

# 废料细化钢渣对导电沥青混合料的 电学性能影响研究

栾利强<sup>1,2</sup>, 石云升<sup>1,2</sup>, 陈耀鹏<sup>1,2</sup>, 李晓龙<sup>1,2</sup>

(1. 广西绿色建材与建筑工业化重点实验室, 桂林理工大学, 广西 桂林 541004; 2. 广西岩土力学与工程重点实验室, 桂林理工大学, 广西 桂林 541004)

**摘要:**为解决导电沥青混合料在温度变化、荷载及微裂缝损伤下电阻稳定性不足从而影响融雪化冰效率的问题, 引入具有导电性的细化废料钢渣, 设置不同细粒径钢渣替换量的碳纤维导电沥青混合料, 研究了温敏效应和压敏效应以及微裂缝影响下的电学性能变化, 并对其微观状态下导电机理进行分析。结果表明: ①细粒径钢渣对在负温度环境由于 PTC 效应电阻率快速增涨有抑制作用, 其抑制最大水平可达到 54%; ②在 10 次标准轴载循环压力作用下, 随着细粒径钢渣替换率增加, 其电阻尖峰波动次数逐渐降低为 0, 当钢渣集料替换率达到 75% 时, 与碳纤维掺量为 0.3% 协同作用可形成稳定的复合导电网络, 钢渣的均匀分布对于导电沥青混合料电阻异常增大的尖峰波动有显著稳定改善作用; ③1 mm 细裂缝、2 mm 粗裂缝、损伤裂缝三种预制微裂缝情况下, 细粒径钢渣替换量与电阻增长率和愈合电阻恢复率分别呈负相关和正相关, 当细粒径钢渣替换率为 100% 时, 在损伤裂缝下, 对应裂缝愈合前电阻增长率为 42.6%, 裂缝愈合后电阻恢复率为 96.2%, 相较于对照组电阻增长率有效减少了 0.19, 电阻恢复率增加了 0.177, 与另外两种裂缝情况相比, 损伤裂缝下具有最高的电阻增长幅度和最优的电阻恢复能力。

**关键词:** 钢渣; 碳纤维; 温敏效应; 压敏效应; 微裂缝; 电阻稳定性

中图分类号: X705, U414

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2026)01-0102-10

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2026.01.012

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



与作者互动  
听语音  
聊科研

## Research on the effect of refined steel slag waste on the electrical properties of conductive asphalt mixtures

LUAN Liqiang<sup>1,2</sup>, SHI Yunsheng<sup>1,2</sup>, CHEN Yaopeng<sup>1,2</sup>, LI Xiaolong<sup>1,2</sup>

(1. Guangxi Key Laboratory of Green Building Materials and Construction Industrialization, Guilin University of Technology, Guilin 541004, Guangxi, China; 2. Guangxi Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004, Guangxi, China.)

**Abstract:** To address the issue of insufficient resistivity stability in conductive asphalt mixtures under temperature variations, loading, and microcrack damage, which affects snow/ice melting efficiency, conductive refined waste steel slag was introduced. Carbon fiber-reinforced conductive asphalt mixtures with varying replacement ratios of fine steel slag were prepared to investigate the changes in electrical properties under thermosensitive and pressure sensitive effect as well as microcrack damage. The conductive mechanism was analyzed at the microscopic level. The results indicate: ① Fine steel slag effectively suppresses the rapid resistivity increase caused by the Positive Temperature Coefficient (PTC) effect in subzero environments, with a maximum suppression level of 54%. ② Under 10 cycles of standard axle loading, the number of resistivity spike fluctuations gradually decreases to zero as the replacement ratio of fine steel slag increases. When the replacement ratio of steel slag aggregate reaches 75%, a

收稿日期: 2025-07-21; 修回日期: 2025-08-02; 接受日期: 2025-08-15

作者简介: 栾利强, 1981 年出生, 男, 山东烟台人, 博士, 副教授, 长期从事路面结构和道路新材料方向的基础研究工作, E-mail: luan1201@163.com。

stable composite conductive network forms in synergy with 0.3% carbon fiber. The uniform distribution of steel slag significantly stabilizes and mitigates abnormal resistivity spikes in conductive asphalt mixtures. ③Under three types of prefabricated microcracks (1 mm microcracks, 2 mm macrocracks, and damage-induced cracks), the replacement ratio of fine steel slag exhibits a negative correlation with resistivity growth rate and a positive correlation with healing-induced resistivity recovery rate. At the 100% steel slag replacement ratio under damage-induced cracking, the resistivity growth rate before crack healing was 42.6%, while the post-healing recovery rate reached 96.2%. Compared to the control group, it represents an effective reduction of 0.19 in resistivity growth rate and an improvement of 0.177 in recovery rate. Damage-induced cracks demonstrated the highest resistivity growth amplitude and the most optimal recovery capability compared with the other two crack conditions.

**Key words:** steel slag; carbon fiber; thermal sensitivity effect; pressure-sensitive effect; microcracks; resistance stability

## 0 引言

导电沥青路面在服役过程中通常面临着恶劣环境条件,尤其是在极寒冰冻天气下,温度和荷载的耦合作用易引发道路内部微裂缝的萌生和发展,导致内部电学性能下降<sup>[1-3]</sup>,进而影响其融雪化冰功能。目前导电沥青混凝土实际应用面临的主要挑战在于如何在提升导电性能的同时确保其电阻率的稳定性。

电阻稳定性直接决定导电沥青混凝土的机敏和电热性能,其表现为两个方面:一是导电性能在压力、温度等外界条件变化下保持相对稳定或者小幅度衰减;二是电热效应可促进导电沥青混凝土的裂缝自愈合,从而显著延长其稳定服役周期<sup>[4]</sup>。贾兴文等<sup>[4]</sup>研究发现单掺一种导电材料电阻稳定性不佳,由多种导电材料制备的复相导电混凝土具有更优异的电阻稳定性。

导电相材料体系主要包括碳基材料(石墨、碳纤维)和金属材料(钢纤维、镍粉、铜粉)两大类。其中碳纤维作为一种优质导电材料,通常添加于导电沥青混合料中,研究表明,当碳纤维掺量超过 0.3% 时容易发生团聚现象,导致电学性能提升不佳<sup>[5-6]</sup>,因此诸多学者尝试在碳纤维基础上复掺石墨烯、碳纳米管、镍粉、铜粉等<sup>[7-9]</sup>材料以提升导电性能,但均存在材料成本过高问题。相比之下,钢渣作为一种兼具导电性与经济性的工业固废,在我国利用率仅为 10%~40%,有较大开发前景且符合我国“双碳”战略<sup>[10]</sup>。在钢渣利用领域诸多学者倾向于粗集料的利用,主要因为钢渣粗集料能显著提升路面抗滑性能<sup>[11-13]</sup>,其粗糙表面和骨架结构可有效延缓抗滑性能的衰减<sup>[14-15]</sup>,这对冬季湿滑路面的安全方面尤为重要。另一方面钢渣经陈化处理,钢渣的体积膨胀性可控制在工程允许范围内,其部分性能指标甚至优于传统石灰石<sup>[16-18]</sup>,LÜ 等<sup>[19]</sup>研究表明,钢

