

沥青混凝土路面融雪热流密度的分析

屠艳平^{1,2,3},李杰^{2,3},胡国祥^{2,3},姜文⁴,张治军⁵

(1. 武汉理工大学土木工程与建筑学院,湖北 武汉 430070;

2. 武汉工程大学环境与城市建设学院,湖北 武汉 430074;

3. 武汉工程大学交通研究中心,湖北 武汉 430074;

4. 湖北电力勘测设计院,湖北 武汉 430062;

5. 湖北工程建设总承包有限公司,湖北 武汉 430077)

摘要:以武汉地区2010年1月5日的气象条件,分析了京珠高速湖北段沥青混凝土路面融雪随机传热机理,建立了传热模型.在分析埋管的传热基础上,计算出给定热流密度时管内流体的平均温度.探讨了不同气象条件下的热流密度,结果表明降雪量及室外温度为影响热流密度的关键因素,风速为主要因素,环境空气相对湿度为次要因素.

关键词:沥青混凝土路面;地源热泵;随机传热;融雪化冰;热流密度

中图分类号: TU528

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.1674-2869.2010.09.009

0 引言

道路交通事故在天气恶劣条件下会增加.据资料统计,2008年11月全国有19省(区、市)雨、雪、雾等恶劣天气交通事故导致死亡人数同比上升,山东省2009年11月阴、雨、雾、雪等恶劣天气条件下共发生道路交通事故、死亡人数分别占总数的16.8%、19.5%.在冬季下雪时,路面积雪、结冰,导致车辆行驶困难,极易发生交通事故.据统计,路面湿润时发生的事是干燥路面的2倍,降雪时是干燥路面的5倍,结冰时是干燥路面的8倍^[1].2010年1月9日晚22时许,受路面结冰影响,汉十高速公路湖北枣阳段张凹水库大桥处,发生4起道路交通事故,12台车辆相继连环追尾相撞,造成7人死亡、14人轻伤.可见道路融雪化冰对冬季道路交通条件的改善起到关键作用.目前国内外道路融雪化冰新技术是采用热力学法,包括导电混凝土、发热电缆及地源热泵.其中地源热泵融雪化冰技术利用太阳能蓄热,可节约能源^[2],同时环保、高效,发展前景巨大.美国、日本、北欧等国家已经有一批典型的地源热泵道路、桥梁融雪示范工程,在国内已有学者开展了相关研究,胡文举^[3]进行了沥青混凝土桥面融雪系统的基础研究,王华军^[4]对流体加热水泥混凝土道路融雪传

热介质特性进行了研究,但目前还没有对沥青混凝土路面融雪化冰的研究.本文以武汉地区2010年1月5日的气象条件为依据,分析京珠高速湖北段沥青混凝土路面融雪随机传热机理,并确定武汉地区沥青混凝土路面融雪热流密度.

1 分析条件

1.1 气象条件

分析计算采用武汉2010年1月5日历史降雪记录.降雪时段是2:00 PM~10:00 PM,持续8 h;积雪厚度为12.8 mm,瞬态降雪强度为1.6 mm/h;气温-3~-2℃;偏北风3~4级;相对湿度60%~95%.

1.2 路面条件^[5]

湖北省京珠高速公路全部采用沥青路面,结构如下:

a. 4 cm SUPER-PAVE12.5或AK-16A抗滑表层;b. 中面层为6 cm厚的AC-20I型沥青混凝土;c. 底层为6 cm厚的AC20S沥青混凝土.

1.3 材料热物性参数

由于摊铺沥青混合料温度不低于110~130℃,埋管采用耐高温高密度聚乙烯管,导热系数 $\lambda_p = 0.39 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$,内径 $D_1 = 22 \text{ mm}$,外径 $D_2 = 25 \text{ mm}$.沥青混凝土 $\lambda_A = 1.0 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$.

