

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2013.04.022

导电混凝土应用于建筑采暖工程的计算方法

左正¹, 杨晶², 胡昱¹, 王亚军³

- (1. 清华大学水利水电工程系; 水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084;
2. 山东宁建建设集团有限公司, 山东 济宁 272000; 3. 浙江海洋学院船舶与建筑工程学院, 浙江 舟山 316000)

摘要:导电混凝土作为一种新型建筑材料,将其应用于建筑采暖工程中,可有效节约资源、保护环境。室内空气温度是建筑采暖的主要关注点,针对导电混凝土作为建筑采暖地面的问题,在考虑电热效应、辐射换热与对流换热等的基础上,给出了混凝土温度场、室内空气平均温度的计算方法,无需对空气建模,简化了前处理工作量。与室内试验结果对比分析表明,计算结果与试验结果相对偏差在1.34%左右,验证了所提出计算方法的正确性与可用性。针对室内采暖效率,进行了不同组合工况的数值模拟分析,说明了通电电压、混凝土厚度的可挖潜能力较弱,导电混凝土的电阻率敏感性较强,是可挖潜的重要影响因素。

关键词:导电混凝土;建筑采暖;数值计算;电阻率

中图分类号:TU832.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2013)04-0139-06

Numerical Computing Method of Conductive Concrete Applied in Construction Heating Engineering

Zuo Zheng¹, Yang Jing², Hu Yu¹, Wang Yajun³

- (1. Department of Hydraulic Engineering; State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, P. R. China;
2. Shandong Ningjian Construction Group, Jinning, 272000 Shandong, P. R. China;
3. School of Naval Architecture and Civil Engineering, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316000, Zhejiang, P. R. China)

Abstract: It is worthwhile for saving energy and protecting environment to use conductive concrete as an indoor heating engineering material. Indoor temperature is the key concern of heating system. Based on convection, radiation and Joule effect, a method to calculate temperature of concrete and indoor air was presented. The method did not need to model the air, which simplified the preprocessing. The numerical result agreed with experiment satisfactorily, with a difference of 2.40%, which proved the correctness of the model. Numerical tests of different conditions showed that electrical resistivity with higher potential than power voltage and concrete thickness was the key to increase heating efficiency.

Key words: conductive concrete; heating; numerical analysis; electrical resistivity

当今世界能源问题日益紧张,最大限度地节约能源、保护环境是目前土木建筑领域的核心发展方向。中国大陆属典型的季风性气候,冬季寒冷,传统模式的建筑采暖具有鲜明的南北方特色,北方多采

用锅炉供热并配以分布式金属散热片,一次性投资大,且耗费大量煤炭资源,对环境也存在着废气污染的问题;南方则多采用室内空调采暖,耗电严重,维护成本较高。对此,一些学者展开了针对建筑采暖

收稿日期:2012-11-26

基金项目:国家自然科学基金(51109118);中国博士后科学基金(20100470344);清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室科研课题(2011-KY-4)

作者简介:左正(1987-),男,博士生,主要从事混凝土材料研究,(E-mail)zuo Zheng@yahoo.cn。

胡昱(通信作者),男,副教授,(E-mail)yu-hu@mail.tsinghua.edu.cn。

工程的改进研究,其中,导电混凝土作为一种地面加热材料的方式也在近年内被提出。

作为一种新型混凝土,导电混凝土通过掺入添加材料作为导电相,以降低其自身的电阻率,达到有效导电的目的。现阶段,主要的添加材料包括钢纤维^[1-3]、钢丝绒^[4-5]、碳纤维^[6-8]以及石墨^[5,9]等。一般来说,普通混凝土属于不良导体,电阻率较高,在 $6.54 \times 10^3 \sim 1.1 \times 10^4 \Omega \cdot \text{m}$ 之间^[10-11]。试验表明,混凝土在掺入少量钢纤维后电阻率可在早期有效降低至 $74 \sim 319 \Omega \cdot \text{m}$ ^[3],在掺入石墨后可改变在 $10^{-1} \sim 10^4 \Omega \cdot \text{m}$ ^[9],综合利用钢渣与碳纤维制成的导电混凝土电阻率达到了 $0.78 \Omega \cdot \text{m}$ ^[7]。

