

钢渣及钢纤维对沥青混合料微波加热与路用性能影响研究

胡瑶瑶¹, 张圣涛², 肖玉帅^{3*}, 宋士茂⁴, 张吉哲³

(1.山东省交通规划设计院集团有限公司, 山东 济南 250101; 2.山东高速集团有限公司, 山东 济南 250098; 3.山东大学齐鲁交通学院, 山东 济南 250002; 4.山东省高速养护集团有限公司, 山东 济南 250032)

摘要:针对诱导性材料对沥青混合料微波加热性能影响规律不清的问题,设计制备不同钢纤维质量分数的钢渣沥青混合料、玄武岩沥青混合料、粗钢中玄沥青混合料及粗玄中钢沥青混合料,通过微波加热试验研究钢渣及钢纤维对沥青混合料升温速率及升温均匀性的影响规律,采用车辙试验、低温弯曲试验、浸水马歇尔试验、体积安定性试验与四点弯曲疲劳试验评价钢渣沥青混合料的路用性能。结果表明:钢渣显著提高了沥青混合料的微波加热升温效率,但降低了升温均匀性;钢纤维对沥青混合料微波加热升温效率影响不明显,随着钢纤维质量分数的增加升温均匀性呈现先改善后劣化的规律;钢渣的掺入能够提升沥青混合料的高低温性能与疲劳性能,但对混合料的体积安定性与水稳定性产生不利影响。本研究初步证实了钢渣用作诱导加热自愈合沥青路面集料的可行性,具有较好的应用前景。

关键词:钢渣; 沥青混合料; 钢纤维; 微波加热; 升温均匀性; 耐久性

中图分类号:U414 **文献标志码:**A

引用格式:胡瑶瑶, 张圣涛, 肖玉帅, 等. 钢渣及钢纤维对沥青混合料微波加热与路用性能影响研究[J]. 山东大学学报(工学版), 2025, 55(5): 154-164.

HU Yaoyao, ZHANG Shengtao, XIAO Yushuai, et al. Study on the effect of steel slag and steel fiber on microwave heating and pavement performance of asphalt mixture[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2025, 55(5):154-164.

Study on the effect of steel slag and steel fiber on microwave heating and pavement performance of asphalt mixture

HU Yaoyao¹, ZHANG Shengtao², XIAO Yushuai^{3*}, SONG Shimao⁴, ZHANG Jizhe³

(1. Shandong Provincial Communications Planning and Design Institute Co., Ltd., Jinan 250101, Shandong, China; 2. Shandong Hi-Speed Group Co., Ltd., Jinan 250098, Shandong, China; 3. School of Qilu Transportation, Shandong University, Jinan 250002, Shandong, China; 4. Shandong Province Hi-Speed Maintenance Group Co., Ltd., Jinan 250032, Shandong, China)

Abstract: In response to the problem of unclear patterns of the influence of induced materials on the microwave heating performance of asphalt mixtures, coarse basalt and middle basalt asphalt mixture, coarse steel slag and middle steel slag asphalt mixture, coarse basalt and middle steel slag asphalt mixture, and coarse steel slag and middle basalt asphalt mixture with different dosages of steel fibers had been designed and prepared. The influence of steel slag and steel fiber on the heating rate and uniformity of asphalt mixture was studied by microwave heating test. In addition, rutting test, low-temperature bending test, water-soaked Marshall test, volumetric stability test and four-point bending fatigue test were used to evaluate the pavement performance of steel slag asphalt mixtures. The results found that steel slag significantly improved the microwave heating efficiency of asphalt mixtures, but reduced the heating uniformity. The effect of steel fiber on the microwave heating efficiency of asphalt mixtures was not obvious, and the heating uniformity showed the phenomenon of first improvement and then deterioration with the increase of steel fiber dosage. The incorporation of steel slag could improve the high and low temperature performance as well as fatigue resistance of asphalt mixtures, but it adversely affected the volume stability and water stability of the mixtures. This study preliminarily confirmed the feasibility of

收稿日期:2024-04-15

第一作者简介:胡瑶瑶(1989—),女,山东诸城人,高级工程师,硕士,主要研究方向为道路工程材料。E-mail:1932712922@qq.com

*通信作者简介:肖玉帅(1997—),男,山东菏泽人,硕士研究生,主要研究方向为道路工程材料。E-mail:15871826064@163.com

steel slag used as induced-heating self-healing asphalt pavement aggregate, showing promising application potential.

Keywords: steel slag; asphalt mixture; steel fiber; microwave heating; warming uniformity; durability

0 引言

我国90%以上的高等级公路路面类型为沥青路面,在服役时间与复杂环境的综合作用下,沥青路面会出现早期裂缝类病害,如不及时处理会进一步发展,导致路面性能快速劣化。研究人员发现沥青材料具有自愈合特性,在荷载间歇期内沥青以分子扩散和毛细流动的方式填充裂缝^[1],该特性在文献[2]中首次提出并引发了广泛关注,但在自然环境下沥青材料自愈合是一个十分缓慢的过程,影响这一过程的主要因素是温度^[3]。高温环境下沥青分子扩散及毛细流动速率加快,可促进沥青路面早期裂缝自愈合^[4]。因此,国内外研究人员对提升沥青路面温度的方法进行了大量研究,开发出多种沥青路面加热技术,如电磁感应加热^[5]、微波加热^[6]、红外加热^[7]等,并通过试验发现微波加热具有效率高、能耗低、均匀性好、温度梯度小等优点^[8-9]。

微波是一种电磁波,材料在微波环境下的升温体现在微波穿透材料的过程中微波能的损耗,具体表现为材料中的偶极子随微波电场变化不断转向从而获得动能进而产生热量^[10]。同时,微波具有选择性,对极性较弱的材料如沥青等加热效果不明显。为提高沥青路面微波加热效率,研究人员多采用在沥青混合料中掺加诱导性材料提高混合料整体的吸波性能。文献[11]发现钢渣的导热系数远高于天然集料,在微波环境中可快速加热;文献[12]通过试验发现钢渣可以大幅提高沥青混合料的微波加热效率,但会引起温度分布不均匀导致试件局部破坏;文献[13]研究了钢纤维对AC-13沥青混合料微波升温性能的影响规律,发现升温速率随钢纤维质量分数增加先增大后减小;文献[14]发现铁氧体粉末替代矿粉能够促进沥青混合料对微波的吸收,但加入量过大时会对低温性能产生负面影响;文献[15]对比不同类型诱导性材料对沥青混合料微波升温性能的影响,发现钢渣相比于钢纤维表

