

文章编号: 0451—0712(2004)12—0178—04

中图分类号: U414. 180. 1

文献标识码: A

碳纤维导电混凝土的性能研究

沈刚, 董发勤

(西南科技大学 绵阳市 621010)

摘 要: 以碳纤维为功能导电基元材料制备了碳纤维导电混凝土。探讨了碳纤维导电混凝土的电阻率和28 d抗压强度随着碳纤维含量的变化;研究了电阻率随交流电压而变化的情况,分析了不同电压下的电热效应,利用一种趋势计算法近似计算出碳纤维混凝土的热转化效率。试验结果表明:碳纤维的最佳体积含量为1.0%;随着电压的升高,混凝土电阻率减小;碳纤维混凝土通电后产生的热量能够满足冬季路面除冰化雪的需要;趋势计算法计算出的热转化效率最高可达99.5%。

关键词: 碳纤维; 导电混凝土; 电阻率; 电热效应; 热转化效率

普通混凝土是不导电的,通过在普通混凝土中加入短切碳纤维不但可以增加混凝土的力学性能,而且可以改善导电性,可以使混凝土的电阻率由 $10^7 \Omega \cdot \text{m}$ 下降到 $1 \Omega \cdot \text{m}$ 以下。利用这一特性可将导电混凝土运用在寒冷地区的道路融雪化冰。当与外部电源连通后,导电混凝土产生热量(将电能转换成热能),使路面温度升高。当路面温度上升到 0°C 以上后,路面上的冰雪就会融化成水或蒸发或流走,使路面无积雪、不结冰,从而保障道路畅通和行车安全。这一技术的应用,不但有助于冬季道路畅通和行车安全,而且还将减少除冰盐的使用及消除除冰盐给混凝土结构和环境所带来的负面效应。加拿大的 Ping Xie 和 J. J. Beaudoin 等认为导电混凝土材料同时具有高的力学性能和好的导电性^[1,2],并对导电混凝土用于路面融雪化冰的有效性进行了研究。1999年,美国的 Yehia. Sherif 和 Y. Tuan Christopher 在总结了30余年来采用各种方法(如化学法、地热管法、红外线灯照加热法、电热丝法、热液法等)进行有关路面化冰的

研究进展后,提出利用钢纤维钢屑混凝土的导电性,开展了关于桥梁路面除冰的试验研究^[3,4]。1998年英国费莱尔集团研制出具有在很低的电压下快速变热特性的新型导电混凝土^[5]。据费莱尔集团介绍,利用新型导电混凝土建造机场跑道的除冰雪工作更为简便,目前,一些机场主要利用热水管来清除跑道上的冰雪,不仅耗费人力,成本也高。1999年美国研制出“智能混凝土”,混凝土中加入碳纤维后电阻会随外加应力的变化而成比例改变,科学家指出,利用这一特性制成的“智能混凝土”具有传感器功能,在道路和桥梁等建筑领域将具有广泛的应用前景^[6]。

1 材料及实验方法

主要原料为由江油盛达水泥生产的新标准32.5(R)普通硅酸盐水泥;普通中砂、卵石,卵石的最大粒径为25 mm;碳纤维为PAN基碳纤维(性能如表1);电极采用1号电池碳棒。

表1 PAN基碳纤维的基本性能

碳纤维	拉伸强度/MPa	弹性模量/GPa	密度/(g/cm ³)	电阻率/($\mu\Omega/\text{cm}$)	单丝直径/ μm	长度/mm	碳元素含量/%
PAN	2 000~3 000	175~215	1.74~1.77	30	7	6	≥ 93

试件成型为 $100\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ 的立方体,在成型时试件的上表面插入两根一号电池的碳棒作为电极测试电阻率,制得的试块在室温潮湿的环境中养护28 d。电阻率的测试仪器为DT9205A万用

电表、交流变压器、安培表、伏特表,电阻由 $R=U/I$ 计算,电阻率由 $\rho=RL/S$ 计算,发热功率由公式 $P=UI$ 计算。试块表面温度用ST20红外测温仪测试,抗压强度由抗压强度测试机测试。

制作过程如下:首先将分散剂甲基纤维素放入已装有一定量水的烧杯中(甲基纤维素含量通常为水泥重量的 0.4%),充分搅拌使其溶解;然后加入已称好的碳纤维并搅拌至碳纤维基本上分散均匀;倒入塑料桶并加入已称好的水泥搅拌;2 min 后加入已称好的砂子和石子搅拌约 5 min;然后将搅拌好的混凝土倒入涂了少许油的模具,同时埋入碳棒电极;最后将模具放在振动台上固定好后开启振动台约 60 s,以进行振动密实和消除气泡;24 h 后脱模并在标准养护室(20±2)℃中养护。

