

# 导电混凝土研究进展\*

唐祖全<sup>1</sup>, 钱觉时<sup>1</sup>, 杨再富<sup>1,2</sup>

(1. 重庆大学 材料科学与工程学院, 重庆 400045; 2. 重庆市建筑科学研究院, 重庆 400015)

**摘要:**综合国内外文献分析了导电混凝土的导电机理,介绍了石墨、碳纤维、钢纤维及钢屑等常用导电组分材料及其导电混凝土的性能、导电混凝土电性能的影响因素,分析了导电混凝土的压敏性、温敏性、力电效应和电热特性的研究进展,介绍了导电混凝土在室内采暖、变电站接地网和电热除冰化雪中的应用,指出了目前导电混凝土研究和应用方面存在的不足。

**关键词:**混凝土; 导电性; 机敏; 电热

**中图分类号:** TU528.59 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-7329(2006)06-0135-05

## Research Progress of Electrically Conductive Concrete

TANG Zu-quan<sup>1</sup>, QIAN Jue-shi<sup>1</sup>, YANG Zai-fu<sup>1,2</sup>

(1, College of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China; 2, Chongqing Institute of Building Research, Chongqing 400015, P. R. China)

**Abstract:** Based on the domestic and overseas literatures, the mechanism of electrical conduction of conductive concrete is analyzed at first; Then the performance, the influencing factors of electrical conduction, the smart property such as compression sensibility, temperature sensibility and electro-thermal effect and its engineering application about electrically conductive concrete are introduced; Finally, the shortcoming in present conductive concrete's study and application is pointed out.

**Keywords:** concrete; electrical conduction; smart; electro-thermal

混凝土因其优良的物理力学性能在土木工程领域得到了广泛应用,是目前使用量最大的一种建筑材料。普通混凝土的电阻率高,属电的不良导体。在普通混凝土中添加一定含量的导电组分材料,可使其导电性大大改善。导电混凝土既有结构材料的特点,又具有导电性和机敏特性,这就使得混凝土不仅作为一种结构材料使用,而且在电工、电磁干扰屏蔽、工业防静电、电加热器、电力设备接地工程,以及重大土木基础设施的内部应力和健康状况自诊断和监测等方面具有重要作用。本文综合国内外文献分析了导电混凝土的导电机理,介绍了常用导电组分材料及其导电混凝土的性能、导电混凝土电性能的影响因素、基于混凝土导电性的机敏性研究和导电混凝土的工程应用研究,指出了目前导电混凝土研究和应用方面存在的问题。

### 1 导电混凝土的导电机理

导电混凝土是指由胶凝材料、导电组分材料和水等按一定配合比组成的多相复合材料,是在普通混凝土

中掺入适量导电组分材料而形成的一种水泥基功能复合材料。其中导电组分作为分散相,导电性能好;混凝土或水泥作为基体相,导电性能差。导电混凝土的导电一方面是由分散在基体中的导电组分材料形成网络,并通过隧道效应连通网络间的绝缘而传导,另一方面通过水泥石传导。对于前者,如碳纤维、石墨粉及钢纤维等为电子(或空穴)导电,电流通过彼此搭接或接触形成的导电网络进行传导;同时,导电颗粒或纤维分散在水泥基体中,受绝缘的水泥基体阻隔,形成势垒。当间隔距离减小,使水泥基体形成的势垒足够小,或电子和空穴从外界获得足够的能量时,就会跃过势垒,从一个导体到达另一个导体上,从而实现导电<sup>[1,2]</sup>。对于后者,即水泥石的导电,Whittington<sup>[3]</sup>等人认为可以分为两部分:一部分是通过自由的可蒸发水的离子导电,即通过水泥石液相水中的 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{OH}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 等离子在外加电场作用下产生定向移动而导电。另一部分是通过凝胶、凝胶水及未反应的水泥颗

\* 收稿日期:2006-05-27

基金项目:国家自然科学基金项目资助(50404005)

