

石墨改性沥青混凝土的导电机制*

吴少鹏 磨炼同 水中和

武汉理工大学硅酸盐材料工程教育部重点实验室, 武汉 430070

摘要 通过研究电导率与石墨掺量、频率的依赖性, $V-I$ 特性, 提出石墨导电沥青混凝土的导电机制。渗流模型可解释导电通路的形成与发展, 该体系渗流阈值体积百分数 $P_c=11.0\%$, 电导率临界指数 $t=3.16$ 。导电机制是颗粒接触电导和隧穿机制综合作用。交变电场中的导电行为可等效为电阻和电容并联, 电阻导电捷径作用和电容、电阻相对数量影响临界频率。非线性 $V-I$ 特性产生于隧道效应时粒子间的非线性导电和高电场时诱发额外的导电通路。间隙减小可削弱电场强度对电流密度的影响, 颗粒间隙由于导电发热使热扰动的加剧和沥青热膨胀, 显著影响电导率。

关键词 沥青混凝土 石墨 导电机制 渗流模型

在普通沥青混合料掺入石墨可制备出具有良好电学性能的沥青混凝土, 有望利用导电沥青混凝土的电热效应进行路面的除雪化冰^[1-3]。同时导电沥青混凝土的材料组成与结构决定其电学性能, 电学性能则反映显微结构, 因此通过其电学性能的研究, 有助于理解沥青混凝土的结构与性能和建立沥青路面健康状况的自我诊断^[4,5]。但是, 以上应用的前提是建立在对导电沥青混凝土的电学性能充分理解的基础之上。

尽管导电高分子复合材料发展较快, 但至今没有一个较为完善的、普遍适用的导电机制来解释体系导电网络的形成及其导电行为。一般认为, 导电机制的完善对深入认识导电沥青混凝土的性能和进一步优化设计性能更好的材料是非常必要的。任何一个好的模型必须能解释导电沥青混凝土的各种性能, 如电导率与导电相材料的掺量依赖性^[1,6], 电导率与频率的依赖性^[7], 温敏特性^[8], $V-I$ 特性^[9],

压阻特性^[4,5,10]等。到目前为此, 不少研究者对导电高分子复合材料的导电行为提出了不同的导电机制, 如粒子接触导电效应, 电场发射效应, 隧道效应^[6,9]。但是, 以上3种导电机制均难以完善地解释各种复杂的导电行为。本文通过研究电导率与石墨掺量依赖性, 电导率与交流电频率的依赖性, $V-I$ 特性, 提出较完善的导电沥青混凝土的导电机制。

1 原材料及试验方法

沥青采用湖北省科氏重交沥青 AH-70, 集料为玄武岩碎石, 矿粉为石灰石磨细石粉, 石墨为鳞片状, 相关性能指标见表1—4。

表1 科氏重交沥青 AH-70 性能指标

针入度	延度/cm	软化点/℃
(25℃, 100g, 5s, 0.1mm)	(5cm/min, 15℃)	(环球法)
65	167.3	51.5

2004-07-09 收稿, 2004-09-13 收修改稿

* 湖北省杰出青年科学基金资助项目

E-mail: wusp@mail.whut.edu.cn

表2 玄武岩碎石性能指标

压碎值/%	洛杉矶 磨损/%	视密度 /(g·cm ⁻³)	吸水率/%	与沥青 粘附性	针片状 含量/%
11.2	12.7	2.931	0.28	4级	10.3

表3 矿粉性能指标

视密度 /g·cm ⁻³	含水量 /%	亲水 系数	粒度范围(方孔筛)通过率/%			化学成分/%	
			0.6mm	0.15mm	0.075mm	CaO	SiO ₂
2.83	0.2	0.9	100	97.5	83.5	51.5	1.76

