

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2025.05.016

# 掺钢渣应力吸收层沥青混合料路用性能研究

郑志东

(福州交通建设有限责任公司, 福建 福州 350000)

**摘要:** 为探究钢渣替代普通集料对应力吸收层沥青混合料性能的影响,基于马歇尔设计方法,分别设计了普通集料和部分钢渣集料替代的两种 AC-5 应力吸收层沥青混合料。系统评价了混合料的高温稳定性、低温抗裂性、水稳定性等路用性能,并利用 UTM 试验机测试了其疲劳性能和多种开裂模式(I型、II型及I/II复合型)下的抗裂性能。结果表明:采用钢渣替代普通集料后,混合料的高温稳定性(以动稳定度表征)显著提升,增幅达12.3%;两种混合料的低温性能相当;钢渣混合料的水稳定性(以劈裂冻融强度比表征)得到改善;在15℃条件下,钢渣沥青混合料的疲劳寿命较普通集料混合料大幅提高了72.2%,展现出优异的抗疲劳性能;在评估I型、II型和I/II复合型开裂模式时,通过荷载峰值、破坏位移和断裂能三项指标对比,钢渣沥青混合料的抗裂性能均优于普通集料混合料,其中以断裂能表征的抗裂性能差异最为显著。钢渣作为集料应用于应力吸收层沥青混合料,能有效提升其高温稳定性、水稳定性和抗疲劳及抗裂性能,具有良好应用潜力。

**关键词:** 钢渣;应力吸收层;路用性能;疲劳性能;抗裂性能

中图分类号: U416.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2025)05-0113-08

## Road Properties of Steel Slag Stress Absorbing Layer Mixture

ZHENG Zhidong

(Fuzhou Communication Construction Group, Fuzhou, Fujian 350000, China)

**Abstract:** In order to explore the effects of steel slag substitution of ordinary aggregate on the performance of stress absorbing layer asphalt mixture, based on the Marshall design method, two AC-5 stress absorbing layer asphalt mixtures were designed for ordinary aggregate and partial steel slag aggregate. This work systematically evaluated the pavement performance of the mixture, including high-temperature stability, low-temperature crack resistance, and water stability, and the fatigue properties and crack resistance under various cracking modes (type I, type II and I/II composite type) were tested by UTM testing machine. The results show that the high temperature stability of the mixture (characterized by dynamic stability) is significantly improved by 12.3% after the steel slag is used to replace the ordinary aggregate. The low temperature performance of the two mixtures is comparable. The water stability of the steel slag mixture, characterized by the splitting freeze-thaw strength ratio was improved. Under the condition of 15℃, the fatigue life of steel slag asphalt mixture is greatly increased by 72.2% compared with that of ordinary aggregate mixture, showing excellent fatigue resistance. In the evaluation of type I, type II and I/II composite cracking modes, the crack resistance of steel slag asphalt mixture is better than that of ordinary aggregate mixture by the comparison of load peak, failure displacement and fracture energy, and the difference in crack resistance represented by fracture energy is the most significant. In summary, steel slag is used as an aggregate in asphalt mixture of stress absorbing layer, which can effectively improve its high temperature stability, water stability, fatigue resistance and crack resistance, and has good application potential.

**Keywords:** steel slag; stress absorbing layer; road performance; fatigue performance; crack resistance performance

钢渣是炼钢时衍生出的副产物,占钢产量的 1/10,随着中国钢铁行业的快速发展,炼钢产生的副产物钢渣的产量也在大量增长,然而当下国内对于钢渣的处理利用效率仅为 29.5%,大部分钢渣仍被丢弃或简单填埋等方式处理<sup>[1-2]</sup>。被利用的钢渣中,主要用途包括筑路、治理土壤污染、处理废水、用作水泥原材料等<sup>[3-7]</sup>,其中应用在道路上的钢渣还不足 8%。然而,经高温熔炼过后的钢渣具有高活性、高密度以及表面多孔、纹理丰富的特点,使其与沥青间具有更好的粘附性能<sup>[8-9]</sup>,因此众多学者开展了钢渣替代普通矿石集料来制备钢渣沥青混合料的性能的研究<sup>[10-11]</sup>。曹静<sup>[12]</sup>通过在钢渣表面添加水泥净浆对其进行改性,研究改性后钢渣对沥青混合料疲劳性能的影响。杨泓全等<sup>[13]</sup>研究了季节性冻结区不同钢渣含量的沥青混合料的性能。Has-san 等<sup>[14]</sup>研究了钢渣沥青混合料在沙漠气候区的使用性能。已有研究多从钢渣替代粗集料的角度进行研究,发现大部分钢渣做为粗集料力学性能良好,耐磨性好,但进行细集料替代研究的较少。