2 实验结果与分析

2.1 电阻率的测试结果与分析

经研究表明,对同一试块交流电测试电阻所得到的结果最小,在养护 21 d 后电阻基本达到稳定值^[7,8]。所以本试验采用交流电测试电阻率,在养护 28 d 后进行测量。由于导电混凝土用于融化雪冰和人体紧密接触,应考虑人体安全问题,电压应低于 36 V,本试验测试电压采用的是 24 V。电阻率的测试结果如图 1 所示,其中空白混凝土的电阻率为 1.01×10⁵ Ω·m。

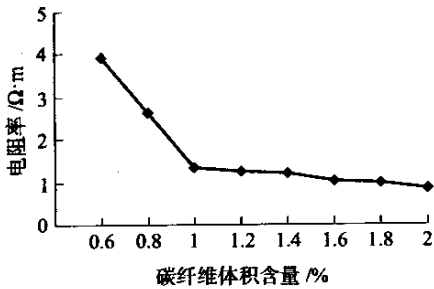


图 1 电阻率与碳纤维含量的关系

从图 1 可以看出,随着碳纤维的加入,混凝土电阻率大幅度下降。加入 0.6% 的碳纤维,混凝土由空白电阻率 1.01×10⁵ Ω·m 下降到 3.92 Ω·m。继续增加碳纤维含量,混凝土电阻率仍继续下降。但是下降比例逐渐减小。在碳纤维含量超过 1.0% 时,虽然增加碳纤维的含量,但是电阻率也无明显下降趋势。

发生这种现象可以这样来解释:在碳纤维含量为 1.0% 时,碳纤维分散均匀已经形成良好的导电网络,这时再增加碳纤维含量已对导电网络影响不大。由于碳纤维价格较昂贵,不宜掺量过多。

2.2 抗压强度测试结果与分析

抗压强度为混凝土养护 28 d 后进行测试,测试结果如图 2 所示。从图 2 可以看出碳纤维含量在 0~1.0% 范围内,随着碳纤维含量的增加,混凝土的抗压强度逐渐增大,在 0.6%~0.8% 范围内,强度增大最明显。在碳纤维含量大于 1.0% 时,随着碳纤维含量的增加,混凝土抗压强度开始下降。造成这种现象可以用以下 2 个原因来解释:(1)碳纤维含量较多搅拌不均匀,造成碳纤维结团现象;(2)碳纤维含量较多在混合时会引入大量气泡,从而使碳纤维混凝土气孔率增加。

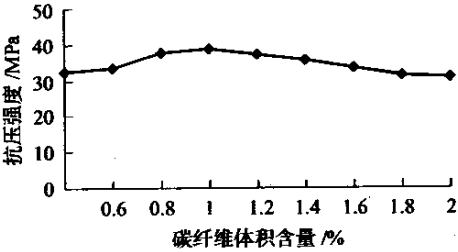


图 2 碳纤维掺量和混凝土 28 d 抗压强度的关系

2.3 升温效果试验与分析

本实验采用交流电源,将混凝土块串联在电路中,电源连通后,在通电的过程中,分别用伏特计和电流计测量混凝土两端的电压和电流,同时用红外测温仪测试试块上表面中心温度,每隔 10 min,测一次电流和温度的变化幅度,从而探讨混凝土块在升温过程中的功率变化及电阻变化规律,测试时室温为 21.5℃。在前 20 min 内温度上升较快,随后上升速度减慢。由于本次试验温度的测试是在混凝土块没有包裹绝热层的条件下进行的,所以所测升温幅度要远低于实际值。以下是其中一组碳纤维含量为 1.0% 所测数据如表 2 所示。对试块共通电加热 50 min。

表 2 不同电压下石墨钢纤维导电混凝土的电阻变化

电压/V	温度变化/℃	升温幅度/℃	平均升温速率/(℃/min)	电流变化/A	电阻变化/Ω	平均发热功率/W
12	21.5~41.5	20	0.4	1.35~1.34	8.94~8.88	16.1
18	21.5~62.5	41	0.8	2.02~2.01	8.93~8.87	36.3
24	21.5~66.5	45	0.9	2.69~2.71	8.92~8.86	64.8

