

钢渣磨细粉对沥青胶浆及混合料性能的影响

徐新强^{1,2}, 韩方元^{1,2}, 陈维斌^{1,2}, 徐腾飞^{1,2}, 崔宇^{1,2}

(1. 宁夏交通建设股份有限公司, 银川 750001; 2. 宁夏交建交通科技研究院有限公司, 银川 750004)

摘要:为探究钢渣磨细粉(SSFP)对沥青胶浆及其混合料性能的影响,使用粒径小于5 mm的钢渣制备SSFP。以石灰岩矿粉(LP)作为对照,对不同粉胶比(F/A)下SSFP沥青胶浆的性能进行了分析和评价,并探究了SSFP对沥青混合料性能的影响。结果表明:相较于LP,SSFP对沥青胶浆及混合料的高、低温及疲劳性能均有所提升,其中低温性能提升幅度最大,SSFP沥青胶浆的蠕变劲度模量提升了190.57%,SSFP沥青混合料的低温弯曲破坏应变提升了9.93%;增大F/A可提升沥青胶浆的高温性能,但会损伤其疲劳性能和低温性能;SSFP应用于沥青混合料中具备较强的可行性和推广价值。

关键词:钢渣磨细粉; 沥青胶浆; 沥青混合料; 粉胶比; 双因素方差分析; 临界破坏温度

中图分类号:U416.217

文献标志码:A

文章编号:1001-1625(2024)03-1153-09

Influence of Steel Slag Fine Powder on Properties of Asphalt Mortar and Mixture

XU Xinqiang^{1,2}, HAN Fangyuan^{1,2}, CHEN Weibin^{1,2}, XU Tengfei^{1,2}, CUI Yu^{1,2}

(1. Ningxia Communications Construction Co., Ltd., Yinchuan 750001, China;

2. Research Institute of Transportation Technology of Ningxia Communications Construction, Yinchuan 750004, China)

Abstract: In order to investigate the effect of steel slag fine powder (SSFP) on performance of asphalt mortar and mixture, SSFP was prepared using steel slag with a particle size less than 5 mm. With limestone powder (LP) as a comparison group, the performance of SSFP asphalt mortar was analyzed and evaluated with different filler-asphalt ratio (F/A), and the effect of SSFP on the performance of asphalt mixture was also investigated. The results show that, compared with LP, SSFP improves the high temperature performance, low temperature performance and fatigue performance of asphalt mortar and mixture, with the greatest improvement in low temperature performance, 190.57% for bending creep stiffness modulus of SSFP asphalt mortar and 9.93% for low temperature bending fracture strain of mixture. The increase of F/A improves the high temperature performance of asphalt mortar, but damages its fatigue performance and low temperature performance. The application of SSFP in asphalt mixture has strong feasibility and popularization value.

Key words: steel slag fine powder; asphalt mortar; asphalt mixture; filler-asphalt ratio; two-factor variance analysis; critical failure temperature

0 引言

钢渣是在钢铁冶炼过程中产生的固体废弃物,主要由冶炼原料中的杂质、矿石中的非金属成分以及冶炼反应中的产物所组成^[1]。钢渣的综合利用可以降低道路工程对自然资源的需求,减少废弃物的排放量,同时还可以创造一定的经济效益。

钢渣与沥青之间有着较好的黏附性^[2-4],可以替代沥青混合料中的石质集料。Li等^[5]发现钢渣沥青混合料在不同温度条件下的低温变形适应性能优异。李灿华等^[6]评价了开级配磨耗层型钢渣透水沥青混合料的路用性能,发现其高温抗车辙能力、抗水损害能力较强,动稳定度较好。申爱琴等^[7]发现适量掺加钢渣

收稿日期:2023-09-28;修订日期:2023-11-20

基金项目:宁夏回族自治区重点研发计划重点项目(2022BEG02009);宁夏回族自治区交通运输厅科技项目(202200187)

作者简介:徐新强(1997—),男,助理工程师。主要从事路面结构与材料方面的研究。E-mail:xu_xinqiang@163.com

可有效提高沥青混合料疲劳寿命。刘晋周等^[8]发现强碱性矿物相的存在显著增强了钢渣作为集料与沥青的黏结能力。Chen 等^[9]发现与玄武岩相比,钢渣与沥青之间的微界面相更加连续和均匀。Moura 等^[10]推荐混合料中钢渣的最佳掺量为 50% (质量分数,下同)。陈伟等^[11]发现钢渣的掺入可以提高混合料的高温稳定性、水稳定性及动态模量,但掺量不宜超过 75%。Ji 等^[12]发现在沥青混合料中掺入钢渣能显著提高路面的抗滑性能,钢渣掺量为 50% 时路面抗滑性能最佳。申爱琴等^[13]发现钢渣丰富的表面纹理和孔隙改善了其与沥青之间的黏结性,进而提升了钢渣沥青混合料的抗滑性能。Jiang 等^[14]发现以滚筒法或热闷法得到的钢渣制得的沥青混合料水稳定性优于以石灰岩为集料的沥青混合料。Guo 等^[15]发现钢渣的加入可以提高沥青混合料的长期水稳定性,且水稳定性随钢渣含量的增加呈先增大后减小的趋势。秦林清^[16]发现钢渣的陈化时间以 12 个月为优,陈化产物增强了钢渣沥青混凝土的水稳定性。

钢渣代替石质集料可以提升混合料的路用性能。但钢渣细集料的比表面积更大,这不仅会增大混合料油石比,还会带来更大的体积膨胀开裂风险^[17-18]。现有研究和应用基本上只使用钢渣粗集料替代沥青混合料中的石质集料,钢渣细集料在沥青混合料中没有得到很好的利用。此外,现有研究仅在粗、细集料层面使用钢渣替代石质集料,以钢渣粉替代混合料中传统矿粉的可行性及效益还需进一步研究。

