

直流电下导电沥青混凝土非线性导电行为研究

李秀君, 张恒, 莫洁清, 宋明洋

(上海理工大学 环境与建筑学院, 上海 200093)

摘要: 导电沥青混凝土中非线性导电行为的导电机制尚不明确。基于实验室制备的碳纤维(CF)-碳纤维粉(CFP)导电沥青混凝土, 通过测试外力场对导电沥青混凝土电阻率的关系, 结合线性随机电阻网络模型、动态随机电阻网络模型和非线性随机动态电阻器模型, 研究导电沥青混凝土非线性导电行为, 明确非线性导电行为的导电机制。结果表明: 随着碳纤维掺量、油石比和压力的增加, 电阻率呈现明显且相似的非线性下降趋势, 其中, 碳纤维粉掺量的增加导致电阻率先下降后上升; 不同掺量的导电沥青混凝土伏安特性曲线均呈现非线性特征; 在强电场作用下, 导电相材料本身的非线性导电行为和绝缘态部分载流子通道导通引起的非线性导电行为共同导致了碳纤维-碳纤维粉导电沥青混凝土的非线性导电行为, 并证明在电场作用下导电沥青混凝土存在隧道效应。

关键词: 碳纤维粉; 电阻率; 导电沥青混凝土; 非线性导电行为; 隧道效应

中图分类号: U 414

文献标志码: A

Nonlinear conductive behavior of conductive asphalt concrete under direct current

LI Xiujun, ZHANG Heng, MO Jieqing, SONG Mingyang

(School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: The conductive mechanism of nonlinear conductive behavior in conductive asphalt concrete is not clear. Based on the laboratory-prepared carbon fiber (CF)-carbon fiber powder (CFP) conductive asphalt concrete, the nonlinear conductive behavior of conductive asphalt concrete was investigated by testing the relationship of the external force field on the electrical resistivity of conductive asphalt concrete, and by combining the linear stochastic resistor network model, dynamic stochastic resistor network model, and nonlinear stochastic dynamic resistor model, to clarify the conductive mechanism of the nonlinear conductive behavior. The results showed that with the increase of carbon fiber content,

收稿日期: 2023-02-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51978401)

第一作者: 李秀君(1976-), 女, 特聘教授。研究方向: 沥青路面结构与路面材料。E-mail: 363096289@qq.com

引文格式: 李秀君, 张恒, 莫洁清, 等. 直流电下导电沥青混凝土非线性导电行为研究[J]. 上海理工大学学报, 2024, 46(3): 339-346. DOI: 10.13255/j.cnki.jusst.20230221002

Citation: LI Xiujun, ZHANG Heng, MO Jieqing, et al. Nonlinear conductive behavior of conductive asphalt concrete under direct current[J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2024, 46(3): 339-346.

asphalt-aggregate ratio and pressure, the resistivity shows a significant and similar nonlinear downward trend, and the increase of carbon fiber powder content leads to the first decrease and then increase of resistivity, and the volt-ampere characteristic curves of conductive asphalt concrete with different contents show nonlinear characteristics. Under the strong electric field, the nonlinear conductive behavior of the conductive phase material itself and the nonlinear conductive behavior caused by the conduction of the carrier channel in the insulating state together lead to the nonlinear conductivity behavior of the carbon fiber-carbon fiber powder conductive asphalt concrete, and it is proved that the tunneling effect exists in the conductive asphalt concrete under the electric field.

Keywords: carbon fiber powder; electrical resistivity; conductive asphalt concrete; nonlinear conductive behavior; tunneling effect

导电沥青混凝土是借助于绝缘体沥青胶浆作为胶结物，以集料作为骨架，填充一种或几种导电相材料或导电聚合物，组合起来得到的满足导电性能和路用性能的复合材料，实现将普通沥青混凝土从电的不良导体转变成导体，实现路面通电升温以达到融雪化冰功能。导电相材料或导电聚合物不仅具备导电性能，同时包括压敏、温敏等特殊性能。常见的导电相材料可以分为 3 大类：碳质材料类、金属类和聚合物类。其中，最常用的是碳质材料类和金属类，如碳纤维(CF)、石墨、石墨烯、炭黑、钢屑等。目前，研究较多的是将碳纤维与石墨或石墨烯作为填充的导电相材料制成导电沥青混凝土^[1-3]。