收稿日期:2010-04-09

基金项目:湖北省自然科学基金资助项目(2008CDB362)

作者简介:屠艳平(1977-),女,湖北孝感人,讲师,博士研究生.研究方向:路面融雪化冰.

2 路面随机传热分析

融雪化冰随机传热机理如图1所示。在沥青混凝土面层中埋耐高温高密度聚乙烯管,管内流体温度大于路面温度,于是沥青混凝土内部存在温差,热量由埋管传至路面(埋管下表面做绝热处理)。路面上的积雪吸收热量,温度升高直至融化成水并蒸发,路面无积雪及水。这一过程是随机非稳态的,融雪所需的热量主要包括:升高雪的温度所需显热 q_s 、融化雪所需潜热 q_m 、对流换热 q_c 、长波辐射换热 q_r 、水蒸发所需热量 q_e ;热源为地源热泵提供热量 q_0 及吸收太阳辐射热 q_1 。

依据能量平衡,有

$$q_0 + q_1 = q_s + q_m + A_r(q_c + q_r + q_e) \quad (1)$$

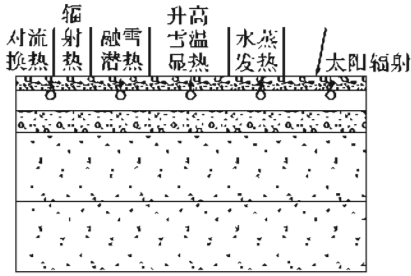


图1 融雪化冰随机传热机理

Fig. 1 Random heat transfer mechanism based on snow melting

则单位面积融雪化冰所需热流密度为

$$q_0 = q_s + q_m + A_r(q_c + q_r + q_e) \quad (2)$$

$$q_s = \rho_{\text{snow}} S (C_w T_0 - C_{\text{snow}} T_a) \quad (3)$$

$$q_m = \rho_{\text{snow}} S h_f \quad (4)$$

$$q_c = h_c (T_f - T_a) \quad (5)$$

$$q_r = \varepsilon \sigma (T_f^4 - T_{\text{sky}}^4) \quad (6)$$

$$q_e = h_m H_i \rho_w (100 - \varphi) \quad (7)$$

$$q_1 = \alpha I \quad (8)$$

其中: A_r 为融雪等级; ρ_{snow} 为冰雪的密度,取 917 kg/m^3 ; S 为降雪量, mm/h ; C_w 为水的比热, C_{snow} 为冰雪的比热,按文献[4]中公式计算为 $2.05 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; T_0 为雪融化成水的温度, $^{\circ}\text{C}$; T_a 为空气温度, $^{\circ}\text{C}$; h_f 为冰雪的融解热,取 $334 \text{ kJ}/(\text{kg})$; h_c 为对流换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, $h_c = 5.678 [a + b(v/0.304)^n]$, $a = 1.09$, $b = 0.23$, $n = 1$; T_f 为水膜温度, $^{\circ}\text{C}$; ε 为路面辐射率,沥青混凝土取 0.96 ; σ 取 $5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$; T_{sky} 为天空辐射温度, $T_{\text{sky}} = 0.522 T_{\text{db}}^{1.5}$, T_{db} 为空气干球温度; h_m 为水蒸发时的传质速率,与风速有关; H_i 为蒸发潜热, $2502 \text{ kJ}/(\text{kg})$; φ 为空气相对湿度; α 为太阳能集热效率,取 0.6 ; I 为大地表面太阳辐射量, W/m^2 。