表4 石墨性能指标

形状	C含量/%	灼烧残渣/%	铁含量/%	电导率/S·cm ⁻¹
鳞片状	≥98	0.2	0.03	3.2×10 ⁵

混合料级配采用 Superpave12.5, 如表5. 石墨的掺量按其占沥青与石墨的体积分数计算, 用量为8%—25%. 石墨粒径小, 可代替部分矿粉作为填料使用. 沥青在高温液态时易被石墨吸收, 因此沥青用量(按其占沥青混合料的质量分数计, 4%—6%)是随着石墨用量增加而增加. 采用水中重法测量试件的密度^[11], 当试件的空隙率为4%时对应的沥青用量为最佳沥青用量. 采用 HB-10 型全自动混合料搅拌机拌和沥青混合料. 170℃集料与 160℃液态沥青先在 170℃搅拌锅内搅拌 90 s, 再掺入石墨和矿粉, 搅拌 90 s. 采用 EP-31111 型美国旋转压实仪成型, 成型温度为(155±1)℃, 其旋转压实次数分别为 $N_{ini}=9$, $N_{des}=125$, $N_{max}=205$. 电阻测试方法详见文献[4], 电极为直径 150 mm, 高 20 mm, 重量约 3000 g 的不锈钢圆柱, 锡焊接铜导线, 电极与试件间为石墨粉. 石墨粉有利于填满试件粗糙表面, 电极重量相当于施加了一定的压力, 改善电极与试件接触界面, 减少接触电阻造成的试验误差. 当试样电阻大于 $10^6 \Omega$ 时, 采用 ZC-43 型超高阻计测量; 电阻小于 $10^6 \Omega$ 时, 采用 DT-830 型数字式万用表测量. 电阻率计算用公式 $\rho=RS/H$, 其中 ρ 为试件的电阻率, R 为试件的电阻, S 为截面积, H 为高度. 变频交流电由 GF 型功率放大器产生, 输出电压 10 V(0.51×10^6 Hz). 直流电压由 SB118 型直流电压电流源输出, 电压和电流采用数字式万用表测量.

表5 混合料合成级配

筛孔/mm	19	12.5	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
通过率/%	100	95.6	77.3	49.5	29.7	21.7	15.7	10.5	7.9	5.7

2 结果与讨论

2.1 电导率对石墨掺量的依赖性 导电沥青混凝土中导电介质是矿料空隙之间的沥青与石墨组成的导电胶结体. 而集料是不良导体, 且尺寸均远大于石墨, 其在沥青混凝土中起填充物作用, 如图1所示. 石墨颗粒是随机分散于沥青基体中, 形成了二相导电复合材料. 随着石墨掺量增加, 孤立颗粒聚集并形成连续导电通路. 石墨具有良好的化学稳定性, 如耐酸、耐碱、耐有机溶剂的腐蚀等, 其与沥青不起化学反应, 仅是物理结合, 因此石墨表面上不存在异相绝缘包裹层.

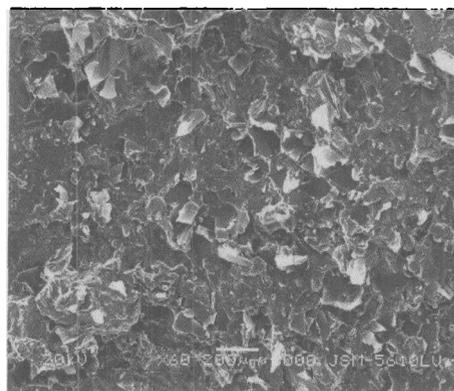


图1 导电沥青混凝土的显微结构

导电沥青混凝土 DC 电导率与石墨体积掺量的关系如图2, 其曲线与其他二相无规混合导电材料相似, 电导率在某一临界值发生突变, 即渗流阈值 P_c . 石墨掺量为 10% 时, 电导率为 8.7×10^{-11} S/cm, 石墨是以大小有限的颗粒集团分散于沥青中, 未能形成连续导电通路, 体系的电导率与沥青的电导率相近, 表现为绝缘性. 而增加到 13% 时, 电导率剧增为 6.7×10^{-6} S/cm. 石墨体积掺量在 11% 附近时 DC 电导率发生突变, 增加近 5 个数量级, 表明导电通路网络形成. 如图1所示, 石墨相互接触形成了体系内的三维导电通路网络.