制备导电沥青混凝土时需要考虑导电相材料的电阻率、成本、耐久性和分散性等诸多因素。经过数十年对导电沥青混凝土的探索与发展，主要通过调整导电相材料的掺量、类型和优化配合比设计等方式使导电沥青混凝土路面具备一定的融雪化冰功能。但是，目前的导电沥青混凝土主要存在以下两方面的问题：一是为达到良好的导电性能，往往添加大量的导电相材料，易对沥青混凝土路用性能产生不利影响，且导电效率低下导致后期运营成本极高，耐久性不足，同时使得导电沥青混凝土造价过高，工程投入成本过大；二是对导电沥青混凝土的非线性导电行为缺乏深刻的认识，未能从多方面多角度指导导电行为，不能满足实际工程的使用需求，从而制约了导电沥青混凝土路面的进一步推广和应用^[4]。

近年来，随着材料科学的发展，碳纤维和碳纤维粉(CFP)的制造成本降低，使得碳纤维和碳纤维粉在土木工程领域中得到一定的应用。林希等^[5]

以碳纤维粉为导电相材料，对水泥砂浆开展改性试验，分析了碳纤维粉掺量、龄期、压应力与试件电阻率的关系。得出随着龄期的增加，各试件的电阻率先增后减，表明试件电阻率与水化程度相关。赵丽等^[6]对复合材料中碳纤维粉的用量以及分散性进行研究，得到当碳纤维粉掺量为树脂质量分数 10%、超声分散时间 15 min 时，碳纤维粉能够在基体树脂中有效分散。金婷艳等^[7]研究了碳纤维粉和钢渣对水泥基复合材料力学性能和导电性能的影响，表明适量的碳纤维粉能够均匀分散在体系内，形成密实的结构，促进体系力学性能和导电性能的提高。张颖等^[8]在环氧树脂中添加碳纤维粉进行改性，研究碳纤维粉尺寸及掺量对复合材料拉伸性能和弯曲性能的影响，得到添加质量掺量 20% 的 1000 目碳纤维粉对玻纤复合材料的强度提升最大。

上述研究为碳纤维粉在沥青道路中的应用奠定了基础，但导电相材料与沥青胶浆存在各方面性能差异，导致整个材料体系不均匀或者处于混乱、无序的状态，这种不均匀性造成了材料在外力场作用下的非线性导电行为。基于以上背景，为了尽量消除导电相材料引起的非线性行为，本文结合碳纤维和碳纤维粉的优异电学性能，在碳纤维导电沥青混凝土的基础上掺入适量碳纤维粉，通过工艺研究和优化设计，在实验室条件下制备出电阻率小于 0.98 Ω·m 的碳纤维-碳纤维粉导电沥青混凝土。通过测试碳纤维-碳纤维粉导电沥青混凝土电阻率与掺量、电阻率与电压、电阻率与油石比、电阻率与压力的关系，结合非线性随机电阻网络模型(NLRRN)和动态随机电阻网络模型(DRRN)^[9-10]，对碳纤维-碳纤维粉的非线性导电

行为进行合理分析, 为导电沥青混凝土电阻率的调控及工程应用提供理论基础。

1 原材料与试验方法

1.1 原材料

本文使用 AC-13 型和 AC-16 型沥青混凝土, 所使用沥青为中石化生产的 70[#]沥青, 集料为浙江省嘉兴市产地集料, 试验用的沥青基本性质及混合料级配如表 1~3 所示。

为了探究碳纤维、碳纤维粉掺量对沥青混凝土伏安特性的影响, 将碳纤维的掺量取为沥青混合料质量的 0.3%, 0.4%, 0.5%, 0.6%, 0.7%; 碳纤维粉的掺量取沥青质量的 1.0%, 1.5%, 2.0%, 2.5%, 3.0%。

沥青混凝土的拌合工艺为先将集料在 175 ℃

表 1 沥青基本性质

Tab.1 Physical properties of asphalt

检测项目	试验结果	试验方法	标准要求
针入度(25 ℃, 5 s, 100 g)/0.1mm	69.50	T0604	60~80
软化点(环球法)/℃	46.30	T0606	≥43
延度(15 ℃, 5 cm/min)/cm	134.40	T0605	≥100
运动黏度(60 ℃)/(Pa·s)	456.00	T0620	≥160
密度(25 ℃)/(g·cm ⁻³)	1.02	T0603	Test

拌合 120 s, 随后加入碳纤维粉沥青胶浆拌合 120 s, 再加入碳纤维拌合 120 s, 最终加入矿粉再拌合 120 s, 沥青胶浆的最佳用量为混合料质量的 4.9%; AC-16 混合料级配下, 成型后的马歇尔试件电阻率为 0.98 Ω·m。碳纤维、碳纤维粉的基本性质见表 4 和表 5。

表 2 AC-13 混合料级配

Tab.2 AC-13 gradation of asphalt mixture

筛孔/mm	16.0	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
通过率/%	100	96.8	82.8	56.2	31.4	24	16.4	10.0	6.0	4.0

