

# 冻融环境下混凝土结构耐久性研究综述

郑元勋<sup>1</sup>, 杨培冰<sup>1</sup>, 康海贵<sup>2</sup>

(1. 郑州大学 水利与环境学院, 河南 郑州 450001; 2. 大连理工大学 建设工程学部, 辽宁 大连 116023)

**摘 要:**对国内外冻融环境下混凝土结构耐久性研究现状及发展趋势进行了系统的总结及归纳,并对该领域未来研究方向进行了展望.基于对国内外文献的研读与分析,首先对冻融环境下混凝土的破坏机理、冻融试验方法和标准进行了归纳与梳理;并分别从理论研究及数值模拟方法上对非预应力混凝土结构、预应力混凝土结构耐久性研究方法进行归纳总结,同时提出增强混凝土抗冻性能的对策措施,最后分析了未来冻融环境下混凝土结构的耐久性研究趋势.研究表明:针对冻融环境作用下混凝土结构耐久性研究已取得一定的研究成果,但基于大尺寸预应力构件开展的冻融环境作用下的耐久性研究尚未见报道,应作为下一步重点研究的方向.

**关键词:**混凝土结构;耐久性;研究综述;冻融环境;破坏机理

**中图分类号:** TU 502 **文献标志码:** A **doi:**10.13705/j.issn.1671-6833.2016.05.006

## 0 引言

混凝土作为工程建设中最主要的一种建筑材料,广泛应用于房屋建筑、公路桥涵、水利大坝等结构中,混凝土材料及结构的坚固性、稳定性和可靠性直接影响着工程结构的安全性及使用寿命.在我国北方高寒地区,混凝土建筑物常常发生冻融破坏,特别是和水有接触的混凝土建筑物,所遭受的冻融破坏更加严重.遭受冻融损伤的混凝土结构耐久性会随着冻融次数的增加逐渐降低,进而导致混凝土结构使用寿命缩短,不仅造成极大的工程经济损失还会导致工程安全事故,因此,冻融环境对混凝土结构耐久性的研究逐渐引起了广大学者的重视,相关研究也在国内外得以广泛开展,笔者在广泛研读国内外相关文献的基础上,对目前冻融试验方法、标准、冻融环境下混凝土结构耐久性研究及预测评估方法、冻融环境下混凝土结构抗冻性能对策等进行了归纳总结,并对未来研究趋势进行了展望.

## 1 混凝土冻融试验方法和标准

混凝土冻融试验方法一般分 3 种:慢冻法、快

冻法和盐冻法,对应的试验条件分别为气冻水融、水冻水融和大气环境中且与盐接触.笔者简要介绍冻融循环试验中常用的慢冻法和快冻法<sup>[1]</sup>.

### 1.1 慢冻法试验条件和步骤

将养护好的尺寸为 100 mm × 100 mm × 100 mm 的混凝土试件吸水饱和,放入冻融箱进入冷冻.混凝土试件需放置在冻融箱中的试件架上,与地面保持一定距离,保证整个混凝土都受到冷冻侵蚀.冻融箱中的空气温度范围为(-20 ~ -18)℃,冷冻时间不少于 4 h.冷冻阶段结束后立刻开始融化阶段,融化阶段中试件处于完全浸水状态,水温保持在 18 ~ 20℃,融化时间不少于 4 h.融化完毕后,即完成一次冻融循环.慢冻法完成整个冻融循环较慢,模拟效果更接近现场环境下的混凝土冻融现象.

### 1.2 快冻法试验条件和步骤

采用尺寸为 100 mm × 100 mm × 400 mm 的混凝土试件,同慢冻法,快冻法的混凝土试件吸水饱和后放入规定尺寸的试件盒内,将试件盒放入冻融箱中的试件架中后加水.冷冻和融化过程中,试件中心最低温度控制在(-18 ± 2)℃,最高温度

收稿日期:2016-05-01;修订日期:2016-06-19

基金项目:中国博士后面上基金资助项目(79439);河南省交通运输厅科技攻关资助项目(2013-2-12);河南省交通运输厅科技资助项目(2014K37-2)

作者简介:郑元勋(1978—),男,河南驻马店人,郑州大学副教授,博士后,主要从事结构耐久性、结构监控、检测及加固等研究,E-mail:yxzheng@zzu.edu.cn.