结合上述研究现状,本文用粒径小于 5 mm 的钢渣细集料制作钢渣磨细粉(steel slag fine power, SSFP),并将其替代普通沥青混合料中的石灰岩矿粉(limestone powder, LP),对不同粉胶比(filler-asphalt ratio, F/A)下 SSFP 沥青胶浆的性能进行了分析和评价,探究了 SSFP 对沥青混合料性能的影响,旨在为钢渣在沥青混合料中的进一步应用提供新的思路和技术支撑。

1 实验

1.1 原材料性能

本文所用沥青为壳牌公司的 90#A 级沥青,钢渣产自宁夏建龙特钢有限公司,LP 产自某集料加工厂。原材料性能见表 1~3。

表 1 90#沥青的性能

Table 1 Performance of 90# asphalt

Index	Measured	Request
Penetration(25 °C, 100 g, 5 s)/(0.1 mm)	81	80 ~ 100
Softening point/°C	46	≥44
Ductility(10 °C)/cm	56	≥30
Density/(g · cm ⁻³)	1.035	Measured value
Flash point/°C	282	≥245
Viscosity(60 °C)/(Pa · s)	169	≥160
Loss of mass/%	-0.161	±0.8
Residue after RTFOT	Residual penetration ratio/%	≥57
	10 °C residual ductility/cm	≥8

注:RTFOT 为旋转薄膜烘箱短期老化测试。

表 2 钢渣的性能

Table 2 Performance of steel slag

Index	Measured	Request
Apparent specific gravity/(kg · m ⁻³)	3.225	≥2.6
Bulk specific gravity/(kg · m ⁻³)	3.007	—
Free calcium oxide content/%	2.71	≤3
Rigidity(>0.3 mm)/%	8.4	≤12
Sand equivalent/%	84.1	≥60
Angularity/s	44	≥30

1.2 钢渣磨细粉的制备

首先称取 5 kg 粒径范围为 0~4.75 mm 的钢渣,将其放入水泥试验小磨中研磨 1.5 h;然后将研磨后的

钢渣从磨机料斗中取出,依次用 2.36、0.6、0.15、0.075 mm 的方孔筛进行筛分;最后参照 LP 的粒径范围,将 0.15、0.075 mm 方孔筛的筛余料以及筛底存料进行掺配,使最终得到的 SSFP 与 LP 的粒径范围一致。

表 3 石灰岩矿粉的性能

Table 3 Performance of limestone powder

Index	Measured	Request
Apparent density/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	2.728	≥ 2.50
Water carrying capacity/%	0.1	≤ 1
Particle size range/%	<0.6 mm	100
	<0.15 mm	98.4
	<0.075 mm	84.2
Appearance	No agglomerates	No agglomerates
Hydrophilic coefficient	0.58	<1
Plasticity index/%	2.6	<4
Heating stability	After heating, the color did not change, no deterioration	Actual observational record

1.3 沥青胶浆的制备

本文制备的沥青胶浆分为两类,分别是 SSFP 沥青胶浆与 LP 沥青胶浆。首先将矿粉加热至 120 °C,将 90#沥青在 135 °C 下加热至熔融状态,然后在 135 °C 下使用电动搅拌器以 200 r/min 的速度搅拌沥青,同时以 0.6、0.8、1.0 及 1.2 的 F/A 将矿粉以一定的速度加入沥青中,继续搅拌 10 min,得到不同矿粉及 F/A 的沥青胶浆,制备过程见图 1。

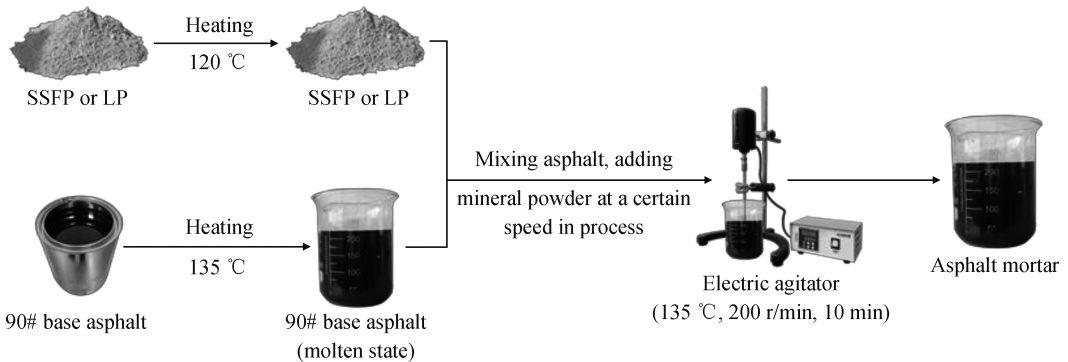


图 1 沥青胶浆的制备过程

Fig. 1 Preparation process of asphalt mortar

1.4 试验方法

1.4.1 沥青胶浆的性能测试

使用 Kinexus DSR 型动态剪切流变仪(dynamic shear rheometer, DSR)分别测试旋转薄膜烘箱短期老化(rolling thin film oven test, RTFOT)前后的胶浆高温性能以及 RTFOT 后的胶浆疲劳性能,使用 TE-BBR 型弯曲梁流变仪(bending beam rheometer, BBR)测试 RTFOT 后的胶浆低温性能。沥青胶浆性能测试参数见表 4。