2.2 导电机制与模型

在导电沥青混凝土中,随着石墨掺量增加,表现出典型的渗流导电行为.一般地,渗流理论^[12]常用于解释无规则混合导电复合材料的绝缘-导电转变过程,其电导率与导电相材料的体积分数 P 满足如下关系

$$\sigma \propto (P - P_c)^t, \quad (1)$$

式中 t 为临界指数, P_c 为渗流阈值.对标准格子渗流问题,在三维体系中的 t 值一般为 1.6—2.0,具有普适性^[12].当对公式(1)两边取对数后得:

$$\lg \sigma \propto \lg(P - P_c), \quad (2)$$

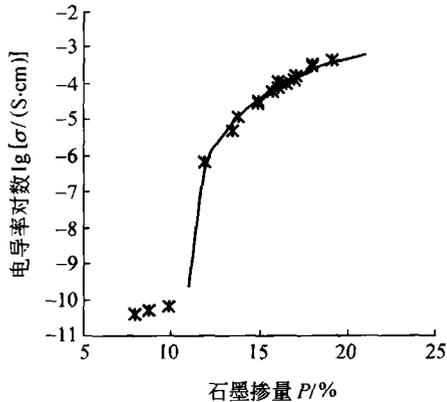


图2 DC电导率与石墨体积掺量的关系

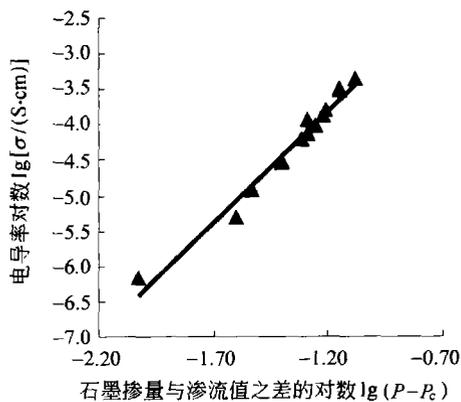


图3 $\lg \sigma - \lg(P - P_c)$ 的关系

用最小二乘法拟合公式(1),可得到导电沥青混凝土的拟合结果为: $t=3.16$, $P_c=11.0\%$.由公式(1)作出的渗流模型 $\sigma(P) - P$ 关系如图2中的曲

线所示,渗流模型结果与实验结果相吻合.当 $P_c=11.0\%$, $\lg \sigma - \lg(P - P_c)$,具有良好的线性关系,如图3所示.但 t 值明显高于标准格子渗流问题的普适临界指数1.6—2.0,说明该体系中发生的连续渗流问题与标准格子渗流问题属不同普适类,这与许多其他连续渗流体系是相类似的^[6].这种高的临界指数值,是与该导电沥青混凝土复杂体系的特征相关.在该体系中,石墨颗粒无规则分布在沥青中,特别是在 P_c 附近,体系的电导显然是由通过导电颗粒间很窄的绝缘层的隧穿机制所控制,局部电导与颗粒间距和隧穿几率相关,因此具有一定的分布,这导致了该体系的非普适性临界指数^[12].

在 P_c 附近 ($P \rightarrow P_c^+$),体系的电导是由通过导电颗粒间很窄的绝缘层的隧穿机制所控制,当导电粒子间的绝缘膜厚度小于某一值(如 $< 10 \text{ nm}$)时,将会发生隧穿电导.隧穿机制中电子跃迁几率 p ^[13] 为:

$$p = \partial \tau e^{-\Delta E/KT} + e^{\Delta E_p/KT}, \quad (3)$$

$$\tau = e^{-\alpha r}, \quad (4)$$

式中 ∂ , α 是常数, E 为跃过能隙所需活化能, T 为样品温度, E_p 是越过壁垒的局部活化能, τ 是隧道因子, r 为电子必须穿过的空间距离.电子跃过间隙的能力随着间隙尺寸的减小而呈指数增大,同时间隙尺寸与导电相的掺量有关.假设石墨粒子随机分散于沥青中,粒子间的平均间隙与体积掺量有如下关系:

$$r \propto P^{-1/3}, \quad (5)$$

显然,隧穿电导与电子跃迁几率 p 成比例,则由公式(3)—(5)式,得

$$\sigma \propto P \propto e^{-\alpha P^{-1/3}}, \quad (6)$$

两边取对数后,得

$$\lg \sigma \propto -P^{-1/3}. \quad (7)$$

将 P 为 $11\% - 18\%$ 代入公式(7),发现 $\lg \sigma$ 的变化范围为 $-2.1 - -1.8$,表明隧穿电导 $\lg \sigma$ 随着 P 变化极为有限.一般地,隧穿电导 σ 有两个特征