控制在  $3 \sim 7\text{ }^{\circ}\text{C}$ . 每次冻融循环的时间控制在  $2 \sim 4\text{ h}$  为最佳, 融化时间应大于冻融循环时间的  $1/4$ . 快冻法可以很快得到冻融循环后的试验结果, 但相比慢冻法, 模拟效果与实际情况存在一定差异.

## 2 冻融环境下混凝土结构耐久性研究现状

冻融环境下混凝土结构耐久性的研究持续开展, 在混凝土冻融损伤破坏机理研究方面提出了诸多学说, 其中美国鲍尔斯提出的“静水压力假说”和“渗透压假说”<sup>[2-3]</sup> 最为经典. 近年来关于冻融环境对混凝土结构耐久性的影响主要集中在以下方面.

宋玉普<sup>[4]</sup> 利用 Weibull 分布及对数正态分布, 提出混凝土结构的可靠度计算公式为

$$P_r(n) = \exp\left[-\left(\frac{N-\gamma}{\eta}\right)^{\beta}\right]. \quad (1)$$

式中:  $P_r(n)$  为冻融循环次数  $n$  下的可靠度,  $N$  是冻融循环寿命;  $\gamma$  为最小寿命参数;  $\eta$  为特征寿命参数;  $\beta$  为 Weibull 形状参数.

结合三参数威布尔概率模型<sup>[5]</sup>, 根据失效概率和可靠度的关系,

$$P_f(n) + P_r(n) = 1. \quad (2)$$

$$P_f(n) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{n-r}{\eta}\right)^{\beta}\right]. \quad (3)$$

同时遵循冻融循环损伤等效的原则, 在正负峰值温度差水平进行分阶段处理的前提下, 以此类推得出  $k$  阶段正负峰值温度差冻融作用下混凝土结构的失效概率为

$$P_{fk}(n_1, n_2, n_3, \dots, n_k) = 1 - \exp\left[-\left(\left(\frac{n_1 - \gamma_1}{\eta_1}\right)^{\frac{\beta_1}{\beta_2}} + \frac{n_2}{\eta_2}\right)^{\frac{\beta_2}{\beta_3}} + \dots + \frac{n_k}{\eta_k}\right)^{\beta_k}\right]. \quad (4)$$

此方法基于宏观损伤力学理论, 提出混凝土在冻融环境下的可靠性, 同时得到失效概率公式, 可以计算不同正负峰值温度差下有限次冻融循环次数的失效概率.

唐光普<sup>[6]</sup> 认为动弹性模量在工程中不直接使用, 需要建立演化模型来实现映射. 蔡昊<sup>[7]</sup> 基于不考虑损伤局部化的修正 Loland 模型和混凝土单轴拉伸行为描述混凝土弹性模量在混凝土冻融循环中的演化规律, 在不考虑初始损伤情况下

$$\begin{cases} \bar{E} = E(1 - an), \\ a = \frac{c(\xi + 1)\sigma_{\max}^{\xi}}{E^{\xi}}, \\ b = \frac{1}{\xi + 1} \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $E$  为无损伤状态的弹性模量;  $\bar{E}$  为损伤状态的弹性模量;  $c$ 、 $\xi$  为材料参数;  $n$  为冻融循环次数;  $\sigma_{\max}$  为一个冻融循环内承受的最大平均静水压力.