现出更优异的升温促进作用。

同时,钢渣以强度高、棱角性丰富、与沥青黏附性好等优点在公路交通建设领域受到了广泛关注^[16-17]。文献[18]制备了不同钢渣质量分数的ARAC-13沥青混合料,发现混合料高低温及水稳定性均随钢渣质量分数增加而提高;文献[19]研究发现膨胀量合格的钢渣沥青混合料动稳定度、最大弯拉应变、浸水残留稳定度和疲劳寿命等指标均优于石灰岩沥青混合料。在大宗固废材料亟待再生利用、天然集料成本及开采难度日益增加的大背景下,钢渣可为公路工程建设提供新的集料选择^[20]。

以上研究表明,钢渣和钢纤维能够提高沥青混合料微波加热升温速率,且对沥青混合料路用性能具有积极影响,但两种材料的掺入可能会导致温度分布不均匀,引起试件局部破坏,钢渣和钢纤维在不同质量分数下对沥青混合料微波加热升温均匀性的影响规律仍需进一步研究。因此,本研究根据钢渣掺入形式的不同,通过体积-质量换算,设计了4种类型的沥青混合料,通过微波加热试验分析了钢渣及钢纤维对沥青混合料微波加热升温速率及升温均匀性的影响规律;同时通过车辙试验、低温弯曲试验、浸水马歇尔试验、体积安定性试验及四点弯曲疲劳寿命试验研究了钢渣对沥青混合料路用性能的影响规律。研究成果揭示了钢渣及钢纤维对沥青混合料微波加热升温性能的影响规律,可为钢渣及钢纤维在诱导加热自愈合沥青路面中的应用提供理论依据。

1 原材料与沥青混合料设计

1.1 原材料基本性能

1.1.1 沥青

本研究所用沥青为SBS(styrene butadiene styrene)改性沥青,主要技术指标如表1所示。由表1可知,各项指标均满足规范要求。

表1 SBS沥青基本性能指标

Table 1 Basic performance indicators of SBS asphalt

技术指标	25 °C 针入度/0.1 mm	5 °C 延度/cm	软化点/°C	135 °C 运动黏度/(Pa·s)
测试值	56.0	32.0	78.2	1.9
技术要求	40.0~60.0	≥20.0	≥60.0	≤3.0

1.1.2 粗集料

本研究所用粗集料为玄武岩与钢渣,其中钢渣来自日照山河超细材料科技有限公司,为自然陈化 1 a 以上的热闷型转炉钢渣,各项指标均满足规范要求,主要性能见表 2。由表 2 可知,钢渣密度大,压碎值与洛杉矶磨耗值低,其强度及耐磨性优于玄武岩集料,具有作为沥青混合料用集料的

表 2 粗集料基本性能指标

Table 2 Basic performance indicators of coarse aggregate

集料名称	集料粒径/mm	表观相对密度	吸水率/%	压碎值/%	洛杉矶磨耗值/%	与沥青的黏附性等级
玄武岩	5~10	3.034	0.52	10.1	8.6	5
	10~15	2.987	0.68		9.4	
钢渣	5~10	3.530	1.10	8.2	7.7	5
	10~15	3.526	1.17		8.1	
标准技术要求		≥2.600	≤3.00	≤28.0	≤30.0	5

表 3 细集料基本性能指标

Table 3 Basic performance indicators of fine aggregate

规格	表观相对密度	砂当量/%	亚加蓝值/(g·kg ⁻¹)	棱角性/s
机制砂	2.749	65.0	2.2	37.5
技术要求	≥2.500	≥60.0	≤2.5	≥30.0

表 4 矿粉基本性能指标

Table 4 Basic performance indicators of mineral powder

规格	表观相对密度	含水率/%	亲水系数	粒度/mm		
				<0.6	<0.15	<0.075
矿粉	2.728	0.2	0.6	100.0	94.0	82.9
技术要求	≥2.500	≤1.0	<1.0	100.0	90.0~100.0	75.0~100.0

1.1.5 纤维

纤维为木质素纤维及钢纤维,其中木质素纤维技术性能见表 5。钢纤维为粉碎性钢棉纤维,当量

潜力。

1.1.3 细集料

本研究所用细集料为机制砂,各项指标均满足规范要求,主要技术指标见表 3。

1.1.4 填料

填料为矿粉,各项指标均满足规范要求,主要技术指标见表 4。

直径为 70~130 μm,公称长度平均为 5.5 mm,含油率为 0.2%。

表 5 木质素纤维基本性能指标

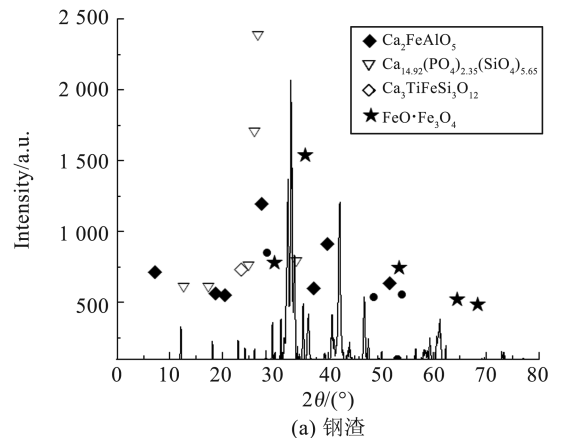
Table 5 Basic performance indicators of lignin fiber

规格	长度/mm	灰分质量分数/%	pH	吸油率/倍	含水率/%
木质素纤维	2.6	17.1	7.7	7.66	3.45
技术要求	≤6.0	18.0±5.0	7.5±1.0	纤维质量的 5.00 倍	≤5.00

1.2 钢渣物化性能

1.2.1 物相组成

基于 X 射线衍射(X-ray diffraction, XRD)分析钢渣及玄武岩的物相组成,结果如图 1 所示。由图 1 可知,钢渣主要由钙铁石(Ca₂FeAlO₅)、钙钛榴石(Ca₃TiFeSi₃O₁₂)、磷酸钙硅酸盐(Ca_{14.92}(PO₄)_{2.35}(SiO₄)_{5.65})和氧化铁等组成,矿物成分较为复杂,其中钙铁石、氧化铁等含铁矿物介电性能良好^[21],在微波环境中能够发生较大的介电损耗及磁损耗,从而快速产生并释放热量。