空间距离 r_c 和 r_o ：即电子可穿过的最大空间距离和容易穿过的空间距离 ($r_c < r_o$)，而且 r_c 和 r_o 是很接近，隧穿电导 σ 只在 P_c 附近一个很小的范围产生。实际上在导电沥青混凝土中，导电粒子随机分散，其间隙是千差万别，因此当某些粒子间隙小于 r_o 时，其起到电子迁移捷径的作用，对电导率的贡献最大。当粒子间隙位于 $r_c - r_o$ 之间时，粒子间隙微小的变化均会引起电导率的显著变化，此时体系的电导率对外界的响应极敏感，如非 $V-I$ 特性、温敏特性、压阻特性等。

实际上导电沥青混凝土的导电机制可看作是粒子接触效应和隧道效应综合作用的结果。在低石墨掺量 ($P < P_c$) 时，导电粒子接触几率极小且导电粒子间隙大，电子难以跃迁，体系呈绝缘性；在石墨掺量 ($P \rightarrow P_c^+$) 时，导电粒子接触几率小，粒子间隙窄而产生隧道效应，局部粒子间的偶然接触在小区域内起电子迁移捷径的作用，但隧穿机制控制体系电导，表现出绝缘-导电急剧转变；而高掺量 ($P > P_c$) 时，导电粒子接触几率大，粒子接触效应起主要作用，电子在由石墨粒子构成的导电网络通路内迁移，此时渗流模型可解释由粒子接触效应所组成的导电通路的形成与发展。当然，除了粒子间的接触，粒子间隙也有一定的分布，隧穿电导对体系电导也起一定的作用，但导电网络通路是电子迁移的捷径，此时隧穿电导的贡献极为微小，完全可忽略。以上对导电沥青混凝土导电机制的分析可被其电导率与频率的依赖性、非 $V-I$ 特性所证实。

2.2 电导率与频率的依赖性

电导率与频率的依赖性如图 4。随着石墨掺量增加，电导率与频率的依赖性减弱。掺量为 11.1%，17.7% 和 24.3% 时，电导率转变的临界频率分别为 10^3 ， 10^4 和 10^5 Hz。这种依赖性是不能用粒子接触电导来解释的，证实隧穿电导的存在。若将导电沥青混凝土在交变电场中的导电行为等效为电阻 R 和电容 C 并联的情形，根据导电沥青混凝土导电机制的分析，则当 $P < P_c$ 时，导电粒子的间隙小于 r_c ，电子难以穿过沥青膜，相当于多个电容 C' ($C' < C$) 与一个电阻 R' (R' 远大于 R) 并联，如图 5 (a)；当 $P \rightarrow P_c^+$ 时，导电粒子的间隙位于 $r_c - r_o$ 之间，电阻和电容均起一定的作用，相当于几个电阻

R' 与一个电容 C 并联的情况，如图 5 (b)；而当 $P \gg P_c$ ，导电粒子的间隙小于 r_o ，电子容易穿过沥青膜，电容起极小的作用，相当于多个电阻 R 与一个电容 C 并联，如图 5 (c)。根据前述分析，电阻和电容的相对数目 m ， n 与石墨掺量有关。石墨掺量增加，粒子间的接触几率增大，沥青膜间隙减小，故 m 增大， n 减小，且 $R' \rightarrow R$ ， $C' \rightarrow C$ 。图 5 (a)，(b)，(c) 分别对应 11.1%，17.7% 和 24.3% 的石墨掺量。