渣能显著提升沥青混合料的抗水损害能力,LUO 等<sup>[20]</sup>认为钢渣良好的导热性还有助于改善混合料的温度均匀性。虽然这些充分说明了钢渣使用在沥青混合料的可行性,但并未对钢渣细集料做出更多利用。值得注意的是,钱觉时等<sup>[21]</sup>使用高铁氧化物钢渣作为导电混凝土的集料,能够实现电阻率的显著降低与稳定性的同步提升。唐祖全等<sup>[22]</sup>通过对钢渣的细化处理可进一步提升导电混凝土的导电性能。

基于上述研究背景,笔者控制碳纤维掺量为 0.3%,在避免发生团聚的前提下,采用细粒径钢渣等体积替代粒径小于 4.75 mm 的石灰石集料(包含粗细集料),既发挥粗集料钢渣的骨架结构作用,又充分利用细集料钢渣的良好导电特性。以钢渣(SS)复掺短切碳纤维(CF)制作一种新型导电沥青混凝土(CFSS),在荷载、温度变化和微裂缝因素动态影响下探究细粒径钢渣对导电沥青混合料的电学性能的影响,为日后建设稳定的智能导电沥青路面提供技术参考。

## 1 试验方法

### 1.1 材料与仪器

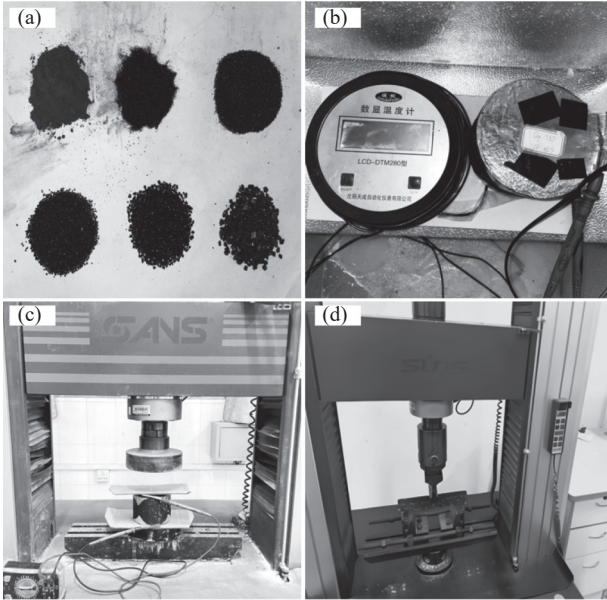
细粒径钢渣(粒径小于 4.75 mm,表观相对密度 3.367 kg/m<sup>3</sup>);碳纤维(电阻率 1.0~1.6 Ω·cm、含碳量 95%、直径 7 μm);70#A 级道路沥青。试验仪器主要有 BH-20 型自动沥青混合料搅和机、MDJ-11C 型马歇尔击实仪、SPGW-4 型高温干燥箱、AGX-100kN 型电子万能试验机、LCD-DTM280 型温度数显计、dt9205a 型便携式万用表等,部分材料和仪器如图 1 所示。

### 1.2 试件制备

#### 1.2.1 配合比设计

钢渣为炼钢产生的残渣,在电压下其中带电荷的离子和自由电子能够流动,并随着钢渣的细化,

导电能力越强。试验选用河北石家庄宝丰矿产加工有限公司所生产的细粒径钢渣,其主要化学成分见表1。



(a) 小于 4.75 mm 的钢渣外观状态; (b) 温阻试验; (c) 压阻试验; (d) 三点弯曲试验下预制损伤裂缝

图1 试验材料和仪器

Fig. 1 Testing materials and instruments

参照《公路沥青路面施工技术规范》(JTG20F40—2004)试验标准成型马歇尔试件,试验采用 AC-13 中值级配,由于钢渣和石灰岩集料密度相差较大,故用等体积法制备试件,根据级配通过毛体积相对密度进行质量百分比换算,其换算方法如式(1)所示。随着细粒径钢渣的加入,混合集料颜色明显加深,如图2所示,同样也会对混合料最佳油石比有所影响,所以分别对不同钢渣掺量的试件以目标油石比增减 0.5%,分别成型 5 个试件,来确定其最佳油石比,最终确定 SS 掺量为 0、25%、50%、75%、100% 对应的最佳油石比为 4.84%、5.06%、5.13%、5.21%、5.3%,其中 CF 均分为两次前后复掺沥青搅和机中,缓解碳纤维团聚现象的产生。

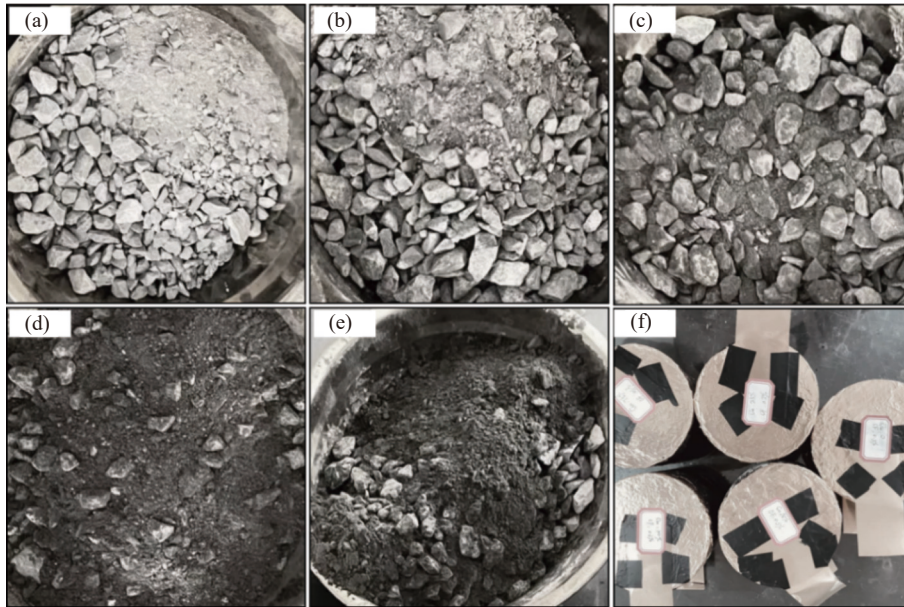
$$\theta_i = \frac{P_i L_i}{\sum_{i=1}^n P_i L_i} \times 100\% \quad (1)$$

式中:  $\theta_i$  为各材料  $i$  的体积百分比;  $P_i$  为各材料  $i$  的质量百分比;  $L_i$  为各材料的毛体积密度。

表1 钢渣主要化学成分表

Table 1 List of main chemical components of steel slag %

CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	TiO <sub>2</sub>	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
38.02	25.44	12.64	9.72	4.06	3.91	2.75	1.56	0.77



(a) CF0.3%; (b) CF0.3%-SS0.25; (c) CF0.3%-SS0.5; (d) CF0.3%-SS0.75; (e) CF0.3%-SS1; (f) 马歇尔试件被铜箔纸包裹状态