(a) 钢渣

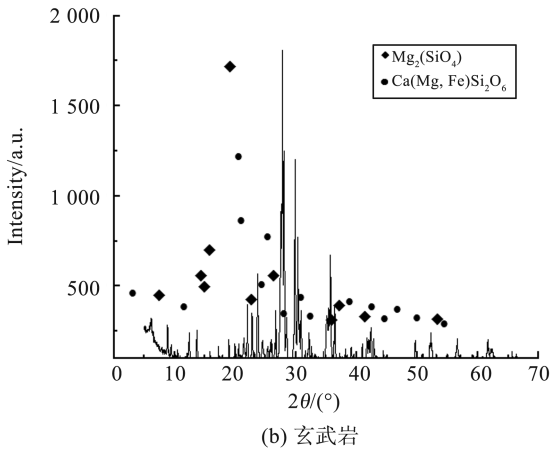


图 1 粗集料 XRD 衍射图谱

Fig.1 XRD diffraction pattern of coarse aggregate

1.2.2 化学成分

基于 X 荧光光谱分析得到玄武岩和钢渣的化学成分见表 6。由表 6 可知,玄武岩的主要化学成分为 SiO₂,属于弱碱性集料。钢渣的主要化学成分为 CaO 与 Fe₂O₃,参照文献[22]对钢渣碱度的定义计算得到钢渣碱度为 3.78,为强碱性集料,钢渣含有的碱性矿物成分能够与沥青中含有的沥青酸等弱酸基团发生中和反应生成稳定的共价键,从而大幅提高集料与沥青的黏附性,钢渣碱度计算公式为

$$M = \frac{w_1 + w_2}{w_3 + w_4}, \quad (1)$$

式中, w₁ 为氧化钙质量分数, w₂ 为氧化镁质量分数, w₃ 为二氧化硅质量分数, w₄ 为五氧化二磷质量分数。

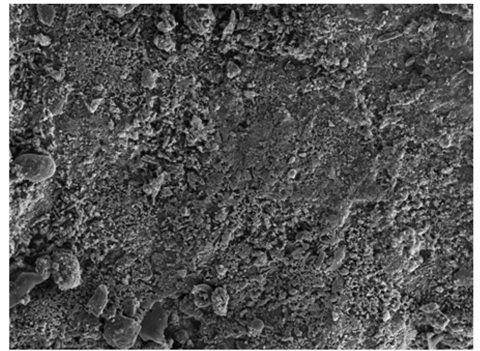
表 6 粗集料化学成分分析

Table 6 Chemical composition analysis of coarse aggregate

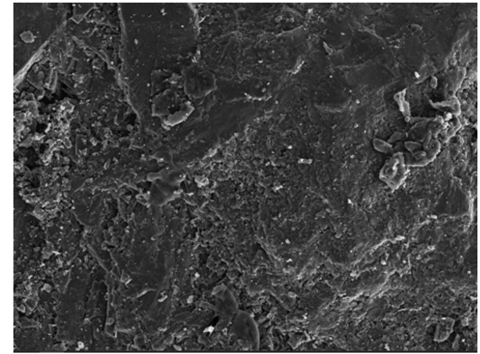
化学成分	质量分数/%	
	玄武岩	钢渣
CaO	7.918	48.299
SiO ₂	51.407	11.037
Al ₂ O ₃	19.591	3.182
Fe ₂ O ₃	7.960	21.407
MgO	3.789	3.177
K ₂ O	2.039	0.039
Na ₂ O	5.340	0.119
TiO ₂	1.791	4.481
P ₂ O ₅	0.752	2.592
MnO	0.100	3.970
其他	0.313	1.697

1.2.3 表面形貌

粗集料表面形貌如图 2 所示。



(a) 钢渣



(b) 玄武岩

图 2 粗集料表面 SEM 扫描结果

Fig.2 SEM scanning results of coarse aggregate surface

由图 2 看出,钢渣表面粗糙不平,附着一层以陈化产物为代表的杂质,这些杂质形状多样,大小不一,覆盖了多数钢渣表面的孔隙,同时在钢渣表面形成疏松多孔的表面结构,进一步提高了钢渣表面的粗糙度。而玄武岩表面十分光滑,表面颗粒附着较少且比较圆滑。钢渣疏松多孔的表面结构增强了与沥青间的黏附性,但同时也是钢渣吸水率较高的主要原因,从而增加了钢渣沥青混合料水损害的风险。

1.2.4 游离氧化钙(f-CaO)质量分数

为避免钢渣中 f-CaO 质量分数过高导致钢渣水化过程中体积膨胀,根据文献[23]中的方法对钢渣中 f-CaO 的质量分数进行测定,测得钢渣中 f-CaO 的质量分数为 0.65%,满足规范中不大于 2.00%的要求。

1.3 沥青混合料设计

根据马歇尔设计法,采用钢渣整体替代某档粗集料的方式设计 SMA-13 沥青混合料,4 种沥青混合料材料组成和编号见表 7,合成级配曲线如图 3 所示。

由于钢渣密度远高于玄武岩和石灰岩等天然集料,为消除集料密度差造成的设计误差,进行马歇尔试验前需采用体积-质量换算的方法将体积配比换算为质量配比,从而保证设计级配与实际试验级配一致,具体换算方法如表 8 所示。根据体积-质量换算结果,通过马歇尔试验确定 4 种沥青混合料配合比及最佳沥青质量分数,最终设计结果如表 9 所示。

表7 沥青混合料材料组成及编号
Table 7 Asphalt mixture material composition and designations

混合料名称	矿料组成	编号
玄武岩沥青混合料	10~15 mm 玄武岩、5~10 mm 玄武岩、机制砂、矿粉	CB-MB
钢渣沥青混合料	10~15 mm 钢渣、5~10 mm 钢渣、机制砂、矿粉	CS-MS
粗玄中钢沥青混合料	10~15 mm 玄武岩、5~10 mm 钢渣、机制砂、矿粉	CB-MS
粗钢中玄沥青混合料	10~15 mm 钢渣、5~10 mm 玄武岩、机制砂、矿粉	CS-MB

