

文章编号: 1009-3087(2011)03-0056-05

# 混凝土水管冷却试验与温控参数的反分析

王振红, 张国新, 刘毅, 刘有志  
(中国水利水电科学研究院 结构材料所, 北京 100038)

**摘要:** 基于实际工程的带冷却水管的混凝土长方体非绝热温升试验, 结合反问题求解的遗传算法和 3 维有限单元法, 识别包括绝热温升和不同保温条件下的放热系数等在内的混凝土温控参数。试验结果表明, 反分析所得温控参数能真实反映混凝土的热学性能。采用试验和反分析相结合的方法, 既经济、简单, 又能获得多个温控参数, 具有较高的工程应用推广价值。

**关键词:** 反分析; 混凝土试验; 水管冷却; 温控参数; 绝热温升

中图分类号: TU 528

文献标志码: A

## Test and Inverse Analysis for Temperature Control Parameters of Concrete with Cooling Pipe

WANG Zhen-hong, ZHANG Guo-xin, LIU Yi, LIU You-zhi

(Dept. of Structures and Materials, China Inst. of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

**Abstract** Based on the genetic algorithm of inverse problem and the 3-D FEM, non-adiabatic temperature rise test of rectangle with cooling pipe based on actual project was done to identify adiabatic temperature rise, heat exchange coefficient and so on. The comparison results showed that different temperature control parameters can indicate the real thermal properties of concrete in site. The method of the combination of test and reverse analysis is simple and economical, and many temperature control parameters can be obtained simultaneously, so it has high engineering values in the future.

**Key words** reverse analysis; concrete test; water pipe cooling; temperature control parameters; adiabatic temperature rise

大体积混凝土施工期容易产生温度裂缝, 而适度表面保温和内部水管降温是防止这类裂缝产生的有效措施<sup>[1-2]</sup>。为选择适时合理的温控措施, 需要进行混凝土温度场的仿真计算, 温度场精确与否直接关系到温控措施是否合理, 而温控参数是关系温度场精确与否的关键因素。因此, 需要准确确定温控参数, 包括混凝土绝热温升、不同表面保温条件下的结构表面放热系数以及通水冷却时水管的放热系数等。这些温控参数的确定一般需要专用仪器设备或者经验公式来确定, 但这些仪器设备不但价格非常昂贵, 而且普及率很低, 经验公式又往往不能反映工程实际情况, 尤其是采用塑料质水管时, 管径和管壁厚度对冷却效果的影响又很难于确定, 作为第三

类边界条件计算时表面放热系数的确定更加困难。针对这些问题, 探索一种既经济、合理、有效, 又能被实际工程推广应用的方法就显得尤为重要。

对于无冷却水管时的混凝土热学参数的确定, 国内很多学者进行了研究并取得较大成果<sup>[3]</sup>, 但对于不同保温形式、保温材料和带冷却水管时的混凝土温控参数的研究相对较少, 特别是通水冷却时水管管壁的热学参数及其影响。作者利用施工现场带冷却水管的混凝土长方体非绝热温升试验, 通过非稳定温度场求解的有限单元法仿真计算技术和反问题优化求解的遗传算法<sup>[4-5]</sup>对混凝土温控参数进行反分析<sup>[6-9]</sup>, 得到能反映混凝土真实热学性能的参数和不同保温措施时的温控参数, 并研究管径和厚度对冷却效果的影响。

## 1 基本原理

### 1.1 混凝土热传导的微分方程

均匀的、各向同性的固体, 在计算域  $R$  内任何一点处温度场  $T$  满足式 (1) 的微分方程<sup>[9]</sup>:

收稿日期: 2010-07-31

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50909105); 国家科技支撑计划资助项目 (2008BAB29B05); 水利部行业公益科研专项 (200801007)

作者简介: 王振红 (1976-), 男, 博士, 研究方向: 混凝土结构温控防裂与仿真计算。E-mail: wzhzhen@126.com

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{1}{a} \left( \frac{\partial \theta}{\partial \tau} - \frac{\partial T}{\partial \tau} \right) = 0 \quad (1)$$

边界条件为:  $T = \bar{T}$  (2)

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial f} = q \quad (3)$$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial f} = \beta(T - T_a) \quad (4)$$

