

机场用碳纤维导电混凝土特性研究

胡天文¹, 张佩浩², 黄贵涛², 王加宝²

(1. 中铁北京工程局集团有限公司 机场工程分公司, 北京市 102308; 2. 中国民航大学 机场学院)

摘要: 针对机场除冰雪问题, 对 60 cm×30 cm×30 cm 的厚尺寸导电混凝土试样施加电压进行导电升温测定其 12 个位置的温度, 得到其加压过程中温度沿厚度方向自上而下逐渐升高, 且底部温度在长时间加压过程中持续升温, 表面温度逐渐趋于稳定。并对未设置隔热层尺寸为 1.3 m×1.3 m×0.3 m 的导电混凝土双层板分别施加 60、80、100、120、160 V 的电压, 得到温度沿厚度方向自上而下逐渐降低; 且在前期, 上层导电混凝土层升温速率较下层素混凝土层升温较快, 在后期, 上层较下层升温速率慢并逐渐平缓。尺寸为 1.3 m×1.3 m×0.3 m 板在导电过程中电阻随升温时间而减小, 但变化幅度较小。

关键词: 碳纤维混凝土; 升温规律; 导电; 大尺寸板

机场跑道常因积雪结冰等因素而影响其运行, 导致航班晚点。在混凝土中添加一定量具有导电特性的碳纤维, 通过导电升温可制备具有融雪化冰特性的智能混凝土。国内外学者对碳纤维混凝土做了大量研究工作, 分析了其导电机理、压敏、温敏、电阻率、焦耳效应、力电效应、屏蔽效应等系列功能特性。

1993 年, 美国 D.D.L.Chung 对碳纤维混凝土进行了多年的研究, 发现碳纤维混凝土电阻率与其内部裂纹的闭合与扩展等有关; 李卓球等发现了碳纤维混凝土的 Sebeck 效应, 并研究了影响 Sebeck 效应的 3 种因素: 碳纤维含量、水泥基体以及龄期; 唐祖全通过对 400 mm×400 mm×20 mm 的碳纤维混凝土试样进行室外融雪试验, 得到雪停之后以较大发热功率融雪效果更佳; 侯作富对碳纤维导电混凝土进行了系统的研究, 发现在低温环境下导电混凝土板融雪功率可降至 300 W/m², 碳纤维最佳体积含量为 0.73%; 孙明清研究了碳纤维混凝土和素混凝土的力电机敏性, 揭示了碳纤维导电混凝土在受载荷作用时和由此产生的电流强度之间呈一一对应的关系; 孙建虎等的试验结果表明: 碳纤维导电混凝土的抗压强度随碳纤维含量的增加有所降低, 但劈裂抗拉强度有所增加; 王闯等试验分析了碳纤维在 3 种不同分散剂溶液下的分散性, 结果表明: 羟乙基纤维素的分散作用最佳; 徐高伟研究了碳纤维对混凝土抗压强度的影响, 指出当碳纤维长度

为 5~6 cm 时抗压强度有明显升高, 而当碳纤维长度继续增长时其抗压强度逐渐降低, 在长度为 11 cm 时降至与素混凝土同等的抗压强度; 丁汀等通过哑铃结合刀口法的试验分析了裂缝宽度对碳纤维导电混凝土特性的影响, 得到其电阻变化率在初期与裂缝大小线性相关, 当达到临界裂缝大小后电阻变化率迅速变大; 同时指出机场道面碳纤维混凝土裂缝的有效临界宽度为 0.65 mm。

该文主要对厚尺寸碳纤维混凝土和双层混凝土板导电升温特性进行探讨。

1 试验材料

该文所选用的碳纤维为河北产 6 mm PAN 基短切碳纤维, 其基本性能指标如表 1 所示; 硅灰的加入能有效改善碳纤维混凝土的导电特性, 同时适当提高其抗压强度和弯拉强度, 该文选用硅灰的基本性能参数如表 2 所示; 水泥、石子、砂子均来自天津本地, 其中水泥为 42.5 级普通硅酸盐水泥。为保证良好的导电性以及制备方便, 石子粒径为 4.75~16 mm, 砂子粒径为