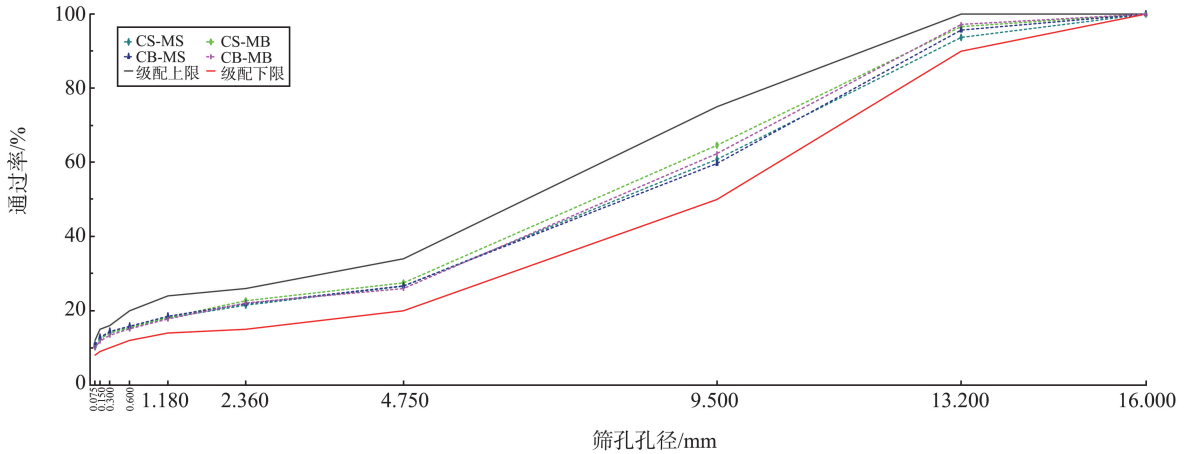


图3 沥青混合料级配曲线
Fig.3 Asphalt mixture gradation curve

表8 体积-质量换算方法
Table 8 Volume-to-mass conversion method

矿料序号	体积分数	毛体积相对密度	质量	总质量	质量分数
1	X_1	V_1	$X_1 V_1$	$M = X_1 V_1 + X_2 V_2 + \dots + X_n V_n$	$Y_1 = (X_1 V_1) / M$
2	X_2	V_2	$X_2 V_2$		$Y_2 = (X_2 V_2) / M$
...
n	X_n	V_n	$X_n V_n$		$Y_n = (X_n V_n) / M$

表9 沥青混合料设计结果
Table 9 Asphalt mixture design result

混合料类型	沥青质量分数/%	理论最大相对密度	毛体积相对密度	空隙率/%	矿料空隙率/%	有效沥青饱和度/%	稳定度/kN	流值/mm
CS-MS	5.9	2.910	2.803	3.7	18.3	79.8	10.92	5.3
CB-MB	5.8	2.577	2.481	3.8	17.1	77.8	9.13	3.9
CS-MB	5.9	2.747	2.631	3.8	18.0	78.8	9.48	4.4
CB-MS	5.9	2.724	2.618	3.8	17.5	78.3	10.07	4.9
技术要求				3.0~4.0	≥ 17.0	75.0~85.0	≥ 6.00	

2 试验方法

2.1 原材料微波加热试验

采用家用微波炉进行原材料加热试验,分别将沥青、集料及矿粉置于微波炉中,在 900 W 功率下加热 100 s,每加热 20 s 使用红外热像仪拍摄材料热像图,拍摄过程控制在 5 s 以内。加热完成后在 Analyz IR 温度分析软件中导出各材料在对应时间

的平均温度,并通过线性拟合计算升温速率。

2.2 沥青混合料微波加热试验

为研究钢渣及钢纤维对沥青混合料微波加热效率的影响规律,制备钢纤维质量分数为 0、0.2%、0.4%和 0.6%的 4 类沥青混合料,混合料类型及编号如表 10 所示。

考虑到钢纤维质量分数低及试验的便捷性,同类型沥青混合料在不同纤维质量分数下的级配及油石比均按 1.3 节设计结果。制备沥青混合料马歇

尔试件并沿顶面中线切割成两个半圆试件,试验时将半圆试件置于微波炉中,在 900 W 功率下加热 100 s,每加热 20 s 使用红外热像仪拍摄试件剖面热像图,拍摄过程控制在 5 s 以内。试验完成后,使用温度分析软件提取试件剖面位置处的温度数据,计算得到试件剖面的平均温度等参数。

表 10 沥青混合料类型及编号
Table 10 Asphaltmixture types and designations

序号	混合料类型	钢纤维 质量分数/%	编号
1		0	CB-MB
2	CB-MB	0.2	CB-MB0.2%
3		0.4	CB-MB0.4%
4		0.6	CB-MB0.6%
5		0	CS-MS
6	CS-MS	0.2	CS-MS0.2%
7		0.4	CS-MS0.4%
8		0.6	CS-MS0.6%
9		0	CB-MS
10	CB-MS	0.2	CB-MS0.2%
11		0.4	CB-MS0.4%
12		0.6	CB-MS0.6%
13		0	CS-MB
14	CS-MB	0.2	CS-MB0.2%
15		0.4	CS-MB0.4%
16		0.6	CS-MB0.6%

2.3 车辙试验

以高温车辙试验评价 4 种沥青混合料高温稳定性,车辙板试件尺寸为 300 mm×300 mm×50 mm,试验温度为 60 °C,试验时以轮压为 0.7 MPa 的橡胶试验轮在车辙板上往返碾压,速度为 (42±1) 次/min,以动稳定度为评价指标。

2.4 低温弯曲试验

以低温弯曲试验评价 4 种沥青混合料的低温抗裂性,低温小梁试件尺寸为 250 mm×30 mm×35 mm,试验温度为 -10 °C,试验时以 50 mm/min 的速率用压头对沥青混合料小梁试件跨径中央进行加载直至试件破坏,以破坏时的最大弯拉应变作为评价指标。

2.5 浸水马歇尔稳定度试验

以浸水马歇尔稳定度试验评价 4 种沥青混合料抵抗水损害的能力,试验时分别将马歇尔试件在 60 °C 温度下水浴 30 min 和 48 h 后进行马歇尔稳定度试验,以浸水残留稳定度作为评价指标。

2.6 体积安定性试验

钢渣体积安定性不良易导致沥青混合料膨胀

变形进而使其路用性能大幅降低,是制约钢渣在沥青路面应用的最主要因素。以钢渣沥青混凝土膨胀量试验评价 4 种沥青混合料的体积安定性,以 60 °C 水浴 72 h 后马歇尔试件的体积膨胀率 C_2 为评价指标。

2.7 四点弯曲疲劳试验

以四点弯曲疲劳寿命试验评价 4 种沥青混合料的抗疲劳性能,疲劳试件尺寸为 380.0 mm×50.0 mm×63.5 mm,试验温度为 15 °C,采用频率为 10 Hz 恒应变控制的连续偏正弦加载模式进行加载,应变水平为 600 $\mu\epsilon$,将加载 50 次时的劲度模量作为试件初始模量,加载过程中以试件劲度模量下降至初始模量的 50% 对应的荷载循环次数即疲劳寿命为评价指标。

3 试验结果与分析

3.1 原材料微波加热试验

各类原材料微波加热后温度变化如图 4 所示,升温速率如表 11 所示,各材料温度随加热时间增加基本呈线性增大的趋势。两档钢渣集料升温速率分别为 0.94、0.92 °C/s,微波升温性能十分优异,钢渣中含有极性较强的金属矿物,能够更好地吸收电磁波并转化为热能。粗集料升温速率远高于细集料与矿粉,说明沥青混合料在微波加热过程中主要靠加热粗集料实现混合料的整体升温。沥青基本不吸收微波,微波升温速率仅为 0.17 °C/s,其在混合料微波加热过程中主要靠集料热传递实现升温,此升温方式能够有效降低沥青因温度梯度产生的老化程度。