式中,  $\tau$  为时间,  $\lambda$  为导热系数,  $\text{kJ}/(\text{m} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$ ;  $\rho$  为密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $c$  为比热,  $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ ;  $a$  为导温系数,  $\text{m}^2/\text{h}$ ;  $\theta$  为绝热温升,  $^\circ\text{C}$ ;  $\bar{T} = \bar{T}(\tau)$  为第一类边界条件;  $f$  为单位法向量;  $q = q(\tau)$  是边界上的给定热流,  $\text{kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ , 为第二类边界条件; 当  $q = 0$  时为绝热边界条件;  $\beta$  为第三类边界上的表面放热系数  $\text{kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$ ;  $T_a$  为外界环境温度。

### 1.2 混凝土温度场冷却水管的模拟

当混凝土绝热温升公式定为:

$$\theta(\tau) = \theta_0(1 - e^{-m\tau}) \quad (5)$$

对式 (5) 微分并代入方程 (1) 积分得:

$$T(t) = \theta_0 \frac{m}{m-b} (e^{-bt} - e^{-mt}) \quad (6)$$

当混凝土绝热温升公式定为:

$$\theta(\tau) = \theta_0 \tau / (n + \tau) \quad (7)$$

对式 (7) 微分并代入方程 (1) 积分得:

$$T(t) = \theta_0 n b e^{-b(n+1)t} \left\{ \frac{e^{bn}}{nb} - \frac{e^{b(n+1)t}}{b(n+1)} + E_i(bn) - E_i[b(n+t)] \right\} \quad (8)$$

式中,  $\theta_0$  为最终绝热温升,  $^\circ\text{C}$ ;  $m$ ,  $n$  和  $b$  均为常数;  $t$  为时间,  $\int E_i$  为指数积分。

### 1.3 优化算法

优化算法采用基于生物进化过程演变算法的一种: 遗传算法 (Basic Genetic Algorithm), 它是模拟自然界的进化过程, 是建立在“物竞天择, 适者生存”的基本理论之上, 可处理目标函数峰值多并且导数不存在和设计变量多离散等优化问题。遗传算法过程主要包括: 编码、构造适应度函数和进行染色体的组合等<sup>[3]</sup>。它作为一种智能化的全局搜索算法, 自问世以来就在参数辨识等诸多应用领域中展现了其特有的魅力。

## 2 混凝土水管冷却试验与温控参数的反分析

为了分析施工现场混凝土采用不同模板、不同种类和不同厚度保温材料时表面放热系数, 确定混凝土绝热温升和绝热温升规律参数, 研究不同管径和壁厚塑料质冷却水管的冷却效果和放热特性。计算混凝土温度场能否反映实际情况与这些温控参数密切相关, 因此, 需对带冷却水管长方体混凝土埋设测点的温度进行反分析, 以得到反映混凝土实际的温控参数。