导电介质在通电后,可以产生电热效应,亦称焦耳效应,其温度将升高,并伴随有热量的产生与释放,因此,导电混凝土可用于公路融雪化冰^[6,12-13]、建筑采暖工程^[7,14]等。其中,对于导电混凝土应用于建筑采暖工程的研究,现阶段主要集中于实验层次,其计算方法的相关研究尚少见。笔者针对导电混凝土应用于室内采暖工程的问题,在考虑电热效应、导热与换热等计算原理的基础上,提出了该类问题的计算方法,并对不同工况进行了数值模拟分析。

1 计算模型

一般来讲,导电混凝土作为建筑内部地面加热材料的应用方式如图 1 所示,导电混凝土层位于绝热底层与地面铺层之间。工作时,分区域分单元地对导电混凝土层通电,以达到室内采暖的目的。地面铺层一般选择绝缘并且传热较好的材料,绝热底层一般选择隔热性能较好的材料。

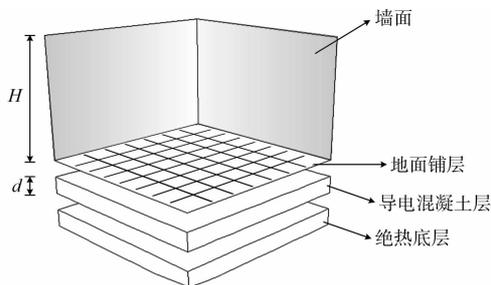


图 1 室内加热示意图

将导电混凝土层中的一个加热单元提取出来,抽象计算模型,如图 2 所示, d 为导电混凝土层的厚度, L 为导电介质间的跨度(电压间跨度), b 为导电截面的长度。

导电混凝土层内部在考虑电热效应的基础上,可按照各向同性介质的热传导问题求解,底部属于绝热边界条件,上部的地面铺层较薄且导热较好,可

视导电混凝土上表面与室内空气之间为对流换热与辐射换热边界条件。

室内空气不考虑由于流动形成的不均匀温度场,等效考虑为相同空间下的均匀温度介质,这样,数值模型中无需对空气建模,可将其作为一种边界条件处理,充分简化了计算的前处理工作量。室内空气在考虑与导电混凝土层的换热外,仍需考虑与室外空气通过墙体的换热。

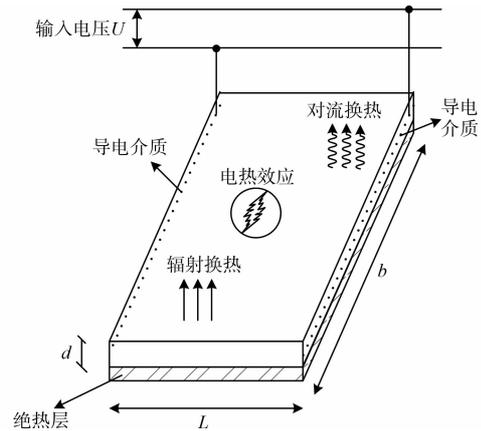


图 2 导电混凝土层计算模型

2 计算原理

2.1 电热效应

导电混凝土的电热效应采用下式计算

$$\frac{\partial Q}{\partial \tau} = P = U_{\text{RMS}}^2 / R \quad (1)$$

式中： Q 为导电介质电热效应的发热量， J ； τ 为时间， s ； P 为电热功率， W ； U_{RMS} 为有效电压值^[15]， V ，直流时 $U_{\text{RMS}} = U$ ，正弦交流时 $U_{\text{RMS}} = U_p / \sqrt{2}$ ，其中 U_p 峰值电压； R 为电阻值， Ω ， R 可采用下式计算：

$$R = \rho L / S = \rho L / bd \quad (2)$$

式中： ρ 为电阻率， $\Omega \cdot \text{m}$ ； S 为导电面积， m^2 。

电热效应产生的热量均匀分布在导电混凝土介质中，则有：

$$q = Q / V = Q / (L \cdot b \cdot d) \quad (3)$$

式中： q 为单体体积产生的热量， J/m^3 ； V 为导电混凝土体积， m^3 。

一般来说,导电介质的输入端为恒压交/直流电源,考虑室内地面可能潮湿的因素,中国标准^[16]规定安全电压在 35V (直流)/ 15V (交流)以下,即应有 $U \leq 35.0 \text{V}$ (直流), $U_p \leq 15.0 \text{V}$ (交流)。