表 3 AC-16 混合料级配

Tab.3 AC-16 gradation of asphalt mixture

筛孔/mm	19.0	16.0	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
通过率/%	100.0	99.0	90.6	65.1	38.3	27.8	22.6	17.6	10.5	5.2	2.9

表 4 碳纤维基本性质

Tab.4 Physical properties of carbon fiber

拉伸强度/MPa	密度/(g·cm ⁻³)	拉伸模量/GPa	电阻率/(Ω·m)	长度/mm	直径/μm
4900	1.75	230	1.5×10 ⁻³	9	7

表 5 碳纤维粉基本性质

Tab.5 Physical properties of carbon fiber powder

拉伸强度/MPa	细度/μm	电阻率/(Ω·m)	直径/μm	密度/(g·cm ⁻³)
4900	2.1	1.5×10 ⁻³	7	1.75

1.2 试验方法

导电沥青胶浆制备: 将基质沥青在 160 ℃ 的烘箱中使其软化, 再将沥青放置于 160 ℃ 的电加热板上, 加入碳纤维粉, 用玻璃棒充分搅拌均匀。

导电沥青混凝土制备: 采用《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20-2011)^[1]中的沥青混合料试件制作方法(击实法)制备, 利用搅拌锅依次加入集料、沥青胶浆、碳纤维、矿粉,

每一步拌合温度为 175 ℃，拌合时间为 120 s，最终制作成标准马歇尔试件。

电阻测试：采用二电极法对室温 25 ℃ 下的标准马歇尔试件进行电阻测试(见图 1)，采用德力西 0801B 万用表。伏安特定曲线测试采用可调直流稳定电源 0 ~60 V 仪器，通过调节电压记录对应电流，计算得到电阻和电阻率。压力作用下的电阻测量采用压力试验机，在室温 25 ℃、加载速度 2.4 kN/s 下进行试验，记录不同压力下的电阻大小。

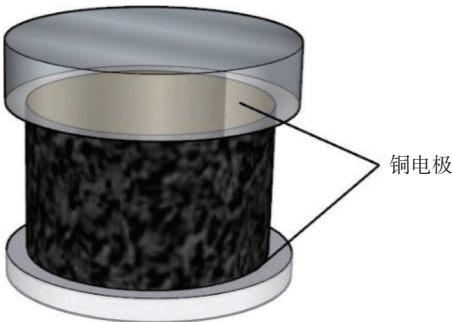


图 1 导电沥青混凝土二电极法

Fig.1 Conductive asphalt concrete two electrode method

2 结果与分析

2.1 碳纤维掺量对非线性导电行为的影响

测试不同碳纤维掺量下导电沥青混凝土试件的非线性导电行为，当 AC-13 混合料级配下的碳纤维掺量为 0.3%，0.4%，0.5%，0.6%，0.7% 时，试件与电阻率之间的非线性导电行为如图 2 所示。

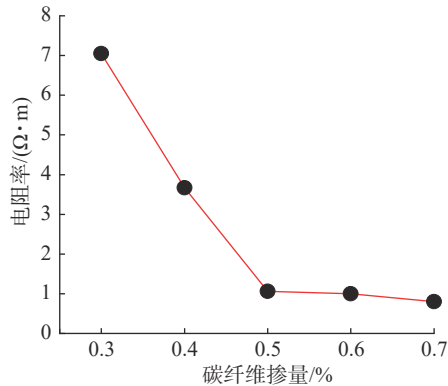


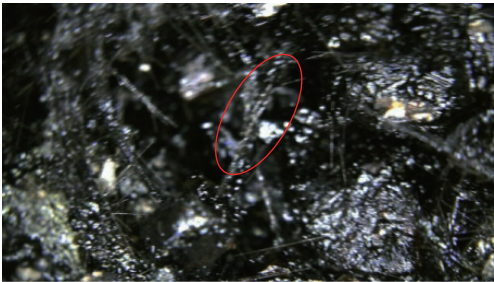
图 2 不同碳纤维掺量下的电阻率

Fig.2 Resistivity at different carbon fiber content

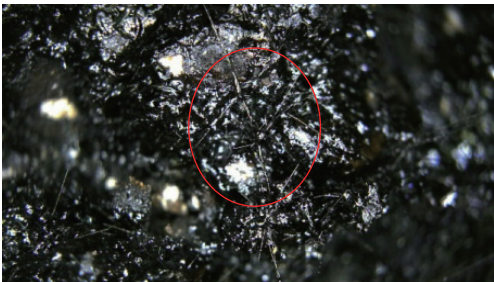
图 2 中的曲线为非线性变化，当碳纤维掺量低于 0.5% 时，碳纤维未完全相互搭接，导电沥青混凝土的部分导电通路未形成。当碳纤维掺量达