### 2.1 试验方法

混凝土配合比见表 1, 带水管试验模型和测点布置见图 1。

表 1 混凝土配合比  
Tab 1 Material gradation of hunder concrete

混凝土标号	水泥	混合料	砂	小石	中石	减水剂	引气剂	水
C50	387	97	717	278	693	5.32	4.24	119

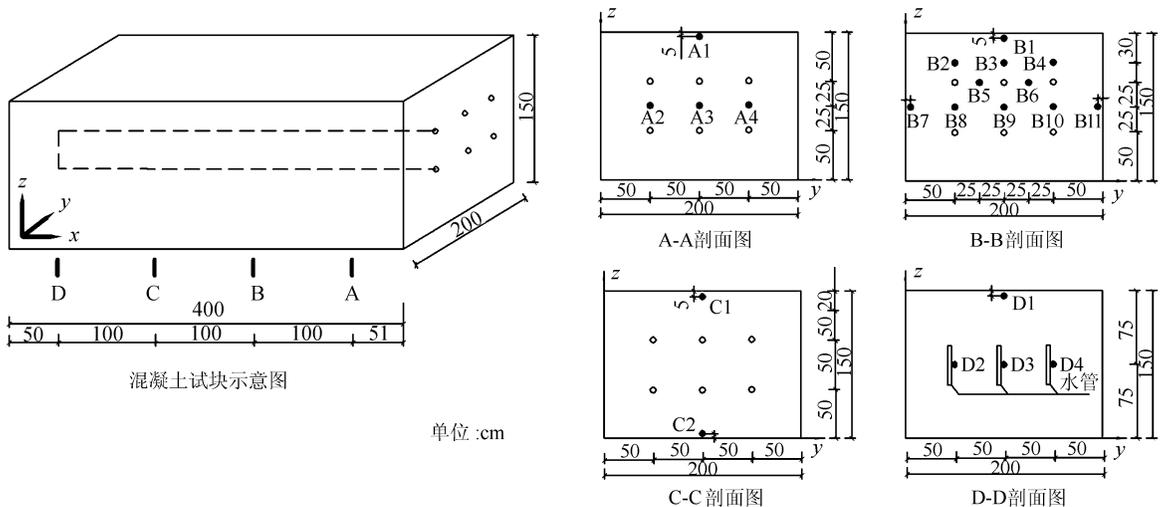


图 1 混凝土试块和测点布置

Fig 1 Sketch of the test and locations of the measuring points of temperature

设置试验长方体 6 个面的覆盖条件不同, 目的是在试验中得到更多温控参数, 具体为: 沿  $y$  轴正向依次布置 3 根塑料水管, 第 1 根壁厚 1.5 mm、外径 28.0 mm, 第 2 根壁厚 2.0 mm、外径 42.0 mm, 第 3 根壁厚 3.0 mm、外径 45.0 mm; 试块底面采用钢模板; 两侧面 ( $x$  向) 分别用厚 1.00 cm 和 2.00 cm 的竹胶模板; 前后面 ( $y$  向) 分别用 1.50 cm 厚的木质模板和厚 4.00 cm 的木质模板; 顶面共长 4 m, 第 1 个 1 m 段用 1 层“两布一膜”形式的土工膜覆盖, 第 2 个 1 m 段用 1 层工业毛毡覆盖, 第 3 个 1 m 段用“1 层农用塑料膜 + 1 层草袋 + 1 层土工膜”覆盖 (1 层草袋厚 2~3 cm), 第 4 个 1 m 段用“1 层农用塑料膜 + 2 层草袋 + 1 层土工膜”覆盖。

2.2 试验过程

试件浇筑时开始通水, 水管连续通水 4 d 流量: 外径 2.8 cm 的水管为  $0.76 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ , 外径 4.2 cm 和 4.5 cm 的水管流量为  $1 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ 。浇筑后每隔一定时间用温度巡检仪对各测点测量温度 1 次, 为了提高观测精度, 从开始到第 6 天, 每 2 h 测温 1 次, 第 6~8 天每 4 h 测温 1 次, 第 8~20 天每 8 h 1 次, 之后间隔逐渐变大, 遇到环境温度变化剧烈时, 为了测量准确, 缩短间隔时间。

根据长方体试块上多个测点的实测温度, 依据遗传算法对混凝土温控参数绝热温升  $\theta_0$ 、 $a$ 、 $b$ 、不同

模板类型和厚度时混凝土表面放热系数  $\beta_{\pm}$  和塑料水管的放热系数  $\beta_{\text{管}}$  进行反分析。反演时目标函数取  $\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (T_{ij} - T_{ij}^0)^2$ , 式中,  $i$  为测点序号,  $j$  为测温时段,  $T_{ij}^0$  和  $T_{ij}$  分别为实测温度和计算温度,  $M$  和  $N$  为测点个数和测温次数; 为了保持种群的多样性,  $a$  取 0.1 交叉概率和变异概率分别取为 70% 和 10%。反演过程中塑料质水管边界视为第三类边界。反分析网格见图 2。

