Computations*, 1996, **13**(7): 113-143.
- [25] Gregg S J, Sing K S W. *Absorption, Surface Area and Porosity*[M]. London: Academic Press, 1982.
- [26] American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. *ASHRAE Handbook, Fundamentals* [M]. Atlanta, Unite States: American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 1993.
- [27] Gray W G, Schrefler B A. Thermo dynamic approach to effective stress in partially saturated porous media[J]. *European Journal of Mechanics - A/Solids*, 2001, **20**(4): 521-538.
- [28] Harmathy T Z, Allen W L. Thermal properties of selected masonry unit concretes[J]. *ACI Journal*, 1973, **70**: 132-142.
- [29] Schneider U, Herbst H J. Permeabilitaet und porositaet von beton bei hohen temperaturen [J]. *Deutscher Ausschuss Stahlbeton*, 1989, **403**: 23-52. (in German)
- [30] Furbish D J. *Fluid Physics in Geology: an Introduction to Fluid Motions on Earth's Surface and Within Its Crust*[M]. Oxford: Oxford University Press, 1997.
- [31] 秦冰, 陈正汉, 方振东, 孙树国, 方祥位, 王驹. 基于混合物理理论的非饱和土的热-水-力耦合分析模型[J]. *应用数学和力学*, 2010, **31**(12): 1476-1488. (QIN Bing, CHEN Zheng-han, FANG Zhen-dong, SUN Shu-guo, FANG Xiang-wei, WANG Ju. Analysis of coupled thermo-hydro-mechanical behavior of unsaturated soils based on theory of mixtures I[J]. *Applied Mathematics and Mechanics (English Edition)*, 2010, **31**(12): 1561-1576.)
- [32] CHEN Yi-feng, ZHOU Chuang-bing, JING Lan-ru. Modeling coupled THM processes of geo-

- logical porous media with multiphase flow: theory and validation against laboratory and field scale experiments[J]. *Computers and Geotechnics*, 2009, **36**(8): 1308-1329.
- [33] Bear J. *Dynamics of Fluids in Porous Media*[M]. New York: Dover Press, 1988.
- [34] Mikhalyuk A V, Zakharov V V. Dissipation of dynamic-loading energy in quasi-elastic deformation processes in rocks[J]. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 1996, **38**(2):312-318.
- [35] Stefeler E D, Epstein J S, Conley E G. Energy partitioning for a crack under remote shear and compression[J]. *International Journal of Fracture*, 2003, **120**(4): 563-580.
- [36] 谢和平, 鞠杨, 黎立云. 基于能量耗散与释放原理的岩石强度与整体破坏准则[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, **24**(17): 3003-3010. (XIE He-ping, JU Yang, LI Li-yun. Criteria for strength and structural failure of rocks based on energy dissipation and energy release principles[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, **24**(17): 3003-3010. (in Chinese))
- [37] Lemaitre J. How to use damage mechanics[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 1984, **80**(3): 233-245.
- [38] 杨圣奇, 徐卫亚, 苏承东. 大理岩三轴压缩变形破坏与能量特征研究[J]. 工程力学, 2007, **24**(1): 136-142. (YANG Sheng-qi, XU Wei-ya, SU Cheng-dong. Study on the deformation failure and energy properties of marble specimen under triaxial compression[J]. *Engineering Mechanics*, 2007, **24**(1):136-142. (in Chinese))

A Coupled Thermo-Hygro-Mechanical Damage Model for Concrete Subjected to High Temperatures

LI Zhong-you, LIU Yuan-xue

(Department of Architectural and Civil Engineering, Logistical Engineering University, Chongqing 401311, P. R. China)

Abstract: Based on theory of mixtures, a coupled thermo-hygro-mechanical damage model for concrete subjected to high temperatures was presented. Concrete was considered as a mixture composed of solid skeleton, liquid water, water vapor, dry air and dissolved air. The Macroscopic balance equations of the model consisted of the mass conservation equations of each component, the momentum and energy conservation equation of the whole medium mixture. The state equations and constitutive model used in the model were given. Four final governing equations were given in term of four primary variables, i. e. displacement components of soil skeleton, gas pressure, capillary pressure and temperature. The processes involved in the coupled model included evaporation, dehydration, heat and mass transfer, etc. Through the process of deformation failure and energy properties, mechanics damage evolution equations were established based on the principle of conversation of energy and Lemaitre equivalent strain assumption, and then the influence of thermal damage on mechanical property and mechanics damage evolution equations were considered.

Key words: concrete; high temperature; thermo-hygro-mechanical (THM); damage model