图2 沥青混合料集料成色

Fig. 2 CFSS aggregate color images

### 1.2.2 电阻率计算

采用二电极法对导电沥青混合料电阻进行测试,选取铜箔纸覆于试件两面,接触面均匀涂满导电膏并用绝缘胶布固定,如图2中(f)所示。试件电阻

率计算公式如式(2)所示。

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

式中,  $\rho$  为电阻率;  $R$  为所测电阻值,  $\Omega$ ;  $S$  为试件横

截面积,  $m^2$ ;  $L$  为高度,  $m$ 。

### 1.3 电学性能测试

#### 1.3.1 温阻试验

将内部嵌有微型温度传感器的不同钢渣替换量的马歇尔试件冷冻至  $-30\text{ }^\circ\text{C}$ , 随后放置  $40\text{ }^\circ\text{C}$  温箱中, 通过传感器显示每上升  $5\text{ }^\circ\text{C}$ , 记录一次阻值变化, 模拟导电沥青路面发热升温情况下的电阻变化。

#### 1.3.2 压阻试验

持续压力作用下电阻稳定性测试: 研究重载车辆长期停放形成的静态持续压力对导电沥青混合料电阻特性的影响, 采用万能试验机施加恒定压力  $0.5\text{ MPa}$ , 加载速率  $200\text{ N/s}$ , 持续加载至试件完全破坏(记录极限承载力及破坏形态), 试件与万能试验机接触面需放置绝缘板, 整个过程记录电阻变化。

循环压力作用下电阻稳定性测试: 采用正弦波循环加载, 最大压应力  $0.7\text{ MPa}$ (标准轴载), 加载和卸载速率为  $200\text{ N/s}$ , 卸载后设置  $30\text{ s}$  恢复时间, 共进行  $10$  次循环(短期疲劳), 整个过程记录电阻变化。

#### 1.3.3 微裂缝试验

温度和压力会导致内部微裂缝的萌生与发展, 而微裂缝直接影响破坏导电网络结构, 导致混合料电学性能劣化, 通过导电发热实现裂缝自愈合使最大程度恢复初始电阻是电阻稳定性重要表现之一。

将车辙板切割为若干个尺寸为  $250\text{ mm}\times 30\text{ mm}\times 35\text{ mm}$  的小梁试件, 采用两种可控方式引入微裂缝。①预制裂缝法: 使用金刚石刀片在试件中部切割标准化裂缝, 设置细裂缝组(PNC): 深度  $3\text{ mm}\times$  宽度  $1\text{ mm}$ (模拟初期微损伤), 宽裂缝组(PWC): 深度  $3\text{ mm}\times$  宽度  $2\text{ mm}$ (模拟严重开裂); ②力学损伤法: 通过三点弯曲试验(跨距  $200\text{ mm}$ , 加载速率  $1\text{ mm/min}$ )使试件中部自然产生微裂缝, 控制裂缝扩展至试件高度  $0.3$  倍时终止试验, 模拟实际荷载损伤, 设置为损伤裂缝组(FFC)。将三类损伤试件接入直流电源, 施加  $36\text{ V}$  电压进行导电加热, 持续加热至裂缝目视闭合, 将试件置于  $25\text{ }^\circ\text{C}$  恒温箱中养护  $12\text{ h}$ , 通过二电极法测试愈合前后电阻。

## 2 结果与讨论

### 2.1 钢渣/碳纤维导电沥青混凝土温敏效应的影响

用各组马歇尔试件在温度上升时电阻相对  $25\text{ }^\circ\text{C}$  初始值的波动程度来评判电阻稳定性, 如图 3 所示。细粒径钢渣组与对照组的电阻率均呈现出 PTC 效应, 从  $-30\text{ }^\circ\text{C}$  升温至室温  $25\text{ }^\circ\text{C}$ , 电阻率都保持持续增长的趋势, 通过将负温度阶段和正温度阶段线性拟合分析, 可以发现在负温度阶段对照组拟合曲线

斜率最大, 并且随着钢渣替换量增加斜率持续减小, 这意味着在  $-30\sim 0\text{ }^\circ\text{C}$  这一过程, controlCF0.3% 对照组有较大的增幅, 根据导电沥青路面的使用环境为寒冷地带居多, 在负温度阶段能够有较小的电阻增幅, 也意味着电阻更加稳定, 是保持导电沥青路面融雪化冰稳定工作的关键, 各组在负温度区间均小于初始电阻, 以负温度区间电阻变化率的持续增加分析, 由细粒径钢渣替换量递增趋势, 其电阻变化率值分别增加了  $22.09$ 、 $18.69$ 、 $15.88$ 、 $11.72$ 、 $10.16$ 。具有导电性的细粒径钢渣的掺入明显改变了负温度阶段电阻的增长速度, 相当于一定程度上抑制了 PTC 效应, 分析发生此现象原因为细粒径钢渣中含有  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  等铁氧化物, 具有半导体特性, 在低温下, 这些成分通过电子跳跃传导和杂质能级激发, 提供额外的载流子路径, 补偿因沥青收缩导致的碳纤维网络断裂。随钢渣替换量的增加, 导电填料碳纤维和钢渣在基体中的分布更接近渗流阈值, 形成冗余导电路径, 即使部分路径因低温断裂, 剩余路径仍能维持导电性。部分抵消电阻的温敏性增长。

在正温度区间其各组数据相对较为离散, 在经过整个升温过程之后对应  $25\text{ }^\circ\text{C}$  时对照组电阻变化率为  $3.15\%$ , CF0.3%-SS1 组电阻变化率为  $1.50\%$ , 各组电阻率均有上升, 但未能恢复到初始电阻, 可能由于升温时基体(如沥青)膨胀导致导电填料(碳纤维、钢渣)间距增大, 导致填料间接触点减少。而且正温度区间数据相对离散, 可能是由于沥青膨胀相对低温时更加敏感, 沥青膨胀导致内部微裂缝产生, 而裂缝产生意味着内部电路不确定因素增多, 因此钢渣的替换并未出现明显效果, 主要是因为钢渣和碳纤维协同提升的导电性能不足以覆盖微裂缝带来的电阻损失。