2.2 热传导

对混凝土温度场的求解采用各向同性介质的热传导方程,即

$$\rho \frac{\partial T}{\partial \tau} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{\partial q}{\partial \tau} \quad (4)$$

式中: c 为比热, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; ρ 为密度, kg/m^3 , T 为温度, K ; τ 为时间, s ; λ 为导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; q 为热源产生的热量, J/m^3 ; 在本问题中即电热效应产生的热量, 由于涉及到辐射换热, 文中计算温度统一采用 Kelvin 温度 ($[\text{K}] = [\text{C}] + 273.15$)。混凝土初始条件应有

$$T|_{\tau=0} = T_{\text{ini},c} \quad (5)$$

式中 $T_{\text{ini},c}$ 为导电混凝土初始温度, K 。

2.3 对流换热

在不涉及电风扇、空调等通风装置的情况下, 室内空气与地板间的对流换热属于一种典型的自然对流^[17]问题, 针对加热地面与室内空气的自然对流换热, 采用下式^[18]计算,

$$q_c = 2.42 \frac{|T_p - T_a|^{0.31} (T_p - T_a)}{D_e^{0.08}} \quad (6)$$

式中: q_c 为对流换热热通量, W/m^2 ; T_p 为换热面温度, K ; T_a 为空气温度, K ; D_e 为换热面等效半径, m ; 以矩形换热面为例, 有

$$D_e = 4 \frac{A}{l} \quad (7)$$

式中: A 为矩形面积, m^2 ; l 为矩形周长, m 。

2.4 辐射换热

加热地面与室内空气之间的热辐射同样是重要的换热途径, 但热辐射的计算方法非常复杂, 利用 MRT 方法^[19]进行简化计算, 即

$$q_r = \sigma F_r (T_p^4 - T_r^4) \quad (8)$$

式中: σ 为斯蒂芬·玻尔兹曼 (Stefan-Boltzmann) 常数^[20], $5.670373 \times 10^{-8} \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$; q_r 为辐射换热热通量, W/m^2 ; F_r 为辐射换热因子 (无量纲); T_p 为辐射板表面的平均温度, K ; T_r 为非加热面表面的平均温度, K 。针对室内环境, F_r 可以取为 0.87 ^[18], 即 $\sigma F_r = 4.93 \times 10^{-8} \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ 。

2.5 墙体换热

室内空气受外墙影响的热流量均化到每个加热单元中, 记为 $Q_{w,\tau}$, 可以采用下式计算,

$$Q_{w,\tau} = h_w \Delta T (A_w/n) \Delta \tau = h_w (T_e - T_w) (A_w/n) \Delta \tau \quad (9)$$

式中: $Q_{w,\tau}$ 为外界环境向室内每个加热单元的换热量, J ; T_w 为墙体温度, K ; h_w 为墙面的换热系数, $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$; A_w 为墙面总面积, m^2 ; n 为室内加热单元总数; T_e 为室外空气温度, K ; 在较短时间内可视为恒定, 较长时间尺度上按照气温统计曲线给出。由于墙体温度很难获得, 可以将室内空气温度