根据上述气象条件,可分别求出 q_s 、 q_m 、 q_c 、 q_r 、 q_e 、 q_1 ,计算出 q_0 。

$$T_0 = 0^{\circ}\text{C}, T_a = -3^{\circ}\text{C}, T_f = 0^{\circ}\text{C} = 273 \text{ K},$$

$$T_{\text{sky}} = 2.71^{\circ}\text{C} = 270.29 \text{ K},$$

$$q_s = 2.50 \text{ W}/\text{m}^2, q_m = 136 \text{ W}/\text{m}^2,$$

$$h_c = 23.37 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}), q_c = 70.11 \text{ W}/\text{m}^2,$$

$$q_r = 5.99 \text{ W}/\text{m}^2, q_e = 40.3 \text{ W}/\text{m}^2 [6]$$

武汉地区全年累计太阳辐射量为 $4497 \text{ MJ}/\text{m}^2$, $I = 142.60 \text{ W}/\text{m}^2$, $q_1 = 85.56 \text{ W}/\text{m}^2$, A_r 取 1 ,则 $q_0 = 169.34 \text{ W}/\text{m}^2$ 。

由于武汉地区冬天最低气温为 -5°C ,与北方相比较,气温较高,升高雪温所需显热少,同时辐射散热也很小,起主要作用的是融雪潜热、对流换热和蒸发热。融雪潜热与降雪量成线性关系,对流换热主要与风速和空气温度有关,蒸发热主要与风速有关。以上求出的是给定气象条件下的最大热负荷,同时考虑利用太阳能以节约资源,提高经济效益。

3 埋管传热分析

埋管埋入沥青混凝土中,首先埋管内流体与管壁进行对流换热,然后管壁内传热,最后与沥青混凝土进行热交换(假设热量不向下传递)。引入热阻的概念,管内平均温度为 t_w 的乙二醇水溶液(质量分数为 16% ,流量为 12.5 L/s),以定热流 q 给沥青混凝土进行传热。

$$t_w = t_b = q R_B \quad (9)$$

$$t_b - t_0 = q R_A \quad (10)$$

$$t_w - t_0 = q (R_B + R_A) \quad (11)$$

其中 t_w 、 t_b 、 t_0 分别为管内流体平均温度、孔壁温度和路面温度, $^{\circ}\text{C}$; R_B 为埋管热阻, R_A 为埋管上沥青混凝土面层热阻,分别按式(12)、(16)计算。

$$R_B = R_p + R_f \quad (12)$$

其中 R_p 为管壁热阻、 R_f 管内流体换热热阻,分别按式(13)、(14)计算。

$$R_p = \ln(D_2/D_1)/(2\pi\lambda_p) \quad (13)$$

$$R_p = 0.052 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$$

$$R_f = 1/(\pi D_1 h_f) \quad (14)$$

其中 h_f 为埋管内流体对流换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$

$$h_f = 0.023 Re^{0.8} P_r^{0.4} \lambda_f / D_1 \quad (15)$$

其中雷诺数 $Re = 10724$, P_r 为流体普朗特数 $= 57.65$, λ_f 为管内流体导热系数,取 $0.558 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$,则 $h_f = 194 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$

$$R_f = 0.075 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$$

$$R_A = \delta / \lambda_A \quad (16)$$

δ 为埋管深度,取 40 mm.

$$R_A = 0.04 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$$

$t_w - t_0 = q \times (0.052 + 0.075 + 0.04)$, q 取 $q_0 = 169.34 \text{ W/m}^2$, 当 t_0 取 0°C 时, $t_w = 28.3^\circ\text{C}$.

从以上分析计算可知,管径、管内流体热物性参数、流体流量、埋管深度对地源热泵融雪化冰效果有很大影响,如果设计不合理,会影响到系统的可靠性、经济性.

4 不同气候条件下的热流密度

上述分析计算只是给定气象条件下的热流密度,不同天气条件下热流密度是不相同的.由以上分析知热流密度与降雪量、空气温度、风速和环境相对湿度有关,而这些因素孰主孰次从以上的计算还无法推段出,因此很有必要进行不同气候条件下融雪热流密度的计算.

4.1 不同降雪量时的热流密度

空气温度为 $T_a = -3^\circ\text{C}$, 风速为 $V = 4 \text{ m/s}$, 环境相当湿度为 $\varphi = 60\%$, 融雪等级 $A_r = 1$, 太阳辐射 $q_1 = 85.56 \text{ W/m}^2$ 保持不变,降雪量变化时的热流密度见表 1.