应用修正 Loland 模型对三维静水作用下混凝土的损伤进行演化模拟. 并利用最大主应变等效到一维情况, 可以得到

$$\bar{K} = K\left(1 - \frac{E^{\xi}}{K^{\xi}}an\right)^b. \quad (6)$$

在各项同性弹性损伤假定下, 建立混凝土冻融损伤  $\bar{K}$  和  $\bar{E}$  的关系

$$\bar{K} = \frac{\bar{E}}{3(1 - 2\nu)}. \quad (7)$$

式(6)和式(7)中:  $K$  为混凝土初始体积模量;  $\bar{K}$  为损伤状态下的体积模量;  $\bar{\nu}$  为损伤状态下的泊松比. 根据式(6)和式(7)可导出泊松比的演化过程规律

$$\bar{\nu} = \frac{1}{2} - \frac{1 - 2\nu}{2} \left\{ \frac{1 - an}{1 - [3(1 - 2\nu)]\xi an} \right\}. \quad (8)$$

在此基础上, 唐光普根据 William-Warnke 五参数模型<sup>[8]</sup> 提出了混凝土冻融破坏模型, 逆向求出  $a$ 、 $b$ 、 $\xi$ , 目的是将动弹性模量演化映射到破坏面上来反应出强度特征的变化, 从而依据强度的变化反应冻融循环后混凝土的耐久性.

宁作君<sup>[9]</sup> 提出了能量耗散模型, 认为混凝土内部形成的微裂缝会在冻融环境中继续生长延伸, 在此过程中会消耗混凝土的内能, 降低断裂能, 可得到  $N$  次冻融循环后断裂能损失率  $\Delta D_n$  的表达式为

$$\Delta D_n = \left(1 - \frac{G_n}{G_0}\right) \times 100\%. \quad (9)$$

式中:  $G_0$  为冻融循环前试件的断裂能;  $G_n$  为  $n$  次冻融循环后试件的断裂能.

Ababneh 等<sup>[10]</sup> 提出超声波模型, 通过脉冲传播速度  $V$ 、共振频率  $f_1$  两个指标来评估混凝土的盐冻损伤. 通过结合混凝土结构失效损伤度与基

于脉冲传播速度  $V$  的动弹性模量表达式得到基于脉冲传播速度  $V$  的冻融损伤度  $D$  的表达式为

$$D = 1 - \left( \frac{V_i}{V_0} \right)^2. \tag{10}$$

式中:  $V_i$  为  $n$  次冻融循环后混凝土试件的脉冲传播速度;  $V_0$  为冻融循环前混凝土试件的脉冲传播速度.

同理可得到基于共振频率  $f_i$  的冻融损伤度  $D$  的表达式为

$$D = 1 - \left( \frac{f_i}{f_0} \right)^2. \tag{11}$$

式中:  $f_i$  为  $n$  次冻融循环后混凝土试件的共振频率;  $f_0$  为冻融循环前混凝土试件的共振频率.

吴庆令等<sup>[11]</sup>以质量损失率作为表征混凝土冻融损伤程度的变量,提出了质量损失率模型,混凝土质量损失率表达式为

$$W_1 = \frac{W_n - W_0}{W_0} \times 100\%. \tag{12}$$

式中:  $W_1$  为质量损失率;  $W_0$  为冻融循环前试件的质量;  $W_n$  为  $n$  次冻融循环后试件的质量.

吴庆令等认为质量损伤可用单段损失模式或双段损伤模型表示. 混凝土结构在经历反复冻融后,表层会发生剥落侵蚀而导致质量损失,然而李金玉<sup>[12]</sup>研究高强混凝土发现,高强混凝土在 300 多次冻融循环后,内部产生微裂缝,微裂缝随着冻融循环次数的增加逐渐扩展,但是整个混凝土结构表面并没有发生明显剥蚀,所以对高强混凝土来说,质量损失率并不能描述其冻融损伤,结论表明,质量损失率指标仅适用于表面产生明显剥落侵蚀的普通混凝土.

刘荣桂<sup>[13]</sup>依据损伤力学分析,发现预应力混凝土结构的冻融破坏是一种低周疲劳损伤,低周疲劳损伤中塑性变形的变化要比应力变化大,所以用应变表示低周疲劳

$$\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_p. \tag{13}$$

式中:  $\varepsilon_e$  为弹性应变;  $\varepsilon_p$  为塑性变形.