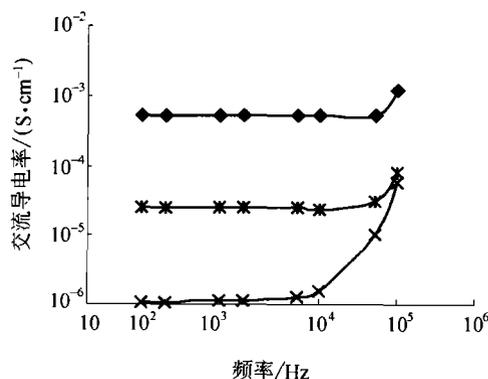


图 4 电导率与频率的依赖性
石墨掺量：◆为 24.3%；×为 11.1%；* 为 17.7%

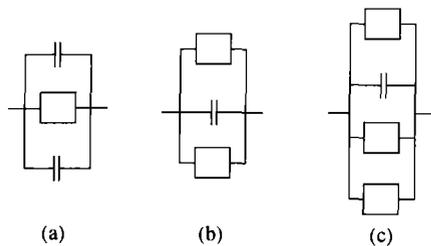


图 5 电阻 R 和电容 C 等效电路
(a) 为 $P < P_c$ ；(b) 为 $P \rightarrow P_c^+$ ；(c) 为 $P \gg P_c$

在频率为 ω 的电场中 R 和 C 有：

$$I_R = \frac{U}{R}, \quad (8)$$

$$I_C = \frac{U}{1/\omega C} = U\omega C, \quad (9)$$

$$C = \epsilon_0 \frac{S}{d}, \quad (10)$$

式中， S 为导电粒子间的面积， $d = r$ 。

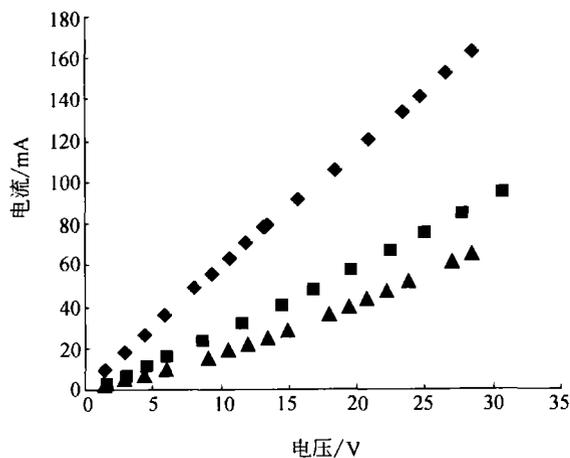
由分式 (5)，(9) 和 (10) 得

$$I_C \propto \omega S P^{1/3} \quad (11)$$

I_C 比 I_R 超前 90° 相位, 当电压一定时, 等效电流 I 为

$$I = [(mI_R)^2 + (nI_C)^2]^{1/2}. \quad (12)$$

由公式(12)式可知, 在一定石墨掺量时, m , n 是一定的. 频率 ω 增大, I_C 增大, 但是由于 R 的导电捷径的作用, mI_R 远大于 nI_C , nI_C 增大对 I 贡献不大, $I \approx mI_R$, 直至频率 ω 足够大时, nI_C 增大引起 I 增加, 表现为电导率与频率的依赖性. 11.1% 石墨掺量与 $P_c = 11.0\%$ 是极为接近的, 如前述分析, 其导电机制由隧穿机制所控制, 在交变电场中的导电行为完全可等效为一个 R 和一个 C 并联, 但直至 $\omega \approx 1000$ Hz 时电导率才发生微小变化, 可见



电容效应是可忽略不计, 试验结果证实 DC 电导率与低频交流电导率相互吻合, 表明在交变电场中电子的迁移主要是通过电阻式的隧穿机制, 而非电容式的流动.

2.3 直流 V-I 特性

导电沥青混凝土的直流 V-I 特性如图 6. 当石墨掺量为 18.4% 和 16.4% 时, V 与 I 具有线性特征. 而 11.1% 时, $V-I$ 表现为非线性. 从 $V-I$ 关系可看出: 不同石墨掺量时电阻随电压的变化差异明显. 石墨掺量在临界点附近时电阻随电压增加而迅速减小. 增加石墨掺量, 电阻减小趋势缓和, 最终, 电阻随电压增加而略微增加. 非线性 $V-I$ 特性亦表明隧道效应存在于体系中.