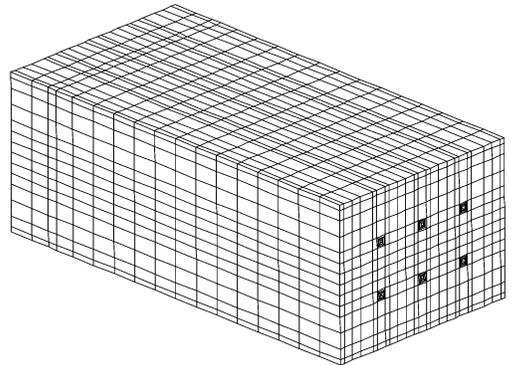


图 2 反分析网格

Fig 2 Mesh for reversion analysis

2.3 结果与讨论

经过 91 次的迭代计算, 反演出绝热温升, 不同保温材料与厚度时混凝土的表面放热系数, 以及塑料质水管的放热系数见表 2 和 3。

表 2 混凝土热学参数反演结果

Tab 2 Results of reverse analysis for thermal parameters of concrete

绝热温升 / $^{\circ}\text{C}$	混凝土表面放热系数 $\beta_{\pm} / (\text{kJ} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^{\circ}\text{C})^{-1})$						
	竹胶模板		木模板		钢模板	土工膜	工业毛毡
	1.0 m	2.0 m	1.5 m	4.0 m			
$50.06(1 - e^{-0.251t^{1.979}})$	13.08	9.08	20.87	12.85	33.33	14.58	12.50

表 3 混凝土热学参数反演结果

Tab 3 Results of reverse analysis for thermal parameters of concrete

混凝土表面放热系数 $\beta_{\pm} / (\text{kJ} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^{\circ}\text{C})^{-1})$		塑料水管表面放热系数 $\beta_{\text{管}} / (\text{kJ} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^{\circ}\text{C})^{-1})$		
1 层农用塑料膜 + 1 层草袋 + 1 层土工膜	1 层农用塑料膜 + 2 层草袋 + 1 层土工膜	外径为 2.80 cm 壁厚为 1.5 mm	外径为 4.20 cm 壁厚为 2.0 mm	外径为 4.50 cm 壁厚为 3.0 mm
1.67	1.25	375.21	208.33	166.67

结果表明, 外径 2.8、4.2 和 4.5 cm 的水管表面放热系数分别为 375.2、208.3 和 166.7  $\text{kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^{\circ}\text{C})$ , 细管的放热系数反而要大于粗管, 原因是粗管管壁明显厚于细管管壁。因此, 塑料管的表面放热系数和水管管壁厚度有很大的关系, 和通水流

量关系不大。

根据反演得到的温控参数再进行混凝土温度场计算, 得到测点的温度计算值, 表 4 为部分测点部分时刻的实测温度值和计算温度值, 图 3 为实测温度值和计算温度值的历时过程线。

表 4 试验测得的部分混凝土温度值以及反演参数计算的温度值

Tab 4 Temperatures measured from the test and calculated after the results of reverse analysis

时间 /d	T(B1) /℃		T(B7) /℃		T(B11) /℃		T(C1) /℃		T(C2) /℃		T(D1) /℃	
	实测值	反演值	实测值	反演值	实测值	反演值	实测值	反演值	实测值	反演值	实测值	反演值
0.38	10.75	9.20	9.88	8.64	8.94	8.70	11.50	9.22	8.44	8.24	11.00	9.27
0.88	13.31	14.51	12.19	13.30	11.75	13.10	15.06	16.31	10.06	11.00	14.81	16.42
1.33	16.81	18.50	16.50	17.60	16.40	18.00	20.13	20.89	12.40	14.00	18.75	20.94
1.88	27.09	28.50	26.02	26.49	25.69	26.95	36.19	33.51	22.06	22.89	34.94	33.83
2.54	32.06	33.20	29.75	30.37	29.50	30.88	41.44	39.98	25.00	25.96	41.31	40.39
3.13	33.69	33.68	31.06	30.50	31.25	30.92	41.94	41.13	26.50	26.37	42.19	41.48
3.63	32.75	32.28	29.69	28.96	30.06	29.60	40.50	40.25	25.88	25.57	40.88	40.63
4.13	31.88	31.00	29.00	28.43	29.50	28.76	38.38	37.85	25.31	24.66	38.51	38.17
4.79	30.19	29.78	26.88	26.13	27.38	26.42	36.50	36.02	23.69	22.90	35.38	35.17
5.63	30.81	29.92	25.50	24.32	26.13	25.00	35.44	34.33	23.00	21.82	33.06	32.28
6.63	28.00	27.11	22.81	21.59	23.94	22.50	33.06	31.77	20.81	19.61	29.81	28.92
7.79	25.56	24.84	21.06	20.13	22.25	20.86	29.94	28.67	19.06	18.43	26.75	25.83
8.35	24.31	23.69	20.25	19.48	21.06	19.96	28.44	27.23	18.50	18.05	25.25	24.43
9.02	23.06	22.27	19.00	17.92	20.06	18.55	26.81	25.59	17.00	16.09	23.44	22.68
10.02	20.31	19.00	16.81	16.12	17.25	16.34	23.25	22.30	15.25	14.84	20.60	19.96
11.02	19.31	17.80	16.19	15.30	16.56	15.43	21.88	20.95	14.50	13.80	18.81	18.33
12.02	16.38	14.89	14.00	13.20	14.56	13.51	19.25	18.56	12.75	12.00	16.56	16.24
13.02	14.44	13.16	12.31	11.59	12.94	11.97	17.06	15.26	11.31	10.61	14.56	13.74
14.02	12.88	11.74	11.00	10.33	11.50	10.61	15.19	13.76	9.94	9.32	12.75	12.29