表 1 碳纤维性能参数

| 拉伸强 度/MPa | 拉伸模 量/GPa | 密度/ (g·cm ⁻³) | 线密度/ (g·m ⁻¹) | 单丝直 径/μm | 电阻率/ (Ω·cm) |
|--------------|--------------|------------------------------|------------------------------|-------------|----------------------|
| 4 558 | 231 | 1.76 | 0.82 | 7.3 | 1.75×10 ³ |

收稿日期: 2018-04-17(修改稿)

基金项目: 中国民航机场工程研究基地开放基金项目(编号: MHJCJD2017); 中国民航大学国家创新创业项目(编号: 201610059024)

作者简介: 胡天文, 男, 大学本科, 助理工程师, E-mail: cauchutianwen@163.com

表 2 硅灰基本性能参数

| 密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$) | 平均粒 径/ μm | 比表面积/ ($\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$) | 耐火度/ $^{\circ}\text{C}$ | SiO_2 / % | Al_2O_3 / % | Fe_2O_3 / % | MgO / % | CaO / % |
|--|-------------------------|---|----------------------------|-----------------------|--------------------------------|--------------------------------|---------------------|---------------------|
| 1.65 | 0.1~0.3 | 20~28 | $\geq 1\ 600$ | ≥ 98 | ≤ 0.7 | ≤ 0.6 | ≤ 0.5 | ≤ 0.2 |

0~2.36 mm。电极采用 0.3 mm 厚不锈钢板连接导线制成,并在钢板中间冲孔,以保证导电混凝土的导电性以及电极两侧混凝土的连接。

2 厚尺寸板试验研究

前人对导电混凝土的研究大多局限在小尺寸板,对厚尺寸导电混凝土的研究较少,该文通过制作厚尺寸碳纤维混凝土试样,研究道面板不同厚度处的温度变化规律,探究厚尺寸导电混凝土板应用的可行性。

2.1 厚尺寸板制作

传统配合比中石子骨架用量较多,在碳纤维混凝土中,石子阻碍导电回路的形成,即石子比例越大碳纤维混凝土电阻越大。因此,若采用传统配合比制备碳纤维混凝土,其阻值很大,不能满足融雪化冰的要求。综合试验试配及相关文献,该文碳纤维混凝土的配合比取:水泥:石子:砂子=1:1:1,水灰比为 0.5,并采用硅灰含量 10%等质量代替水泥,碳纤维体积含量均为 0.6%。厚尺寸板试样尺寸为 60 cm \times 30 cm \times 30 cm,电极板尺寸为 28 cm \times 28 cm。

制备厚尺寸碳纤维混凝土板时,为使碳纤维均匀分布,将水泥、砂、硅灰以及短切碳纤维水泥砂浆在搅拌机内分层铺好,徐徐加入总用水量的 1/3 左右;待碳纤维水泥砂浆搅拌均匀后,将剩余用水量以及石子加入混合料中搅拌均匀;在制作好的模具四周涂油,同时固定电极板并在两边设置 4 cm 保护层。由于板较厚分两次浇筑并在试样内部不同厚度位置预埋 7 根温度传感器,表面设置 5 个测点。试样成型后浇水养护 28 d。

2.2 厚尺寸混凝土导电升温试验

对试样施加 40 V 交流电压,测定其不同位置温度变化情况,同时在电路中接入电流表、电压表测定其电阻随升温时间的变化。为保证四周绝热,整个试验过程均未拆模具,图 1 为试验装置以及各测点位置图。

图 2 为在室温环境下施加 40 V 交流电压,120 min 时间内各测点温度变化曲线。由图 2 可知:在升温前 30 min 内,各测点升温速率大致相同。随着升温

时间的增加,碳纤维混凝土在不同厚度上的升温差异逐渐明显:表面升温速率逐渐减慢,并具有稳定趋势(8、9 点);7 点较 2、3 点温度高,2、3 点较 6 点温度高。表明温度自上而下逐渐增加,这是由于混凝土在升温过程中仅表面与外界存在热交换,而下部热量往上传递速率较慢,从而导致表面温度最低。图 3 为升温过程中电阻变化规律,可知:在整个过程中混凝土试样的电阻均保持在 4.5 Ω 左右,说明厚尺寸碳纤维混凝土对温度敏感性小。