将每一段荷循环中的混凝土损伤表示为塑性变形  $\varepsilon_p$  的幂指数函数<sup>[14]</sup>

$$\frac{\partial D_m}{\partial n} = \left( \frac{\varepsilon_p}{C_1} \right)^{r_1}. \tag{14}$$

在弹性变形较小时,损伤演化方程可以表示为应力  $\sigma$  的函数,即

$$\frac{\partial D_m}{\partial n} = \left( \frac{\sigma}{C_2} \right)^{r_2}. \tag{15}$$

并利用  $\sigma = E\varepsilon_e$ ,得到低周疲劳的损伤模型为

$$\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_p = \frac{C_2}{E} \left( \frac{\partial D_m}{\partial n} \right)^{\frac{1}{r_2}} + C_1 \left( \frac{\partial D_m}{\partial n} \right)^{\frac{1}{r_1}}. \tag{16}$$

式中:  $C_1$ 、 $r_1$ 、 $r_2$ 、 $C_2$  是与温度相关的材料参数. 一般材料中  $C_1 = D_u^{0.6}$ ,  $C_2 = 3.5\sigma_u$ ,  $r_1 = 1.67$ ,  $r_2 = 8.33$ ,  $\sigma_u$  为强度极限应力,  $D_u$  是表示材料延性的参数,它受力时面积收缩率  $R_a$  的关系表示为:  $D_u = -\ln(1 - R_a)$ , 面积收缩率可以看似等同于应变  $\varepsilon$ <sup>[15]</sup>  $D_m$  为损伤度;  $n$  为冻融循环次数.

张峰<sup>[16]</sup>则以抗拉强度为冻融损伤的标准,以实验数据为依据,通过数值拟合的方法,得到冻融损伤度  $D$  和冻融循环次数之间的关系式,即:

$$D = 1 - f_{tsn}/f_{ts0} = 1 - (1 - 0.00296n)^{0.234}. \tag{17}$$

式中:  $f_{ts0}$  为冻融循环前试件的初始抗拉强度;  $f_{tsn}$  为经  $n$  次冻融循环后试件的抗拉强度.

Cho<sup>[17]</sup>通过应变的变化描述了混凝土冻融损伤,得到快速冻融试验结果,发现残余应变与实验结果吻合度较高,建立了两者之间极限函数,同时建立了等效塑性应变的极限状态函数,两者分别为

$$g(\cdot) = 300 - (5\,632.71 + 4\,957.77x_1 - 2\,300x_2 + 6.64x_3 - 4\,411.99x_1^2 + 163.27x_2^2 - 8.88 \times 10^2 x_3^2). \tag{18}$$

式中:数值 300 为假设的混凝土破坏时应变临界值.

$$g(\cdot) = 1.0 - (-1.403 + 1.553x_1 - 0.662x_2 + 0.000\,717x_3 + 6.798x_1^2 + 0.044\,0x_2^2 + 4.50 \times 10^6 x_3^2). \tag{19}$$

式中:数值 1.0 为假设混凝土破坏时的等效塑性应变临界值.

混凝土发生冻融破坏时,内部发生的应变很容易监测获取,所以用应变来反映混凝土的冻融损伤和寿命是非常理想的,但是杜鹏<sup>[18]</sup>认为应变作为寿命终止的极限指标值有待于确定.

于孝民等<sup>[19]</sup>通过试验,用数据拟合的方式得到混凝土断裂能与冻融循环次数的关系为

$$G_F = -0.002\,5n^2 - 0.094\,3n + 24.502. \tag{20}$$

式中:  $G_F$  为断裂能. 能量耗散因其包含了应变和强度两方面的内容,从比较广的范围内反映了混凝土的损伤情况.

张连英等<sup>[20]</sup>对冻融循环后不同强度等级的混凝土试件进行快速冻融试验,基于不同强度等

级混凝土试件的强度变化情况,并结合冻融循环条件下混凝土单轴压缩试验数据,建立了冻融循环作用下不同强度等级混凝土试块损伤演化方程

$$D = \frac{-0.48586}{1 + \exp[(n - 44.76341)/4.545]} + 0.48586. \quad (21)$$

式中:  $D$  为损伤变量;  $n$  为冻融循环次数.