表 4 沥青胶浆性能测试参数

Table 4 Test parameters of asphalt mortar performance

Performance parameter	Test equipment	Test temperature/°C	Evaluation indicator
High temperature performance	DSR	46, 52, 58, 64, 70, 76	Rutting factor $G^* / \sin \delta$
Fatigue performance	DSR	31, 28, 25, 22, 19, 16	Fatigue factor $G^* \cdot \sin \delta$
Low temperature performance	BBR	-6, -12, -18	Bending creep stiffness modulus S , creep rate m -value

1.4.2 沥青胶浆临界破坏温度计算方法

将 DSR 及 BBR 试验结果以试验温度为自变量,以 $G^* / \sin \delta$ 、 $G^* \cdot \sin \delta$ 、 S 及 m 值为应变量进行回归分析

并确定回归公式,然后将上述指标的限值代入回归公式反算各指标达到限值时的温度作为临界破坏温度。根据 SHRP 要求^[19-20],原样沥青胶浆的 $G^*/\sin \delta$ 应大于 1.0 kPa,老化后的沥青胶浆 $G^*/\sin \delta$ 应大于 2.2 kPa,沥青胶浆的 $G^* \cdot \sin \delta$ 应小于 5 000 kPa, S 应小于 300 MPa, m 值应大于 0.3;使用 BBR 试验表征沥青胶浆的低温等级时需要在试验温度的基础上减去 10 °C。

1.4.3 SSFP 对沥青混合料性能的影响测试方法

分别制备矿粉为 SSFP 和 LP 的 AC-13 沥青混合料,并测定两种混合料的路用性能,分析两种矿粉对沥青混合料性能的影响差异。其中疲劳性能使用四点弯曲疲劳试验方法,采取应变控制模式,加载频率为 10 Hz,应变水平为 600 $\mu\epsilon$ 。

2 结果与讨论

2.1 钢渣磨细粉对沥青胶浆性能的影响

图 2~4 为不同 F/A 的 SSFP 沥青胶浆与 LP 沥青胶浆的 $G^*/\sin \delta$ 、 $G^* \cdot \sin \delta$ 、 S 和 m 值随测试温度的变化,及对所有指标测试结果的回归曲线。表 5 为不同 F/A 的 SSFP 沥青胶浆与 LP 沥青胶浆的 $G^*/\sin \delta$ 、 $G^* \cdot \sin \delta$ 、 S 和 m 值和测试温度的回归拟合公式参数及相关系数。除 m 值外其余指标的回归公式形式均为 $y = a \cdot e^{bx}$,拟合后的相关系数 R^2 均大于 0.93, m 值的回归公式形式为 $y = ax + b$ 。RTFOT 前后不同 F/A 的 SSFP 沥青胶浆与 LP 沥青胶浆 $G^*/\sin \delta$ 变化趋势基本一致,因此仅展示 RTFOT 前沥青胶浆的 $G^*/\sin \delta$ 。

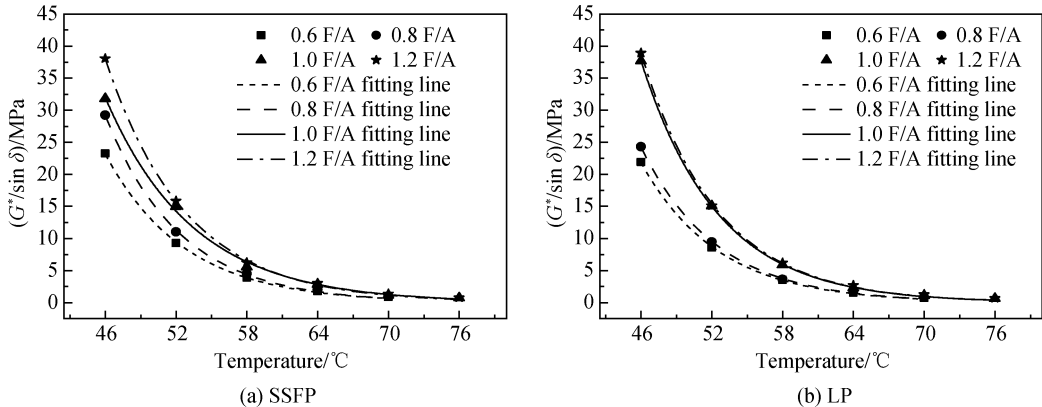


图 2 不同测试温度下胶浆的 $G^*/\sin \delta$

Fig. 2 $G^*/\sin \delta$ of mortar at different test temperatures

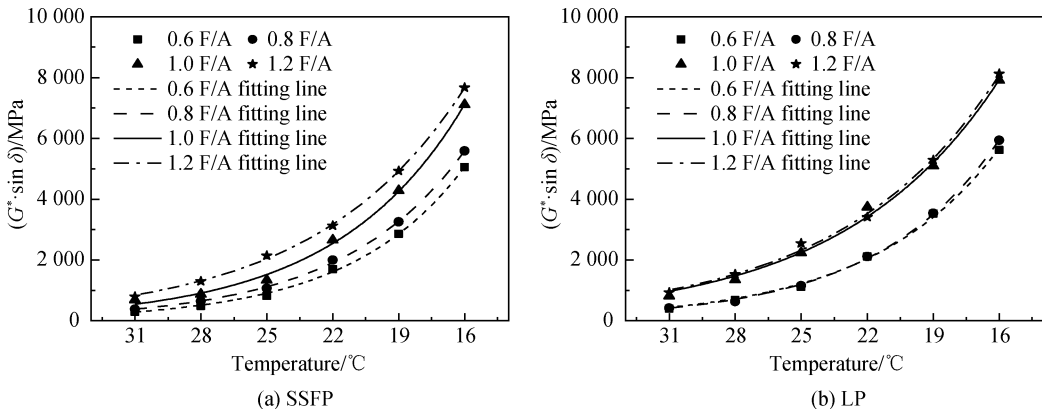


图 3 不同测试温度下胶浆的 $G^* \cdot \sin \delta$

Fig. 3 $G^* \cdot \sin \delta$ of the mortar at different test temperatures

根据图 2~4 和表 5 可知,随着测试温度升高,不同 F/A 的 SSFP 和 LP 沥青胶浆的 $G^*/\sin \delta$ 均呈下降趋势, $G^* \cdot \sin \delta$ 呈上升趋势。这符合沥青材料在升温过程中由线弹性状态向黏性流动状态转变的规律。在相