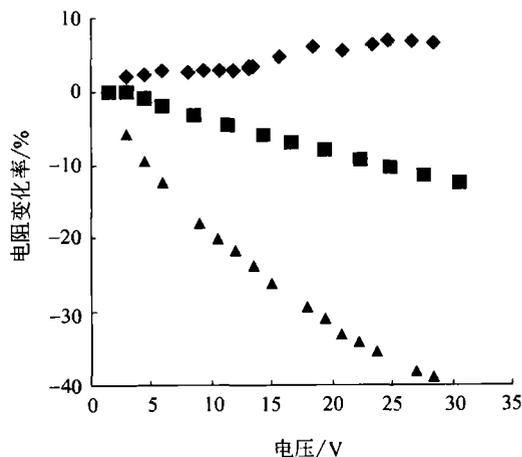


图 6 V-I 特性

(a) V-I 关系, (b) V- ΔR 关系

石墨掺数: \blacklozenge 为 18.4%; \blacksquare 为 16.4%; \blacktriangle 为 11.1%

如前文所述, 电子跃过间隙的能力因间隙尺寸而异, 因此电压或电流对电子跃过间隙能力的影响也与间隙尺寸有关. 假定两个石墨粒子之间的相距截面为 S , 厚度为 r 的沥青膜缝隙的势垒:

$$V(x) = V_0 - (4V_0/\omega^2)x^2, \quad (13)$$

由 WKB 近似, 隧道电流密度^[14]为:

$$j(E) = j_0 \exp\left[-\frac{r\pi\chi}{2} \left(\frac{|E|}{E_0} - 1\right)^2\right], \quad (14)$$

其中 ($|E| < E_0$, $E_0 = V_0/r$), $\chi = (2mV_0/h^2)^{1/2}$

隧道效应的缝隙的热扰动导致的均方值为 $(k_B T/C)^{1/2}$, (C 为电容, $C = S/4\pi r$). 热扰动产生电场的变化, 则 $E = E_T + E_A$ (E_A 表示外加电场). 前后热扰动的几率相等. 在 $E_A < E_T$ 时, 实际上的隧道电流为:

$$\Delta j = j(E_T + E_A) - j(E_T - E_A),$$

若定义

$$\sum(E_T) = \lim_{\epsilon_A \rightarrow 0} \frac{\Delta j}{\epsilon_A E_A} = 2 \frac{dj(E_T)}{dE_T} \quad (15)$$

按下式取平均:

$$\sigma = \int_0^{\infty} p(E_T) \sum (E_T) dE_T, \quad (16)$$

其中 $p(E_T) = K \exp\left(-\frac{UE_T^2}{k_B T}\right)$, 表示 E_T 出现的几率, $U = \frac{rS}{8\pi}$. 把公式(14), (15)代入(16)积分, 求得电导率为:

$$\sigma = \sigma_0 \exp\left(\frac{-T_1}{T+T_0}\right), \quad (17)$$

其中 $T_1 = \frac{UE_0^2}{k_B}$, $T_0 = \frac{2UE_0^2}{r\pi\chi k_B}$. T_1 就是一个电子越过缝隙所必需的能量.

当 $E_A > E_T$ 时, 可得:

$$j(E) = \int_{-E_A}^{\infty} j(E_A + E_T) P(E_T) dE_T \quad (18)$$

$$\approx j_0 \exp\left\{-a(T) \left[\left(\frac{E_A}{E_0}\right) - 1\right]^2\right\},$$

式中 $a(T) = T_1 / (T + T_0)$,

若 T 远大于 T_0 时,

$$j(E) = j_0 \exp\left\{-\frac{rSE_0^2}{TK_B} \left[\frac{E_A}{E_0} - 1\right]^2\right\}, \quad (19)$$