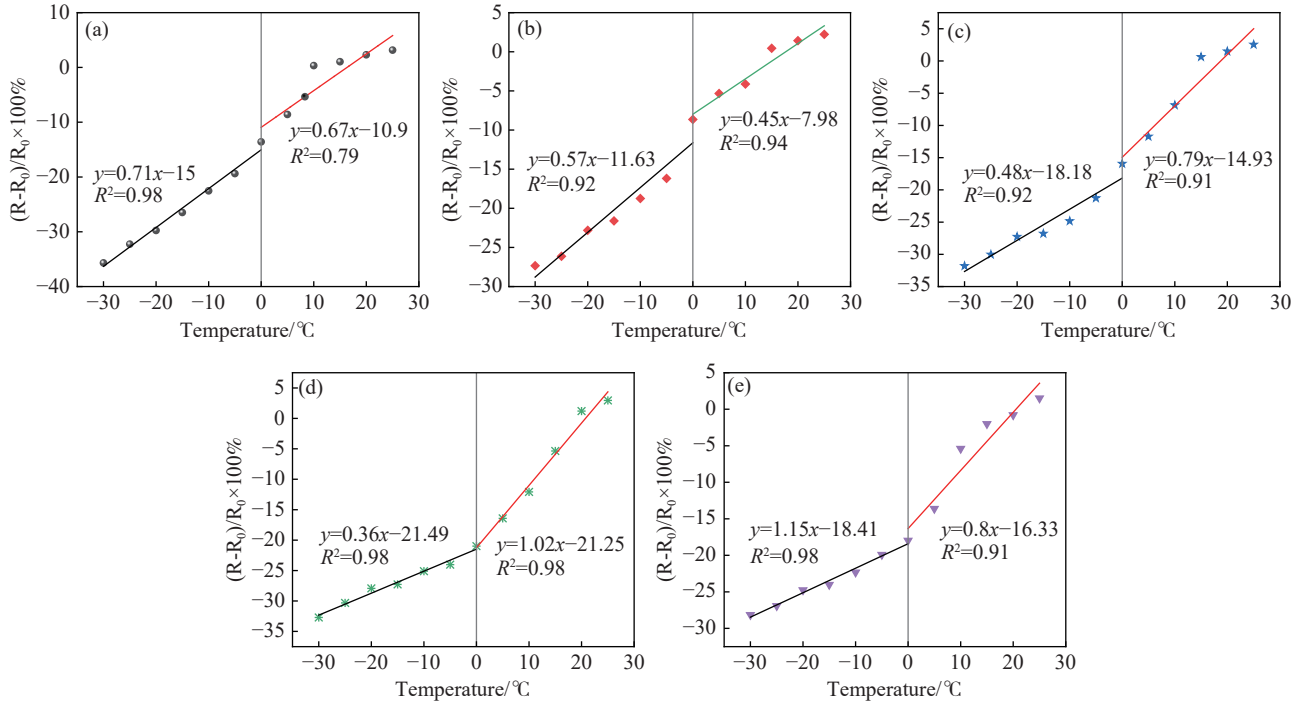
### 2.2 钢渣/碳纤维导电沥青混凝土压阻特性

#### 2.2.1 持续施压下电阻稳定性分析

马歇尔试件在持续压应力作用下的破坏过程可分为三个典型阶段, 如图 4 所示, I 阶段为初始密实抗压阶段, 此时压力较小, 试件仅产生细微变形, 内部空隙缓慢缩小, 可能伴随微裂缝产生; II 阶段为蠕变抵抗阶段, 沥青通过弹塑性变形抵抗压力, 试件开始出现侧面变形和裂纹; III 阶段为快速破坏阶段, 试件达到最大抗压强度后发生侧面爆裂, 电路完全损坏。由图 5(a)(b)可以看出, 五组试件在 I、II 阶段电阻率均缓慢降低, 但在达到极限强度时均出现电阻率突变, 破坏后电阻率显著高于初始值。随着细粒径钢渣替换量增加(替换比例  $0.25$ 、 $0.5$ 、 $0.75$ 、 $1$ ), 试件无侧限抗压强度分别提升  $3.47\%$ 、 $7.05\%$ 、 $10.04\%$  和  $14.82\%$ , 无侧限抗压强度的提升有效延

缓了电阻率突变点的出现,由于钢渣混合料拥有更加密实的结构,面对相同重载时形变量较小,这种抗压性能的提升保护了内部电路,钢渣集料的替换从

力学性能角度延长了导电沥青混凝土的电学性能使用寿命,进而延长了面对持续静压力(模拟车辆停放情况)下的电阻稳定期。



(a) Control CF0.3%; (b) CF0.3%-SS0.25; (c) CF0.3%-SS0.5; (d) CF0.3%-SS0.75; (e) CF0.3%-SS1