同测试温度下,随着 F/A 增加, $G^*/\sin \delta$ 和 $G^* \cdot \sin \delta$ 均有不同程度的提高。在 F/A 从 0.6 提升为 1.2 的过程中,46 °C 下 SSFP 沥青胶浆的 $G^*/\sin \delta$ 提升了 36.81%,LP 沥青胶浆的 $G^*/\sin \delta$ 提升了 77.68%;16 °C 下 SSFP 沥青胶浆的 $G^* \cdot \sin \delta$ 提升了 51.81%,LP 沥青胶浆的 $G^* \cdot \sin \delta$ 提升了 44.66%。这表明增大 F/A 能增强沥青胶浆的高温抗变形能力,但会对其抗疲劳开裂能力造成损伤,相比于 LP 沥青胶浆,SSFP 掺量的变化对沥青胶浆抗疲劳性能的影响更显著。

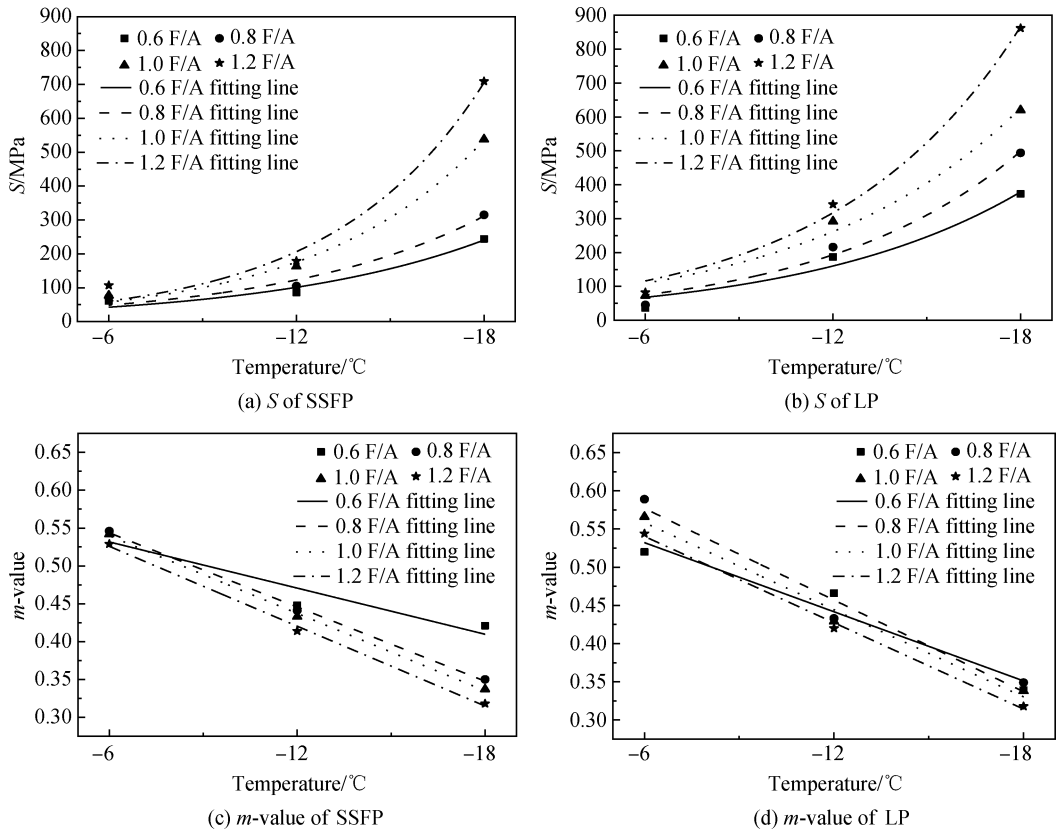


图4 不同测试温度下胶浆的 S 和 m 值

Fig. 4 S and m-value of mortar at different test temperatures

表5 不同 F/A 下各指标同测试温度的回归拟合结果

Table 5 Regression fitting results of each index with test temperature at different F/A