### 3 提高冻融环境下混凝土结构抗冻性能对策研究

工程的安全和健康依赖于混凝土结构良好的耐久性,提高混凝土的抗冻性能一定程度上可以提高混凝土的耐久性能,增加结构的使用寿命. 诸多研究表明:只有从混凝土内部因素中的质量和构造出发,同时结合外部因素的施加和保护,才能提高混凝土的抗冻性能.

#### 3.1 降低混凝土水灰比

混凝土越密实,水就越难进入混凝土,就能减少混凝土冻融损伤. 与混凝土密实度相关的因素是混凝土内部的孔隙率,孔隙率越低,密实度越好,降低水灰比,可以一定程度上降低结构的孔隙率,进而提高混凝土的抗冻性能. 李金平<sup>[21]</sup>认为水泥品种和水灰比是影响混凝土耐久性的因素,水泥内部熟料成分越多,则表明水泥的水化产物越多,水化产物可以提高混凝土抗冻性能.

#### 3.2 选取合适混凝土品种

文献[22]认为含有自然河流骨料的混凝土具有更大的抗压强度、更大的堆积密度及更好的抗冻性能. 李金平<sup>[21]</sup>认为从提高结构耐久性角度出发,水泥选用需水量小的普通硅酸盐水泥或选用掺加高细粉煤灰的高性能水泥,同时选用高活性水泥;骨料根据孔隙率最小的原则选用合理的连续级配,严格控制含泥量.

相比于试验,李金平<sup>[21]</sup>指出实际工程中,并不是标号越高的混凝土抗冻性能越强,比如高强混凝土早期和后期易开裂的问题,更容易导致冻害侵蚀.

#### 3.3 掺入矿物或者其他物质

程宏强等<sup>[23]</sup>认为,掺加一定量的钢纤维,能够有效提高混凝土的抗冻性能,在一定范围内,随钢纤维掺量的增加,强度损伤逐渐减小.

相关研究表明,混凝土抗冻性能与其内部的孔结构、水饱和程度、受冻龄期、以及混凝土强度

因素有关,其中最主要的因素是孔结构. 段桂珍<sup>[24]</sup>认为掺入适量粉煤灰、硅粉等矿物,可以细化混凝土中的孔结构,既有利于气泡分散,又有利于抵抗冻融危害. 同时还提出引气混凝土抗冻性能优于普通混凝土是因为引气混凝土内部充满了封闭气泡,在冻融侵蚀时,能够缓冲冻融产生的压力. 混凝土含气量的多少,也影响混凝土的抗冻性,进而影响混凝土的耐久性,其中,平均气泡间隔系数<sup>[25-26]</sup>被认为是影响混凝土抗冻性能的重要因素. 曾力等人<sup>[27]</sup>也通过试验得出结论:对于掺加矿物掺合料混凝土,随着龄期的增长,混凝土的密实性提高,再结合李金平等人<sup>[21]</sup>的研究,混凝土密实性提高,抗冻性能也得到提高,从而证实矿物掺合料对混凝土抗冻性能的作用.

#### 3.4 适当控制预应力结构的应力比

刘荣桂<sup>[28]</sup>基于损伤理论对预应力混凝土冻融破坏进行研究,发现随着应力水平的提高,混凝土的抗应变能力是增大的,抗冻能力也得到了提高,但是并没有阐述应力大小和抗冻耐久性的关系. 周奇峰<sup>[29]</sup>在研究无粘结预应力混凝土结构抗冻融耐久性时,认为压力荷载可以在一定程度和范围上缓解冻融造成的损伤,并通过试验对比提出:压应力比在 0.01 ~ 0.50 时,压应力与混凝土冻融循环寿命呈现正相关;而压应力比达到 0.75 时,混凝土冻融循环寿命较无应力状态低.