视为墙体温度, 即 $T_e = T_a$, 并对 h_w 进行相关修正。

2.6 室内空气温度的计算方法

在计算中, 单独为室内空气平均温度建立数组 $\{T_a\}$, 有初始条件:

$$\{T_a\}|_{\tau=0} = T_{\text{ini},a} \quad (10)$$

式中: $T_{\text{ini},a}$ 为室内空气初温, K ; 非特殊条件下应有 $T_{\text{ini},a} = T_{\text{ini},c}$ 。每一增量步中, 利用 $T_{a,\tau}$ 计算该步中的对流换热与辐射换热边界条件, 集总得到该步的换热量 $Q_{a,\tau}$:

$$Q_{a,\tau} = (q_c + q_r) A \Delta \tau \quad (11)$$

式中: $Q_{a,\tau}$ 为地面向空气的换热量, J ; q_c 为对流换热的热通量, W/m^2 ; q_r 为辐射换热的热通量, W/m^2 ; A 为换热面积, m^2 ; $\Delta \tau$ 为增量步的时间步长, s 。

在得到 $Q_{a,\tau}$ 和 $Q_{w,\tau}$ 后, 可以计算下一增量步开始时的 $T_{a,(\tau+\Delta\tau)}$,

$$\rho_a c_a (AH) [T_{a,(\tau+\Delta\tau)} - T_{a,\tau}] = Q_{a,\tau} + Q_{w,\tau} \quad (12)$$

式中: ρ_a 为空气密度, kg/m^3 ; c_a 为空气比热, $\text{J}/\text{kg} \cdot \text{K}$; A 为地面换热面积, m^2 ; H 为室内高度, m ; $T_{a,\tau}$ 、 $T_{a,(\tau+\Delta\tau)}$ 分别为 τ 和 $\tau+\Delta\tau$ 时刻的空气温度, K 。

3 数值算例与讨论

3.1 材料参数

根据已有试验资料确定的基本材料参数如表 1, 不同导电相掺入材料的混凝土导电率如表 2 所示。

表 1 材料参数

材料	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	比热/ ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	导热系数/ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)
混凝土	2 291.0	1 048.5	2.31
空气	1.293	1 000.0	—

表 2 电阻率

导电材料组分	电阻率/($\Omega \cdot \text{m}$)
钢渣+1.2%碳纤维 ^[7]	0.78
1%碳纤维 ^[21]	1.20
25%石墨浆 ^[14]	0.24

3.2 算例验证

文献[7]曾采用 $b = 1.0 \text{m}$, $L = 0.4 \text{m}$, $d = 0.05 \text{m}$ 的地面布置形式, $\Delta U = 36.0 \text{V}$ (按照较早规范^[22]) 的直流输入电压, 利用钢渣与碳纤维作为混凝土导电添加材料, 在不同室内外初始温差 ΔT 情况下进行了为期 2 h 的室内采暖原位试验。对此, 笔者按上述条件建立了有限元模型, 如图 3 所示, 并

进行数值模拟分析,计算 2 h 后的室内空气上升温度,结果符合原实验结果在 15.5~20.4 °C 之间的结论,具体如表 3 所示,计算结果与实验结果的平均相对偏差为 1.34%,说明了本文所述计算方法的合理性与可行性。

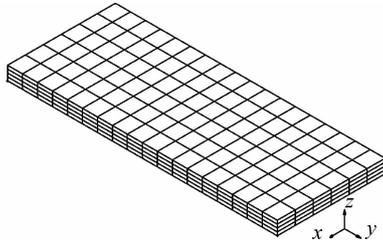


图 3 导电混凝土层有限元网格

表 3 计算室内空气的上升温度

室内外初始温差 $\Delta T_0/^\circ\text{C}$	计算结果/ $^\circ\text{C}$	实验结果/ $^\circ\text{C}$
-6.2	19.16	19.6
-4.6	18.72	18.9
-4.5	18.70	18.7
-3.5	18.36	18.9
-2.3	18.09	18.3
-1.9	17.98	18.8
-0.8	17.68	17.3
1.2	17.12	17.6
2.0	16.90	16.9
3.1	16.60	16.8
3.2	16.57	17.0
3.6	16.45	16.5