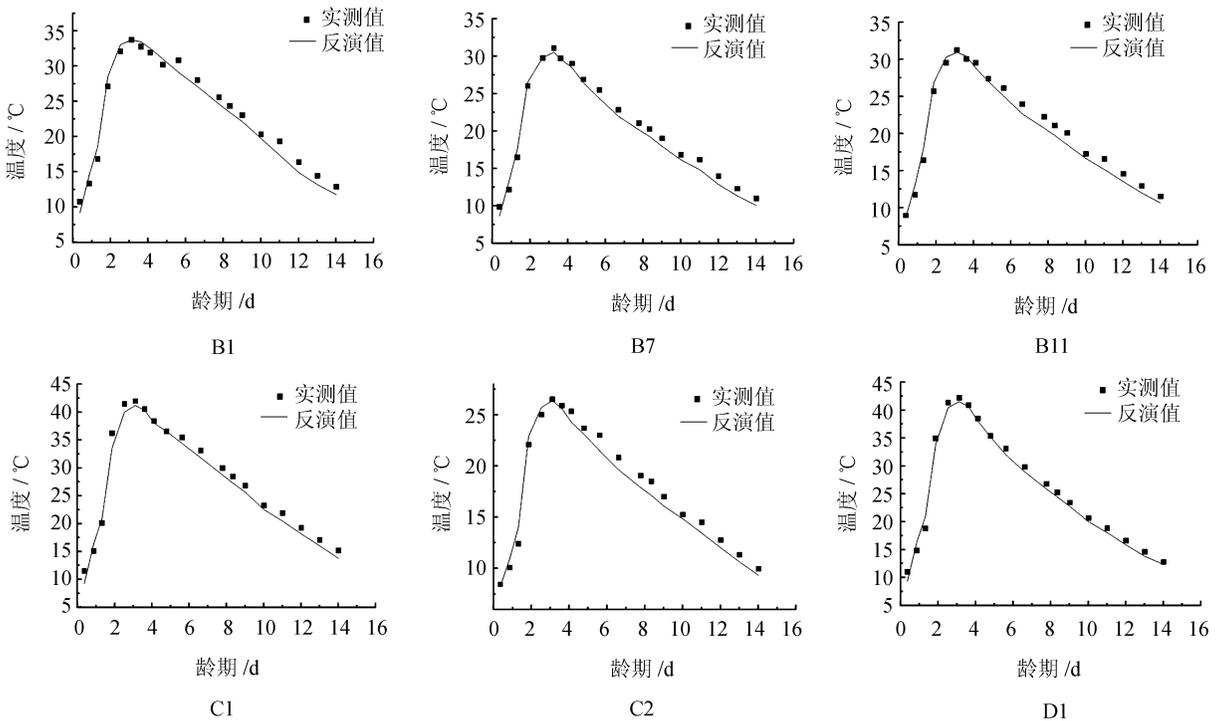


图 3 测点实测温度值与反演参数计算温度值对比

Fig 3 Comparison of temperatures of measurements with values calculated at typical points

从表 4 和图 3 上可以看出, 实测值和计算值吻合较好, 不同位置测点的温变曲线能较好的体现相互之间差别, 也能反映出各测点温度与所在位置保温材料和保温形式密切相关, B1 点覆盖的工业毛毡

保温效果好于 B7 点处的木模板, 故 B1 点温度高于 B7。C1 距离 (塑料膜 + 1 层草帘 + 土工膜) 较近, 保温效果远好于钢模板, 故 C1 点温度高于 C2。