到 0.5% 时，随着掺量继续增加，电阻率几乎不再变化，源于碳纤维在混合料中已基本完全相互搭接，形成完整的导电通路，此时再增加碳纤维的掺量，未增加额外导电通路。

若碳纤维在导电沥青混凝土内部出现大量团聚，会导致其工作时出现局部温度迅速上升，当温度达到沥青软化点时，导电沥青路面局部将失去力学性能。为观察 0.5% 掺量碳纤维在混合料中的分布状态是否均匀，使用显微镜观看发现其内部碳纤维出现了大量团聚现象(见图 3(a))，且通过试验发现 0.5% 掺量碳纤维导电沥青混凝土在复掺碳纤维粉时，其电阻率与 0.4% 掺量碳纤维导电沥青混凝土在复掺碳纤维粉时相差不大(见表 6)，此时，碳纤维在混合料内部分布均匀(见图 3(b))，因此，确定碳纤维掺量为 0.4%。



(a) 0.5%碳纤维+碳纤维粉



(b) 0.4%碳纤维+碳纤维粉

图 3 混合料内部碳纤维分布状态

Fig.3 Distribution state of carbon fiber inside the mixture

表 6 复掺不同碳纤维掺量与碳纤维粉电阻率
Tab.6 Different carbon fiber content and carbon fiber powder resistivity

导电沥青混凝土	电阻率/(Ω·m)
0.5%CF+2.0%CFP	1.94
0.4%CF+2.0%CFP	2.68

2.2 碳纤维粉掺量对非线性导电行为的影响

由于碳纤维粉价格相对低廉，在沥青胶浆中分散性好，因此，采用碳纤维粉作为导电相材料。测试不同碳纤维粉掺量下的非线性导电行

为。在 AC-13 设计级配下, 碳纤维掺量固定在 0.4%, 改变碳纤维粉不同掺量, 分别为 1.0%, 1.5%, 2.0%, 2.5%, 3.0%, 其掺量与电阻率之间的非线性导电行为曲线如图 4 所示。

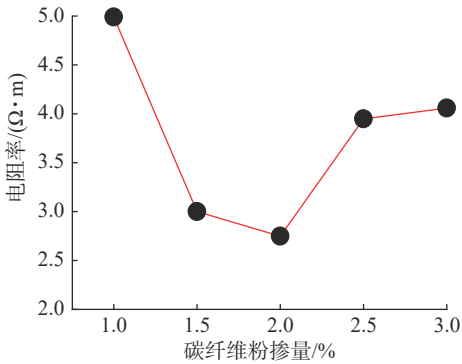


图 4 不同碳纤维粉掺量下的电阻率

Fig.4 Resistivity at different carbon fiber powder content

从图 4 中可以看出, 电阻率随碳纤维粉掺量的变化为非线性, 当碳纤维粉掺量较低时, 导电沥青混凝土的电阻率变化不明显, 这是因为碳纤维粉-碳纤维粉、碳纤维-碳纤维粉、碳纤维-碳纤维相互之间间距过大, 未能满足形成隧道效应的最大间距。当碳纤维粉掺量为 2.0% 时, 电阻率达到低值, 这是因为导电体系中碳纤维与碳纤维粉相互搭接或距离减小, 增加了导电通路的数量。但随着碳纤维粉掺量的进一步增加, 其出现大量团聚现象, 不利于导电通路的形成。

2.3 油石比对非线性导电行为的影响

对不同油石比下的非线性导电行为, 采用 AC-16 设计级配, 0.4% 碳纤维+2.0% 碳纤维粉掺量的导电沥青混凝土, 油石比分别为 4.0%, 4.5%, 5.0%, 5.5%, 6.0%, 其油石比与电阻率的非线性导电行为曲线如图 5 所示。

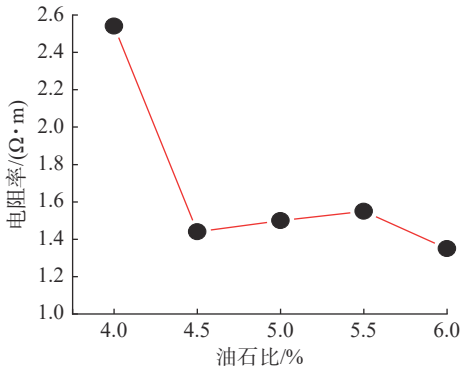


图 5 不同油石比下的电阻率

Fig.5 Resistivity at different whetstone ratios

图 5 中当油石比掺量在 4.0%~4.5% 时, 电阻率下降明显。一是由于沥青胶浆未能充分裹附集

料, 导电通路被集料隔断; 二是由于沥青胶浆含量少, 使得碳纤维粉含量少, 导致一部分碳纤维之间未被碳纤维粉连通形成导电通路。在适当油石比范围内, 随着沥青胶浆掺量增加, 导电体系中碳纤维粉含量增加, 此时有利于导电通路的形成。但随着油石比的增多, 材料成本逐渐增加, 路用性能逐渐减弱, 而油石比在 4.5%~6.0% 时电阻率变化较小, 结合马歇尔配合比设计方法, 可确定最佳油石比为 4.9%。