19式表明隧道电流密度与粒子间隙大小和面积, 温度和电场强度有关, 与实验现象相符. 在同一电场强度下, 电流密度随着粒子间隙减小呈指数增加, 这与前述 $\sigma - e^{-\sigma^{-1/3}}$ 关系相吻合. 由于石墨是符合欧姆定律的, 则产生非线性 $V-I$ 特性的根源可能是粒子间的非线性导电和高电场时诱发额外的导电通路, 因此非线性 $V-I$ 特性易产生于低石墨掺量体系中. 首先, 当 $\frac{E_A}{E_0} < 1$ 时, 电场强度影响极小, 热扰动促使电子迁移; 当 $\frac{E_A}{E_0} < 1.5$ 时, 电场强度增加对提高隧穿几率不显著, 电流密度近似线性增加, 在较低电压时表现出线性 $V-I$ 特性; 而当 $\frac{E_A}{E_0} > 2.5$ 时, 电场强度增加引起电流密度急剧增加. 其次高电场强度诱发电子发射跃迁, 在导电颗粒间隙大于 r_c 时诱发额外的导电通路. 高石墨掺量时颗

粒间接触几率增加, 石墨颗粒间的相互接触构成了导电通路网络, 接触电导起主要作用, 体系表现出线性 $V-I$ 特性. 在通电过程中, 在粒子间隙中存在导电发热和热传导散热的过程. 沥青是热不良导体, 石墨掺量高, 间隙电导率高, 同一电场强度下产生的热量多. $V-I$ 实验后发现 18.4%, 16.4% 和 11.1% 三个试样温度分别升高 2.2, 0.6 和 0.2°C. 热扰动的加剧有助于提高电导率, 同时温度增高使沥青热膨胀, 加大了粒子间隙而造成电导率下降, 文献[1]也证实了温度对沥青混凝土电导率影响显著. 当间隙的导电发热和热传导散热处于平衡状态下, 电导率会出现极值. 另外, 粒子间导电行为可看作是一个细小的电阻丝, 过高的电流会产生电阻丝熔断效应, 造成电导率下降, 这种效应在高石墨掺量时尤为明显. 按以上分析, 在 $V-I$ 特性实验中, 将有可能出现临界电压和临界电流, 即 $V-I$ 特性明显偏离线性现象在某一电压或电流出现, 因此在伏安法测量电阻时应尽量采用低电压或低电流.

3 结论

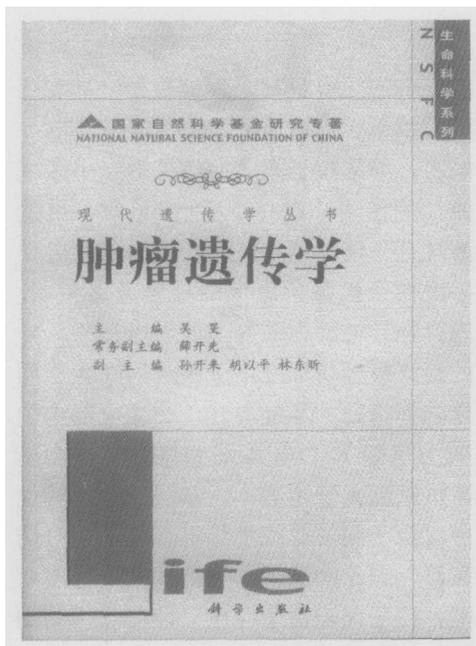
导电沥青混凝土的导电机制是颗粒接触电导和隧穿机制综合作用的结果, 即在 P_c 临近时体系的电导由隧穿机制所控制, 局部粒子间的偶然接触在小区域内起电子迁移捷径的作用; 在高于 P_c 掺量时, 虽然粒子间隙在局部具有一定的分布, 其产生的隧穿电导极为微小, 电导由粒子接触所组成的导电通路控制. 该理论可较好地解释导电沥青混凝土的导电行为. 导电沥青混凝土的渗流模型与标准格子渗流问题属不同普适类, 其电导临界指数 t 值为 3.16. 交变电场中的导电行为可等效为电阻 R 和电容 C 并联, 且电阻 R 导电捷径对电流贡献远大于电容 C . 非线性 $V-I$ 特性产生于隧道效应时粒子间的非线性导电和高电场时诱发额外的导电通路. 颗粒间隙减小可削弱电场强度对电流密度的影响, 粒子间隙由于导电发热使热扰动加剧和沥青热膨胀, 显著影响电导率.