图3 电阻变化率与温度变化的关系

Fig. 3 Relationship between resistivity change rate and temperature variation

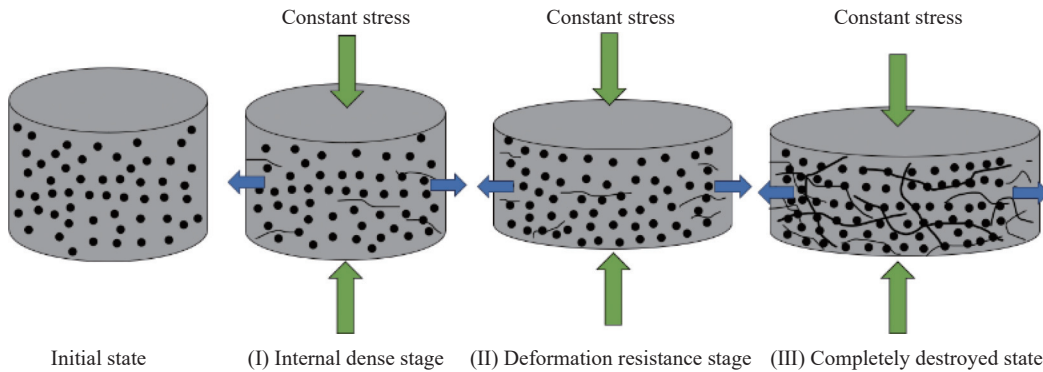


图4 不同阶段下试件的压缩效果

Fig. 4 Compression performance of specimens at different stages

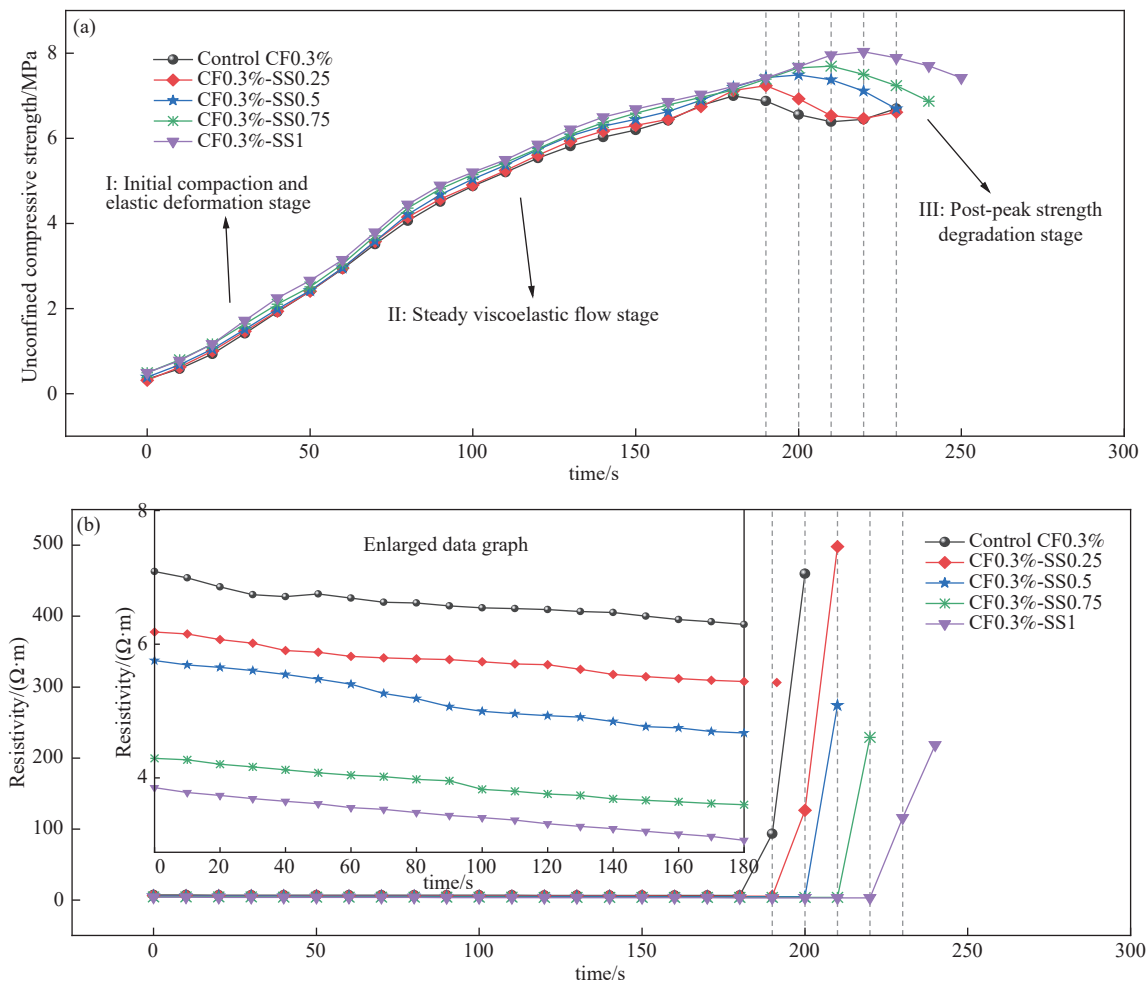
根据导电沥青混凝土的压阻特性,引入压阻系数  $\pi$  来表示压阻效应的强弱变化。为了简便计算,横向应变默认为零。压阻系数计算公式如式(3)所示。

$$\frac{\Delta R}{R_0} = \pi_1 \sigma_1 + \pi_2 \sigma_2 \quad (3)$$

式中,  $\Delta R$ 为电阻变化值,  $\Omega$ ;  $R_0$ 为初始电阻,  $\Omega$ ;  $\pi_1$ 为纵向压阻系数,  $\text{Pa}^{-1}$ ;  $\sigma_1$ 为纵向压应力,  $\text{Pa}$ ;  $\pi_2$ 为横向压阻系数,  $\text{Pa}^{-1}$ ;  $\sigma_2$ 为横向压应力,  $\text{Pa}$ 。

以钢渣替换比例 0、0.5、1 作对比试验,由图6可

以看出,细粒径钢渣替换比例为 0.5 和 1 的两组的压阻效应均强于无钢渣替换的未掺钢渣组,且 CF0.3%-SS0.5 组和 CF0.3%-SS1 组在整个加载过程中都处在负阶段,说明在此阶段电阻是在持续减小的,而 Control CF0.3% 组出现了逆向压阻效应,这侧面说明了达到阈值的单一碳纤维导电沥青混凝土虽具有良好的导电性,但同时具有导电性能不稳定的问题,在达到某一压力值时会由正向压阻效应转为逆向压阻效应,使得电阻效应减弱,电阻增大,导致电学性能衰减。



(a) 压强与时间的关系; (b) 电阻率与时间关系

图 5 试件从开始至压坏期间压强与电阻率的对应关系

Fig. 5 The correspondence between pressure and resistivity of specimens from initial loading to compressive failure

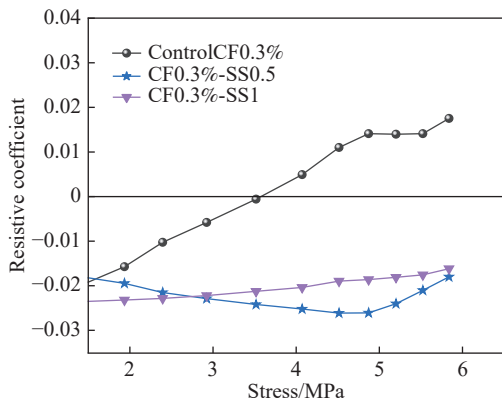


图 6 不同钢渣替换量的各组压阻系数变化

Fig. 6 Variation in piezoresistive coefficients in each group with different steel slag replacement ratios

### 2.2.2 压力循环作用下电阻稳定性分析

图 7 为整个循环过程, 试验五组试件的初始电阻率随细粒径钢渣替换量增加呈递减趋势, 分别为 7.08、6.18、5.75、4.29、3.85 Ω·m。由图 8 可以看出: 所有试件电阻均呈现加载时降低、卸载时恢复的周

期性波动特征, 且随循环次数增加电阻恢复能力逐渐减弱, 这说明导电沥青混凝土循环受压后短期内不能恢复到初始电阻。可以明显发现高钢渣掺量组 (CF0.3%-SS0.75 和 CF0.3%-SS1) 表现出稳定的电阻波动规律, 而低掺量组 (Control CF0.3%、CF0.3%-SS0.25、CF0.3%-SS0.5) 则出现异常断路现象, 其中对照组 (Control CF0.3%) 的尖峰波动最为显著, 当细粒径钢渣替换量达到 75% 时, 有效抑制了异常电阻波动。

分析以上现象原因是导电沥青电阻的异常波动与其内部导电粒子数量以及均匀程度有较大关联, 这说明使用细粒径钢渣不用考虑类似碳纤维这种碳基材料的团聚以及不均匀问题, 搅拌机的直接搅拌能达到钢渣导电粒子的均匀分布状态, 当导电粒子密度达到一定程度, 比如细粒径钢渣替换量达到 75%, 可与 0.3% 碳纤维形成稳定的复合导电网络, 导电粒子密度提升, 其电阻稳定性也更加明显。电阻的规律性的恢复性波动, 一方面意味着能够使导电沥青混合料拥有稳定导电发热功能, 另一方面这