注: $\Delta T_0=(\text{初始时刻})\text{室内温度}-\text{室外温度}$ 。

3.3 温度场

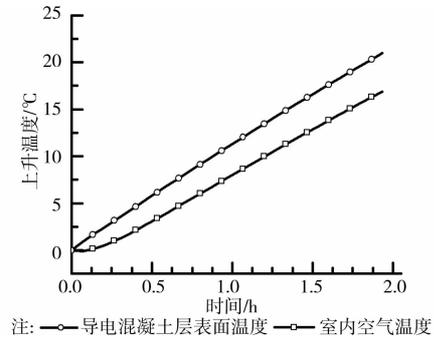
采取验证算例的布置形式与混凝土材料,调整直流通电电压为 35.0 V,以室内外初始温差 2.0 °C 为例,计算温度历程如图 4 所示,由于墙体换热的存在,室内空气温度的上升斜率在后期要小于导电混凝土层表面。

绘制通电 2 h 时的导电混凝土层的竖向温度变化场分布云图如图 5 所示,层内沿垂直方向形成了热量流动,在上表面附近温度梯度较大,上下表面温差在 2 °C 左右。

3.4 换热量

采取验证算例的布置形式与混凝土材料,计算并统计通电 2 h 内不同室内外初始温差 ΔT_0 情况下自然对流换热与辐射换热的换热量如表 4 所示,在导电混凝土层与室内空气的换热过程中,辐射换热

所占的比重较大,总量上有辐射换热量:对流换热量=60%:40%,以室内外初始温差 $\Delta T_0=2.0$ °C 为例,计算热通量历程如图 6 所示。



注:—○—导电混凝土层表面温度 —□—室内空气温度

图 4 $\Delta T_0=2.0$ °C 情况的计算温度

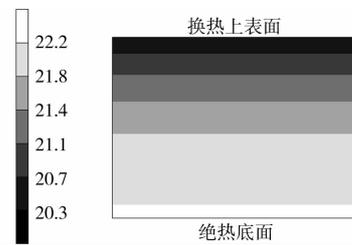


图 5 通电 2 h 导电混凝土层温度变化云图($^\circ\text{C}$)

表 4 换热量

$\Delta T_0/^\circ\text{C}$	对流换热量/kJ	辐射换热量/kJ
-4.0	18.3	29.4
-3.0	19.2	30.4
-2.0	20.1	31.5
-1.0	21.0	32.5
0.0	21.9	33.5
1.0	22.8	34.5
2.0	23.7	35.6
3.0	24.7	36.6
4.0	25.6	37.6

3.5 采暖效率的敏感性分析

一般来讲,混凝土的密度、比热在基本配合比一定的情况下较为固定,因此对于导电混凝土应用于建筑采暖的加热效率而言,主要的影响因素应为通电电压、导电混凝土的电阻率以及混凝土层厚度。对此,在相同平面布置尺寸($b=1.0$ m, $L=0.4$ m)、相同室内外初始温差 $\Delta T_0=2$ °C 的基础上,进行了上述 3 种影响因素的数值试验,共计算工况 18 个($3 \times 3 \times 2$),计算结果如图 7 所示。以室内气温上升

10℃为标准,统计不同计算工况下所需的通电时间如表 5 所示。

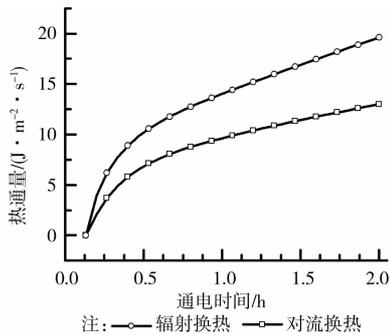
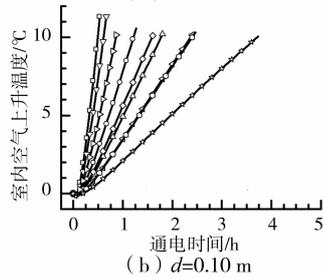
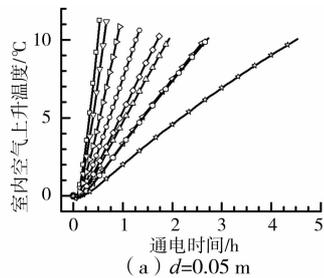