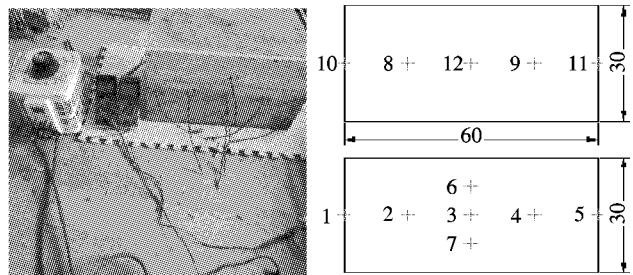


图 1 试验装置及测点布置图(单位:cm)

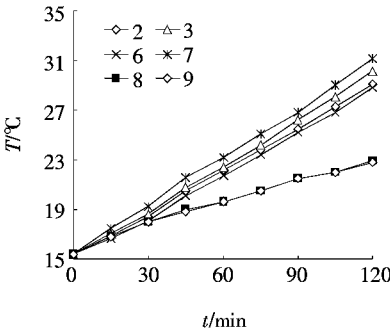


图 2 40 V 电压下厚尺寸试样各测点升温曲线

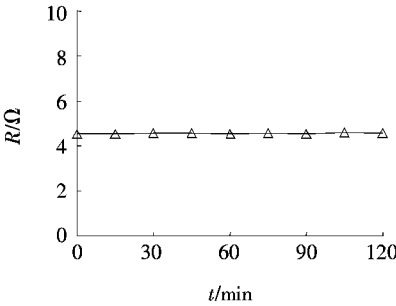


图 3 升温过程中电阻变化图

为进一步研究厚尺寸导电混凝土在升温过程中其内外温度差异,施加 30 V 交流电压,测定其 540 min 时间内温度的变化(图 4)。

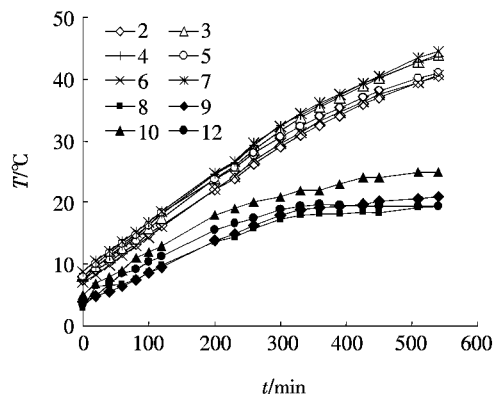


图 4 30 V 电压下厚尺寸试样各测点升温曲线

由图 4 可知:在长时间升温过程中,混凝土内部温度持续升高,尤其底部 7 点和中部 3 点温度上升速率较快;而表面温度在 300 min 左右时,逐渐趋于稳定。同时可知在相同厚度方向不同测点温度存在差异,这是因碳纤维混凝土制备过程中不均匀所致。

3 双层混凝土板试验研究

3.1 碳纤维混凝土双层板尺寸分析

导电混凝土在通电升温过程中,其发热功率可由以下公式计算得到:

$$P = UI = \frac{U^2}{R} \quad (1)$$

$$R = \rho \frac{L}{S} \quad (2)$$

$$P = \frac{U^2}{R} = \frac{U^2}{\rho \frac{L}{S}} = \frac{U^2 S}{\rho L} \quad (3)$$

$$S = bh \quad (4)$$

$$P = \frac{U^2 bh}{\rho L}$$

式中: P 为发热功率(W); U 为电压(V); I 为电流(A); ρ 为电阻率; L 为电极间距(m); S 为电极面积(m^2); b 为电极长度(m); h 为电极高度(m)。