测试结果表明,随着通电时间的延长,碳纤维混凝土块温度升高,电流 I 略为增大,因而电阻 R 略为减小,但减小的幅度不大。表 2 列出了 3 种外加电压碳纤维混凝土块表面温升、平均升温速率以及电流和电阻的变化情况。当外加 24 V 的交流电压时,板面温度升高了 45 ℃,而电阻只减小了 0.67%。因此,当电压 U 一定时,电阻 R 变化小,则功率 P 变化也小,即发热功率是比较稳定的。通过改变通电电压的大小可得到不同的发热功率,以满足不同情况(环境温度、降雪等级、结冰厚度、除冰时间限制)下融雪化冰的需要。

2.4 热转化效率

如图 3 所示,将导电混凝土板与外部电源、电流表和电压表相连,当接通交流稳压电源时,导电混凝土板就会发热。设电压表和电流表的读数分别为 U 和 I ,则通电所产生的电热功率为:

$$\begin{aligned} P &= UI = I^2 R = I^2 (R_C + R_1 + R_2 + R_3 + R_4) \\ &= I^2 R_C + I^2 R_1 + I^2 R_2 + I^2 R_3 + I^2 R_4 \\ &= P_C + P_1 + P_2 + P_3 + P_4 \end{aligned} \tag{1}$$

由此可知,在对导电混凝土板通电加热时,通过电压表和电流表的读数按公式 $P=UI$ 计算的电热功率并不等于导电混凝土板的发热功率 P_C 。电流除使导电混凝土板产生热量外,由于接触电阻的存在,还将在左右两侧导线与电极之间,以及电极与混凝土之间产生热量。显然,当导电混凝土板本身的电阻较小,而左右两侧接触电阻较大时,在相同的电热功率 P 作用下,导电混凝土板内产生的热量较低,其电热效应较差。

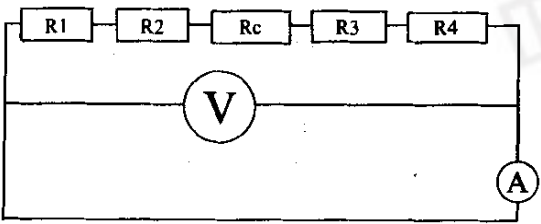


图 3 导电混凝土块电热试验装置

在绝热条件下,导电混凝土通电的电能应等于导电混凝土板热容量和接触电阻产生的热量之和,即:

$$\begin{aligned} P\Delta t &= (P_C + P_1 + P_2 + P_3 + P_4)\Delta t \\ &= P_C\Delta t + P_1\Delta t + P_2\Delta t + P_3\Delta t + P_4\Delta t \end{aligned} \tag{2}$$

导电混凝土的热转化效率:

$$\eta = \frac{P_C\Delta t}{P\Delta t} = \frac{P_C}{P} \tag{3}$$

在非绝热条件下,导电混凝土板的热容量不等于

混凝土板的功率与时间的乘积,而是小于功率与时间的乘积,原因是混凝土随着温度的升高不断向环境释放热量。但是通电时间 Δt 越小,两者越接近。可以用公式表示如下:

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} P_C\Delta t = C_P m \Delta T \tag{4}$$

非绝热条件下,选择在对导电混凝土板通电尽可能短的时间内计算电热转换效率,可用公式 $\eta = C_P m \Delta T / P\Delta t$ 近似计算。但实际电热转换效率要高于此值。

碳纤维导电混凝土由碳纤维和普通混凝土组成,其中的比热容 C_P 可由复合材料的复合理论计算,可采用公式(5)来进行计算:

$$C_P = \frac{\rho_C}{\rho} V_1 C_C + \frac{\rho_A}{\rho} (1 - V_1) C_A \tag{5}$$

式中: ρ_C 、 V_1 、 C_C 分别为碳纤维的密度、体积含量、比热; ρ_A 、 C_A 分别为普通混凝土的密度、比热; ρ 为导电混凝土的密度。普通混凝土和碳纤维相关技术指标如表 3。由公式(5)计算出不同碳纤维含量的导电混凝土比热如表 4。

表 3 碳纤维和普通混凝土技术指标

类型	密度 kg/m ³	温度 ℃	导热系数 w/m·℃	比热容 kJ/kg·℃
普通混凝土	2 300	20	1.28	1.05
碳纤维	1 750	20	20	0.72