2.4 外加压力对非线性导电行为的影响

采用压力测试机, 在不同压力下测试试件的电阻。采用 AC-16 设计级配, 0.4% 碳纤维+2.0% 碳纤维粉掺量的导电沥青混凝土马歇尔试件。压力与电阻的非线性导电行为曲线如图 6 所示。

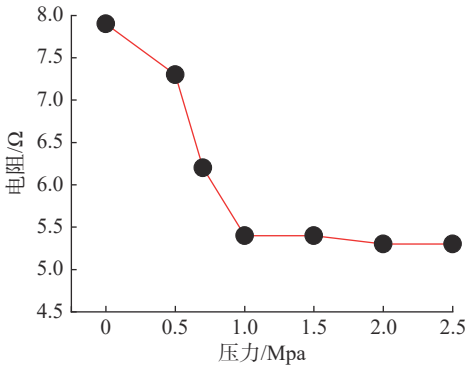


图 6 不同压力下的电阻

Fig.6 Resistance at different pressures

随着压力逐渐增大, 电阻逐渐减小, 当压力达到 1 MPa 以后, 试件电阻几乎不再改变。这是因为随着压力增加, 试件不断被压缩, 导电网络发生结构变化, 使得导电相材料相互靠近, 导电通路逐步被完善, 材料的电阻下降, 非线性关系减弱。

2.5 导电沥青混凝土的非线性伏安特性

测试导电相材料不同掺量下导电沥青混凝土试件的伏安特性曲线。试件 a, b, c, d 为标准马歇尔试件, 试件 e, f 为 30 mm×30 mm×50 mm 车辙板试件, 试件 a, b, c, d, e, f 的伏安特性曲线分别如图 7(a)~(f)所示, 其中, 虚线为伏安特性曲线的线性拟合曲线。

从图 7 中可知, 无论是单掺碳纤维还是复掺碳纤维+碳纤维粉都表现出明显的非线性特征。即随着电压的增大, 电压-电流曲线逐渐偏离, 向电流轴靠拢, 产生了非线性导电行为。当掺量较低时, 非线性特点较为明显, 这是因为导电沥青混凝土内部形成的点网络比较不稳定, 导电通道的