表 1 不同降雪量时的热流密度 W/m^2

Table 1 Heat flux of different snowfall W/m^2

$S/(\text{mm/h})$	q_s	q_m	q_c	q_r	q_e	q_0
1	1.56	85	70.11	5.99	40.3	117.4
2	3.12	170	70.11	5.99	40.3	203.96
3	4.68	255	70.11	5.99	40.3	290.52

4.2 不同风速时的热流密度

降雪量 $S = 2 \text{ mm/h}$, 空气温度 $T_a = -3^\circ\text{C}$, 环境相对湿度 $\varphi = 60\%$, 融雪等级 $A_r = 1$, 太阳辐射 $q_1 = 85.56 \text{ W/m}^2$ 保持不变,风速变化时的热流密度见表 2.

表 2 不同风速时的热流密度 W/m^2

Table 2 Heat flux of different wind speeds W/m^2

$V/(\text{m/s})$	q_s	q_m	q_c	q_r	q_e	q_0
3	3.12	170	57.24	5.99	30.5	181.29
4	3.12	170	70.11	5.99	40.3	203.96
5	3.12	170	83.01	5.99	45.7	222.26

4.3 不同空气温度时的热流密度

降雪量 $S = 2 \text{ mm/h}$, 风速为 $V = 4 \text{ m/s}$, 环境相对湿度 $\varphi = 60\%$, 融雪等级 $A_r = 1$, 太阳辐射 $q_1 = 85.56 \text{ W/m}^2$ 保持不变,空气温度变化时的热流密度见表 3.

表 3 不同室外空气温度时的热流密度 W/m^2

Table 3 Heat flux of different outdoor air temperatures W/m^2

$T_a/^\circ\text{C}$	q_s	q_m	q_c	q_r	q_e	q_0
-3	3.12	170	70.11	5.99	40.3	203.96
-4	4.16	170	93.48	20.54	40.3	248.91
-5	5.20	170	116.9	27.46	40.3	280.29

4.4 不同环境相对湿度时的热流密度

空气温度为 $T_a = -3^\circ\text{C}$, 降雪量 $S = 2 \text{ mm/h}$, 风速为 $V = 4 \text{ m/s}$, 融雪等级 $A_r = 1$, 太阳辐射 $q_1 = 85.56 \text{ W/m}^2$ 保持不变,环境相对湿度发生变化时的热流密度见表 4.

表 4 不同相对湿度时的热流密度 W/m^2

Table 4 The heat flux of different relative humidity W/m^2

φ	q_s	q_m	q_c	q_r	q_e	q_0
50	3.12	170	70.11	5.99	50.4	213.76
60	3.12	170	70.11	5.99	40.3	203.96
70	3.12	170	70.11	5.99	30.3	193.96
80	3.12	170	70.11	5.99	20.2	182.86
90	3.12	170	70.11	5.99	10.1	179.76

4.5 极端气象条件

根据武汉地区近十年的气象数据,确定极端气象条件是 $S = 2 \text{ mm/h}$, $T_a = -5^\circ\text{C}$, $V = 5 \text{ m/s}$, 太阳辐射 $q_1 = 85.56 \text{ W/m}^2$ 不变.在极端气象条件下不同融雪等级的热流密度见表 5.