根据热力学相关知识可得, t 时间内产生的能量可表示为:

$$Q = Pt \quad (5)$$

若不考虑导电混凝土产生的能量与外界环境的热传递、热传导以及热辐射等,则产生的能量将全部转化

为热量,用于提高混凝土的温度。

$$\text{即 } Q = cm\Delta T \quad (6)$$

$$Pt = c\rho_c SL\Delta T \quad (7)$$

$$\frac{U^2 bh}{\rho L} \cdot t = c\rho_c bhL\Delta T \quad (8)$$

可得混凝土升高温度:

$$\Delta T = \frac{U^2 t}{c\rho_c L^2} \quad (9)$$

式中: ΔT 为温度涨幅; c 为混凝土比热容; ρ_c 为混凝土密度; t 为升温时间。

由式(9)可得:在不考虑热量损失情况下,导电混凝土升温规律与碳纤维混凝土的比热容、密度、电阻率、施加电压的平方、施加电压时间以及电极间距平方有关。对于特定的碳纤维体积分含量的混凝土而言,由于其密度、电阻率、比热容为其固有性质可通过简单试验或者查阅相关文献获取,可认为是已知量,则单位时间其升温效果仅与电压和电极间距有关。因此,若单位时间内升温效果相同,则其电压与电极间距比值为定值。

因机场道面板采用分仓浇筑,每块的尺寸以及道面板的厚度根据设计不同均存在一定差异,该文假设一块道面板尺寸为 $5\text{ m} \times 5\text{ m}$,厚度取 30 cm 进行分析。碳纤维价格昂贵,若道面板厚度方向均浇筑碳纤维混凝土造价将大大增加。同时,由前文可知,厚尺寸混凝土在升温过程中其内部温度较高,内外温差大,会产生较大的温度应力,导致混凝土板的变形破坏。

基于厚尺寸导电混凝土存在的缺陷,可在道面板上层 5~10 cm 设置导电混凝土,下层设置素混凝土,使机场道面板由较薄的导电混凝土层和较厚素混凝土层组成。因道面板面积较大,若仅在其两端设置电极板,无法达到其升温效果。因此,综合考虑升温效果及施工等多种因素,该文取电极间距为 1.2 m。

3.2 大尺寸导电混凝土制作

该文制作尺寸为 $1.3\text{ m} \times 1.3\text{ m}$ 、碳纤维层厚度为 5 cm、素混凝土层厚 25 cm 大尺寸试样,制备过程中各组分用量如表 3 所示。双层混凝土试样在浇筑前,下部铺设碎石垫层,并将制作的木质模具定位。混凝土试样的制备与厚尺寸板制备方法相同,分 3 次浇筑完成:下层素混凝土厚度较厚分 2 次浇筑,上层碳纤维混凝土层 1 次浇筑完成。为测定混凝土升温过程中各位置温度变化情况,在浇筑过程中预埋多个温度传感器,用于后期检测温度。

3.3 双层混凝土板导电升温试验

为研究双层混凝土板导电升温变化规律,在混凝

表 3 各组分用量

| 项目 | 碳纤 维/g | 水泥/ kg | 硅灰/ kg | 石子/ kg | 砂子/ kg | 水/ kg |
|---------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|
| 碳纤维混凝土层 | 824 | 51.3 | 5.7 | 57 | 57 | 28.5 |
| 素混凝土层 | — | 127 | — | 228.6 | 520.7 | 63.5 |

土内部不同厚度位置设置 10 个温度测点,表面设置 5 个测点(图 5)并施加 60、80、100、120、160 V 的电压值,分别对其进行导电升温试验,探究其温度变化以及电阻变化规律。

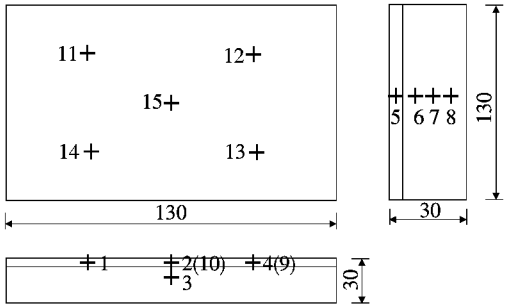


图 5 双层混凝土板测点布置(单位:cm)