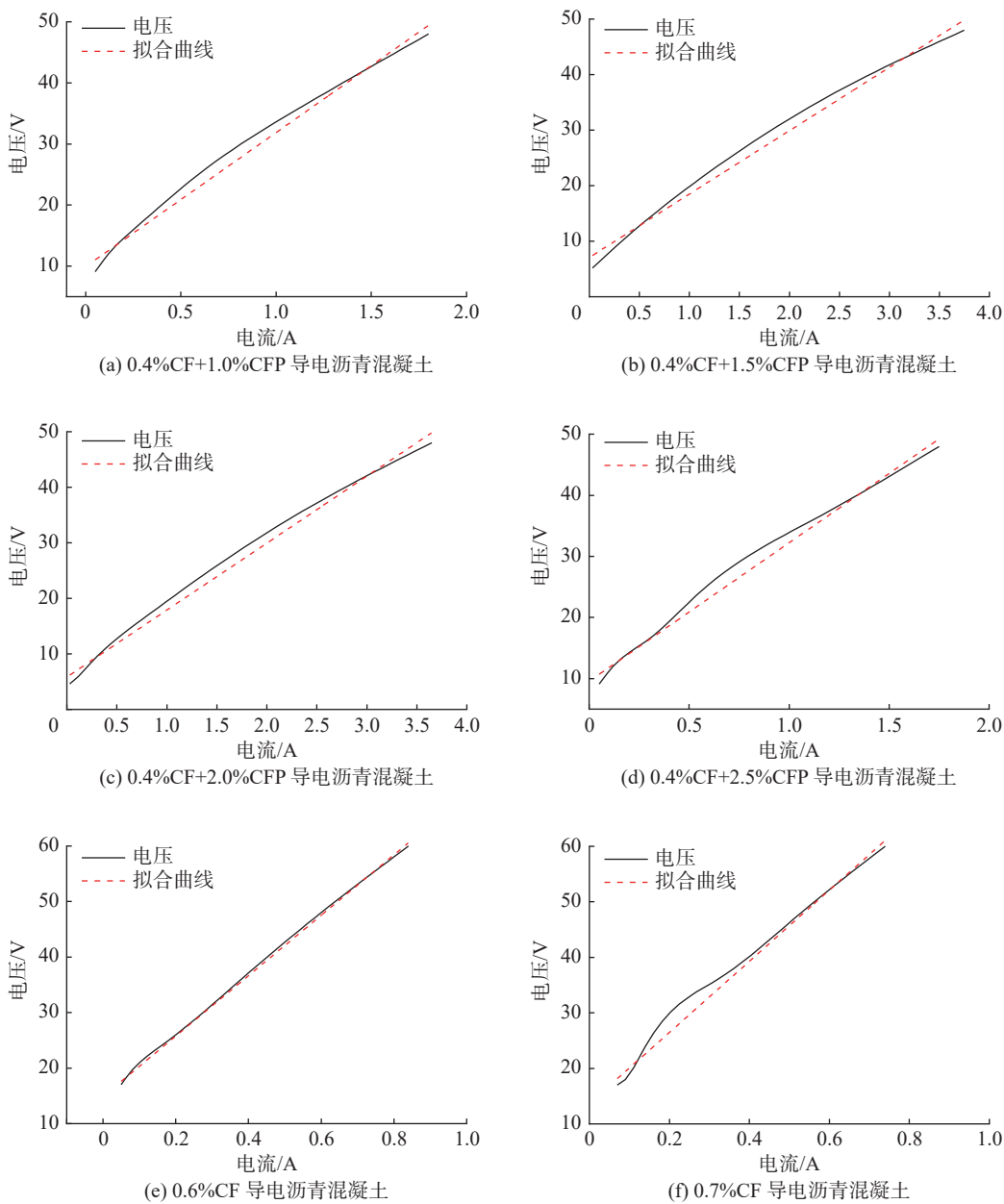


图 7 导电沥青混凝土的伏安特性曲线

Fig.7 Voltammetry characteristic curve of conductive asphalt concrete

数量较少，整个体系很多物理性质波动较大。

当导电沥青混凝土掺入 0.6%(如图 7(e))碳纤维时，其伏安特性曲线已近似线性关系，这是因为导电沥青混凝土内部形成完整的导电通路。但当碳纤维含量为 0.7%(如图 7(f))时，其伏安特性曲线线性关系变差，这是因为碳纤维掺量过多会造成碳纤维大量团聚，反而影响了导电通路的形成。通过分析伏安特性曲线，可以确定导电相材料的最优添加比例。

伏安特性曲线中各点斜率对应该电压下电阻，得出在 0~48 V 的测试电压范围内，各导电

沥青混凝土的电阻随着电压增大而逐渐减小。

为了便于观察电阻随电压的变化规律，将试验结果进行换算，得到电阻与电压的变化(见图 8)。结果表明：当电压很低时，未突破转变电压，导电沥青混凝土的电阻基本保持不变。当电压超过转变电压时，导电沥青混凝土的电阻会迅速下降，再进一步增大电压，电阻几乎保持不变。

为了消除导电沥青混凝土尺寸和电阻之间的差异，将图 7 的 $I-U$ 曲线转化成 $J-E$ 曲线，如图 9 所示。在电场作用下，所有导电沥青混凝土均具有非线性导电行为，当 $I-U$ 曲线不再遵循欧姆定

