

混凝土随机冻融损伤三维预测模型

张 峰, 李术才, 李守凯

(山东大学 土建与水利学院, 济南 250061)

摘 要: 为了有效评估混凝土在冻融循环作用下的损伤, 在混凝土损伤力学理论的基础上, 结合实验测试建立混凝土冻融损伤预测模型, 开展了引气混凝土在冻融作用后抗拉强度测试试验研究。针对混凝土的耐久性失效实质是一个内部损伤演变的逐步劣化过程, 对混凝土试块进行网格离散, 应用概率方法分析混凝土冻融随机损伤的累积发展过程, 建立混凝土损伤演化的三维多元 Weibull 分布模型, 基于梯度法进行参数估计, 采用实测数据进行模型验证, 设计了相应算法, 采用 C++ 语言编制程序进行计算, 建立适用于冻融条件下的混凝土耐久性随机预测模型。数值和实测数据显示, 随着冻融次数的增加, 混凝土的损伤呈现非线性增长趋势。

关键词: 混凝土; 冻融循环; 试验研究; 损伤; 预测模型; 程序

中图分类号: TU 528.01 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2011)01-0031-05

Three-dimensional Random Damage Prediction Model of Concrete Caused by Freeze-thaw

ZHANG Feng, LI Shu-cai, LI Shou-kai

(School of Civil Engineering and Water Conservancy, Shandong University, Jinan 250061, P. R. China)

Abstract: In order to effectively assess the damage of concrete in freeze-thaw condition, prediction model for concrete frost damage is presented based on damage mechanical theory and the experimental test. The degeneration of tension strength of air-entraining concrete is tested after freezing and thawing. Provided with the fact that the degeneration of concrete is an interior damage evolving process, freezing and thawing damage accumulation of concrete is analyzed based on the discrete grid with probability of stochastic method. And Three-dimensional multi-parameters Weibull distribution model about concrete damage evolutions is presented. Parameters are estimated based on gradient method, and the mathematical model is verified according to the tested data. Corresponding algorithm is designed and programming is completed by C++ programming language to establish concrete durability prediction model under freeze-thaw conditions. It is indicated that the damage of concrete develops in nonlinear way as the freezing and thawing increases.

Key words: concrete; Freeze-thaw; Experimental study; damage; prediction model; program

2001 年, 加州伯克利分校的 Mehta 教授^[1]在总结 59 年来混凝土耐久性的研究进展时指出: 引起混凝土结构劣化的破坏因素按照重要程度依次为钢筋

锈蚀、冻融破坏和海水侵蚀作用。文献[2]认为对于一般条件下的混凝土结构, 其功能失效的标志并非钢筋锈蚀, 而是冻融或腐蚀等损伤引起混凝土自身

收稿日期: 2010-04-08

基金项目: 山东省自然科学基金(ZR2009FQ020); 高等学校博士学科点专项科研基金(20100131120042)

作者简介: 张峰(1978-), 男, 博士后, 从事桥梁结构耐久性评估研究, (E-mail) zhangfeng2008@sdu.edu.cn.

李术才(通讯作者), 男, 博士, 长江学者特聘教授, 从事土木工程防灾减灾研究, (E-mail) lishucai@sdu.edu.cn.

的耐久性破坏,对这类混凝土结构进行使用寿命预测和耐久性设计,需要探索新的方法。该观点同样证明了研究具有实际的理论和工程意义。

20 世纪 40 年代以来的混凝土冻融研究多以实验室研究为主^[3-6]。以上文献大都从材料的微观破坏机理及材料抗冻性方面阐述冻融对混凝土的影响。对混凝土结构进行寿命预测,通常采用在混凝土寿命预测领域,通常采用如下几种方法^[9-10]:专家评估、类似材料性能推测、加速实验^[11-14]、混凝土强度理论^[16]、应用统计可靠度理论^[17]。但是已有研究总结部分研究成果后,混凝土定量评估主要还是基于大量的实验结果进行公式拟合,其适用范围有限,室内加速实验的数据准确性对混凝土损伤评估影响较大。