作者简介:唐祖全(1969-),男,重庆永川人,副教授,博士,主要从事机敏混凝土研究。

粒的电子导电,主要是铁、铝、钙的化合物。

材料导电能力的大小可用其体积电阻率 $\rho$ 或电导率 $\sigma$ (二者互为倒数)来表示。导电混凝土的电阻率取决于导电组分材料的电学性能、物理性能以及导电组分材料与水泥基体的相互作用。根据所添加的导电组分材料的类型、形状、尺寸以及含量的不同,导电混凝土的电阻率可在一较宽的范围内变化。

研究表明,导电混凝土与导电高分子复合材料一样,存在电导渗流现象<sup>[4,5]</sup>。在导电组分材料(导电相)与绝缘基体材料(基体相)进行复合时,当导电相的体积含量小于某一临界值时,复合材料的电阻率随导电相体积分含量的增加而缓慢减小;当导电相的体积分含量达到临界值时,复合材料的电阻率急剧减小,电阻率的减小达几个甚至十个数量级左右;当导电材料的体积分含量超过临界值后,随掺量的进一步增加,复合材料电阻率的减小又趋于平缓。导电材料的临界体积分含量称为渗滤阈值,其值主要取决于导电组分材料的形状和尺寸。导电纤维比导电粒子的渗滤阈值低;对纤维直径小,单丝长度大的纤维,较低掺量即会出现电导渗流现象。

## 2 常用导电组分材料及其导电混凝土的性能

目前常用于制作导电混凝土的导电组分主要有石墨粉、碳纤维、钢纤维及钢屑等,不同组分导电混凝土的力学和导电性能差异较大。

### 2.1 石墨

石墨是一种较易获取的无机材料,它不仅具有良好的导电性、导热性,而且有良好的化学惰性。研究表明,导电混凝土的电阻率随石墨掺量的改变可在 $10^{-1} \sim 10^6 \Omega \cdot \text{cm}$ 范围内变化<sup>[6]</sup>,但必须在掺量较高时才能使混凝土具有良好的导电性,这将使混凝土的强度大幅度降低。当石墨掺量为25%时,石墨水泥的电阻率降为 $7.4 \times 10^3 \Omega \cdot \text{cm}$ ,但其强度不足10 MPa<sup>[7]</sup>。

### 2.2 钢纤维及钢屑

钢纤维具有良好的导电性,其电阻率约为 $(1.33 \sim 2.44) \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$ 。在混凝土中掺入一定含量的钢纤维,也可以提高混凝土的导电能力。N·Banthia<sup>[8]</sup>和Xie<sup>[4]</sup>等对钢纤维水泥复合材料的导电性进行了研究,对平均直径为25  $\mu\text{m}$ 、长度3 mm左右的钢纤维,当体积掺量为1%~5%时,养护28 d的电阻率为 $(31.9 \sim 7.4) \times 10^3 \Omega \cdot \text{cm}$ <sup>[8]</sup>。Sherif<sup>[9]</sup>等对同时掺加钢纤维和钢屑混凝土的性能进行了研究,掺入1.5%~2%钢纤维和10%~20%钢屑,混凝土的电阻率为500~1 000  $\Omega \cdot \text{cm}$ ,抗压强度为35~40 MPa。

### 2.3 碳纤维

将适量短切碳纤维掺到水泥混凝土中,不但可以起到增强效果、提高脆性水泥基体的抗拉强度和抗冲击性能、提高韧性,同时还可以改善水泥混凝土的导电性<sup>[4,7,8,10]</sup>,使其电阻率从 $10^9 \Omega \cdot \text{cm}$ 降至 $10^2 \Omega \cdot \text{cm}$ 以内。N·Banthia<sup>[8]</sup>还对碳纤维和钢纤维增强水泥的电阻率作了对比研究。研究结果表明,掺入碳纤维或钢纤维均能使水泥浆的电阻率降低,且电阻率随纤维掺量的增大而减小。研究还发现尽管钢纤维的电阻率比碳纤维低,但在纤维掺量相同时,钢纤维水泥浆的电阻率比碳纤维水泥浆的大得多。这主要是因为碳纤维的直径小,长径比和比表面积大,在水泥基体内更易于形成导电网络。掺入混杂纤维,即通过掺加一定量碳纤维形成相互连通的导电网络,同时掺入适量电阻率低的钢纤维,将获得比单掺碳纤维或钢纤维(体积掺量相同)更好的导电性。