为智能道路信息传输提供了可行性,细粒径钢渣通过优化导电相分布可使导电沥青混合料的电阻波动

幅值降低,显著提升其在循环荷载下(模拟真实路况下)的电阻稳定性。

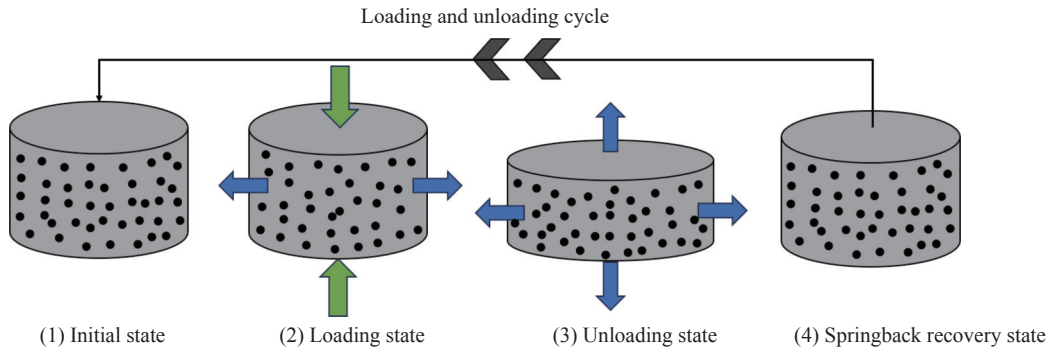


图7 压力循环下试件效果  
Fig. 7 Specimen performance under pressure cycling

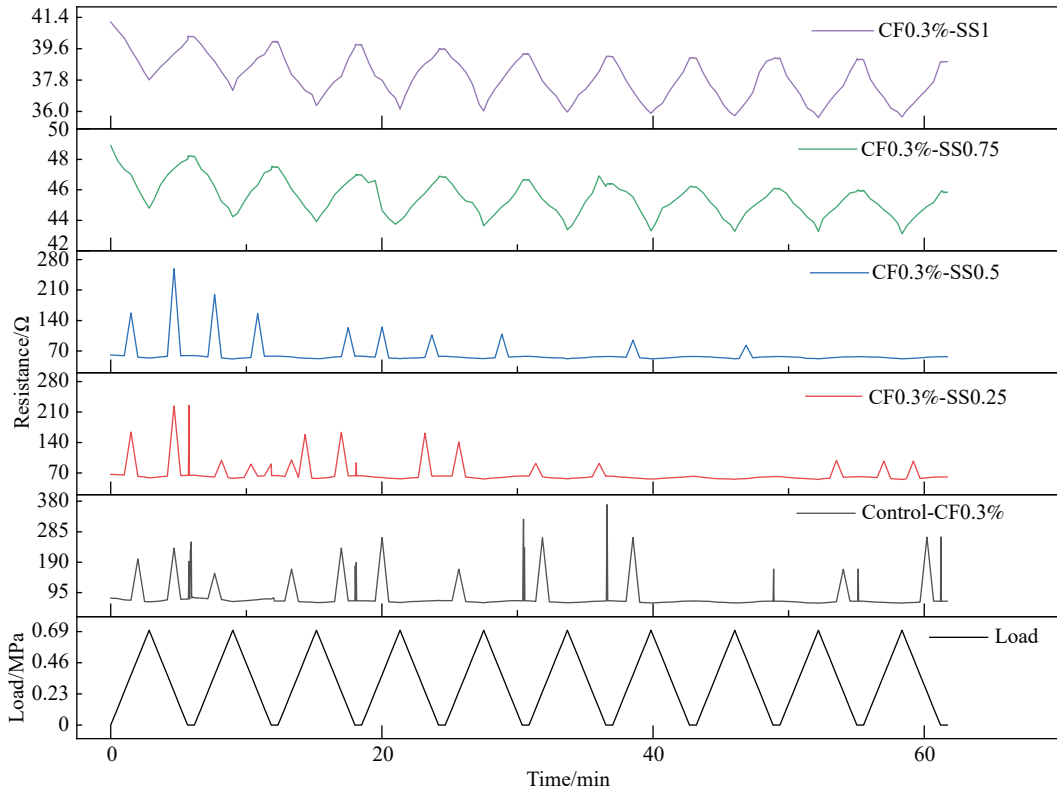


图8 压力循环作用下电阻的变化  
Fig. 8 Cyclic-loading-induced resistivity variation

### 2.3 微裂缝下电阻稳定性分析

从图9(a)可以看出在三种裂缝模式中,力学损伤裂缝(FFC)对导电网络的破坏最为显著,未掺钢渣对照组的电阻增长率高达73.98%,而细粒径钢渣100%替换可将其降低至42.49%,降幅达42.6%;相比之下,1mm细预制裂缝(PNC)组的电阻增长率最低(钢渣替换量100%时为12.6%),2mm粗预制裂缝(PWC)组电阻增长率为22.3%,介于二者之间。这种差异源于钢渣的替换量影响及其独特的导

电机制:细粒径钢渣能通过空间效应与碳纤维形成三维互穿网络,使导电接触点密度提升,意味着细粒径钢渣替换的导电沥青混合料在面对微裂缝时能较大程度缓解电阻衰减。

由图9(b)可以看出,导电沥青通电发热自愈对微小裂缝有较好效果,其中PWC和FFC拟合线斜率较大,表明其电阻恢复率对愈合条件的响应较敏感,对比数据点可以看出掺入细粒径钢渣显著提升了导电沥青愈合能力和电阻恢复率,以钢渣替换量为100%为

例, PNC、PWC、FFC 三种裂缝类型下电阻恢复率分别为 94.32%、90.91%、96.21%, PNC 和 FFC 裂缝下其电阻恢复率相对较高。分析发生此现象原因, 细粒径钢渣能通过物理吸附作用改善沥青-填料界面结合, 由于优良导热性能又作为热传导节点实现了裂缝区域的均匀加热, PWC 由于裂缝相对较大, 导致电阻恢复率较小, 而 PNC 和 FFC 裂缝可达到良好的表面结构愈合和内部电路流动性愈合效果, 细粒径钢渣导电沥青混凝土在导电发热使用场景下, 可及时对早期裂缝进行自愈合修补, 而且由于细粒径钢渣本身的导

热导电性以及其协同沥青的良好流动性, 这种电发热愈合方式也能达到电阻恢复效果。

### 2.4 微观结构

通过 SEM 对两组样品的截面进行拍摄, 从图 10 可以看出, 沥青能够将碳纤维完全包裹, 对比观察发现, 未替换细粒径钢渣的沥青混合料(石灰石基)表面较为光滑, 而 CF0.3%-SS1 组(掺入钢渣)的混合料表面则呈现明显粗糙特征, 钢渣的粗糙多孔更有利于碳纤维在钢渣集料表面的附着, 这意味着两者具有良好的协同作用。