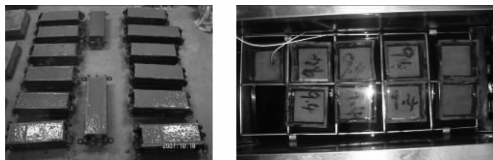
综上所述,对于冻融循环后混凝土力学性能退化的试验研究,目前部分学者已经进行了一系列的研究,但结合试验研究,通过理论分析研究混凝土冻融作用下的耐久性随机损伤预测模型的研究还鲜有报道。关宇刚^[10]基于二维模型进行了混凝土的数值耐久性计算,对于二维问题能够有效预测部分混凝土结构的冻融损伤,但是对于很多的土木工程结构,比如在海冰冻融条件下的混凝土桥墩承台,其形状较为复杂,采用二维模型不能有效模拟结构的冻融损伤演化,该问题值得进一步深入研究。

推导了混凝土随机损伤的三维预测模型,并采用梯度法进行 weibull 参数估计,编制对应程序,采用实测数据验证数值模型和程序的准确性。

1 混凝土冻融试验

1.1 实验方案设计

首先按照试验设计要求制作混凝土试件,待养护 28 d 后,将混凝土试块(100 mm×100 mm×100 mm)



A) 混凝土试块制作

B) 冻融试验



C) 微机控制电液伺服压力试验机

图 1 试验照片

置于混凝土快速冻融实验设备进行冻融试验(冻融周期:100 次;200 次;300 次),然后将混凝土试件在山东大学结构工程实验室的 300 kN 液电伺服试验机上进行劈裂试验;另一部分在大型静、动三轴电液伺服试验机上进行单轴受压破坏试验,以取得应力、应变、极限强度等的量测数据。

1.2 混凝土冻融损伤后的劈拉强度测试

进行室内快速冻融的混凝土试块配合比如表 1 所示。

表 1 每 m³ 混凝土配合比 /kg

类别	水泥	矿粉	粉煤灰	沙子	碎石
配比	164	212	94	737	938
类别	水	减水剂	阻锈剂	引气剂	
配比	155	4.47	6	0.011 8	

抗拉强度是混凝土重要力学性能之一,对研究混凝土的抗裂性及其结构构件的设计计算,探讨混凝土的冻融破坏机理等都是必不可少的依据。同时,混凝土的外观质量及耐久性均与其抗拉强度密切相关。

混凝土立方体劈裂抗拉强度按下式计算:

$$f_{ts} = \frac{2F}{\pi A} = 0.637 \frac{F}{A} \quad (1)$$

式中: f_{ts} 为混凝土立方体劈裂抗拉强度(MPa); F 为极限荷载(N); A 为试件劈裂面面积(mm²),为试件横截面面积。

劈裂抗拉试件的破坏面大都产生于中部收拉区。破坏面与加载方向基本重合,从破坏面上可见到凸起的骨料和粗糙的水泥砂浆,也有石子被拉坏,试件破坏时伴有脆性破坏的声音且很突然,属于典型的脆性破坏如图 2 所示。随冻融循环次数的增加,混凝土裂缝面上的骨料被拉断的比例增加,混凝土破坏时的爆裂声越响亮,破碎现象越严重,已经不能成为完整的两部分,而是被劈成很多柱状,还有碎角。

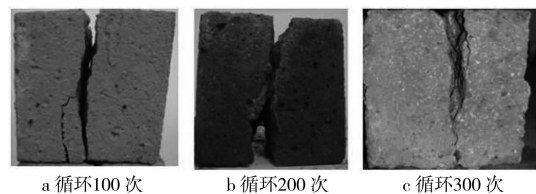


图 2 混凝土试件单轴劈裂抗拉破坏形态

混凝土随不同冻融循环次数变化的抗拉强度的试验结果如表 2 所示。

表 2 不同冻融循环次数后的试块抗拉强度 /MPa

冻融循环次数	试块 1	试块 2	试块 3
0	5.56	5.15	5.64
100	5.23	4.87	5.32
200	4.38	4.11	4.52
300	3.32	3.15	3.39

假定 $f_{tsn}/f_{ts0} = [1 + pN]^k$, 取 f_{ts0} 为 5.45 MPa, 对表 1 中的数据计算, 拟合得到参数 $P = -0.00296$, $k = 0.234$, 相关系数 R 为 0.97.