另一方面,应力吸收层作为沥青路面特殊的功能层,采用较细级配和高沥青含量,多用在半刚性基层上方或者“白改黑”工程中水泥混凝土路面板之上、沥青加铺层之下,起到延缓、抑制反射裂缝的作用,在国内已经有 20 余年的研究历史,早在 2003 年就对应力吸收层开展研究,随后李鹏飞<sup>[15]</sup>、王漾博<sup>[16]</sup>深入分析了应力吸收层沥青以及沥青混合料的性能。近年来,研究人员大多从级配、沥青改性剂等角度出发进行研究,如刘俊斌<sup>[17]</sup>研究了不同级配的应力吸收层混合料的性能,文献<sup>[18-19]</sup>通过研究添加不同的沥青改性剂,从改性沥青角度研究了

沥青材料对应力吸收层的影响。但是,目前尚无钢渣用于应力吸收层集料的研究。

综上所述,结合当下钢渣的回收利用现状,有必要对钢渣作为集料应用于应力吸收层沥青混合料的相关性能进行深入研究,为解决钢渣回收利用和进一步改进应力吸收层受力问题提供更多参考思路。为此,本文首先制备了应力吸收层所使用的 HVA/SBS 复合改性沥青,然后用马歇尔方法设计应力吸收层钢渣沥青混合料配合比,再通过混合料试验对比分析二者的高温、低温、水稳定性、抗疲劳性能以及抗裂性能。

## 1 试验材料及配合比设计

### 1.1 原材料

本文采用干法添加 HVA 高粘剂(high viscosity asphalt,简称 HVA)的 I-D 型 SBS 复合改性沥青,HVA 高粘剂和 I-D 型 SBS 改性沥青质量比为 6:94,SBS 改性沥青由厦门新立基股份有限公司生产,SBS 含量标称为 4.5%。HVA 高粘剂由中路高科(北京)技术有限公司提供,如图 1 所示,复合沥青性能如表 1 所示。



图 1 HVA 改性剂

表 1 HVA/SBS 复合改性沥青指标测试结果

针入度 /0.1 mm	5℃延度 /mm	软化点 /℃	弹性恢 复率/%	60℃动力 粘度/(Pa·s)	RTFOT		
					质量变化/%	25℃针入度比/%	5℃延度/mm
52	365	>95	99	210 000	-0.05	82	274

表 2 凝灰岩集料密度

粒径/mm	表观相对密度	毛体积相对密度
4.75~9.50	2.803	2.688
2.36~4.75	2.704	2.561
1.18~2.36	2.664	2.564
0.60~1.18	2.697	2.588
0.30~0.60	2.703	2.632
0.15~0.30	2.557	2.446
0.075~0.15	2.694	2.634

试验所用的普通矿石集料为凝灰岩,矿粉为石灰石矿粉,均由福州榕圣市政工程有限公司提供;钢渣由福建三明钢铁公司提供。集料的毛体积相对密度以及表观相对密度的试验结果如表 2 所示。试验前钢渣集料陈化存放了一年,各项性能指标结果如表 3 所示。对钢渣进行 XRD 分析,经仪器测试和 JADE 软件分析得到图谱如图 2 所示。