## 3 导电混凝土导电性能的影响因素

混凝土的配合比组成是影响导电混凝土导电性能的主要因素,包括导电组分材料的类型、形状特征(颗粒状或纤维状)、颗粒大小或长径比大小、掺量及混凝土的水灰比等;另外,混凝土导电性随固化龄期的延长和环境温度、湿度而变化。对碳纤维混凝土而言,除上述因素外,纤维的均匀分散性对混凝土导电性影响显著。为了充分发挥纤维的作用,使碳纤维在混凝土中均匀分散,对提高碳纤维混凝土的导电性十分重要。改善碳纤维分散性的措施主要有:(1)优化配合比组成及选用恰当的搅拌和成型工艺,研究表明,混凝土的水灰比、加入碳纤维的先后顺序、搅拌工艺和时间、以及成型工艺等对纤维的分散性有重要影响;(2)掺加分散剂,如甲基纤维素等,促进碳纤维在水溶液中均匀分散;(3)掺超细矿物填料,如硅灰和粉煤灰。硅灰由于粒径细,加入到混凝土中将形成良好的填充效应,不仅能够填充在水泥颗粒之间,也能分散在碳纤维之间,从而有效地提高碳纤维的分散性,降低碳纤维混凝土的电阻率<sup>[11]</sup>。(4)对碳纤维进行表面处理,提高碳纤维的亲水性。由于水泥浆属于水基化合物,因而碳纤维的亲水性对纤维的分散性有重要影响。Chung对碳纤维各种表面处理方法的机理和效果进行了大量研究<sup>[12-15]</sup>。一种方法是将碳纤维浸泡在强氧化剂溶液<sup>[12]</sup>中或在臭氧中处理<sup>[13]</sup>,在强氧化剂的作用下,纤维表面发生氧化反应,形成具有亲水性的含氧官能团;另一种方法是将碳纤维浸泡在硅烷偶联剂溶液中<sup>[14]</sup>,在纤维表面形成硅烷涂层,而硅烷分子本身具有亲水性。碳纤维亲水性的改善,一方面可提高碳纤维在水泥基体中的分散能力,从而有效降低电阻和改善碳纤

维水泥混凝土电阻的稳定性;另一方面使纤维与水泥基结合更紧密,可减小纤维-基体的接触电阻,也有利于提高导电能力<sup>[15]</sup>。

#### 4 基于混凝土导电性的机敏性研究

在混凝土中掺入导电组分材料后,不但使混凝土的导电性能得到改善,而且还赋予混凝土本征机敏特性。目前对混凝土机敏特性的研究主要围绕碳纤维混凝土展开。

##### 4.1 碳纤维混凝土的压敏性

即碳纤维混凝土的电阻率在外力作用下产生有规律的变化。Chung 在这方面开展了大量的研究工作,通过在水泥混凝土中掺加一定体积含量的短切碳纤维,可使混凝土感知应力、应变、疲劳损伤和断裂破坏。碳纤维混凝土在拉应力作用下,纤维拔出,电阻增大;在压应力作用下,纤维插入,电阻减小<sup>[16]</sup>;其压敏性的灵敏度很高,灵敏系数可达 700<sup>[17]</sup>,远远高于一般的电阻应变片。毛起焯等研究发现:随着压力的增大,碳纤维混凝土电阻率的变化存在可逆感应阶段、平衡阶段和剧增阶段,反映了试块内原有缺陷裂纹的闭合张开、新裂纹的萌生和裂纹的扩展破坏<sup>[18]</sup>。