表 4 碳纤维导电混凝土比热

碳纤维体积含量 %	普通混凝土质量含量 %	密度 kg/m ³	比热 kJ/kg·℃
0.6	99.4	2 296	1.048 8
0.8	99.2	2 294	1.048 7
1.0	99.0	2 292	1.048 6
1.2	98.8	2 291	1.048 5
1.4	98.6	2 288	1.048 4
1.6	98.4	2 286	1.048 3
1.8	98.2	2 284	1.048 2
2.0	98.0	2 281	1.048 1

利用表 4 计算出的不同碳纤维含量导电混凝土的比热,进而可近似计算出不同通电时间的电热转换效率。此导电混凝土的温度测试是在混凝土块没有包裹任何绝热层条件下测试的,在加热升温的过程中,随着温度的升高,混凝土块要和周围环境发生对流辐射换热,所以利用公式 $\eta = C_P m \Delta T / P\Delta t$ 计算出的结果比实际要低,计算出的结果如表 5 所示。

表 5 碳纤维导电混凝土热转化效率

碳纤维体 积含量/%	电压/V	热转化效率/%				
		10 min	20 min	30 min	40 min	50 min
0.6	24	46.5	61.7	69.9	74.8	93.2
	29	89.8	92.8	98.7	91.8	85.8
	34	99.0	98.8	98.3	84.2	74.1
0.8	24	79.5	84.6	91.5	96.4	97.8
	29	84.8	90.9	98.6	97.8	97.4
	34	99.4	98.8	97.3	95.9	93.5
1.0	12	83.7	78.8	74.8	72.2	66.9
	18	85.6	75.2	67.9	60.6	56.9
	24	88.5	69.5	57.6	50.8	47.5
1.2	12	91.9	89.4	86.6	83.9	77.6
	18	93.8	85.6	81.5	75.5	68.6
	24	95.7	68.9	56.5	46.7	44.8
1.4	12	95.3	94.6	93.3	92.1	89.4
	18	98.5	94.4	92.6	85.8	84.4
	24	99.5	86.9	74.2	63.5	58.7

从表 5 可以看出,对于不同导电相含量的混凝土,在前 10 min 内热转化效率都是随着电压的升高而升高。可以用 2 个原因来解释:(1)随着电压的升高,输入功率增大,导电混凝土升温速率也相应增大,在比较短的时间内,导电混凝土块和环境热交换较小,因而混凝土的热容 $C_{pm}\Delta T$ 接近于混凝土功率与时间的乘积;(2)由于混凝土中的碳纤维含量较高,在制作的过程中已有较多的碳纤维搭接在一起,当然也有部分的碳纤维没有搭接在一起,随着电压的升高,这些没有搭接在一起的碳纤维的部分电子具备了足够的能量跃过碳纤维之间的势垒,从一根碳纤维过渡到另一根碳纤维上,即所谓的隧道跃迁效应,所以导电性逐渐增强,输入功率逐渐增大。

另外,电阻率相对较大的碳纤维含量为 0.6%和 0.8%的导电混凝土在 24 V 较低的电压下,由于输入功率较小,升温速率较慢,在开始很长一段时间内温度上升幅度较小,和环境发生的对流辐射换热也较小。因而在所测试的前 50 min 内,混凝土块的热转化效率是逐渐增大的;而在电压相对较高的 29 V 电压下,在前 30 min 内热转化效率达到最大,随后随着混凝土块温度的升高,对流辐射换热加大,热转化效率逐渐降低;在相对较高电压 34 V 下,在前10 min内热转化效率可达最大,随后逐渐降低。对于电阻率相对较小的导电相含量为 1.0%、1.2%、1.4%的混凝土块,在不同电压 12 V、18 V、24 V 下,都是在前 10 min 内热转化效率达到最大,在后面的时间内逐渐降低。主要是电阻较小,虽然在较低电压下都可获得较大输入功率,在短时间内便可迅速升温。但随着温度的升高,对流

换热发生的程度也越来越严重。

本文对上述热转化效率计算要做严重申明,对于同种物体,在加一定电压条件下,热转化效率应该是一定的,但本文为什么用一个变化的热转化效率来计算呢?本文主要是利用一种趋势计算来尽可能地接近热转化效率,因为导线和电极、电极和混凝土之间的接触电阻无法用试验来测得,所以本文就利用公式 $\eta = C_{pm}\Delta T/P\Delta t$ 来近似计算。对于上述每一种不同导电相含量的导电混凝土在每一种不同电压下的热转化效率都应该高于最高值。

3 结论

(1)碳纤维混凝土导电性随着碳纤维含量的增加而增强,但超过 1.0%时导电性已增加不明显;而抗压强度在碳纤维含量超过 1.0%时,随着碳纤维含量的增加抗压强度下降。综合导电性、抗压强度、经济性考虑,碳纤维不宜超过 1.0%过多。

(2)碳纤维混凝土具有较好的电热特性,利用一种趋势算法可近似计算出碳纤维导电混凝土的电热转换效率。

(3)碳纤维混凝土具有优良的力学性能,可用于道路和机场的融雪化冰以及建筑取暖和环境加热等领域。

参考文献:

[1] Xie Ping,Gu Ping,Beaudonin J J.Electrical Percolation Phenomenain Cemnent Composites Containing Conductive Fibres[J]. Journal of Materials Science, 1996,31(15).