图 6 $\Delta T_0=2.0\text{ }^\circ\text{C}$ 情况的热通量历程



注: $\rho=1.20, \Delta U=24\text{ V}$ $\rho=0.24, \Delta U=35\text{ V}$
 $\rho=0.78, \Delta U=35\text{ V}$ $\rho=1.20, \Delta U=35\text{ V}$
 $\rho=0.24, \Delta U=30\text{ V}$ $\rho=0.78, \Delta U=30\text{ V}$
 $\rho=0.12, \Delta U=30\text{ V}$ $\rho=0.24, \Delta U=24\text{ V}$
 $\rho=0.78, \Delta U=24\text{ V}$

图 7 不同情况下的室内空气温度发展

表 5 室内气温上升 10℃ 所需时间

厚度 d/m	电阻率 $\rho/(\Omega \cdot \text{m})$	输入电压 $\Delta U/\text{V}$	通电时间 t/h
0.05	0.24	35.0	0.49
0.05	0.24	30.0	0.61
0.05	0.24	24.0	0.93
0.05	0.78	35.0	1.27
0.05	0.78	30.0	1.70
0.05	0.78	24.0	2.70
0.05	1.20	35.0	1.93
0.05	1.20	30.0	2.65
0.05	1.20	24.0	4.50
0.10	0.24	35.0	0.49
0.10	0.24	30.0	0.61

续表 5

厚度 d/m	电阻率 $\rho/(\Omega \cdot \text{m})$	输入电压 $\Delta U/\text{V}$	通电时间 t/h
0.10	0.24	24.0	0.85
0.10	0.78	35.0	1.21
0.10	0.78	30.0	1.59
0.10	0.78	24.0	2.40
0.10	1.20	35.0	1.76
0.10	1.20	30.0	2.37
0.10	1.20	24.0	3.73

将采暖效率的敏感性指标定义为:通电时间变化比率/参变量变化比率^[23],即

$$S_{\langle F_i \rangle} = \left| \frac{\Delta t/t}{\Delta F_i/F_i} \right| = \left| \frac{[f(F_i + \Delta F_i, F_j |_{j \neq i}) - f(F_1, F_2, \dots, F_n)]/t}{\Delta F_i/F_i} \right| \quad (13)$$

式中: t 为所需通电时间; F_i 为某一参变量; $S_{\langle F_i \rangle}$ 为 t 对 F_i 的敏感性指标; ΔF_i 为参变量变化量; Δt 为通电时间变化量。

根据计算结果,对不同组合工况进行参数敏感性分析,可得到 $\rho, \Delta U, d$ 的平均敏感性指标分别为 0.84、2.73、0.16。说明采暖效率对输入电压非常敏感,但是由于安全电压的限制,直流 35.0 V 已是极限,没有挖潜的余地;采暖效率对厚度的敏感性较弱,且进一步加厚将带来工程材料增加的额外费用,并不值得做太多文章;采暖效率对导电混凝土的电阻率敏感性较强,且导电材料仍有进一步研究挖潜的空间。因此,导电混凝土的导电能力是其应用于建筑采暖工程中的主要考虑因素与研究重点。

4 结 论

1)在考虑对流换热、辐射换热以及电热效应等计算原理的基础上,提出了导电混凝土应用于建筑采暖工程中的计算方法,通过对已有试验的数值模拟,证明了计算方法的正确性与可行性。

2)通过数值试验证明了掺入添加材料后混凝土的导电性能是建筑采暖工程中应用的重要考察因素。

没有考虑配制导电混凝土的经济性是本文的不足,这也将是未来研究工作中的重点。

参考文献:

[1] Yehia S, Tuan C Y. Conductive concrete overlay for bridge deck deicing [J]. ACI Materials Journal, 1999, 96(3): 382-390.