设定混凝土的损伤因子表达式为

$$D = 1 - f_{tsn}/f_{ts0} = 1 - [1 - 0.00296N]^{0.234} \quad (2)$$

得到混凝土的冻融损伤因子随混凝土随冻融循环次数的变化见图 3.

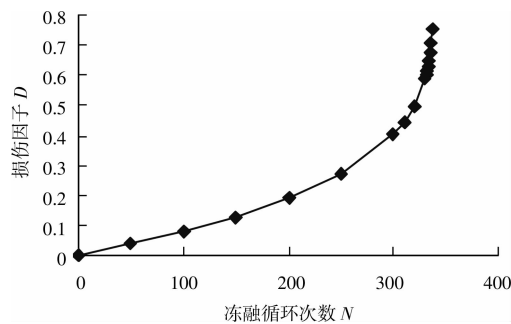


图 3 混凝土冻融损伤因子

2 混凝土三维冻融损伤预测模型

2.1 冻融损伤模型

建立 1 个立方体受冻融模型, 6 边受到等损伤梯度 G (见图 4)。

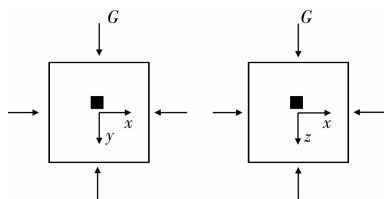


图 4 6 边受到等损伤梯度 G 的简化模型

假定混凝土内部连续、均匀, 则可以假定混凝土内部到边界最短距离相同的点受到的冻融损伤程度相同。采用 Weibull 寿命分布 (公式 3) 描述混凝土内部冻融随机损伤。

$$F(t) = 1 - \exp\{-[\lambda \cdot H(t - t_0)]^\alpha\} \quad (3)$$

式中: t 为时间; t_0 为阈值; λ 为尺度因子; α 为形状因子。 $H(t - t_0)$ 为 Heaviside 函数, 满足:

$$H(t - t_0) = \begin{cases} 0 & t \leq t_0 \\ 1 & t > t_0 \end{cases}$$

假设 λ 与 t_0 成反比例关系, 如式 (4) 所示, 其中 k_0 为比例系数。

$$t_0 = k_0 \lambda^{-1} \quad (4)$$

在混凝土试块中坐标为 (x, y, z) 处取微单元, 该微单元发生破坏的概率密度为 $f(x, y, z; t)$ 。可得出混凝土试块 t 时刻的损伤因子为

$$\begin{aligned} D &= V_0^{-1} \int_{V_0} f(x, y, z; t) dx dy dz \\ &= V_0^{-1} \int_{V_0} \alpha [\lambda \cdot H(t - k_0 \lambda^{-1})]^{\alpha-1} \cdot \\ &\quad \exp\{-[\lambda \cdot H(t - k_0 \lambda^{-1})]^\alpha\} dx dy dz \end{aligned} \quad (5)$$