[2] Xie P,Beaudoin J J. Electrically Conductive Concrete and Its Application in Deicing [C].Advances in Concrete Technology. In: Proceedings, Second CANMET/ACI International Symposium, SP-154. Farmington Hills,Mich. :American Concrete Institute, 1995.

[3] Sherif Y, Christopher Y T. Conductive Concrete Overlay for Bridge Deck Deicing [J]. ACI Materials Journal, 1999,96(3).

[4] Sherif Y, Christopher Y T.David Ferdonetal. Conductive Concrete Overlay for Bridge Deck Deicing: Mixture Proportioning Optimization and Properties [J]. ACI Materials Journal,2000,97(2).

[5] 孙浦生. 英国研制出能快速变热的导电混凝土[J]. 石油工程建设,1998,(6).

[6] 新华社供稿. 智能混凝土[J]. 世界研究开发与动态, 1999,(4).

文章编号: 0451-0712(2004)12-0182-04

中图分类号: U414.180.9

文献标识码: A

废弃水泥混凝土再生集料需水量问题分析

张 超¹, 徐桂萍²

(1. 长安大学公路学院 西安市 710064; 2. 广东工业大学建设学院 广州市 510640)

摘 要: 废弃水泥混凝土再生集料在配制混凝土或采用无机结合料稳定做基层材料时, 存在明显的需水量改变的问题。通过试验和分析认为, 需水量的改变一是再生集料配制混凝土时要额外吸收一定的水分, 二是因为水泥稳定基层材料在击实时将再生集料中原有的结晶水成分累加造成的。

关键词: 废弃混凝土; 再生集料; 含水量; 热分析试验

旧水泥混凝土道路的改建, 必定会产生相当数量的废弃混凝土块。以一条 9 m 宽的二级路为例, 当混凝土板厚 0.24 m, 则改建每公里公路就将产生 2 000 多 m^3 的混凝土块, 可见改建一条几公里或几十公里的水泥混凝土道路所废弃的混凝土数量是十分巨大的。显然如此之多的废弃混凝土再生利用是一个必须解决的实际问题, 这不仅是一个关系到旧混凝土道路改建的问题, 同时也是一个涉及到保护道路周边环境、促进当地经济可持续发展的问题。

废弃混凝土路面板再利用有效而简便的方法是

将其轧制成一定规格的粒料, 重新用于改建道路的基层或配制成再生混凝土面层。实践中发现, 这两种用途都存在需水量发生显著改变的现象, 而且这种需水量变化的特点和趋势也不尽相同。因此, 分析这一现象产生的原因和处理的方法, 将是废弃混凝土再利用时必须解决的问题。

1 再生集料技术性质

通过控制最大粒径的方法, 采用普通颚式轧石机进行初步粉碎, 一般将轧碎的再生集料粒径控制

收稿日期: 2004-06-16

[7] 侯作富, 李卓球, 唐祖全. 碳纤维导电混凝土的交直流电性能对比研究[J]. 混凝土, 2002, (4).

[8] 沈刚, 董发勤. 复相导电混凝土的研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2003, (6).

Performance Research on Carbon Fiber Conductive Concrete

SHEN Gang, DONG Fa-qin

(Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China)

Abstract: The carbon fiber conductive concrete is prepared in CF elementary material of function. The changes of the resistivity and 28 days compressive strength with carbon fiber contents and the resistivity variation with the voltage of AC power are analyzed. The electro-thermal efficiency is analyzed under the different voltages and accounted approximately by a trend numeration. The experimental results show that the critical content in volume of CF is 1.0%. The resistivity decreases with the increasing of voltage. The thermal energy produced in CFRC connected to AC power source is enough for deicing and snow melting purpose. Thermal transformation efficiency of CFRC is up to 99.5% by the trend numeration.

Key words: carbon fiber; conductive concrete; resistivity; electro-thermal efficiency; thermal transformation efficiency