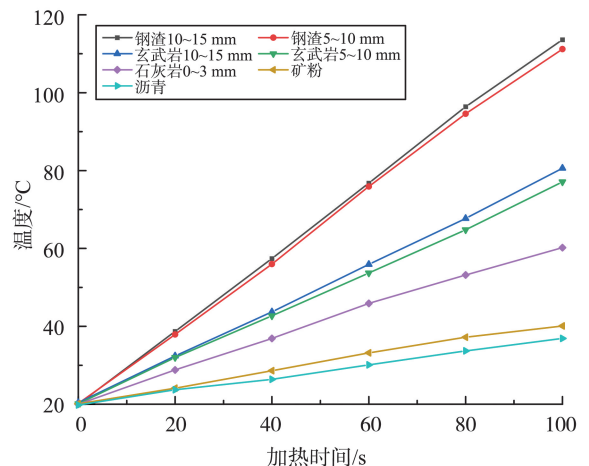


图 4 原材料微波加热温度

Fig.4 Raw material microwave heating temperature

表 11 原材料微波升温速率

Table 11 Raw material microwave heating rate

序号	原材料	升温速率/ ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$)
1	钢渣 10~15 mm	0.94
2	钢渣 5~10 mm	0.92
3	玄武岩 10~15 mm	0.60
4	玄武岩 5~10 mm	0.57
5	机制砂	0.41
6	矿粉	0.21
7	沥青	0.17

3.2 沥青混合料微波加热试验

3.2.1 钢渣与钢纤维对沥青混合料升温速率的影响规律

不同钢纤维质量分数下沥青混合料微波加热

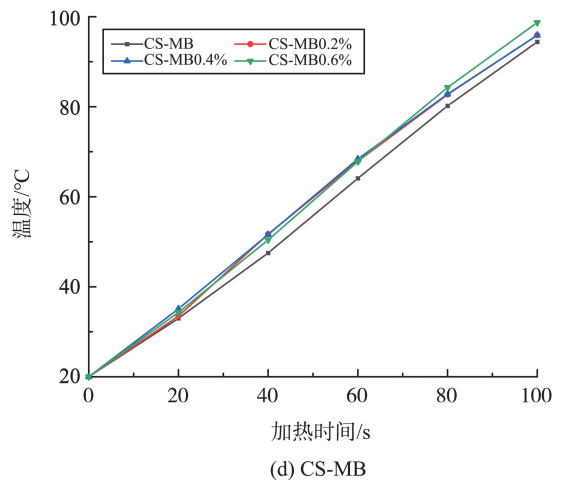
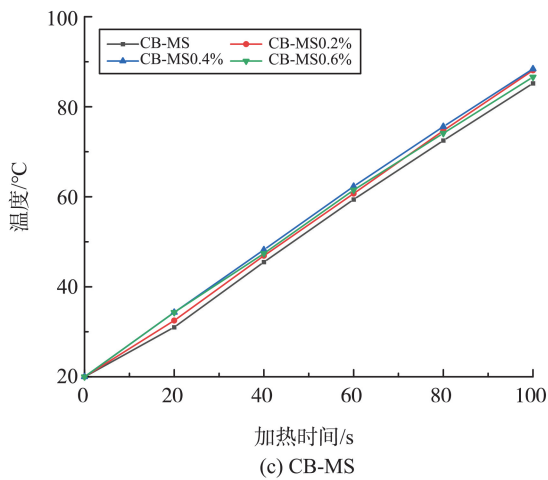
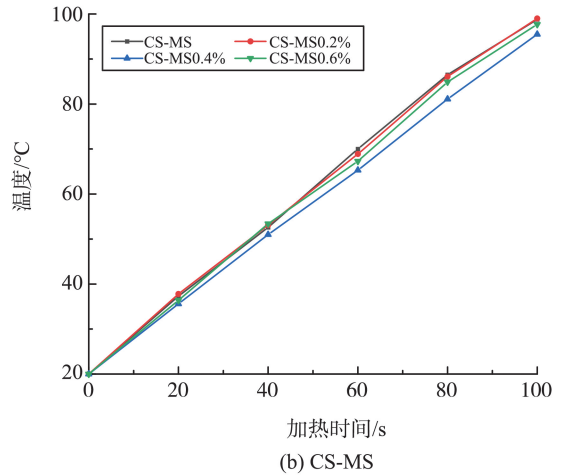
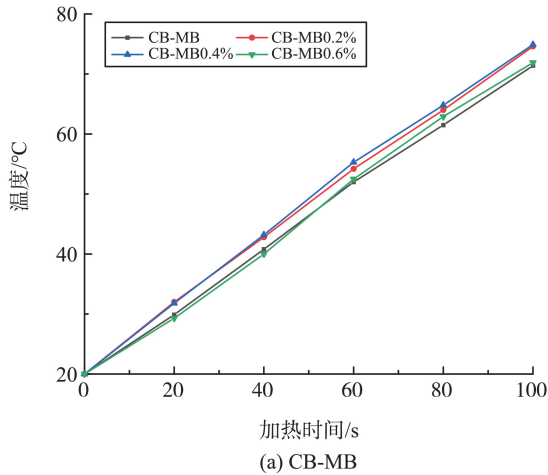


图 5 沥青混合料微波加热温度曲线

Fig.5 Microwave heating temperature curve of asphalt mixture

根据沥青混合料微波加热温度曲线线性拟合得到温度随加热时间的变化公式,公式中斜率可定义为试件的升温速率,拟合公式及结果见表 12。表 12 中: y 为加热过程中试件的表面平均温度; x 为加

温度变化曲线如图 5 所示。

由图 5 可知,沥青混合料剖面温度随加热时间增加呈线性增加的趋势。3 种掺钢渣的沥青混合料(CS-MS、CS-MB、CB-MS)的升温趋势较 CB-MB 提升更快,且随钢渣质量分数的增加而增加。CS-MS 加热 100 s 后剖面平均温度达到 98.8°C ,较 CB-MB 提高 38.4%。钢渣的掺入提高了沥青混合料中吸波材料的质量分数,大幅增强了沥青混合料在微波场中的升温能力。对同类型沥青混合料而言,钢纤维的掺入能够提高沥青混合料微波加热温度,但 4 种钢纤维质量分数下试件的温度曲线十分接近,说明钢纤维的掺入可以提高沥青混合料的微波升温效率,但由于质量分数不高导致温度提升效果有限。