需要说明的是, 由于不同的保温和不同的水管

冷却措施是在同一个模型中进行,相互影响和网格疏密程度对计算结果也有一定的影响,计算值和实测值之间会有误差产生,但误差均在  $1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  以内,显示出非常理想的反演效果,所得温控参数能反映带冷却水管的混凝土真实热学特性。

将此模型的反演结果直接运用到南水北调中线干线工程某大型渡槽,对不同季节施工的混凝土进行了多工况的仿真计算分析,得出相应的温控防裂措施,指导现场施工。现场反馈信息显示,计算结果与工程现场观测结果甚为吻合,且后续施工跨段没有发现裂缝产生,温控防裂取得圆满成功。

### 3 结 语

1) 塑料水管的等效表面放热系数和水管的厚度密切相关,随着管壁厚度的增加,其等效放热系数逐渐减小。加大塑料管管径并不一定带来更好的冷却效果,因为管径较大时,其管壁也会相应增厚,这会在一定程度上削弱管径加大带来的降温效果。

2) 带冷却水管的混凝土长方体试块温升试验模型简单,可操作性强。同时,多测点的布置结合反演方法可得到多种反映混凝土特性的温控参数,为制定温控防裂措施、满足工程建设需要提供服务。

3) 遗传算法把适者生存原则和结构化及随机化的信息交换结合在一起,形成了具有某些人类智能的特征,因此具有反演快和精度高的优点。借助这种方法根据实测数据确定计算参数的方法更为先进,结果也更为可靠,值得在工程实际中应用推广。

#### 参考文献:

- [1] Ding Baoying Wang Guobing Huang Shuping et al A review on causes of cracking in domestic concrete dams and preventive measures[J]. Water Resources and Hydropower Engineering 1994 25(4): 12-18 [丁宝瑛,王国秉,黄淑萍,等.国内混凝土坝裂缝成因综述与防止措施[J].水利水电技术,1994 25(4): 12-18]
- [2] Wang Dongdong Zhou Shiqing Experimental study of temperature rising of mass concrete insulating[J]. Coal Ash China 2006 17(5): 3-6 [汪冬冬,周士琼.大体积混凝土绝热温升试验研究[J].粉煤灰,2006 17(5): 3-6]
- [3] Zhang Yuxin, Song Yupu Wang Denggang Inverse analysis of three dimensional unsteady temperature field with genetic algorithms[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics 2004 21(3): 338-342 [张宇鑫,宋玉普,王登刚.基于遗传算法的混凝土三维非稳态温度场反分析[J].计算力学学报,2004 21(3): 338-342]
- [4] Xia Jiang Yan Ping Zhang Yizhou et al Prediction of soft soil foundations settlements based on genetic algorithm[J]. Rock and Soil Mechanics 2004 25(7): 1131-1134 [夏江,严平,庄一舟,等.基于遗传算法的软土地基沉降预测[J].岩土力学,2004 25(7): 1131-1134]
- [5] Zhu Yueming Liu Yongjun Determination of thermal parameters of concrete by reverse analysis of test results[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering 2002 24(2): 175-177 [朱岳明,刘勇军.确定温度特性多参数的立方体试验及反演分析[J].岩土工程学报,2002 24(2): 175-177]
- [6] Zhao Tongbin Tan Yunliang Liu Chuanxiao Research on back-analysis of roadway displacement based on genetic algorithms[J]. Rock and Soil Mechanics 2004 25(9): 107-109 [赵同彬,谭云亮,刘传孝.基于遗传算法的巷道位移反分析研究[J].岩土力学,2004 25(9): 107-109]
- [7] Zhang Guomei Zhu Yueming Inverse analysis on concrete thermal parameters based on fast simulated annealing algorithm[J]. Water Resources and Hydropower Engineering 2007 38(1): 56-58 [章国美,朱岳明.基于快速模拟退火算法的混凝土热学参数反演分析[J].水利水电技术,2007,38(1): 56-58]
- [8] Zhang Lili Xu Xiliang Wang Lai Finite element numerical simulation of ground subsidence in Liangjia Colliery[J]. Transactions of Tianjin University 2002 8(3): 200-202 [张力,刘锡良,王来.梁家煤矿地表移动的有限元数值模拟与参数反分析[J].天津大学学报:英文版,2002 8(3): 200-202]
- [9] 朱伯芳.大体积混凝土温度应力与温度控制[M].北京:中国电力出版社,1998

(编辑 张津徐)