### 4 冻融环境下混凝土耐久性研究趋势

针对冻融环境下混凝土耐久性的研究不论是在理论还是在试验方面均已取得一定的研究成果,这些研究成果的取得对掌握冻融环境作用的耐久性损伤机理及提高冻融环境下结构耐久性具有一定的理论价值及工程意义,现有研究成果包括依据损伤力学原理、基于相关假设、借助数值方法建立了相应的损伤模型;基于试验研究分析冻融循环对混凝土强度、相对动弹性模量、应变等因素的影响,并以此推导出冻融环境下混凝土的剩余寿命等.

目前还存在以下问题亟待解决:诸多混凝土损伤模型中大多是基于理论假设来推导的,并不完全符合实际工程;且现有研究成果大多是针对非预应力结构开展的,针对大尺寸预应力构件的研究较少,考虑到预应力结构在实际工程应用的广泛性,在以后的研究中应针对大尺寸预应力构

件开展冻融环境下的耐久性研究,同时,相关理论如人工神经网络、层次分析、灰色系统、模糊数学等将更广泛的应用于未来混凝土结构耐久性研究.

## 参考文献:

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB/T50082—2009 普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准[S]. 北京:中国工业建筑出版社,2009.
- [2] POWERS T C. A working hypothesis for further studies of frost resistance [J]. Journal of the ACI, 1945, 16(4):245–272.
- [3] POWERS T C, HELMUT H R A. Theories of volume change in hardened portland cements paste during freezing[J]. Highway Research Board, 1953(32): 85–21.
- [4] 宋玉普,冀晓东. 混凝土冻融损伤可靠度分析及剩余寿命预测[J]. 水利学报,2006,27(3):259–263.
- [5] 蒋仁言. 威布尔模型族特性、参数估计和应用[M]. 北京:科学出版社,1998.
- [6] 唐光普,刘西拉,施士升. 冻融条件下混凝土破坏面演化模型研究[J]. 岩石力学与工程学报,2006,25(12):2572–2578.
- [7] 蔡昊. 混凝土抗冻耐久性预测模型[D]. 北京:清华大学土木与水利学院,1998.
- [8] WILLAM K J, WARNKE E P. Constitutive models for the triaxial behavior of concrete[C]//International Association of Bridge and Structural Engineers Seminar on Concrete Structures Subjected to Triaxial Stresses. Bergamo, Italy: Springer, 1974:1–30.
- [9] 宁作君. 冻融作用下混凝土的损伤与断裂研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学土木工程学院,2009.
- [10] ABABNEH A N, XI Y. Evaluation of environmental degradation of concrete in cold regions[C]//Proceedings of the 13th International Conference on Cold Regions Engineering. Maine: American Society of Civil Engineers, 2006: 1–10.
- [11] WU Q L, YU H F, CHEN X X. Service life prediction method of concretes based on mass loss rate: establishment and narration of mathematical model[C]//Tenth International Conference of Chinese Transportation Professionals, Beijing: American Society of Civil Engineers, 2010: 3253–3260.
- [12] 李金玉,曹建国,徐文雨,等. 混凝土冻融破坏机理的研究[J]. 水利学报,1999(1):41–49.
- [13] 刘荣桂,付凯,颜庭成. 基于损伤理论的预应力混凝土冻融破坏研究[J]. 混凝土,2007(1):1–3.
- [14] 余寿文,冯西桥. 损伤力学[M]. 北京:清华大学出版社,1997.
- [15] LEMAITRE J, CHABOCHE J L. Mechanics of solid materials [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1990.
- [16] 张峰,李术才,李守凯. 混凝土随机冻融损伤三维预测模型[J]. 土木建筑与环境工程,2011,33(1):31–35.
- [17] CHO T J. Prediction of cyclic freeze-thaw damage in concrete structures based on response surface method [J]. Construction and Building Materials, 2007, (21):2031–2040.
- [18] 杜鹏,姚燕,王玲,等. 基于冻融损伤的混凝土寿命预测研究进展[J]. 长江科学院院报,2014,31(4):77–84.
- [19] 于孝民,任青文. 冻融循环作用下普通混凝土断裂能试验[J]. 河海大学学报:自然科学版,2010,38(1):80–82.
- [20] 张连英,刘瑞雪,李雁,等. 冻融循环下不同强度混凝土损伤力学特性的试验研究[J]. 水利学报,2014,45(S1):143–146.
- [21] 李金平,盛煌,丑亚玲. 混凝土冻融破坏研究现状[J]. 路基工程. 2007(3):1–3.
- [22] BELGRADE, SERBIA. Frost resistance of concrete with crushed brick as aggregate [J]. Architecture and Civil Engineering, 2010, 8(2):155–162.
- [23] 程红强,高丹盈,朱海堂. 钢纤维混凝土抗冻耐久性试验研究[C]//第十二届全国纤维混凝土学术会议,北京:新型建筑材料,2008:231–233.
- [24] 段桂珍,方从启. 混凝土冻融破坏研究进展与新思考[J]. 混凝土,2013(5):16–20.
- [25] 严捍东,孙伟,李钢. 大掺量粉煤灰水工混凝土气泡参数和抗冻性研究[J]. 工业建筑,2001, 31(8):46–48.
- [26] 许丽萍,吴学礼,黄士元. 抗冻混凝土的设计[J]. 上海建材学院学报,1993,6(2):112–123.
- [27] 曾力,朱蕴东,赵卓. 基于渗透性的混凝土力学和耐久性能指标相关性试验[J]. 郑州大学学报(工学版),2013,34(1):1–4.
- [28] 刘桂荣,付凯,颜庭成. 基于损伤理论的预应力混凝土冻融破坏研究[J]. 混凝土,2007(1):1–3.
- [29] 周奇峰. 无粘结预应力混凝土结构抗冻融耐久性[D]. 长沙:中南大学土木工程学院,2008.