热时间;截距为试件剖面初始平均温度 20°C ; R^2 为判定系数,用于衡量拟合优度。

由温度数据拟合得到的升温速率如图 6 所示。

表 12 沥青混合料微波升温曲线拟合结果

Table 12 Fitting results of microwave heating curves for asphalt mixtures

序号	编号	拟合公式	R ²
1	CB-MB	y = 0.518 64x + 20	0.999 89
2	CB-MB0.2%	y = 0.553 82x + 20	0.999 77
3	CB-MB0.4%	y = 0.561 64x + 20	0.999 61
4	CB-MB0.6%	y = 0.525 36x + 20	0.999 61
5	CS-MS	y = 0.801 36x + 20	0.999 49
6	CS-MS0.2%	y = 0.809 18x + 20	0.999 59
7	CS-MS0.4%	y = 0.769 45x + 20	0.999 95
8	CS-MS0.6%	y = 0.793 82x + 20	0.999 62
9	CB-MS	y = 0.651 09x + 20	0.999 70
10	CB-MS0.2%	y = 0.679 73x + 20	0.999 92
11	CB-MS0.4%	y = 0.692 73x + 20	0.999 90
12	CB-MS0.6%	y = 0.675 45x + 20	0.999 84
13	CS-MB	y = 0.739 18x + 20	0.999 52
14	CS-MB0.2%	y = 0.773 55x + 20	0.999 53
15	CS-MB0.4%	y = 0.776 55x + 20	0.999 64
16	CS-MB0.6%	y = 0.790 18x + 20	0.999 75

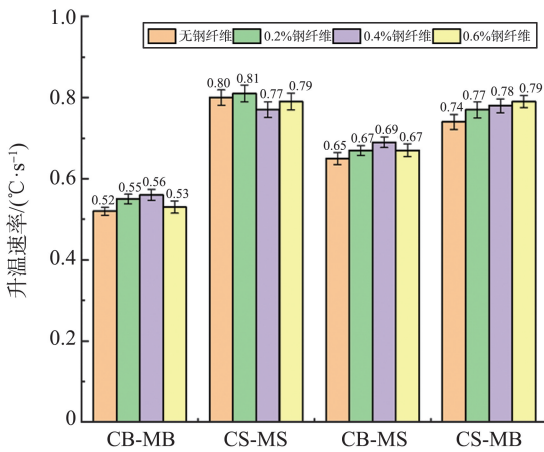


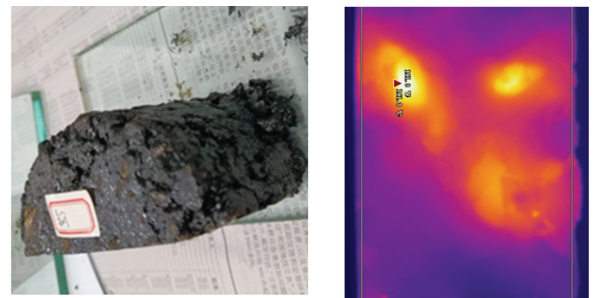
图 6 沥青混合料微波升温速率

Fig.6 Microwave warming rate of asphalt mixtures

由图 6 可知,钢渣对沥青混合料升温速率的促进作用十分显著。不掺钢纤维情况下,CS-MS 的升温速率较 CB-MB、CB-MS 和 CS-MB 分别提高了 53.8%、23.1% 和 8.1%。掺入钢纤维后,沥青混合料升温速率大体呈现先升后降的趋势,但升降幅度均十分有限。这是由于钢纤维的掺入增加了沥青混合料中吸波材料的质量分数进而提高混合料升温速率,但掺入钢纤维质量较低时对整体影响不大,掺入钢纤维质量较高时会使混合料空隙率增大,阻碍试件升温的同时影响红外热像仪的测量精度,使测量温度稍低于实际温度。

3.2.2 钢渣与钢纤维对沥青混合料升温均匀性的影响规律

在微波加热过程中发现部分钢渣沥青混合料试件出现局部破坏、松散的现象,同时对应的剖面热像图中也存在温度分布不均匀、出现突出温度点的情况,该现象随钢渣及钢纤维质量分数的增加变得尤其严重,个别 CS-MS 沥青混合料加热 100 s 后剖面最高温度超过 190 °C,沥青混合料试件不均匀升温情况如图 7 所示。试件局部温度过高会使该部分沥青快速老化,导致混合料试件破坏,影响沥青路面服役性能。



(a) 试件局部破坏

(b) 剖面热像图

图 7 沥青混合料试件不均匀升温图

Fig.7 Uneven warming of asphalt mixture specimens

采用变异系数 c_v 表征沥青混合料微波加热的均匀性, c_v 可以有效反映并比较不同数据序列间的变异性程度,计算公式为

$$c_v = \frac{\sigma}{u}, \quad (2)$$

式中, σ 为样本标准差, u 为样本均值。

使用 Analyz IR 温度分析软件提取加热 100 s 后试件剖面热像图中的各像素点的温度数据,得到平均温度和标准差,计算出各类沥青混合料剖面温度变异系数如图 8 所示。

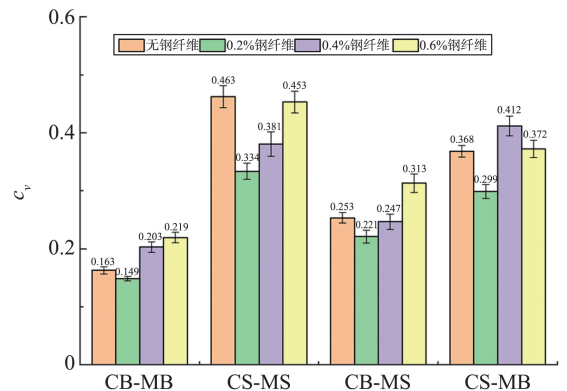


图 8 沥青混合料试件温度变异系数

Fig.8 Temperature coefficient of variation of asphalt mixture specimens

由图 8 可以看出, c_v 随钢渣质量分数增加而增加,CS-MS 试件的 c_v 较 CB-MS 试件提高 184.0%,温

度分布均匀性十分不理想,导致试件加热时容易出现温度集中进而导致局部破坏现象。CS-MB 试件的 c_v 比 CB-MS 试件提高 34.3%,相比于粒径为 10~15 mm 的钢渣,5~10 mm 粒径钢渣在沥青混合料中分布更均匀,相同体积下具有更大的传热面积,使热量可以快速传递至周边低温区域,提高温度分布的均匀性。