采用对混凝土试块进行网格离散的办法求解公式 (5)。对计算对象在三维空间进行离散化处理 (如图 4 所示)。

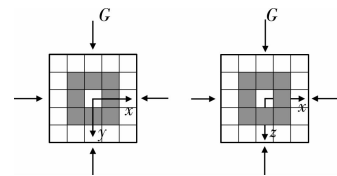


图 5 模型网格剖分图

截面每边平均划分为 N 份, 令 N 为偶数。则离混凝土试块表面最短距离相同的第 i 层单元数 (图 5 的阴影部分) 为

$$N_i = 6N^2 - 24iN + 24i^2 - 12N + 24i + 8 \quad (6)$$

式中: $i = 0, 1, 2, \dots, (N/2 - 1)$ 。

微单元发生破坏的分布函数为 $F_i(t)$ 。则第 i 层单元破坏 N_i 块的数学期望为

$$E(\Phi_i) = N_i F_i(t) \quad (7)$$

由公式 (3) 可得到

$$F_i(t) = 1 - \exp\{-[\lambda_i H(t - k_0 \lambda_i^{-1})]^\alpha\} \quad (8)$$

假定尺度因子 λ_i 沿截面近似呈线性变化^[10], 则可得

$$\lambda_i = \lambda_0 + \nu[(i + 1)N^{-1} - 0.5] \quad (9)$$

式中: λ_0 为待定的均匀尺度参数; ν 为待定的梯度因子; $i = 0, 1, 2, \dots, (N/2 - 1)$ 。

时刻 t 全部单元破坏的数学期望为

$$E(\omega) = \sum_{i=0}^{N/2-1} E(\Phi_i) = \sum_{i=0}^{N/2-1} N_i F_i \quad (10)$$

将公式 (10) 得到的破坏单元数量处理整个模型的网格数目即可得冻融损伤因子 D 为

$$\begin{aligned} E(D) &= E(\omega) / N^3 = N^{-3} \sum_{i=0}^{N/2-1} \\ &\quad (6N^2 - 24iN + 24i^2 - 12N + 24i + 8) \\ &\quad \{1 - \exp\{-[\lambda_i \cdot H(t - k_0 \lambda_i^{-1})]^\alpha\}\} \end{aligned} \quad (11)$$

2.2 模型参数估计算法

模型中需要确定的参数有 4 个, α 为形状因子; λ_0 待定的均匀尺度参数; ν 待定的梯度因子; k_0 比例系数。建立如下方程组。

$$f(\alpha, \lambda_0, \nu, k_0, N_i) - E(D, N_i) = 0 (i = 1, 4) \quad (12)$$

式中,

$$f(\alpha, \lambda_0, \nu, k_0, N_i) = N^{-3} \sum_{j=0}^{\frac{N}{2}-1} (6N_i^2 - 24jN_i + 24j^2 - 12N_i + 24j + 8) \cdot \{1 - \exp\{-[\lambda_j \cdot H(t - k_0\lambda_j^{-1})]^\alpha\}\}$$

N_i 为室内快速冻融次数, $f(\alpha, \lambda_0, \nu, k_0, N_i)$ 为理论分析得到的混凝土损伤因子, $E(D, N_i)$ 实际试验测试数据得到的混凝土损伤因子。

对模型中 4 个参数的计算, 其实是求解一个高度非线性的方程组, 采用以下算法进行参数估计。

1) $\theta = (\alpha, \lambda_0, \nu, k_0)^T$, $f(\alpha, \lambda_0, \nu, k_0, N_i) = f_i$, 根据输入的初始参数 $\alpha, \lambda_0, \nu, k_0$, 对 4 种不同冻融循环次数 N_1, N_2, N_3, N_4 下的计算 f_1, f_2, f_3, f_4 。

2) 设目标函数值为

$$\varphi = \varphi(f_1, f_2, f_3, f_4) = \sum_{i=1}^4 f_i^2 \quad (13)$$

设求解误差限值为 ϵ 。若 $\varphi < \epsilon$, 则 θ 即为方程组的一组解, 求解结束; 否则求解继续。

3) 引入目标函数梯度向量

$$\nabla \varphi = \left[\frac{\partial \varphi}{\partial \alpha}, \frac{\partial \varphi}{\partial \lambda_0}, \frac{\partial \varphi}{\partial \nu}, \frac{\partial \varphi}{\partial k_0} \right]^T \quad (14)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial \varphi}{\partial \alpha} = 2 \sum_{i=1}^4 f_i \frac{\partial f_i}{\partial \alpha} & \frac{\partial \varphi}{\partial \lambda_0} = 2 \sum_{i=1}^4 f_i \frac{\partial f_i}{\partial \lambda_0} \\ \frac{\partial \varphi}{\partial \nu} = 2 \sum_{i=1}^4 f_i \frac{\partial f_i}{\partial \nu} & \frac{\partial \varphi}{\partial k_0} = 2 \sum_{i=1}^4 f_i \frac{\partial f_i}{\partial k_0} \end{cases}$$