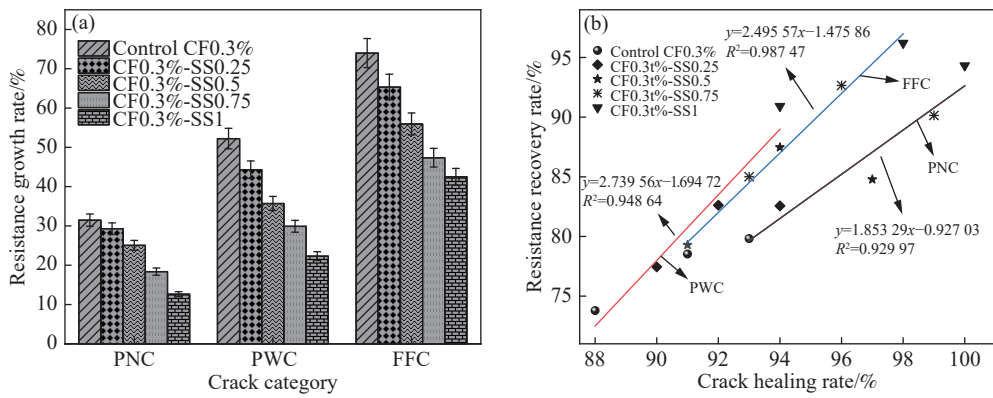
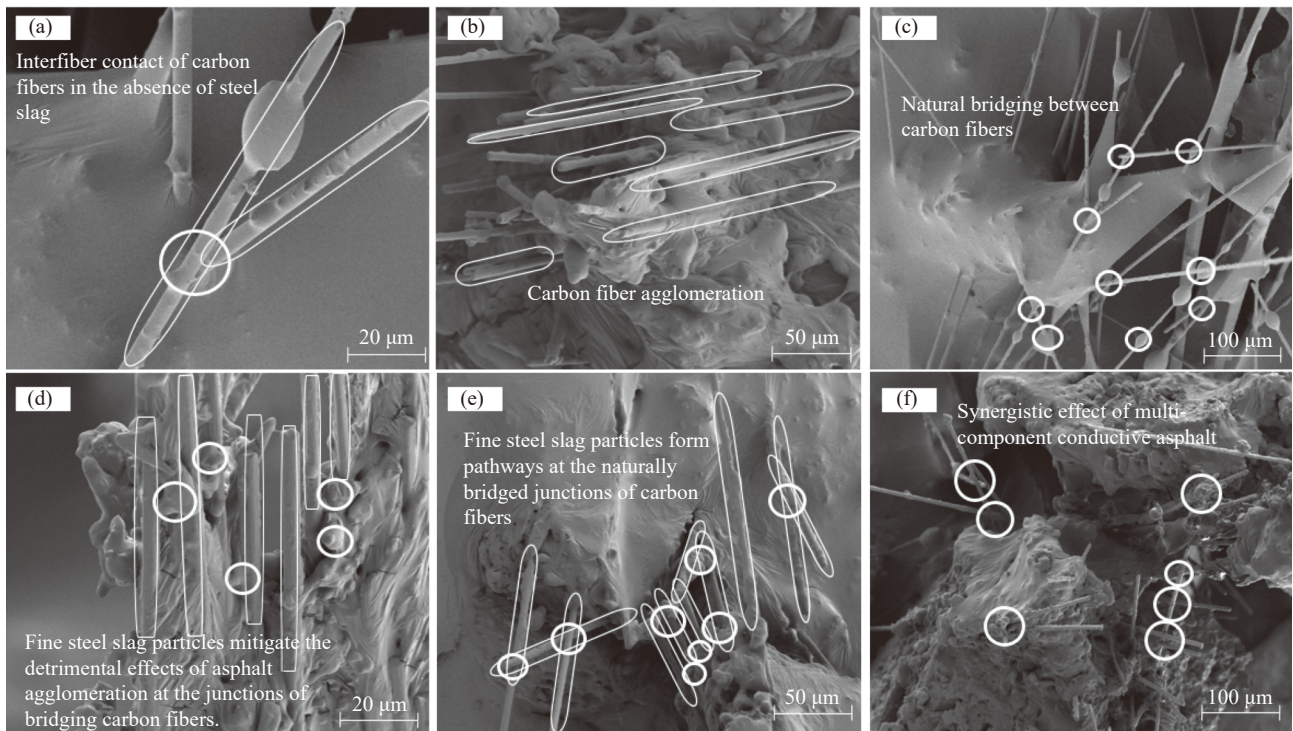


图 9 不同裂缝状态下电学性能变化  
Fig. 9 Electrical performance variations under different crack conditions



对照组: (a) 20 μm; (b) 50 μm; (c) 100 μm; CF0.3%-SS1 组: (d) 20 μm; (e) 50 μm; (f) 100 μm

图 10 不同放大倍数下对照组 CF0.3% 和 CF0.3%-SS1 的微观形貌  
Fig. 10 The microstructures of control CF0.3 wt% and CF0.3 wt%-SS1 at different magnification levels

两组试样均存在碳纤维团聚现象,但在未掺钢渣组中,当碳纤维呈平行分布时(图 10(b)),沥青与石灰石可视为绝缘体,此时,碳纤维相互的偶然搭接成为电路形成的唯一途径(图 10(c))。相比之下,通过掺入细粒径钢渣能够有效串联碳纤维,在碳纤维相互搭接处包裹上具有导电性的细粒径钢渣,在碳纤维呈平行团聚分布时(图 10(d)),具有导电性的钢渣沥青胶浆开始发挥电路桥接作用,这改善了因碳纤维团聚导致的沥青混合料导电性能提升不佳的问题。

与对照组相比,替换钢渣组的电接触类型更加丰富,细粒径钢渣能够保证导电粒子的均匀分布,改善了碳纤维分布不均匀带来的影响,这种通过替换导电骨料与复掺导电材料构建的复合导电模式,不仅显著提升了碳纤维导电沥青混合料的导电性能,而且由于内部导电粒子接触概率的大幅增加,使得其电阻稳定性得到了可靠保证。

### 3 结论

基于导电沥青混合料温敏、压敏以及预制裂缝愈合试验,结合马歇尔试件截面微观结构状态,系统分析了细化钢渣替换率对于导电沥青混合料分别在温度变化、荷载作用、不同类型裂缝影响情况下电学性能变化规律,具体结论如下:

1)钢渣/碳纤维导电沥青混合料表现出 PTC 效应,碳纤维和钢渣协同作用生成更多导电路径,降低

了渗流阈值,即使部分路径因低温断裂,剩余路径仍能维持导电性,因此细粒径钢渣的掺入,在降低电阻率的同时也抑制了在负温度阶段温敏性增长速率。

2)小于 4.75 mm 粒径替换量的钢渣替换后显著提升了马歇尔试件力学性能,当钢渣替换比例分别为 25%、50%、75% 和 100% 时,无侧限抗压强度相应提高 3.47%、7.05%、10.04% 和 14.82%,抗压强度间接延缓了电阻率突变点的出现,从力学性能角度延长了导电沥青的电学寿命,进一步增强了电阻稳定性。

3)循环荷载作用下,75% 细钢渣替换量可与 0.3% 碳纤维形成稳定的导电网络,显著改善电阻异常波动现象。细粒径钢渣无需考虑类似碳纤维这种碳基材料的团聚以及分布不均匀问题,采用导电性细粒径钢渣替代石灰石有效提升了导电粒子密度,从而抑制电学衰减引起的电阻紊乱,使得电阻稳定性得到提升,这为智能路面通过电阻波动分析道路信息提供了重要依据。