表3 钢渣集料性能指标

粒径/mm	表观相对密度	毛体积相对密度	洛杉矶磨耗值/%	针片状含量/%	压碎值/%	浸水膨胀率(10 d)/%	活性CaO含量/%
2.36~4.75	3.520	3.341	20.1	6.3	12.5	1.11	0.5
4.75~9.50	3.533	3.400	21.3				
指标要求	—	—	≤28.0	≤18.0	≤26.0	≤2.00	≤3.0

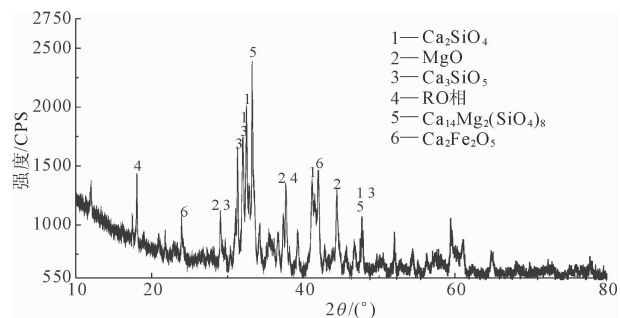


图2 钢渣 X 射线衍射图谱

由图2可知,钢渣的物相组成主要以Ca、Mg、Fe的固溶体形式存在,包括硅酸二钙(Ca<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>)、硅酸三钙(Ca<sub>3</sub>SiO<sub>5</sub>)、钙镁橄榄石、MgO、RO相以及黑钙铁矿(Ca<sub>2</sub>Fe<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)。其中硅酸二钙(Ca<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>)、硅酸三钙(Ca<sub>3</sub>SiO<sub>5</sub>)、钙镁橄榄石对应的衍射峰较强,说明三者为主要矿物相,这与国内其他研究结果相似<sup>[20]</sup>。

1.2 矿料级配曲线

本次级配设计试验参考了JTG F40中的AC-5型级配,表4为级配设计结果,合成级配曲线见图3。

表4 级配设计

粒径/mm	级配上限/%	级配下限/%	级配中值/%	合成级配/%
9.5	100	100	100	100
4.75	100	80	90	96
2.36	85	60	72	76
1.18	70	40	55	55
0.6	55	25	40	38
0.3	35	15	25	24
0.15	20	8	14	14
0.075	14	6	10	9

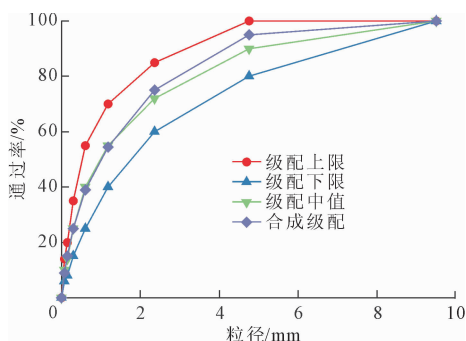


图3 级配曲线

刘勇<sup>[20]</sup>研究表明,若集料全替换为钢渣,钢渣表面的多孔构造会导致沥青用量的增加,进而导致成本增加,此外,钢渣颗粒的不均匀性、体积膨胀性等特性容易导致混合料出现开裂等不良现象,降低使用寿命,一般不建议将全部集料换为钢渣。因此,在本研究中,将4.75 mm~9.5 mm、2.36 mm~4.75 mm两档集料全部替换为钢渣,其余各档集料均为凝灰岩集料。表5为未掺钢渣和掺加钢渣的沥青混合料各档集料的质量占比,其中掺钢渣的各档集料质量分数由相应档位的凝灰岩质量分数通过等体积置换原则计算得到。从表5中看到,由于钢渣密度较大,等体积替换后按质量分数计算,钢渣所在两档粒径的质量所占比重有所增加,其他档位质量所占比重有所降低。

表5 两种集料中各档集料质量占比

集料粒径/mm	掺钢渣集料/%	凝灰岩集料(未掺钢渣)/%
4.75~9.50	6.4	4.0
2.36~4.75	22.9	20.0
1.18~2.36	18.0	20.6
0.60~1.18	16.2	17.4
0.30~0.60	13.4	14.0
0.15~0.30	9.8	10.0
0.075~0.15	4.3	5.0
矿粉	9.0	9.0