##### 4.2 碳纤维混凝土的温敏性

碳纤维混凝土的温敏性研究主要包括两个方面:塞贝克(Seebeck)效应和电阻-温度特性。孙明清等于 1998 年首次报道了碳纤维混凝土的塞贝克效应<sup>[19]</sup>,温差引起的电动势与温差成线性关系。研究表明碳纤维掺量是影响塞贝克效应的主要因素,在最佳纤维掺量下,其温差电动势率可达 18  $\mu\text{V}/\text{C}$ <sup>[20]</sup>。Wen 等对碳纤维掺杂处理提高温差电动势率进行了研究,通过在碳纤维中掺入溴元素,使溴进入碳纤维的石墨层间,接受电子,提高空穴浓度,进而提高温差电动势率。对沥青基碳纤维增强水泥,掺溴后其温差电动势率从 0.8  $\mu\text{V}/\text{C}$ ,提高到 17  $\mu\text{V}/\text{C}$ <sup>[21]</sup>。他们在研究钢纤维混凝土的塞贝克效应<sup>[22]</sup>后,发现钢纤维混凝土和碳纤维混凝土的塞贝克系数符号相反,前者为正,相当于电子型;后者为负,相当于空穴型。将两者接触,则在接触处形成 PN 结,该处比单一的钢纤维混凝土或碳纤维混凝土对温度的敏感性都要高,其温差电动势率可达到 70  $\mu\text{V}/\text{C}$ <sup>[23]</sup>。

张跃等于 1992 年研究了碳纤维-无宏观缺陷水泥基复合材料的电阻-温度特性,在 100~275 K 范围内电阻率随温度升高而下降,275 K 以后电阻率随温度升高而上升<sup>[1]</sup>。Wen 等在 1999 年研究发现碳纤维混凝土的电阻率随温度升高而减小、随温度降低而增大<sup>[24]</sup>。2001 年 Farhad Reza 等研究了温度对碳纤维水

泥体积电阻率的影响<sup>[25]</sup>。Tang 等<sup>[26]</sup>对碳纤维混凝土的电阻-温度变化规律以及纤维掺量对温敏特性的影响进行了研究,发现在纤维掺量小于 0.6% 时,碳纤维混凝土电阻对温度变化很敏感,且随纤维含量的增加,碳纤维混凝土电阻温敏性的稳定性提高;含 0.5% 和 0.6% 纤维的碳纤维混凝土同时具有较高的敏感性和稳定性;当纤维含量超过 0.8% 时,碳纤维混凝土没有明显的温敏性。

##### 4.3 碳纤维混凝土的力电效应

Sun 等人在 2000 年研究了 CFRC 的力电效应<sup>[27]</sup>,通过测试单向受压下的 4 cm × 4 cm × 4 cm CFRC 立方体试样发现:从小荷载直到破坏荷载的全过程中压应力与所产生的电流强度之间存在一一对应关系。CFRC 每 MPa 应力产生的平均电流强度为 0.04  $\mu\text{A}$ ,灵敏度比净浆、砂浆和普通混凝土高。

##### 4.4 导电混凝土的电热特性

导电混凝土的电热特性是指在外加电源作用下,混凝土放出热量的现象,即焦耳效应。孙明清等在研究碳纤维混凝土电热特性<sup>[28]</sup>的基础上,将它与碳纤维混凝土的塞贝克效应结合起来,研制了具有温度自诊断和自适应功能的碳纤维混凝土板结构模型<sup>[29]</sup>。

#### 5 导电混凝土的工程应用研究

目前开展的应用研究主要有以下三个方面:室内采暖、电力设备接地工程和电热除冰化雪。室内采暖是利用导电混凝土的电热特性,即通电后产生热量,从而达到采暖的目的。文献[30]对导电混凝土采暖地面的初步研究结果表明,对设计功率为 1 kW 的 3.0 × 2.6 m 的导电混凝土地面,每天通电 4 h 即可满足采暖要求。