- [2] Xie P, Gu P, Beaudoin J J. Electrical percolation phenomena in cement composites containing conductive fibres [J]. *Journal of materials science*, 1996, 31(15): 4093-4097.
- [3] Banthia N, Djeridane S, Pigeon M. Electrical resistivity of carbon and steel micro-fiber reinforced cements [J]. *Cement and Concrete research*, 1992, 22(5): 804-814.
- [4] Liu Q, Schlangen E, García á, et al. Induction heating of electrically conductive porous asphalt concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2010, 24(7): 1207-1213.
- [5] García á, Schlangen E, van de Ven M, et al. Electrical conductivity of asphalt mortar containing conductive fibers and fillers [J]. *Construction and Building Materials*, 2009, 23(10): 3175-3181.
- [6] 唐祖全, 李卓球, 侯作富, 等. 导电混凝土融雪化冰机理分析[J]. *混凝土*, 2001(7): 8-11.
Tang Z Q, Li Z Q, Hou Z F, et al. Mechanism analyzing on deicing or snow-melting of electrical conductive concrete [J]. *Concrete*, 2001, (7): 8-11.
- [7] 许孝春, 宋建成, 冯晋阳. 钢渣-碳纤维发热混凝土地板的研制[J]. *混凝土*, 2008(2): 122-124.
Xu X C, Song J C, Feng J Y. Development of steelslag-carbon fiber heating concrete floor [J]. *Concrete*, 2008(2): 122-124.
- [8] Hou Z, Li Z, Wang J. Electrically conductive concrete for heating using steel bars as electrodes [J]. *Journal of Wuhan University of Technology: Materials Science Edition*, 2010, 25(3): 523-526.
- [9] 周浩, 陈隆道. 导电混凝土及其应用[J]. *混凝土*, 1992(4): 12-13.
Zhou H, Chen L D. Conductive concrete and its application [J]. *Concrete*, 1992(4): 12-13.
- [10] Whittington H W, McCarter J, Forde M C. The conduction of electricity through concrete [J]. *Magazine of Concrete Research*, 1981, 33(14): 48-60.
- [11] Tuan C Y, Yehia S. Evaluation of electrically conductive concrete containing carbon products for deicing [J]. *ACI Materials Journal*, 2004, 101(4): 287-293.
- [12] Zhang J, Peterson R. Selection of effective and efficient snow removal and ice control technologies for cold-region bridges [J]. *Journal of Civil, Environmental, and Architectural Engineering*, 2009, 3(1): 1-14.
- [13] Hong L, Zhao Y. The electrical properties and snow melting of graphite slurry infiltrated steel fiber concrete [J]. *Journal of Wuhan University of Technology: Materials Science Edition*, 2010, 25(4): 609-612.
- [14] 李仁福, 戴成琴. 导电混凝土采暖地面[J]. *混凝土*, 1998(1): 47-48.
Li R F, Dai C Q. Conductive concrete warming floor [J]. *Concrete*, 1998(1): 47-48.
- [15] Cartwright K V. Determining the effective or RMS voltage of various waveforms without calculus [J]. *The Technology Interface*, 2007, 8(1): 1-20.
- [16] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 3805—2008 特低电压(ELV)限制[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [17] Cengel Y A. *Heat transfer: a practical approach* [M]. New York: McGraw-Hill, 2007.
- [18] ASHRAE H. *Systems and Equipment Handbook* [M]. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Inc, 2008.
- [19] Walton G N. A new algorithm for radiant interchange in room loads calculations [J]. *ASHRAE transactions*, 1980, 86(2): 190-208.
- [20] The National Institute of Standards and Technology. *The NIST reference on constants, units, and uncertainty* [R]. Gaithersburg, 2011.
- [21] 沈刚, 董发勤. 碳纤维导电混凝土的性能研究[J]. *公路*, 2004(12): 178-181.
Shen G, Dong F Q. Performance research on carbon fiber conductive concrete [J]. *Highway*, 2004(12): 178-181.
- [22] 中华人民共和国劳动人事部. GB 3805—83 安全电压[S].
- [23] 黄清华, 张万昌. SWAT 模型参数敏感性分析及应用[J]. *干旱区地理*, 2010, 33(1): 8-15.
Huang Q H, Zhang W C. Application and parameters sensitivity analysis of SWAT model [J]. *Arid Land Geography*, 2010, 33(1): 8-15.

(编辑 胡英奎)