致谢 感谢南策文教授在渗流理论模型方面的指导.

参 考 文 献

- 1 Wu S P, Mo L T, Shui Z H. An improvement of electrical prop-

- erties of asphalt concrete. Jour of Wuhan University of Technology (Mater Sci Ed), 2002, 17(4): 69
- 2 吴少鹏, 磨炼同, 水中和, 等. 导电沥青混凝土的制备研究. 武汉理工大学学报交通科学与工程, 2002, 26(05): 566
 - 3 唐祖全, 李卓球, 侯作富. 导电混凝土融雪化冰机理分析. 混凝土, 2001, 141(7): 8—12
 - 4 Wu S P, Mo L T, Shui Z H. Piezoresistivity of graphite modified asphalt-based composites. Key Engineering Materials, 2002, 249: 391
 - 5 Fu X L, Chung D D L. Self-monitoring of fatigue damage in carbon fiber reinforced cement. Cement and Concrete Research, 1996, 26(01): 15—20
 - 6 Zou J F, Yu Z Z, Pan Y X, et al. Conductive mechanism of polymer/graphite conducting composites with low percolation threshold. Journal of Polymer Science: Part B: Polymer Physics, 2004, 40: 954
 - 7 Ezquerro T A, Connor N T. Alternating-current properties of graphite, carbon-black and carbon-fiber polymeric composites. Composites Science and Technology, 2001, 61: 903
 - 8 Li R Q, Dou D Y, Miao J L, et al. Complicated resistivity-temperature behavior in polymer composites. Journal of Applied Polymer Science, 2002, 86: 2217
 - 9 Chen G H, Weng W G. Nonlinear conduction in nylon-6/Foliated graphite nanocomposites above the percolation threshold. Journal of Polymer Science: Part B: Polymer Physics, 2004, 42: 155
 - 10 Zhang X W, Pan Y. Piezoresistance of conductor filled insulator composites. Polymer International, 2001, 50: 229
 - 11 中华人民共和国交通行业标准. 公路工程沥青及沥青混合料试验规程(JTJ052-93). 北京: 北京人民交通出版社, 1993
 - 12 Nan C W. Physics of inhomogeneous inorganic materials. Progress in Materials Science, 1993, 37: 1—116
 - 13 Bhattacharya S K, et al. Metal-Filled Polymers: Properties and Applications. New York: Marcel Dekker, 1986, 152—154
 - 14 雀部博之. 导电高分子材料. 曹 镛, 叶 成, 朱道本译. 北京: 科学出版社, 1989, 218—224



国家自然科学基金研究专著

《肿瘤遗传学》吴旻 主编

科学出版社 定价: 138.00 元

本书是《现代遗传学丛书》之一, 是国内首部大型肿瘤遗传学专著, 编著者多为这一研究领域的资深学者或活跃在研究一线的中青年专家. 本书较为全面、及时地反映了学科发展水平, 具有较强的实用性和可读性. 第一篇为肿瘤遗传学基础, 包括癌相关基因和染色体改变, 以及肿瘤相关研究的最新进展, 如表遗传学和信号转导等; 第二篇为肿瘤遗传学各论, 重点论述中国人常见的恶性肿瘤, 如肺癌、消化系统诸器官癌和乳腺癌等; 第三篇为肿瘤预防、早期诊断和治疗的遗传学对策, 包括肿瘤遗传流行病学、遗传易感性、遗传咨询和生物治疗等; 第四篇为研究技术, 实用与新技术并重, 包括染色体分析、微核试验、比较基因组杂交、基因芯片和生物信息学等.

本书可供医药卫生、遗传学、生物学和环境科学等专业的教师、研究生、大学生, 以及有关科研人员参考.