变电站接地网是保证电力系统安全可靠运行、保证人身及设备安全的重要设施,其接地电阻是接地网的主要技术参数之一。一般说来,在设计土壤电阻率较高的变电站时,接地电阻不太容易满足规程要求,需要采取降阻措施。采用导电混凝土接地,通过降低接地电极表面与土壤的接触电阻和电流在地中扩散时所经过路径的电阻,可达到降低接地电阻的目的<sup>[31]</sup>。该方法具有接地电阻小、接地电阻稳定、使用寿命长等优点,可在高电阻率地区接地工程中推广应用。

导电混凝土电热除冰化雪的工作原理是:将导电混凝土与外部电源连通,混凝土内产生热量,使路面温度升高。当路面温度上升到 0  $^{\circ}\text{C}$  以上后,路面上的冰雪就会吸热融化成水蒸发、流走,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,而且还将消除除冰盐的使用及除冰盐

给混凝土结构和环境所带来的负面影响。加拿大的 Xie 等对导电混凝土用于路面融雪化冰的有效性进行了研究<sup>[32]</sup>。1999年,美国的 Sherif 等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实验研究<sup>[9]</sup>。他们采用  $1.2 \times 3.6$  m 导电混凝土板,进行了多次野外防止结冰的试验,研究结果表明一次暴风雪的能量消耗费用不到  $1 \text{ \$/m}^2$ 。英国费莱尔集团也研制出能在很低的电压下快速变热的新型导电混凝土材料,利用这种材料建造机场将使机场跑道的除冰工作更为简便;伦敦地铁部门还计划将这种混凝土用于一些站台,以防止冬天乘客在结冰的站台上不慎滑倒<sup>[33]</sup>。文献[34]在试验研究碳纤维混凝土导电性和电热特性的基础上,开展了碳纤维混凝土除冰、化雪性能的实验研究(图1)。研究结果表明,碳纤维混凝土板通电产生的热量能够快速有效清除路面冰雪,采用较小的电热功率即可使降落在路面上的雪及时融化成水流走,路面不会积雪结冰。

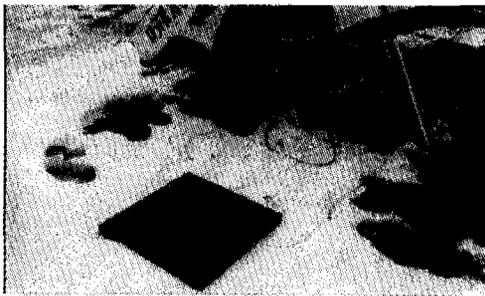


图1 碳纤维混凝土板室外融雪实验

## 6 存在的问题及解决措施

目前导电混凝土的研究和应用存在以下两个关键问题,需要进一步研究解决:

1) 对颗粒状或粉末状的石墨粉、碳粉、焦炭及钢屑等导电材料,由于其长径比小,当掺量较小时,导电材料难以相互接触,不能形成良好的导电网络,故其导电性能差;当掺量较大时,一方面由于碳黑、焦炭等自身强度较低,另一方面由于导电材料的吸水性,将加大混凝土拌和时的需水量(水灰比),使混凝土的强度大幅降低,难以满足土木工程对力学强度的需要。对碳纤维;虽然掺量较低时即可形成导电网络,但由于纤维搭接的接触面较小,因此其电导率低,需加大纤维的掺量才能改善其导电性能。而过高的纤维含量将使纤维在搅拌时结团成束,难以分散;在成型时易引入大量的气泡,使混凝土强度降低。而对于钢纤维,由于其直径较粗,当纤维掺量较低时,难以形成相互搭接的导电网络,导电性能差;但纤维掺量高时,其工作性又差,采用常规方法很难施工。因此,目前研究的导电混凝土难

以较好地兼顾力学与导电这两方面性能的要求。2) 导电混凝土的造价普遍较高。特别是石墨、碳纤维等导电组分材料价格昂贵,使其造价远远高于普通混凝土。加拿大的 Xie 等在混凝土中掺入体积含量为 15%~20% 的钢屑和 1.5%~2.0% 钢纤维,使混凝土的造价增加了 4 倍,达到  $250 \text{ \$/m}^3$ 。上述两个因素严重制约了导电混凝土在实际工程中的大量推广应用。