1.3 混合料配合比设计

试验初步设定5个油石比:7.5、8.0、8.5、9.0、9.5。经试验测试及计算得到每组油石比下混合料的各项体积指标及物理指标,以2.5%空隙率作为应力吸收层混合料设计指标,计算得到普通集料沥青混合料、掺钢渣沥青混合料最佳油石比分别为8.4%和8.6%,混合料马歇尔试验各技术指标见表6,后续混合料各项性能试验均采用该油石比。

表6 应力吸收层混合料指标结果表

混合料类型	VV/%	VA/%	VMA/%	VFA/%	稳定度/kN	流值/mm	最佳油石比/%
普通集料	2.4	17.7	20.1	87.2	11.24	8.50	8.4
掺钢渣集料	2.2	19.2	21.0	91.2	10.74	10.65	8.6

## 2 路用性能对比研究

### 2.1 高温稳定性

应力吸收层功能以抗拉裂为主,但用于白改黑路面时,结构层位较高,在夏季工作环境属于高温环境,应具有相应的高温稳定性。本文通过标准车辙试验方法,对钢渣应力吸收层混合料的高温抗变形性能进行了评估。表 7 为试验结果。试验所用的车辙板采用意大利 Matest 轮碾成型机成型。

表 7 动稳定度试验结果

普通集料复合改性混合料 动稳定度/(t·mm <sup>-1</sup> )	掺钢渣复合改性混合料 动稳定度/(t·mm <sup>-1</sup> )	变化比例 /%
3250	3640	12.3

动稳定度与马歇尔试验的稳定度均可以表征沥青混合料的高温性能。比较表 7 的动稳定度与表 6 的马歇尔试验结果,可以看到二者表征的高温性能评价结果并不一致。马歇尔试验结果显示,掺钢渣沥青混合料的稳定度较凝灰岩集料混合料略低些,但相差不超过 5%,考虑试验结果存在偶然性,可认为两种混合料的稳定度相当,而以流值比较,掺钢渣沥青混合料较凝灰岩混合料大了 25%,即以稳定度和流值来表征抗车辙变形能力时,凝灰岩沥青混合料更好。但车辙试验结果与之相反,掺钢渣混合料的动稳定度较凝灰岩混合料提升了 12.3%。目前认为动稳定度较马歇尔试验结果更能表征沥青混合料的实际高温抗变形能力,因此,从动稳定度结果来看,掺钢渣应力吸收层高温稳定性性能更好一些。其原因可能在于钢渣表面较凝灰岩的纹理更加丰富,压碎值更高,提高了集料间的嵌挤作用,进而提升了沥青混合料在车轮荷载下的抗变形能力。应力吸收层作为白改黑路面整体的一部分时,位于水泥混凝土面板之上,层位较高,较高的动稳定度使其作为抗裂功能层在夏季高温下抵抗变形保持厚度均匀性,有助于在低温季节到来时更好地抵抗反射裂缝的作用。

### 2.2 低温抗裂性

本研究采用间接拉伸试验与低温弯曲小梁试验相结合的方法,系统评估沥青混合料的低温抗裂性能,同时,在规范推荐的 -10℃ 温度基础上加做了 0℃、10℃ 下的间接拉伸试验以及 -20℃ 下的低温弯曲小梁试验。表 8 为试验结果。根据表 8 可以看出,在各试验温度下,普通集料混合料与掺钢渣混合料的低温弯曲小梁试验结果基本一致,间接拉伸试

验结果也基本一致;且随着温度的增加,两种混合料破坏拉伸应变值近似成线性增长。-20℃ 下,两种混合料的低温弯曲小梁试验破坏应变相差不到  $100 \times 10^{-6}$ ,在基数为  $7\,000 \times 10^{-6}$  级别下,该差值可以忽略;在温度为 -10℃ 下,两种混合料破坏弯曲应变相差仅 2%。间接拉伸试验结果表明,两种混合料的劈裂劈坏应变除了在 0℃ 时的结果区别较大外,在 -10℃ 与 10℃ 时都非常接近。主要原因可能是在沥青用量差别不大的情况下,无论集料是钢渣还是凝灰岩,低温性能主要依赖于沥青性能,因此两种混合料采用同一种沥青时低温性能区别不大。综上所述,可以说掺钢渣集料沥青混合料与普通集料沥青混合料具有大体相当的低温抗裂性能。