## The Overview of Concrete Structure Durability under the Freeze-thaw Condition

ZHENG Yuanxun<sup>1</sup>, YANG Peibing<sup>1</sup>, KANG Haigui<sup>2</sup>

(1. School of Water Conservancy & Environment, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Department of Construction Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China)

**Abstract:** This paper systematically introduced and summarized the research status and development trend of the durability of concrete structure under freeze-thaw condition at home and abroad. The future direction of the research in this field was also been explored. Based on the analysis of related publications, the paper firstly summarized the failure mechanism of concrete in freeze-thaw environment and freeze-thaw test methods and standards. The paper also summarized the durability research methods of reinforced concrete structures and prestressed concrete structures by theoretical analysis and numerical simulation methods. At the same time, the countermeasure to enhance the frost resistance of concrete was put forward. Finally, the future research trend of the durability of concrete structure in freezing-and-thawing was analyzed. The research shows that certain research achievements were made in the study of concrete structure under freeze-thaw condition. However, there are few research results in this field aiming at large size prestressed components which should be taken as the primary research direction in the next step.

**Key words:** concrete structure; durability; overview; freeze-thaw condition; damage mechanism

(上接第 26 页)

## Synthesis of Bonsai-like ZnO and Its Gas Sensing Properties

ZHANG Yonghui, LIU Chunyan, LIU Huanzhen, GONG Feilong, LI Feng

(Zhengzhou University of Light Industry, State Laboratory of Surface and Interface Science and Technology, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** 3D bonsai-like ZnO materials with defects on their surfaces have been prepared via a hydrothermal method and a subsequent annealed process for the first time. The characterization of X-ray diffraction (XRD) and TG/DTA suggest that the as-prepared samples are composed with ZnO and  $\text{Zn}_5(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_6$ . We carefully investigate the morphology of our materials by field emission scanning electron microscopy (FESEM). The result shows that the nanosheets grow symmetrically with a self-assembly process to form every hexagon generation resulting in 3D bonsai-like ZnO structure. Then we fabricate the gas sensor with our ZnO materials and study their gas sensing properties systematically. The results indicate that the as-prepared gas sensor behave the highest sensitivity to 100 ppm ethanol vapor at 340 °C, meanwhile it also exhibits an excellent response-recover property and stability. The 3D bonsai-like ZnO materials have a great potential to design and fabricate ethanol gas sensor in the future.

**Key words:** ZnO; bonsai-like; hydrothermal method; nanosheets; gas sensor