根据导电混凝土的导电机理和电导渗流理论,可采取同时掺入导电纤维和导电颗粒的方法,即在适量纤维相互搭接形成导电网络的基础上,掺入导电颗粒,以增大导电组分的接触面,从而在确保混凝土具有足够力学强度的基础上,获得较好的导电性。对导电性要求不太高的混凝土,可采用钢渣等固体废弃物进行配制。炼钢过程产生的废弃物钢渣中除含有较高的金属铁及其氧化物(半导体材料,具有一定导电能力)外,还具有可代替天然骨料制备混凝土。作为一种工业废渣,其价格十分便宜。因此采用钢渣制备导电混凝土,将有效克服以往价格高、混凝土性能下降的缺点。表1所示为某风淬钢渣的化学成分,氧化铁的含量达到 26% 左右。采用粒径小于 5 mm 的钢渣,按水泥:钢渣=1:1 的配合比配制的钢渣混凝土,其 28 d 电阻率为  $8.4 \times 10^3 \text{ \Omega} \cdot \text{cm}$ ,远远低于普通水泥浆的电阻率  $140.0 \times 10^3 \text{ \Omega} \cdot \text{cm}$ ;且其力学性能好,  $4 \times 4 \times 4$  cm 立方体试块 28 d 抗压强度达到 76 MPa。可满足防静电地面等对混凝土强度和导电性的要求。

表1 某风淬钢渣的主要化学成分

CaO	MgO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	f-CaO	碱度
42.80	5.81	19.02	2.53	26.39	1.50	1.03	0.09	0.40	2.4

## 参考文献:

- [1] 张跃, 职任涛, 朱逢吾, 等. 碳纤维(LCF)-无宏观缺陷(MDF)水泥基复合材料电学性能的研究[J]. 材料科学进展, 1992, 6(4): 357-362.
- [2] Sun Mingqing, Li Zhuoqiu, Mao Qizhao, Shen Darong. Study on the hole conduction phenomena in carbon fiber reinforced concrete [J]. Cement and Concrete Research, 1998, 28(4): 549-553.
- [3] Whittington H W, McCarter J, Forde M C. The Conduction of Electricity Through Concrete [J]. Magazine of Concrete Research, 1981, 33(114): 48-60.
- [4] Xie Ping, Gu Ping, Beaudoin J J. Electrical Percolation Phenomena in Cement Composites Containing Conductive Fibres [J]. Journal of Materials Science, 1996, 31(15): 4 093-4 097.
- [5] 雀部博之. 导电高分子材料[M]. 北京: 科学出版社, 1989.