同类型沥青混合料在钢纤维质量分数为 0.2% 时温度变异系数均降低,CS-MS 与 CS-MB 温度变异系数降幅最大,分别降低 27.9% 和 23.0%。而随着钢纤维质量分数继续升高, c_v 不降反升,CB-MB 与 CB-MS 在钢纤维质量分数为 0.6% 时的 c_v 均高于不掺钢纤维时。这是因为少量钢纤维可以在沥青混合料中起到导热通道的作用,促进温度在混合料中的传递,提高沥青混合料的微波升温均匀性。但钢纤维质量分数过高时容易在沥青混合料拌和过程中发生团簇现象,钢纤维团簇现象如图 9 所示。在微波加热过程中容易在团簇位置出现温度集中,导致试件温度变异性增大,对升温均匀性产生不利影响。



图 9 钢纤维团簇现象

Fig.9 Steel fiber clustering phenomenon

3.3 车辙试验

沥青混合料车辙试验动稳定度结果如表 13 所示。

表 13 沥青混合料动稳定度

Table 13 Dynamic stability of asphalt mixture

序号	编号	动稳定度/(次·mm ⁻¹)
1	CB-MB	4 515.4
2	CS-MS	5 759.1
3	CB-MS	4 730.8
4	CS-MB	5 274.5

由表 13 可知,沥青混合料的动稳定度随钢渣质量分数的增加而提高,CS-MS 的动稳定度较 CB-MB 提高了 27.5%。钢渣优良的强度与棱角性能够构成更稳固的骨架结构,在高温轮载作用下抵抗集

料破碎及试件变形的能力增强,钢渣的强碱性能够更好地与弱酸性的沥青发生中和反应形成性能稳定的沥青酸盐,同时粗糙多孔的表面结构提高了沥青与集料的接触面积,使集料骨架结构表面的结构沥青膜厚度增加,进一步增强了沥青混合料的高温抗车辙性能。

3.4 低温弯曲试验

沥青混合料低温弯曲试验最大弯拉应变结果如表 14 所示。

表 14 沥青混合料最大弯拉应变

Table 14 Maximum bending and tensile strains of asphalt mixture

序号	编号	最大弯拉应变/ $\mu\epsilon$
1	CB-MB	3 599.8
2	CS-MS	4 039.0
3	CB-MS	3 703.9
4	CS-MB	3 967.3

由表 14 可知,沥青混合料的最大弯拉应变随钢渣质量分数的增加而提高,CS-MS 的最大弯拉应变相比于 CB-MB 增加了 12.2%,其他两种钢渣沥青混合料(CB-MB、CB-MS)低温性能也有不同程度的提高。钢渣表面含有丰富的孔隙结构,混合料在拌和过程中使沥青深入孔隙结构内,进而增强了沥青与集料间的锚固效应与界面强度,同时钢渣与沥青的中和反应提高了沥青混合料的整体黏结强度,使沥青混合料抵抗低温开裂的能力增强。

3.5 浸水马歇尔稳定度试验

沥青混合料浸水马歇尔稳定度试验结果如表 15 所示。

表 15 沥青混合料浸水残留稳定度

Table 15 Residual stabilization of asphalt mixture with water immersion

序号	编号	浸水残留稳定度/%
1	CB-MB	95.3
2	CS-MS	88.6
3	CB-MS	92.4
4	CS-MB	89.7

由表 15 可知,随钢渣质量分数的增加沥青混合料浸水残留稳定度逐渐降低,但水稳定性最差的 CS-MS 的浸水残留稳定度较 CB-MB 仅降低了 6.7%,仍具有较为理想的水稳定性。一方面钢渣中的 f-CaO 与水发生反应产生体积膨胀可致试件产生局部破坏,促使水分的侵入进而加剧试件沥青膜的剥落;同时钢渣优良的表面结构与岩性提高了其与沥青的黏附作用,集料表面裹附的结构

沥青膜起到很好的密水效果,使水分与钢渣集料接触的难度增加。在两种因素的综合作用下钢渣沥青混合料水稳定性发生有限程度的降低,发生水损害的风险较低。

3.6 体积安定性试验

沥青混合料体积安定性试验结果如表 16 所示。

表 16 沥青混合料体积膨胀率
Table 16 Volume expansion of asphalt mixture

序号	编号	$C_2/\%$
1	CB-MB	0.06
2	CS-MS	0.35
3	CB-MS	0.13
4	CS-MB	0.27

由表 16 可知,沥青混合料的 C_2 随钢渣质量分数增加而增加,但均满足不大于 2.00% 的规范要求。这是因为试验用钢渣经 1 a 以上的自然陈化后表面游离氧化钙大部分已水化完成,同时钢渣表面裹附的沥青膜也阻碍了水分的浸入,使钢渣沥青混合料体积稳定性较好。CS-MS 与 CS-MB 的 C_2 比 CB-MS 高 100% 以上,说明粗粒径的钢渣更容易发生浸水膨胀,这是由于钢渣随粒径增加表面孔洞大小及数量也随之增加,与水接触面积更大,其发生水化反应产生的体积膨胀量更大;另一方面,中粒径钢渣由于体积较小,多分布在由 10~15 mm 粗颗粒形成的骨架结构内,其发生水化反应产生的体积膨胀量多被由粗集料骨架结构形成的空隙吸纳,使试件整体的膨胀率较低。

3.7 四点弯曲疲劳试验

4 种沥青混合料劲度模量化过程如图 10 所示,疲劳寿命如表 17 所示。

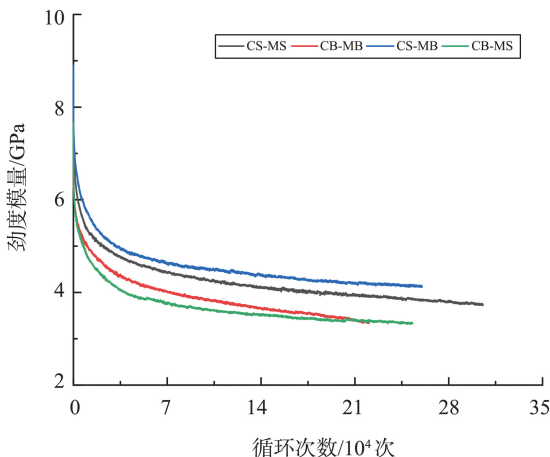


图 10 沥青混合料模量变化曲线

Fig.10 The modulus variation curve of asphalt mixture

表 17 沥青混合料疲劳寿命
Table 17 Fatigue life of asphalt mixture

序号	编号	疲劳寿命/次
1	CB-MB	220 667
2	CS-MS	305 546
3	CB-MS	252 567
4	CS-MB	260 261

由表 4 可知,4 种沥青混合料劲度模量的变化趋势十分接近,早期加载阶段试件劲度模量快速衰减,直至加载 5 万次左右时模量衰减速率逐渐放缓,模量曲线慢慢趋于线性。在加载的中后期, CB-MB 沥青混合料模量衰减速率较其他 3 种沥青混合料明显加快。同时,对比沥青混合料疲劳寿命发现,3 种钢渣沥青混合料 (CS-MS、CB-MS 与 CS-MB) 疲劳寿命较 CB-MB 分别增加了 38.46%、14.46% 和 17.94%,说明钢渣的掺入提高了沥青混合料抵抗疲劳破坏的能力。钢渣良好的表面粗糙度、棱角性及碱性大大提高了其与沥青的黏附作用,从而提高沥青混合料的劲度模量,改善其承受重复荷载时的变形协调性能,使沥青混合料具有更优异的疲劳性能。