图 6 为不同电压下各测点温度变化曲线。

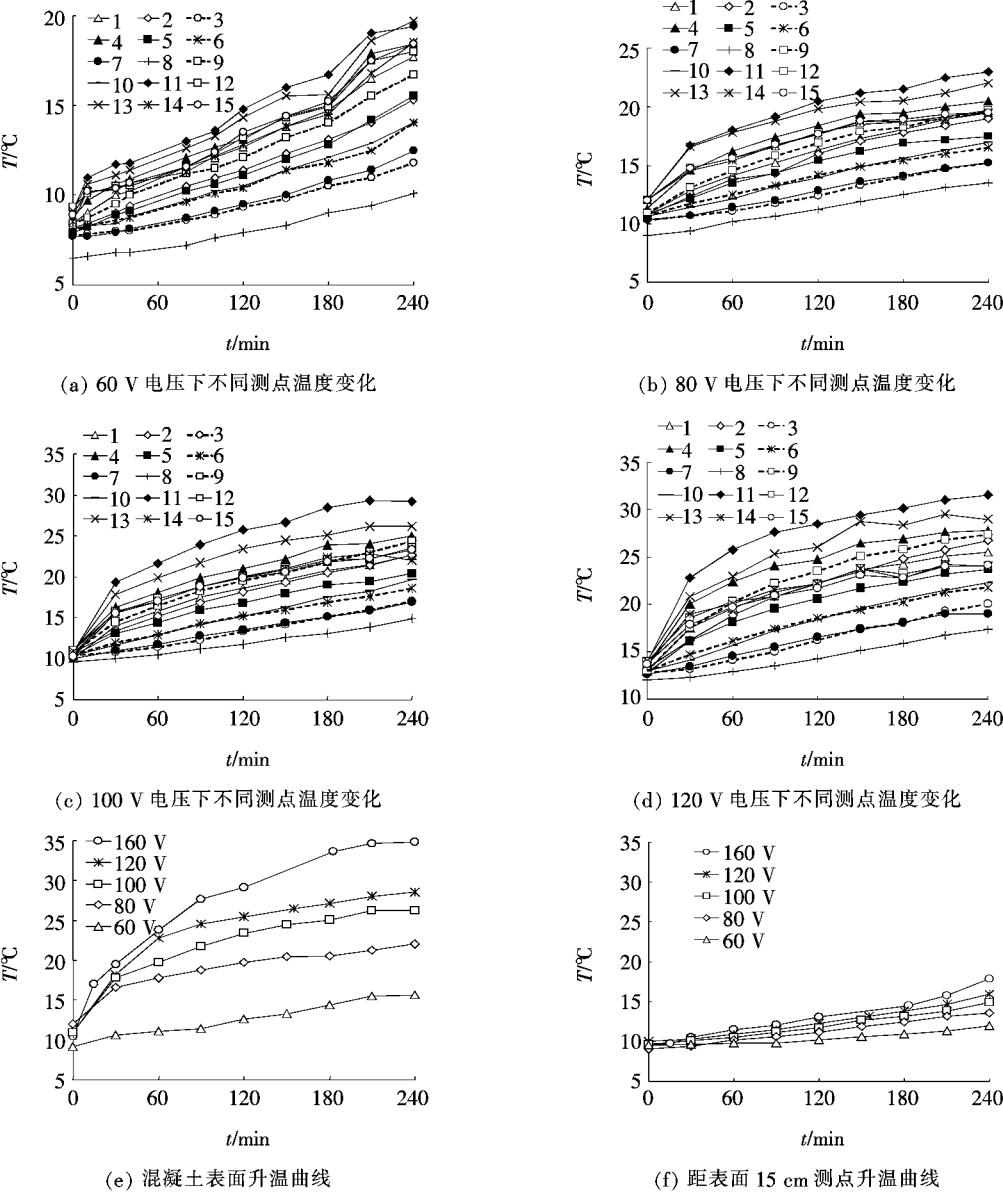


图 6 不同电压下不同测点升温曲线

由图 6 可知:碳纤维混凝土层表面测点温度上升速率较快,且随着升温时间的增加,其温度上升速率降

低,并有稳定趋势。下层素混凝土测点(3、6、7、8)温度沿厚度方向呈递减趋势,且随着升温时间的增加,温度

增加速率较快。这是由于导电混凝土层的热量沿厚度方向往下传递,在升温过程中传至素混凝土层的热量逐渐增加。

图 7 为施加电压过程中大尺寸板的电阻变化规律。

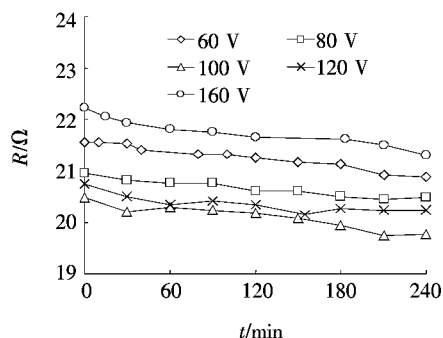


图 7 升温过程中电阻变化

由图 7 可知:① 随着升温时间的增加,碳纤维混凝土大尺寸板的电阻呈减小趋势;② 施加不同电压值,测得电阻值均不相同,这是由于碳纤维在混凝土中的分布是复杂且不均匀的,在施加不同电压时,电子所获得的能量不同,在混凝土中的运动轨迹不同,形成不同的电流回路,从而表现出不同的阻值;③ 电压小于 100 V 时,电阻随施加电压值增加而降低,电压值大于 100 V 时,电阻值随施加电压值增加而增大。但是施加不同电压,电阻随时间变化幅度较小对其导电升温产生的影响可忽略不计。

4 结论

通过对厚尺寸碳纤维混凝土试样以及双层混凝土试样的试验研究,得到如下结论:

(1) 对于厚尺寸碳纤维混凝土试样,其在导电升温过程中表面温度具有稳定趋势,而内部温度持续增加;且沿厚度方向温度自上而下逐渐增加。

(2) 厚尺寸试样升温过程中电阻基本保持不变。

(3) 对双层混凝土板施加不同电压,表现不同的升温规律。施加电压越大,升温效果越明显;同时,得到导电混凝土层产生的热量会沿厚度方向传至素混凝土层,并随着升温时间的增加素混凝土层温度升高速率加快而表面温度升高速率减缓。

(4) 在升温过程中双层混凝土随升温时间增加,电阻有所降低,但降低幅度很小;施加不同电压,电阻值表现不同,电压小于 100 V 时,电阻随施加电压值增加而降低,电压值大于 100 V 时,电阻值随施加电压值增加而增大。