- [6] 周浩,陈隆道. 导电混凝土及其应用[J]. 混凝土与水泥制品,1992,4:12-13.
- [7] 杨元霞,刘宝举,沈大荣. 不同填料对导电水泥基复合材料物理性能影响的研究[J]. 长沙铁道学院学报,1997,15(3):21-25.
- [8] 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.
- [9] Sherif Yehia, Christopher Y Tuan. Conductive Concrete Overlay for Bridge Deck Deicing[J]. ACI Materials Journal, 1999,96(3):382-390.
- [10] 叶青,张泽南,胡国君. 掺碳纤维水泥基导电材料的物理性能研究[J]. 混凝土与水泥制品,1995,3:43-46.
- [11] 侯作富,李卓球,胡胜良. 硅灰对碳纤维导电混凝土电阻率和强度的影响[J]. 混凝土,2003,(2):26-28.
- [12] W. Lu, X. Fu, D. D. L. Chung. A comparative study of the wettability of steel, carbon, and polyethylene fibers by water[J]. Cement and Concrete Research, 1998,28(6):783-786.
- [13] Xuli Fu, Weiming Lu, D. D. L. Chung. Improving the tensile properties of carbon fiber reinforced cement by ozone treatment of the fiber[J]. Cement and Concrete Research, 1996,26(10):1485-1488.
- [14] Yunsheng Xu, D. D. L. Chung. Silane-treated carbon fiber for reinforcing cement[J]. Carbon, 2001,39:1995-2001.
- [15] Xuli Fu, D. D. L. Chung. Contact electrical resistivity between cement and carbon fiber; its decrease with increasing bond strength and its increase during fiber pull-out[J]. Cement and Concrete Research, 1995,25(7):1391-1396.
- [16] D. D. L. Chung. Strain Sensors Based on the Electrical Resistance Change Accompanying the Reversible Pull-Out of Conducting Short Fibers in a Less Conducting Matrix[J]. Smart Material Structure, 1995,4:59-61.
- [17] D. D. L. Chung. Self-monitoring structural materials[J]. Materials Science and Engineering, 1998,R22:57-78.
- [18] 毛起焯,赵斌元,李卓球,等. 水泥基碳纤维复合材料压敏性的研究[J]. 复合材料学报,1996,13(4):8-11.
- [19] 孙明清,李卓球,沈大荣. 碳纤维水泥基复合材料的 Seebeck 效应[J]. 材料研究学报,1998,12(1):111-112.
- [20] Sun Mingqing, Li Zhuoqiu, Mao Qizhao et al. Thermoelectric percolation phenomena of carbon fiber reinforced concrete[J]. Cement and Concrete Research, 1998,28(12):1707-1712.
- [21] Sihai Wen, D. D. L. Chung. Enhancing the Seebeck Effect in Carbon Fiber Reinforced Cement by Using Intercalated Carbon Fibers[J]. Cement and Concrete Research, 2000,30(8):1295-1298.
- [22] Sihai Wen, D. D. L. Chung. Seebeck Effect in Steel Fiber Reinforced Cement[J]. Cement and Concrete Research, 2000,30(4):661-664.
- [23] Sihai Wen, D. D. L. Chung. Electrical behavior of cement-based junctions including the pn-junction[J]. Cement and Concrete Research, 2001,31:129-133.
- [24] Sihai Wen, D. D. L. Chung. Carbon Fiber-Reinforced Cement as a Thermistor[J]. Cement and Concrete Research, 1999,29(6):961-965.
- [25] Farhad Reza, Gordon B. Batson, Jerry A. Yamamuro, et al. Volume Electrical Resistivity of Carbon Fiber Cement Composites[J]. ACI Materials Journal, 2001,98(1):25-35.
- [26] Tang Zuquan, Li Zhuoqiu, Xu Dongliang. Influence of carbon fiber contents on the temperature sensibility of CFRC road material[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Materials Science Edition), 2002,17(3):75-77.
- [27] Sun Mingqing, Liu Qingping, Li Zhuoqiu et al. A study of piezoelectric properties of carbon fiber reinforced concrete and plain cement paste during dynamic loading[J]. Cement Concrete Research, 2000,30(10):1593-1595.
- [28] 孙明清,李卓球,毛起焯. CFRC 电热特性的研究[J]. 武汉工业大学学报,1997,19(2):72-74.
- [29] Sun Mingqing, Li Zhuoqiu, Liu Qingping et al. A study on thermal self-diagnostic and self-adaptive smart concrete structures[J]. Cement and Concrete Research, 2000,30(8):1251-1253.
- [30] 李仁福,戴成琴,于纪寿,等. 导电混凝土采暖地面[J]. 混凝土,1998,1:47-48.
- [31] 孙旭. 导电混凝土在变电站接地网中的应用[J]. 高电压技术,2001,27(4):66-67.
- [32] P. Xie, J. J. Beaudoin. Electrically Conductive Concrete and Its Application in Deicing. Advances in Concrete Technology, Proceedings[J]. Second CANMET/ACI International Symposium, SP-154, American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., 1995:399-417.
- [33] 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,1998,6:54.
- [34] 唐祖全,李卓球,钱觉时. 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,2004,7(2):215-220.