上式中的梯度 $(\frac{\partial f_i}{\partial \alpha}, \frac{\partial f_i}{\partial \lambda_0}, \frac{\partial f_i}{\partial \nu}, \frac{\partial f_i}{\partial k_0})$ 显式非常复杂, 采取差分法计算即可。

4) 计算迭代后的求解向量

$$\theta = \theta - \rho \nabla \varphi \quad (15)$$

式中, $\rho = \varphi/m$, 计算变量

$$m = \left(\frac{\partial f_i}{\partial \alpha}\right)^2 + \left(\frac{\partial f_i}{\partial \lambda_0}\right)^2 + \left(\frac{\partial f_i}{\partial \nu}\right)^2 + \left(\frac{\partial f_i}{\partial k_0}\right)^2$$

2.3 程序介绍

基于提出的分析方法, 采用 C++ 语言编制了混凝土损伤三维预测模型 CDE(Concrete Damage Evaluate)。由 5 个类组成: 参数输入类 CInput, 矩阵计算类 CMatrix, 损伤因子计算类 CDamage, 非线性方程组求解类 CEquation 和程序输出类 COutput。

整个程序的计算流程图如图 6 所示。

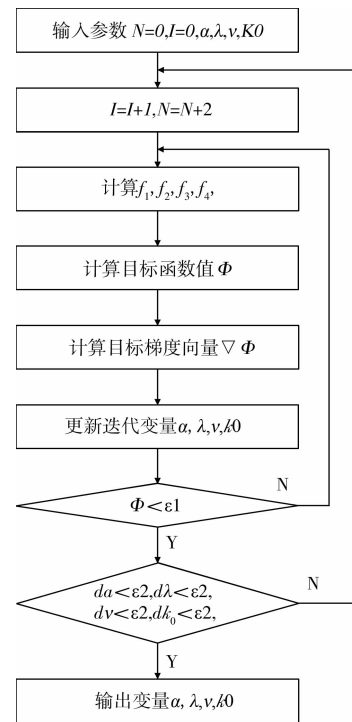


图 6 计算流程图

3 计算结果

采用上述算法及程序, 对第 2 节和第 3 节介绍的实测数据进行计算分析, 得到不同该文所对应的混凝土预测模型计算参数。

选取图 3 中的 $N=50, 100, 200, 330$ 共 4 个冻融次数下的混凝土实测损伤因子 (0.036 785 825、0.078 846 509、0.189 235 96、0.59) 进行计算分析。外层迭代的参数误差设为 0.005, 内层迭代的参数误差设为 0.02。通过 39 次迭代计算, 得到 Weibull 参数值为: $\theta = (2.61 \ 2.76 \ 0.146 \ 0.024)^T$ 。以下为外层迭代中的 $\alpha, \lambda_0, \nu, k_0$ 的参数误差变化规律。

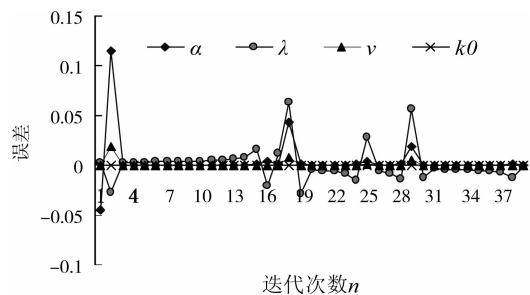


图 7 参数误差迭代变化

由图 7 可以看出, 对于建立的迭代模型, 参数在计算过程中会发生振荡, 而且 α 参数振荡较其余 3

个参数要大。根据计算出的 θ 值,可以确定不同冻融循环次数 N 作用下的混凝土损伤因子。

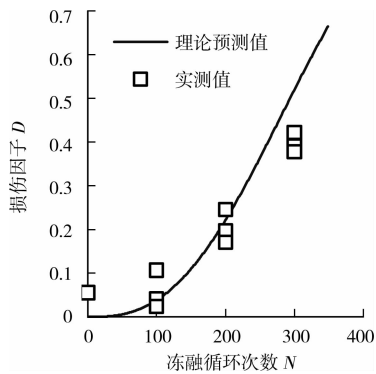


图 8 理论及实测值比较

图 8 中实测值参见表 1,从图 8 可以看出建立的冻融损伤预测模型和实测值吻合,随着冻融次数的增加,混凝土的损伤呈现非线性增长趋势,理论模型和实测数据都体现了这一规律。