Index	Parameter	0.6 F/A		0.8 F/A		1.0 F/A		1.2 F/A	
		SSFP	LP	SSFP	LP	SSFP	LP	SSFP	LP
$G^*/\sin \delta$ (before RTFOT)	a	22 375.2	25 221.4	41 585.6	31 469.0	15 713.9	44 215.2	31 781.4	46 566.9
	b	-0.149 4	-0.153 3	-0.157 9	-0.155 8	-0.134 7	-0.153 7	-0.146 3	-0.154 1
	R ²	0.999 5	0.999 6	0.999 3	0.999 5	-0.998 0	0.999 9	0.999 6	0.999 6
$G^*/\sin \delta$ (after RTFOT)	a	59 648.1	45 969.6	86 022.3	53 953.9	88 687.4	113 478.1	32 419.6	114 479.8
	b	-0.158 9	-0.156 0	-0.161 3	-0.158 3	-0.155 1	-0.158 3	-0.130 6	-0.159 5
	R ²	0.999 7	0.999 9	0.999 6	0.999 8	0.997 4	0.999 8	0.998 8	0.999 6
$G^* \cdot \sin \delta$	a	107 330.7	86 628.3	97 775.3	102 226.0	110 381.9	74 460.9	80 495.2	74 314.7
	b	-0.190 9	-0.170 3	-0.178 8	-0.177 7	-0.171 3	-0.140 0	-0.147 0	-0.138 6
	R ²	0.998 7	0.997 7	0.999 4	0.999 2	0.997 3	0.994 5	0.999 4	0.997 5
S	a	17.94	28.66	19.23	28.98	18.90	45.62	17.68	42.48
	b	-0.144 3	-0.143 4	-0.154 7	-0.158 1	-0.185 8	-0.145 5	-0.204 8	-0.167 5
	R ²	0.940 3	0.938 4	0.950 5	0.972 4	0.991 0	0.969 8	0.972 8	0.988 7
m-value	a	0.010 17	0.015 08	0.016 33	0.020 00	0.017 08	0.019 00	0.017 58	0.018 83
	b	0.592 7	0.622 7	0.641 7	0.697 0	0.642 3	0.672 3	0.631 3	0.653 3
	R ²	0.812 3	0.897 1	0.996 6	0.941 8	0.997 3	0.973 2	0.994 6	0.993 7

随着测试温度的降低,不同 F/A 的 SSFP 沥青胶浆和 LP 沥青胶浆的 S 均增大, m 值均减小。这符合沥青材料在降温过程中从弹性状态向玻璃态转化的过程。在相同测试温度下,随着 F/A 增加,胶浆的 S 升高, m 值降低。当 F/A 从 0.6 提升为 1.2, $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下 SSFP 沥青胶浆的 S 提升了 190.57%, m 值降低了 24.47%; LP 沥青胶浆的 S 提升了 131.10%, m 值降低了 6.19%。这意味着添加更多磨细矿粉会降低沥青胶浆的低温抗裂能力,相比于 LP, SSFP 掺量的变化对沥青胶浆低温性能的影响更显著。

对比可知,在相同测试条件下,SSFP 沥青胶浆的 $G^*/\sin\delta$ 总体高于 LP 沥青胶浆, $G^*\cdot\sin\delta$ 总体低于 LP 沥青胶浆,但 SSFP 沥青胶浆的 S 显著低于 LP 沥青胶浆。说明同一 F/A 下,SSFP 沥青胶浆的高温性能、疲劳性能以及低温性能均优于 LP 沥青胶浆。造成这种差异的原因可能有以下几个方面:1) 与 LP 相比,SSFP 孔隙较多^[21-23],比表面积较大,与沥青的接触面积更大,因此沥青与骨料的黏结强度较高;2) 钢渣表面含有的金属氧化物和硅酸盐等成分可以与沥青中的某些成分发生化学反应^[23],这些元素能够与沥青形成更稳定的结构,从而提高沥青胶浆的稳定性和耐久性;3) 相比于 LP,SSFP 的硬度更高,耐磨性更好^[24],所以在疲劳性能和低温性能上 LP 沥青胶浆弱于 SSFP 沥青胶浆。因此,相同 F/A 下,SSFP 制备的沥青胶浆比 LP 制备的沥青胶浆性能更佳。

2.2 钢渣磨细粉对沥青胶浆临界破坏温度的影响

基于上述试验结果可知,低温性能指标 S 比 m 值先达到临界值,因此根据最不利原则取 S 的试验结果计算两种胶浆在低温域的临界破坏温度。两种胶浆在不同温域内的临界破坏温度如图 5~7 所示。