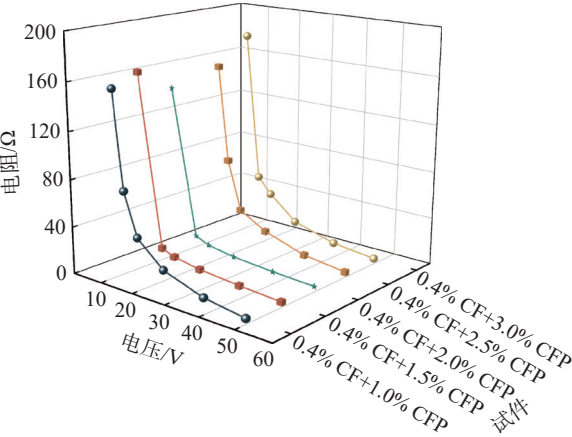


图8 导电沥青混凝土电阻-电压关系曲线

Fig.8 Resistivity-voltage relation curve of conductive asphalt concrete

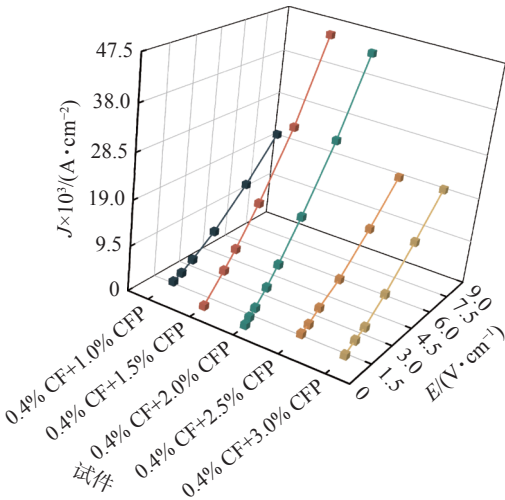


图9 电流密度-电场强度关系曲线

Fig.9 Current density-electric field intensity relation curves

律时, 可以用电流密度 J 和电场强度 E 来描述, 即

$$J \propto E^\alpha \tag{1}$$

式中, α 表示非线性导电行为偏离线性导电行为的程度, $\alpha \neq 1$ 。

从图9可知, 电流密度随着电场强度增大基本呈现线性变化, 在碳纤维粉掺量为1.5%和2.0%时, 电流密度随电场强度变化最为显著, 这是因为导电并不完全由导电相材料通过物理接触形成, 导电相材料之间包裹着厚薄不一的沥青绝缘层, 构成载流子运输过程中的隧道势垒^[12]。在最佳掺量时, 大部分导电相材料在电场作用下突破隧道势垒形成导电通路, 促使导电通道数量增多, 此时, 导电沥青混凝土非线性导电行为最为明显。

导电沥青混凝土在低电场时的线性电导率为 σ , 定义材料电导率开始偏离线性电导率 σ 时,

J - E 曲线上对应点为 (E_c, J_c) , 导电沥青混凝土的线性电导率越小, J - E 曲线上非线性转变点的坐标越接近坐标原点, 非线性转变点 J_c 和 E_c 的值越小。非线性转变电流密度 J_c 与导电沥青混凝土线性电导率 σ 的关系如图10所示。导电沥青混凝土的 J_c 随着 σ 的增大而增加, 满足标度方程:

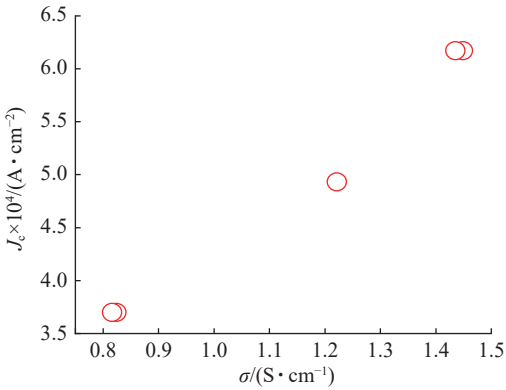


图10 电流密度-线性电导率关系图

Fig.10 Current density-linear conductivity diagram

$$J_c \sim \sigma^X \tag{2}$$

式中, X 为非线性指数。

对图10实验数据使用该标度方程两边同时取对数后进行线性拟合, 拟合方程为: $\log J_c = A + X \log \sigma$, A 为常数, 拟合结果如图11所示。

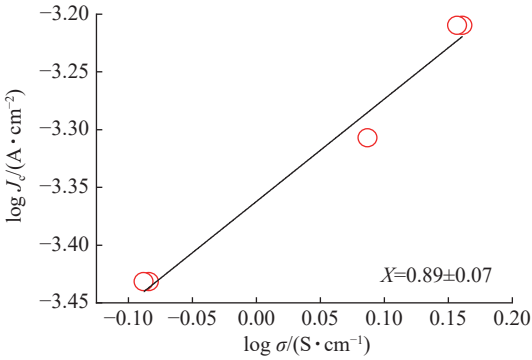


图11 电流密度-线性电导率关系拟合曲线

Fig.11 Current density-linear conductivity relation fitting curves

在三维体系中, NLRN 网络模型和 DRRN 网络模型给出的非线性指数理论值分别为 $X < 0.88$ 和 $X < 1.44$ ^[9]。碳纤维/碳纤维粉导电沥青混凝土体系拟合得到 $X \in (0.82, 0.96)$ 。当 $X \in (0.82, 0.88)$ 和 $X \in (0.89, 0.96)$ 时, 分别满足 NLRN 网络模型和 DRRN 网络模型。由于 NLRN 模型和 DRRN 模型中的任何一个模型都不能圆满地解释导电沥青混凝土的非线性导电行为, 但非线性随机动态电阻器模型(NLRDRN)^[13]可同时满足 NLRN 模型和 DRRN