4 小结

1) 对于冻融循环后混凝土力学性能退化的试验研究,目前国部分学者已经进行了一系列的研究,但结合试验研究,通过理论分析研究混凝土冻融作用下的耐久性随机损伤预测模型的研究还鲜有报道。

2) 针对混凝土的耐久性失效实质是一个内部损伤演变的逐步劣化过程,对混凝土试块进行网格离散,应用概率方法分析混凝土耐久性随机损伤的累积发展过程,建立混凝土损伤演化的三维多元 Weibull 分布模型。

3) 基于梯度法进行 Weibull 分布参数估计,采用实测数据进行模型验证,设计了相应算法,采用 C++ 语言编制程序进行计算,建立适用于冻融条件下的混凝土耐久性随机预测模型。

4) 建立的冻融损伤预测模型和实测值吻合,随着冻融次数的增加,混凝土的损伤呈现非线性增长趋势,理论模型和实测数据都体现了这一规律。

参考文献:

- [1] MEHTA P K. Concrete durability-fifty year's progress [C]//Proceeding 2nd International Conference on Concrete Durability, American Concrete Institution. ACI SP126-1. 1991;1-31.
- [2] 余红发,孙伟,张云升,等. 在冻融或腐蚀环境下混凝土使用寿命预测方法 I—损伤演化方程和损伤失效模式[J]. 硅酸盐学报. 2008,31(S1):128-135.
- YU HONG-FA, SUN WEI, ZHANG YUN-SHENG,

et al. Service life prediction method of concrete subjected to freezing-thawing cycles and chemical attack I-damage development equation and degradation mode [J]. Journal of The Chinese Ceramic Society. 2008,31(S1):128-135.

- [3] MU R, MIAO C L, LIU J P. Property of concrete subjected to freezing and thawing under sulphate attack [J]. Indian Concrete Journal. 2001,75(7):451-454.
- [4] MU R, MIAO C L, BREUGEL K V, et al. Property of air-entrained concrete subjected to freezing and thawing cycles and salt attack simultaneously[C]//Advanced in Concrete and Structures ICASC2003; Paris, France: ILEM Publications SARL,2003 :982-988.
- [5] SHANG HUI-SHUAI, SONG YU-PU. Experimental study on strength and deformation of plain concrete under triaxial compression after freeze-thaw cycles [J]. Building and Environment,2008,43(7):1197-2005.
- [6] RZA POLAT, RAMAZAN DEMIRBOA, etc. The influence of lightweight aggregate on the physico-mechanical properties of concrete exposed to freeze - thaw cycles[J]. Cold Regions Science and Technology, 2010,60:51-56.
- [7] COLLINS A R. The destruction of concrete by frost [J]. Journal of Institute of Civil Engineers,1994,23(1):29-41.
- [8] 余红发,孙伟,李美丹. 混凝土在化学腐蚀和冻融循环共同作用下的强度变化[J]. 沈阳建筑大学学报:自然科学版,2006,122(4):588-591.
- YU HONG-FA, SUN WEI, LI MEI-DAN. Strength development of concrete subjected to combined actions of freezing-thawing cycles and chemical attack [J]. Journal of Shengyang Jianzhu University: Natural Science,2006, 122(4):588-591.
- [9] CLIFTON J R. Predicting the life of concrete[J]. ACI Materials J,1993,90(6):611-617.
- [10] 关宇刚,孙伟,缪昌文. 基于可靠度与损伤理论的混凝土寿命预测模型 I:模型阐述与建立[J]. 硅酸盐学报, 2001,29(6):530-534.
- GUAN YU-GANG, SUN WEI, MIAO CHANG-WEN. One service life prediction model for the concrete based on the reliability and damage theories I: narration and establishment of the model [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society,2001,29(6):530-534.
- [11] PIERLUIGI COLOMBI, GIULIA FAVA, CARLO POGGI. Bond strength of CFRP - concrete elements under freeze - thaw cycles [J]. Composite Structures, 2010,92:973-983.