表 5 极端气象条件不同融雪等级时的热流密度 W/m^2

Table 5 Heat flux of different snowmelt level of extreme weather condition W/m^2

A_r	q_s	q_m	q_c	q_r	q_e	q_0
0.7	5.2	170	138.35	27.46	57.6	246.03
0.8	5.2	170	138.35	27.46	57.6	268.37
0.9	5.2	170	138.35	27.46	57.6	290.71
1.0	5.2	170	138.35	27.46	57.6	313.05

由表 1 可知,降雪量从 1 mm/h 增大到 2 mm/h 、从 2 mm/h 增大到 3 mm/h 热流密度均增加 86.56 W/m^2 ,且最大热流密度出现在其他气象条件不变降雪量为 3 mm/h 情况下.由表 2 可知风速从 3 m/s 增大到 4 m/s 热流密度增加 22.67 W/m^2 、从 4 m/s 增大到 5 m/s 热流密度增加 18.30 W/m^2 .由表 3 可知室外温度从 -3°C 降到 -4°C 热流密度增加 44.95 W/m^2 ,从 -4°C 降到 -5°C 热流密度均增加 31.33 W/m^2 ,其他气象条件不变室外温度在 -5°C 情况下热流密度居第二位.由表 4 可知相对湿度每增加 10% ,热流密度约增加

10 W/m². 可见武汉地区降雪量及室外温度是影响融雪化冰热流密度的关键因素. 主要是因为雪的融解热很大, 且根据式(5)在水膜温度为 0 ℃ 情况下温度越低对流换热也越大. 风速是主要因素, 相对湿度是次要因素, 是因为风速对换热及辐射换热有较大影响, 而模型中相对湿度只对蒸发热有影响. 由表 5 可知在极端气候条件下不同的融雪等级, 热流密度增加不大, 但其取值对系统的可靠性及经济性影响极大.

5 结 语

地源热泵融雪化冰高效、环保, 在国外已经有应用, 而在我国还处于起步阶段. 通过对沥青混凝土路面融雪随机传热机理的研究可确定不同气象条件下的融雪热流密度, 通过对埋管的传热分析, 埋管的参数选择对融雪化冰的效果有很大影响. 本文的研究为地源热泵融雪化冰系统的设计祭奠了基础.

参考文献:

- [1] 张志刚. 道路因素、交通环境与交通事故分析[J]. 公路交通科技, 2002, 17(6): 56-59.
- [2] Koji Morita, Masashi Ogawa. Geothermal and Solar Heat Used to Melt Snow on Roads[R]. United Kingdom, Harwell: CADDET Centre for Renewable Energy, Organization for Economic Co-operation Development (OECD), 1998.
- [3] 胡文举. 基于土壤热泵桥面融雪系统的基础研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.
- [4] 王华军. 流体加热道路融雪传热介质特性研究[D]. 天津大学, 2007.
- [5] 吴少鹏, 黄晓明, 赵永利. 湖北京珠高速公路北段路面结构设计与分析[J]. 武汉理工大学学报, 2002, 24(3): 71-73.
- [6] 涂■, 陈辉, 吴少鹏, 等. 导电沥青混凝土融雪化冰热输出功率计算方法[J]. 武汉理工大学学报, 2009, 31(13): 37-40.

Analysis of heat flux of asphalt concrete pavement based on snow melting

TU Yan-ping^{1,2,3}, LI Jie^{2,3}, HU Guo-xiang^{2,3}, JIANG Wen⁴, ZHANG Zhi-jun⁵

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;

2. School of Environmental and Civil Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China;

3. Transportation Research Center, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China;

4. Hubei Electric Power Survey & Design Institute, Wuhan 430062, China;

5. Hubei Construction CO. LTD, Wuhan 430077, China)

Abstract: On the basis of Wuhan district January 5, 2010 weather conditions, random heat transfer mechanism of Beijing-Zhuhai Expressway Hubei section of asphalt concrete pavement based on snow melting is analyzed and the model of heat transmission is established. The average temperature of tube fluid is calculated for a given heat flux based on the analysis of the heat transfer of pipes. Heat flux of different meteorological conditions is investigated and the results show that the rate of snow fall and air temperature are the key factors, the wind velocity is the main factor and the air relative humidity is the minor factor.

Key words: asphalt concrete pavement; ground-source heat pump; random heat transfer; deicing and snow melting; heat flux

本文编辑: 龚晓宁