4 结论

本研究采用微波加热试验研究了钢渣及钢纤维对沥青混合料微波加热性能的影响规律,比较了钢渣及钢纤维在自愈沥青路面中的适用性,并分析了钢渣沥青混合料的路用性能,主要结论如下。

(1) 钢渣含有极性较强的金属矿物成分,微波升温性能优异,900 W 功率下最大升温速率可达 0.94 °C/s,显著提高了沥青混合料的微波加热升温效率,但降低了升温均匀性。CS-MS 的升温速率较 CB-MB 提高了 53.8%,温度变异系数提高了 184.0%,导致沥青混合料试件出现局部松散、变形等现象。

(2) 钢纤维对沥青混合料微波加热升温效率影响不明显,在低质量分数条件下能够改善沥青混合料的微波升温均匀性,钢纤维质量分数过高则容易在混合料中形成团聚体,对沥青混合料的微波升温均匀性产生负面影响。在自愈沥青混凝土路面中更适合使用钢渣作为提高沥青路面微波升温速率的诱导性材料。

(3) 钢渣能够显著提升沥青混合料的高低温性能与疲劳性能,对混合料的体积安定性与水稳定性

产生不利影响,但仍满足规范要求,表现出较好的服役耐久性。

(4)受限于试验条件,在研究沥青混合料微波加热升温性能时,本研究采用表面温度作为评价试件微波加热升温效率的主要指标。后续研究中将进一步探讨试件整体温度的准确测量方法。

参考文献:

- [1] WAN P, WU S P, LIU Q, et al. Extrinsic self-healing asphalt materials: a mini review [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 425: 138910.
- [2] BAZIN P, SAUNIER J. Deformability, fatigue and healing properties of asphalt mixes [C]//*Proceedings of the International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements*. Washington, USA: [s. n.], 1967: 438-451.
- [3] TRIGOS L, GALLEGRO J, ESCAVY J I. Heating potential of aggregates in asphalt mixtures exposed to microwaves radiation [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 230: 117035.
- [4] 朱洪洲,袁海,魏巧,等. 沥青混合料断裂-微波自愈合影响因素分析[J]. *科学技术与工程*, 2020, 20(11): 4547-4552.
ZHU Hongzhou, YUAN Hai, WEI Qiao, et al. On influence factors on asphalt mixture fracture microwave-healing performance [J]. *Science Technology and Engineering*, 2020, 20(11): 4547-4552.
- [5] JAHANBAKSH H, MOGHADAS NEJAD F, KHODAI A, et al. Sustainable induction-heatable cold patching using microwave and reclaimed asphalt pavement [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2024, 36(3): 04023607.
- [6] ZHANG L T, ZHANG Z H, YU W X, et al. Review of the application of microwave heating technology in asphalt pavement self-healing and de-icing [J]. *Polymers*, 2023, 15(7): 1696.
- [7] 马登成,曹雨轩,桂学. 红外热风协同加热实验台结构设计及仿真验证 [J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2023, 55(3): 49-57.
MA Dengcheng, CAO Yuxuan, GUI Xue. Structural design and simulation verification of experimental platform for infrared and hot air collaborative heating [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2023, 55(3): 49-57.
- [8] NORAMBUENACONTRERAS J, GARCIA A. Self-healing of asphalt mixture by microwave and induction heating [J]. *Materials & Design*, 2016, 106: 404-414.
- [9] SUN Y H, WU S P, LIU Q T, et al. Snow and ice melting properties of self-healing asphalt mixtures with induction heating and microwave heating [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2018, 129: 871-883.
- [10] REN X Y, SHA A M, LI J G, et al. Carbon fiber powder in sustainable asphalt pavements: improving microwave self-healing capacity and low-temperature performance [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2024, 440: 140828.
- [11] LIU J N, WANG Z J, GUO H Y, et al. Thermal transfer characteristics of asphalt mixtures containing hot poured steel slag through microwave heating [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 308: 127225.
- [12] 向阳开,刘威震,赵毅,等. 钢渣沥青混合料微波加热自愈合性能研究 [J]. *硅酸盐通报*, 2022, 41(2): 667-677.
XIANG Yangkai, LIU Weizhen, ZHAO Yi, et al. Self-healing performance of steel slag asphalt mixtures by microwave heating [J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2022, 41(2): 667-677.
- [13] 李佰昌,王丽健,孙艺涵,等. 钢纤维对沥青混合料微波加热及耐久性能的影响 [J]. *当代化工*, 2022, 51(3): 555-560.
LI Baichang, WANG Lijian, SUN Yihan, et al. Effect of steel fiber on microwave heating and durability of asphalt mixture [J]. *Contemporary Chemical Industry*, 2022, 51(3): 555-560.
- [14] LOU B W, SHA A M, et al. Improved microwave heating uniformity and self-healing properties of steel slag asphalt containing ferrite filler [J]. *Materials and Structures*, 2021, 54: 1-14.
- [15] LOUREIRO C D A, SILVA H M R D, OLIVEIRA J R M, et al. The effect of microwave radiation on the self-healing performance of asphalt mixtures with steel slag aggregates and steel fibers [J]. *Materials*, 2023, 16(10): 3712.
- [16] CHANDRASHEKAR GOWDA K N, NAVEEN G M. Laboratory performance of asphalt mixtures incorporating electric arc furnace slag and basic oxygen furnace slag as partial replacement for conventional aggregates [J]. *Energy, Ecology and Environment*, 2023, 8(6): 586-595.
- [17] BAI X F, WANG L. Study on mesoscopic model of low-temperature cracking of steel slag asphalt mixture based on random aggregate [J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 364: 129974.
- [18] 柳力,朱晓明,刘朝晖,等. 钢渣掺量对橡胶沥青混合料 ARAC-13 性能的影响 [J]. *材料导报*, 2023, 37(10): 66-72.