4)细粒径钢渣和碳纤维形成的导电网络结构和热传导路径,改善了碳纤维导电沥青混合料裂缝下抗电学性能衰减能力和电阻恢复能力。

5)通过替换细粒径钢渣丰富了导电沥青混合料电接触类型,使得内部导电粒子接触概率大大提升,导电集料与复掺导电材料在协同作用下拥有良好的电阻稳定性。

### 参考文献

- [1] XIE X. Study on the electro-thermal performance of CSG conductive concrete[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2016.  
(谢欣. CSG 导电混凝土的电热性能研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2016.)
- [2] LUAN L Q, WANG Q P. Thermal stability analysis of carbon nanotube asphalt mixtures based on thermal-oxygen aging[J]. Journal of Functional Materials, 2025, 56(2): 2229-2236.  
(栾利强, 王钦佩. 基于热氧老化的碳纳米管沥青混合料电热稳定性分析[J]. 功能材料, 2025, 56(2): 2229-2236.)
- [3] HE Y J, AO Z X, LÜ L N, et al. Electrical resistance stability on conductive asphalt concrete using steel slag as aggregate deicing and snow melting[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2011, 37(1): 80-84.  
(何永佳, 敖灶鑫, 吕林女, 等. 融雪化冰用钢渣导电沥青混凝土的电阻稳定性[J]. 北京工业大学学报, 2011, 37(1): 80-84.)
- [4] JIA X W, ZHANG X, MA D, et al. Conductive properties and influencing factors of electrically conductive concrete: a review[J]. Materials Reports, 2017, 31(21): 90-97.  
(贾兴文, 张新, 马冬, 等. 导电混凝土的导电性能及影响因素研究进展[J]. 材料导报, 2017, 31(21): 90-97.)
- [5] HAN B Z, HAN B G, WANG Y J, et al. DC four-electrode method for electrical resistance measurement of conductive composites[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2010, 42(10): 1677-1680.  
(韩宝忠, 韩宝国, 王艳洁, 等. 测试导电复合材料直流电阻的四端电极法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2010, 42(10): 1677-1680.)
- [6] COQUARD R, BAILLIS D, GRIGOROVA V, et al. Modelling of the conductive heat transfer through nano-structured porous

- silica materials[J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2013, 363: 103-115.
- [ 7 ] TAN S L, ZHUANG Y Q, YI J H. Preparation and properties of multi-walled carbon nanotube reinforced alumina matrix composites by sol-spray method[J]. *Acta Physica Sinica*, 2022, 71(1): 1-14.  
(谈松林, 庄永起, 易健宏. 溶胶-喷雾法制备多壁碳纳米管增强氧化铝基复合材料及性能研究[J]. *物理学报*, 2022, 71(1): 1-14.)
- [ 8 ] TANG Z J, WANG L S, YANG J Y. Electrothermal properties of nickel powder/carbon fiber composite conductive asphalt [J]. *Journal of Materials Science and Engineering*, 2024, 42(2): 290-298.  
(汤智杰, 王路生, 杨景玉. 镍粉/碳纤维复合导电沥青胶浆的电热性能[J]. *材料科学与工程学报*, 2024, 42(2): 290-298.)
- [ 9 ] HU C H, ZHAO Q, LI P F, *et al.* Electrical conductivity of asphalt mixture containing copper slag and carbon fiber[J]. *New Chemical Materials*, 2023, 51(10): 272-276, 281.  
(胡春华, 赵青, 李鹏飞, 等. 铜渣和碳纤维沥青混合料导电性能研究[J]. *化工新型材料*, 2023, 51(10): 272-276, 281.)
- [ 10 ] WANG Z H, NIU Z, ZHOU Z Y, *et al.* Application of metallurgical slag in road engineering[J]. *Modern Transportation and Metallurgical Materials*, 2023, 3(6): 71-78.  
(王子涵, 牛哲, 周子玥, 等. 冶金废渣在道路工程中的应用[J]. *现代交通与冶金材料*, 2023, 3(6): 71-78.)
- [ 11 ] KOWALSKI K J, MCDANIEL R S, OLEK J. Development of a laboratory procedure to evaluate the influence of aggregate type and mixture proportions on the frictional characteristics of flexible pavements[J]. *Asphalt Paving Technology-Proceedings*, 2008, 77: 35-69.
- [ 12 ] SOFILIC T, MERLE V, RASTOVCAN-MIOC A, *et al.* Steel slag instead natural aggregate in asphalt mixture[J]. *Archives of Metallurgy and Materials*, 2010, 55(3): 657-668.
- [ 13 ] LI C, CHEN Z W, XIE J, *et al.* A technological and applicational review on steel slag asphalt mixture[J]. *Materials Reports*, 2017, 31(3): 86-95,122.  
(李超, 陈宗武, 谢君, 等. 钢渣沥青混凝土技术及其应用研究进展[J]. *材料导报*, 2017, 31(3): 86-95,122.)
- [ 14 ] YANG R S, ZHANG Z Q, ZHAO Z L. Development of accelerated loading tester for asphalt mixtures and study on skid resistance attenuation model[J]. *Journal of China & Foreign Highway*, 2007(5): 206-209.  
(杨荣尚, 张争奇, 赵战利. 沥青混合料加速加载试验机开发及抗滑衰减模型研究[J]. *中外公路*, 2007(5): 206-209.)
- [ 15 ] HE J. Study on the attenuation law of long-term skid resistance of asphalt pavement with limestone and basalt mixed aggregates[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2023.  
(何佳. 石灰岩与玄武岩混合集料沥青路面长期抗滑性能衰减规律研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2023.)
- [ 16 ] LIU X, WANG Z L, BAO Y P. Resourceful utilization of converter steel slag: Research status and application prospects[J/OL]. *Chinese Journal of Engineering*, 1-16[2025-04-14].  
(刘昕, 王仲亮, 包燕平. 转炉钢渣资源化利用研究现状与应用展望[J/OL]. *工程科学学报*, 1-16[2025-04-14].)
- [ 17 ] LIN Z H, MENG X Y, CHENG Q, *et al.* Test analysis and aggregate procesing of steel slag for asphalt concrete[J]. *The World of Building Materials*, 2021, 42(1): 12-15,28.  
(林振华, 孟秀元, 程千, 等. 沥青混凝土用钢渣集料加工与试验分析[J]. *建材世界*, 2021, 42(1): 12-15,28.)
- [ 18 ] QU L, MENG X Y, MO L T, *et al.* Effect of hydration products on the interfacial bonding properties between asphalt binder and steel slag coarse aggregate[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2023, 35(2): 04022432.
- [ 19 ] LÜ Z H, SHEN A Q, LI D S, *et al.* Effect of dry-wet and freeze-thaw repeated cycles on water resistance of steel slag asphalt mixture[J]. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 2020, 45(prepublish).
- [ 20 ] LUO W, HUANG S Y, LIU Y H, *et al.* Three-dimensional mesostructure model of coupled electromagnetic and heat transfer for microwave heating on steel slag asphalt mixtures[J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 330.
- [ 21 ] QIAN J S, LI C T, TANG Z Q, *et al.* Experimental study on electric conductive concrete made from steel slag quenching with wind[J]. *Journal of Building Materials*, 2005(3): 233-238.  
(钱觉时, 李长太, 唐祖全, 等. 风淬钢渣用于制备导电混凝土的试验研究[J]. *建筑材料学报*, 2005(3): 233-238.)
- [ 22 ] TANG Z Q, QIAN J S, WANG Z, *et al.* Experimental study on electrical conduction of steel slag reinforced concrete[J]. *Concrete*, 2006(6): 12-14.  
(唐祖全, 钱觉时, 王智, 等. 钢渣混凝土的导电性研究[J]. *混凝土*, 2006(6): 12-14.)