模型的要求，因此，NLRDRN模型能较好地解释导电沥青混凝土的非线性导电行为。这种联合模型假定复合体系的非线性来源于以下两个方面：一是导电相材料本身的导电行为呈非线性，只要存在能改变材料导电通路的外场，导电材料必定发生非线性变化^[12]；二是导电相材料本身为线性，但导电相材料复合体系被绝缘的基体所隔开，在强电场作用下，通过隧道效应或跃迁效应产生额外的导电通道，引起宏观导电呈非线性^[14]。

基于上述分析可知，导电沥青混凝土非线性导电行为既来源于导电相材料本身，也来源于在足够强的电场作用下，原本处于绝缘态的部分载流子通道导通，出现了附加的导电通路，从而呈现宏观的非线性导电行为。附加导电通路的出现对应载流子跨越沥青绝缘薄膜隧道效应的物理过程，通过分析导电沥青混凝土非线性导电标度方程 X 值的范围，进一步证明了在电场作用下导电沥青混凝土存在隧道效应。

3 结 论

a. 试验表明，在不同碳纤维掺量、不同油石比和不同压力下，导电沥青混凝土均表现出类似的非线性导电行为，随着自变量增加，电阻率逐渐降低，最终趋于稳定，可以根据拐点确定其最优掺量。

b. 在碳纤维导电沥青混凝土的基础上添加一定量的碳纤维粉，电阻率与掺量的关系曲线类似抛物线。当碳纤维粉掺量为2.0%时，电阻率达到了一个低值，此时导电沥青混凝土内部形成了更加完善的导电网络，但碳纤维粉掺量超过2.0%时，其出现大量团聚现象，非线性导电行为加剧。

c. 导电沥青混凝土伏安特性曲线均表现出非线性特征，其中0.6%碳纤维导电沥青混凝土表现出近似线性关系，通过分析伏安特性曲线，可以确定导电相材料的最优掺量。

d. 碳纤维-碳纤维粉导电沥青混凝土非线性导电行为符合非线性随机动态电阻器模型，其导电行为既来源于导电相材料本身，也来源于在足够强的电场作用下，处于绝缘态的部分载流子通道导通而出现的附加导电通路引起的非线性，即在

电场作用下导电沥青混凝土存在隧道效应。

参考文献：

[1] 杨振华. 石墨碳纤维导电沥青混凝土的制备及性能研究 [D]. 长沙: 长沙理工大学, 2015.

[2] 刘凯. 碳纤维/石墨烯导电沥青混凝土的制备及电热特性研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.

[3] 宋鹏. 石墨烯导电沥青混凝土制备及性能研究 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2019.

[4] 谭忆秋, 刘凯, 王英园. 碳纤维/石墨烯导电沥青混凝土的非线性伏安特性 [J]. 建筑材料学报, 2019, 22(2): 278–283.

[5] 林希, 王荣, 沈德争. 基于力阻的碳纤维改性砂浆自监测性能分析 [J]. 江苏建材, 2022(1): 32–33.

[6] 赵丽, 刘加强, 胡海青. 碳纤维粉/环氧树脂复合材料的研究 [C]//2011 年高分子学术论文报告会论文集. 大连: 中国化学会, 2011: 1000.

[7] 金婷艳, 田秀淑, 崔健, 等. 碳纤维粉-钢渣水泥基复合材料的力学性能和导电性能研究 [J]. 硅酸盐通报, 2015, 34(12): 3601–3605.

[8] 张颖, 刘晓峰, 阎述韬, 等. 碳纤维粉改性环氧树脂基玻纤复合材料力学性能研究 [J]. 功能材料, 2020, 51(11): 11103–11109.

[9] GEFEN Y, SHIH W H, LAIBOWITZ R B, et al. Nonlinear behavior near the percolation metal-insulator transition[J]. *Physical Review Letters*, 1986, 57(24): 3097–3100.

[10] AHARONY A. Crossover from linear to nonlinear resistance near percolation[J]. *Physical Review Letters*, 1987, 58(25): 2726.

[11] 交通部公路研究所. JTG E20–2011 公路工程沥青及沥青混合料试验规程 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2011.

[12] LU W, WU D J, WU C L, et al. Nonlinear DC response in high-density polyethylene/graphite nanosheets composites [J]. *Journal of Materials Science*, 2006, 41(6): 1785–1790.

[13] ZHENG Q, SONG Y H, WU G, et al. Reversible nonlinear conduction behavior for high-density polyethylene/graphite powder composites near the percolation threshold[J]. *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, 2001, 39(22): 2833–2842.

[14] STROUD D, HUI P M. Nonlinear susceptibilities of granular matter[J]. *Physical Review B*, 1988, 37(15): 8719–8724.