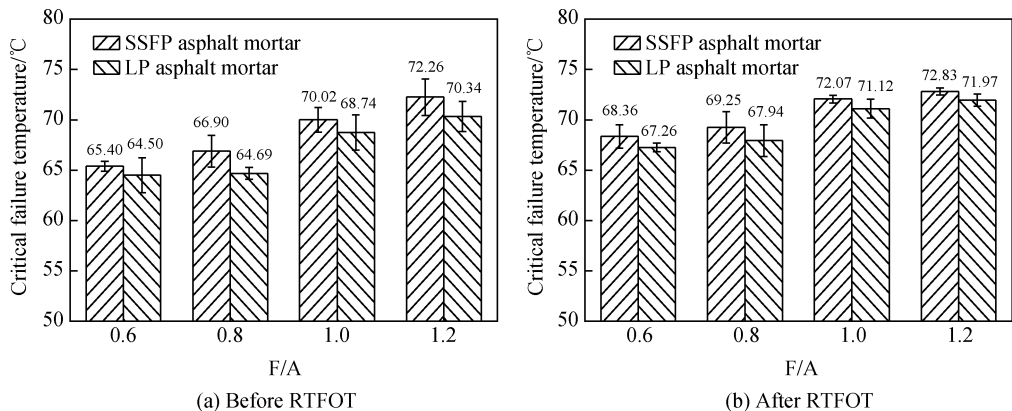


图 5 高温域临界破坏温度

Fig. 5 Critical failure temperature in high-temperature domain

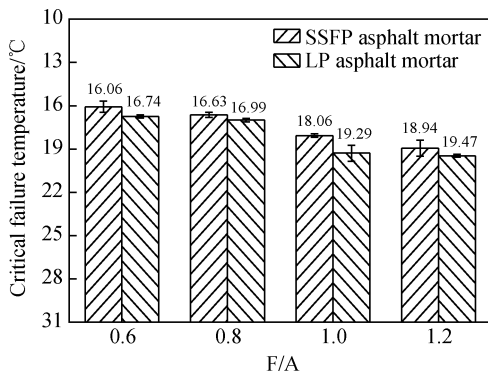


图 6 中温域临界破坏温度

Fig. 6 Critical failure temperature in middle-temperature domain

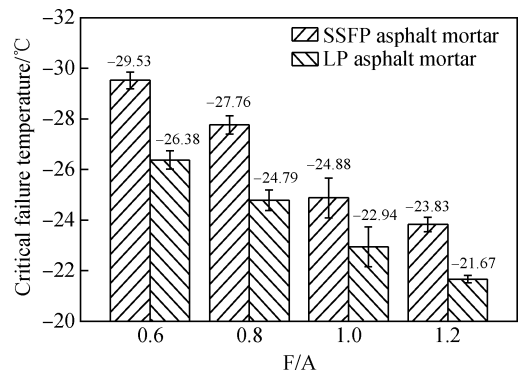


图 7 低温域临界破坏温度

Fig. 7 Critical failure temperature in low-temperature domain

根据图 5~7 可知,在同一 F/A 下,SSFP 沥青胶浆的高温临界破坏温度高于 LP 沥青胶浆,相较于 LP 沥青胶浆,SSFP 沥青胶浆在老化前高温临界破坏温度平均提升了 2.35%,老化后高温临界破坏温度平均提升了 1.52%;SSFP 沥青胶浆的中温临界破坏温度和低温临界破坏温度均低于 LP 沥青胶浆,相较于 LP 沥青胶

浆,SSFP 沥青胶浆的中温临界破坏温度平均降低了 3.86%,低温临界破坏温度平均降低了 10.67%。说明在沥青胶浆中,使用 SSFP 替代 LP 对胶浆的高温性能影响最小,对低温性能影响最大,SSFP 沥青胶浆在更高的温度下抵抗流动变形,在更低的温度下不会发生疲劳开裂和脆性破坏。这与前述结论一致,即相较于 LP 沥青胶浆,SSFP 沥青胶浆的高温性能、低温性能以及疲劳性能均有所提升。

当 F/A 从 0.6 提高至 1.2,老化前的 SSFP 沥青胶浆高温临界破坏温度提升了 6.86 °C,LP 沥青胶浆提升了 5.84 °C;老化后的 SSFP 沥青胶浆高温临界破坏温度提升了 4.47 °C,LP 沥青胶浆提升了 4.71 °C;SSFP 沥青胶浆中温临界破坏温度提升了 2.88 °C,LP 沥青胶浆提升了 2.73 °C;SSFP 沥青胶浆低温临界破坏温度提升了 5.70 °C,LP 沥青胶浆提升了 4.71 °C。说明 F/A 的增大对沥青胶浆的高温性能有积极影响,而对其疲劳性能和低温性能产生了不利影响,且 F/A 的变化对 SSFP 沥青胶浆的高温性能影响更大。

2.3 钢渣磨细粉沥青胶浆性能影响因素分析

基于上述试验结果,以 F/A、温度及矿粉类型三个影响因素与因素间耦合作用作为差异来源,分别对 RTFOT 前后的 $G^*/\sin \delta$ 、 $G^* \cdot \sin \delta$ 和 S 进行方差分析,分析结果如表 6。

表 6 方差分析结果

Table 6 Results of variance analysis

Resource of difference	$G^*/\sin \delta$ (before RTFOT)		$G^*/\sin \delta$ (after RTFOT)		$G^* \cdot \sin \delta$		S	
	F	P	F	P	F	P	F	P
F/A	36.246	0	112.433	0	513.178	0	112.838	0
Temperature	604.091	0	871.477	0	3 655.223	0	886.648	0
Type of mineral powder	0.787	0.391	9.951	0.008	153.466	0	80.172	0
Temperature * type of mineral powder	0.129	0.983	2.701	0.074	5.631	0.004	31.321	0.001
F/A * temperature	9.125	0	28.382	0	24.703	0	41.78	0
F/A * type of mineral powder	1.746	0.207	2.011	0.166	14.311	0	0.626	0.624

注: * 表示 F/A、温度及矿粉类型三者之间的两两耦合作用。

根据表 6 可知,在单一因素影响下,对于沥青胶浆 RTFOT 前后的 $G^*/\sin \delta$ 、 $G^* \cdot \sin \delta$ 和 S,试验温度均为最显著的因素,其次为 F/A,矿粉类型影响最小。对于 RTFOT 前沥青胶浆的 $G^*/\sin \delta$,矿粉类型对应的 $P > 0.05$,因此,矿粉类型对 RTFOT 前沥青胶浆的 $G^*/\sin \delta$ 影响可视为基本无影响。

在因素间耦合作用下,F/A 和试验温度的耦合对 RTFOT 前后沥青胶浆的 $G^*/\sin \delta$ 、 $G^* \cdot \sin \delta$ 和 S 的影响均十分显著,而试验温度和矿粉类型之间的耦合作用仅对 $G^* \cdot \sin \delta$ 和 S 有显著的影响,F/A 和矿粉类型之间的耦合作用只对 $G^* \cdot \sin \delta$ 影响显著,对其他指标均基本无影响。

2.4 钢渣磨细粉对混合料性能的影响

粗、细集料均采用石灰岩集料,分别采用 SSFP 和 LP 矿粉制备两种不同的沥青混合料,并测试其高温性能、低温性能、疲劳性能以及水稳定性。其中 SSFP 和 LP 的用量均为集料总量的 4.0%,油石比均为 4.8%。两种沥青混合料的路用性能如图 8 所示。