(下转第 134 页)

- by pyrene fluorescence probe spectrometry [J]. Petrochemical Technology & Application, 2007, 25(1):48-50.
- [21] 张明翠, 庄惠生. 酸性条件下荧光光度法测定水中邻苯二甲酸二丁酯[J]. 分析测试学报, 2006, 25(5):113-115.
ZHANG MING-CUI, ZHUANG HUI-SHENG. Determination of dibutyl phthalate in water by fluorescence spectrophotometry [J]. Journal of Instrumental Analysis, 2006, 25(5):113-115.
- [22] NEDOLOUJKO A, KIWI J. TiO₂ speciation precluding mineralization of 4-tert-butylpyridine accelerated mineralization via Fenton photo-assisted reaction[J]. Water Research, 2000, 34(13): 3247-3284.
- [23] 辛柏福, 井立强, 付宏刚, 等. 掺杂 Cu 的 TiO₂ 纳米粒子的制备、表征及其光催化活性[J]. 高等学校化学学报, 2004, 25(6):1076-1080.
XIN BAI-FU, JING LI-QIANG, FU HONG-GANG, et al. Preparation and characterization of Cu doped TiO₂ nanoparticles and their photocatalytic activity [J]. Chemical Journal of Chinese Universities, 2004, 25(6):1076-1080.
- [24] 梁爱惠, 陈媛媛, 蒋治良. 液相二氧化钛纳米微粒的荧光和共振散射光谱特性[J]. 光谱学与光谱分析, 2006, 26(6):1088-1091.
LIANG AI-HUI, CHEN YUAN-YUAN, JIANG ZHI-LIANG. Fluorescence and resonance scattering spectral properties of TiO₂ nanoparticle in water phase [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2006, 26(6):1088-1091.
- [25] 陈恩伟, 银董红, 宋慧娟, 等. 镧系离子掺杂 TiO₂ 的制备及其对咪唑降解反应的光催化活性[J]. 催化学报, 2006, 27(4):344-348.
CHEN EN-WEI, YIN DONG-HONG, SONG HUI-JUAN, et al. Preparation of Lanthanide Ions-Doped TiO₂ and its photocatalytic activity for imidazole degradation[J]. Chinese Journal of Catalysis, 2006, 27(4):344-348.

(编辑 胡英奎)

(上接第 35 页)

- [12] 邹超英, 赵娟, 梁峰, 等. 冻融环境下混凝土应力-应变关系的试验研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2007, 39(2): 229-231.
ZOU CHAOYING, ZHAO JUAN, LIANG FENG, et al. Experimental study on stress-strain relationship of concrete in freeze-thaw environment [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2007, 39(2):229-231.
- [13] SHANG HUAI-SHUAI, SONG YU-PU. Behavior of air-entrained concrete under the compression with constant confined stress after freeze-thaw cycles [J]. Cement and Concrete Composites, 2008, 30(9): 854-860.
- [14] B KUCHARCZYKOV, Z KERNER, O POSPCHAL, et al. Influence of freeze-thaw cycles on fracture parameters values of lightweight concrete[J]. Procedia Engineering, 2010, 2(1):959-966.
- [15] 宋玉普, 商怀帅, 张众, 等. 冻融循环后引气混凝土双轴破坏准则研究[J]. 工程力学, 2007, (6): 134-141.
SONG YUPU, SHANG HUAISHUAI, ZHANG ZHONG, et al. Investigation on Failure Criterion of Air-entrained Concrete Under Biaxial Loads After Freeze-thaw Cycles [J]. Engineering Mechanics, 2007, 24(6): 134-141.
- [16] 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]. 岩土力学与工程学报, 2006, 25(12):2573-2578.
TANG GUABGOY, LIU XILA, SHI SHISHENG. Evolution model of concrete failure surface under freeze-thaw conditions [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(12):2573-2578.
- [17] TAEJUN CHO. Prediction of cyclic freeze-thaw damage in concrete structures based on response surface method [J]. Construction and Building Materials, 2007, 21(12): 2031-2040.

(编辑 胡玲)