(5) 双层道面板并未做隔热处理,导电混凝土层热量沿竖向传播有所损失而不能完全用于表面融雪化冰。因此,隔热层材料选取以及设置方法还有待进一步探讨;同时,竖向温差产生的温度应力对道面板强度的影响还需研究。

参考文献:

- [1] 侯作富.融雪化冰用碳纤维导电混凝土的研制及应用研究[D].武汉理工大学博士学位论文,2003.
- [2] Yunsheng Xu, D. D. L. Chung. Cement Based Material Improved by Surface Treated Admixtures [J]. ACI Mater. 2000, 97(3): 333—342.
- [3] 孙明清,李卓球,等.影响 CFRC 的 Seebeck 效应的主要因素[J].材料研究学报,1998(6).
- [4] 唐祖全.碳纤维导电混凝土在路面除冰雪中的应用研究[J].建筑材料学报,2004(6).
- [5] 孙明清.碳纤维混凝土与素混凝土的机电敏性及应用研究[D].武汉理工大学博士学位论文,2001.
- [6] 孙建虎,石少卿,等.导电碳纤维混凝土性能的试验研究[J].混凝土,2012(7).
- [7] 王闯,李克智,等.短碳纤维在不同分散剂中的分散性[J].精细化工,2007(1).
- [8] 徐高伟,陈道政.混凝土中掺入碳纤维对其抗压强度影响的研究[J].公路交通科技,2013(6).
- [9] 丁汀,叶英华.裂缝宽度对机场道面融雪除冰碳纤维混凝土导电性能影响的试验研究[J].工业建筑,2015(7).
- [10] 李龙海,全晔.机场用导电混凝土热融除冰雪能耗优化研究[J].混凝土,2016(4).
- [11] Sheirf, ChristoPher, et al. Conductive Concrete Overlay for Bridge Deck Deicing [J]. ACI Material Journal, 2000, 97(2): 172—181.
- [12] 杨元霞,刘宝举,等.碳纤维水泥基复合材料电性能的若干研究[J].建筑材料学报,2001(2).
- [13] 磨练同.导电沥青混凝土的制备与研究[D].武汉理工大学博士学位论文,2004.