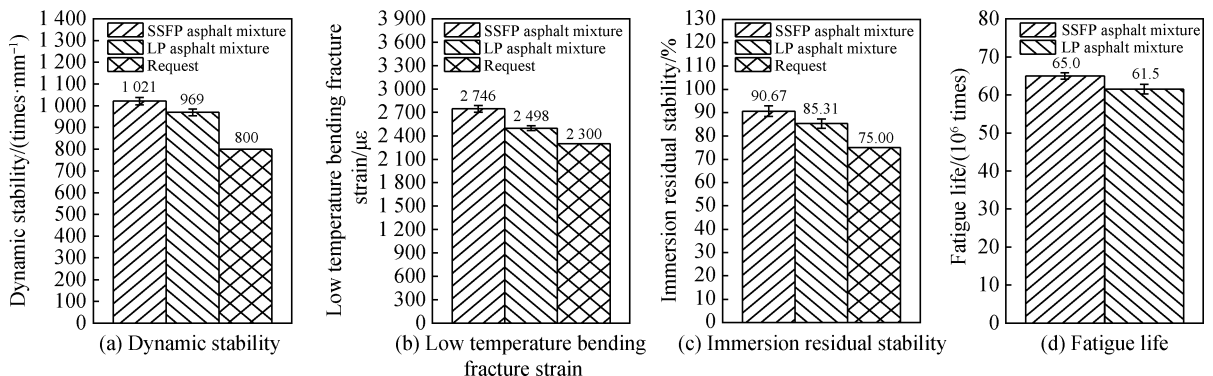


图 8 两种沥青混合料的路用性能

Fig. 8 Road performance of two asphalt mixtures

根据图8可知,两种沥青混合料的路用性能均满足规范要求,且使用SSFP替代沥青混合料中的LP后,混合料的高温性能、低温性能、疲劳性能以及水稳定性均有一定的提升。这与SSFP对沥青胶浆的性能影响规律一致。

相比于LP沥青混合料,SSFP沥青混合料的动稳定度提升了5.37%,低温弯曲破坏应变值提升了9.93%,浸水马歇尔残留稳定度提升了6.28%,疲劳寿命提升了5.69%。说明SSFP对混合料的低温性能贡献最大,对其高温性能贡献最小,这是SSFP与沥青在微观结构和成分方面的差异所致。就低温性能而言,钢渣中含有一定的金属氧化物成分,同时钢渣表面还有大量微细孔隙,大大提高了钢渣与沥青的相互作用面积,增强了两者的界面结合力,抑制了界面微裂缝的产生,从而显著提高了混合料的低温抗裂性能。而在高温条件下,沥青混合料的稳定性主要取决于沥青本身的热稳定性和集料之间的嵌挤作用,虽然SSFP因其相较于LP更高的刚度和坚硬程度使混合料的高温性能有所提升,但其在混合料中占比较小,因此在改善混合料高温性能方面无法发挥出较大的作用。

3 结 论

1)在同一测试温度下,当F/A从0.6提升至1.2,两种胶浆的高温性能、疲劳性能和低温性能均有所提升,且SSFP沥青胶浆的提升效果整体优于LP沥青胶浆,其中低温性能提升幅度最大,SSFP沥青胶浆的低温性能提升了190.57%。而在相同F/A下,SSFP制备的沥青胶浆各项性能均优于LP制备的沥青胶浆。

2)两种沥青胶浆在不同温域内的临界破坏温度均随F/A增大而提高,即F/A的增大可提升沥青胶浆的高温性能,但会损伤其疲劳性能和低温性能。其中SSFP沥青胶浆的高温临界破坏温度增幅最大,为6.86℃。

3)使用SSFP替代沥青混合料中的LP后,混合料的高温性能提升了5.37%,低温性能提升了9.93%,抗疲劳性能提升了5.69%,水稳定性提升了6.28%。钢渣细集料以磨细矿粉的形式应用于沥青混合料中具备较强的可行性和推广价值。

参 考 文 献

- [1] 蒋 亮. 钢渣氧化重构及重构钢渣的组成、结构与性能[D]. 北京: 中国建筑材料科学研究总院, 2018.
JIANG L. Oxidation reconstruction of steel slag and composition, structure and properties of reconstructed steel slag[D]. Beijing: China Building Materials Academy, 2018 (in Chinese).
- [2] 刘名扬, 周 彬, 颜 峰, 等. 铁尾矿-钢渣集料微表处混合料路用性能及耐久性试验研究[J]. 硅酸盐通报, 2022, 41(9): 3176-3189.
LIU M Y, ZHOU B, YAN F, et al. Experimental study on road performance and durability of iron tailings-steel slag aggregate micro-surface mixture[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2022, 41(9): 3176-3189 (in Chinese).
- [3] 李 松, 张彩利, 丁维哲, 等. 钢渣-沥青界面黏附特性研究[J]. 大连理工大学学报, 2022, 62(3): 254-262.
LI S, ZHANG C L, DING W Z, et al. Research on adhesion characteristics of steel slag-asphalt interface[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2022, 62(3): 254-262 (in Chinese).
- [4] JI J, DONG Y, ZHANG R, et al. Effect of water absorption and loss characteristics of fine aggregates on aggregate-asphalt adhesion[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2021, 25(6): 2020-2035.
- [5] LI C, XIE X F, WANG L, et al. Analysis of low-temperature rheological and mechanical properties of steel slag asphalt mixture based on direct tensile test[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2023, 35(3): 04022463.
- [6] 李灿华, 向晓东, 周溪滢. 钢渣开级配透水沥青混合料及性能研究[J]. 建筑材料学报, 2015, 18(1): 168-171.
LI C H, XIANG X D, ZHOU X Y. Investigation of performance of porous open graded steel slag asphalt mixture[J]. Journal of Building Materials, 2015, 18(1): 168-171 (in Chinese).
- [7] 申爱琴, 喻沐阳, 郭寅川, 等. 钢渣沥青混合料疲劳性能及改善机理[J]. 建筑材料学报, 2018, 21(2): 327-334.
SHEN A Q, YU M Y, GUO Y C, et al. Fatigue properties and improvement mechanism of steel slag asphalt mixture[J]. Journal of Building Materials, 2018, 21(2): 327-334 (in Chinese).
- [8] 刘晋周, 张金生, 于 斌, 等. 钢渣矿物组分与沥青黏附的分子模拟和试验研究[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2021, 51(6): 1009-1017.
LIU J Z, ZHANG J S, YU B, et al. Molecular simulation and experimental research on adhesion between mineral components of steel slag and asphalt[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2021, 51(6): 1009-1017 (in Chinese).
- [9] CHEN X B, WEN W, ZHOU J G, et al. Research on the interaction capability and microscopic interfacial mechanism between asphalt-binder

- and steel slag aggregate-filler[J]. *Coatings*, 2022, 12(12): 1871.
- [10] MOURA C, NASCIMENTO L, LOUREIRO C, et al. Viability of using high amounts of steel slag aggregates to improve the circularity and performance of asphalt mixtures[J]. *Applied Sciences*, 2022, 12(1): 490.
- [11] 陈伟, 韦金城, 徐希忠, 等. 不同钢渣掺量的沥青玛蹄脂碎石混合料路用性能[J]. *科学技术与工程*, 2022, 22(21): 9331-9338.
CHEN W, WEI J C, XU X Z, et al. Road performance of stone matrix asphalt with different steel slag contents[J]. *Science Technology and Engineering*, 2022, 22(21): 9331-9338 (in Chinese).
- [12] JI K, SHI C C, JIANG J, et al. Determining the long-term skid resistance of steel slag asphalt mixture based on the mineral composition of aggregates[J]. *Polymers*, 2023, 15(4): 807.
- [13] 申爱琴, 刘波, 郭寅川, 等. 隧道路面钢渣沥青混合料抗滑性能衰减试验研究[J]. *建筑材料学报*, 2019, 22(2): 284-291.
SHEN A Q, LIU B, GUO Y C, et al. Skid resistance attenuation of steel slag asphalt mixtures on tunnel pavement[J]. *Journal of Building Materials*, 2019, 22(2): 284-291 (in Chinese).
- [14] JIANG Q, LIU W, WU S P. Analysis on factors affecting moisture stability of steel slag asphalt concrete using grey correlation method[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 397: 136490.
- [15] GUO Y C, WU H S, SHEN A Q, et al. Study of the long-term water stability of asphalt mixtures containing steel slag aggregate[J]. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2020, 34(8): 877-902.
- [16] 秦林清. 陈化对钢渣及其沥青混凝土的体积和水稳性能影响研究[J]. *中外公路*, 2019, 39(6): 264-270.
QIN L Q. Influence of ageing effect on steel slag and performance of asphalt concrete volume and its water stability[J]. *Journal of China & Foreign Highway*, 2019, 39(6): 264-270 (in Chinese).
- [17] 谢君. 钢渣沥青混凝土的制备、性能与应用研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2013.
XIE J. Study on preparation, properties and application of steel slag asphalt concrete[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2013 (in Chinese).
- [18] 曹林, 汪森. 沥青玛蹄脂钢渣混合料性能试验研究[J]. *山西建筑*, 2013, 39(18): 94-95.
CAO L, WANG M. Experimental research on stone matrix asphalt mixtures containing steel slag[J]. *Shanxi Architecture*, 2013, 39(18): 94-95 (in Chinese).
- [19] 石宁. 美国 SHRP 基于性能的沥青结合料分级规范[J]. *黑龙江交通科技*, 2004, 27(7): 41-43.
SHI N. Performance-based asphalt binder classification specification of SHRP in the United States[J]. *Communications Science and Technology Heilongjiang*, 2004, 27(7): 41-43 (in Chinese).
- [20] ASTM. Standard specification for performance graded asphalt binder: ASTM D6373-15[S]. ASTM International, 2015.
- [21] XUE Y J, WU S P, HOU H B, et al. Experimental investigation of basic oxygen furnace slag used as aggregate in asphalt mixture[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2006, 138(2): 261-268.
- [22] 刘海霞, 张鑫, 韩耿斌, 等. SMA-5 钢渣沥青混合料的组成设计与性能评价[J]. *硅酸盐通报*, 2023, 42(10): 3778-3786.
LIU H X, ZHANG X, HAN G B, et al. Composition design and performance evaluation of SMA-5 steel slag asphalt mixture[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2023, 42(10): 3778-3786 (in Chinese).
- [23] 巴怀强. 钢渣集料对微表处性能影响及灰色关联度研究[J]. *铁道建筑技术*, 2023(7): 9-12 + 20.
BA H Q. Influence of steel slag aggregate on micro-surface properties and grey relational degree analysis[J]. *Railway Construction Technology*, 2023(7): 9-12 + 20 (in Chinese).
- [24] 张争奇, 梁庆武, 郑文章, 等. 混配型钢渣沥青混合料抗滑耐久性能研究[J/OL]. *应用化工*: 1-7 (2023-09-28) [2023-10-27]. <https://doi.org/10.16581/j.cnki.issn1671-3206.20230927.003>.
ZHANG Z Q, LIANG Q W, ZHENG W Z, et al. Study on the skid durability of mixed steel slag asphalt mixture[J/OL]. *Applied Chemical Industry*: 1-7 (2023-09-28) [2023-10-27]. <https://doi.org/10.16581/j.cnki.issn1671-3206.20230927.003> (in Chinese).