表 8 低温破坏应变试验结果 单位:  $\times 10^{-6}$

混合料 种类	-20℃	-10℃		0℃	10℃
	低温弯曲 试验	低温弯曲 试验	间接拉伸 试验	间接拉伸 试验	
普通集料	7210	15200	5500	10200	18750
掺钢渣集料	7301	14900	5636	11980	19101

### 2.3 水稳定性

本研究通过浸水马歇尔试验和冻融劈裂试验评价其水稳定性。表 9 与图 4 为试验结果。

表 9 水稳定性试验结果

项目	普通集料	掺钢渣集料	
浸水马歇尔	浸水前稳定度/kN	11.2	11.1
	浸水后稳定度/kN	10.9	11.0
	残留稳定度/%	97.0	99.0
	规范要求	≥85%	
劈裂冻融	冻融前/MPa	1.05	1.06
	冻融后/MPa	0.93	0.950
	残留强度比/%	88.5	89.4
	规范要求	≥80%	

根据试验结果可以看出,两种混合料在残留稳定度和劈裂强度比这两项指标上均符合规范标准,且表现出良好的性能。其中,掺钢渣沥青混合料的残留稳定度高达 99%,普通集料沥青混合料为 97%;二者的劈裂冻融试验结果基本一致,均在 89% 左右。原因应该在于应力吸收层混合料的沥青用量较高,混合料剩余空隙率很小,浸水马歇尔模式下水分不容易通过孔隙进入混合料内部,而劈裂冻融模式的试验条件更严苛,从而结果略低。总体来说,两种混合料的水稳定性区别不大。

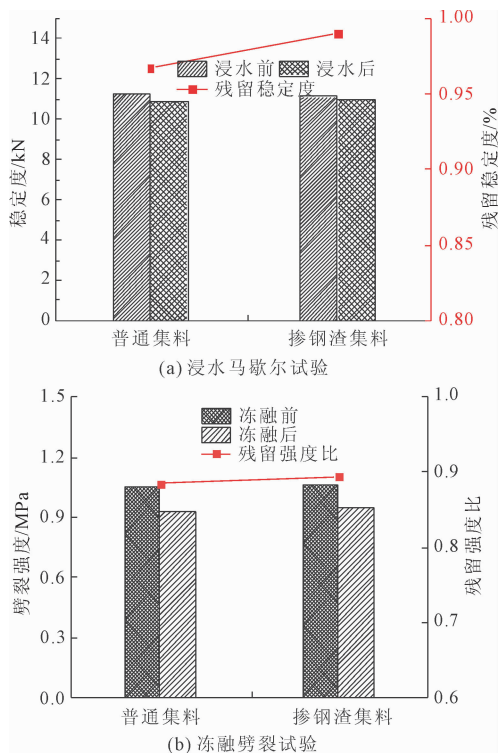


图 4 水稳定性试验

### 2.4 抗疲劳性能

应力吸收层主要用于延缓反射裂缝的发展,其下部的底板断裂带处常受到荷载的反复作用,因此应具备良好的抗疲劳性能。本试验采用意大利 Mat-test 轮碾成型机成型车辙板,然后切割成尺寸为 380 mm × 63 mm × 50 mm 的小梁,采用澳大利亚 IPC 的 UTM 万能试验机进行四点弯曲小梁疲劳试验。试验采取应变控制模式,应变值  $600 \times 10^{-6}$ ,荷载类型为正弦波,试验温度为 15℃、25℃。当试验温度为 15℃ 时,以劲度模量降至初始值 50% 时的加载次数作为疲劳寿命指标,当试验温度为 25℃ 时,经预试验发现疲劳寿命将大幅增加,为节省时间,试验的终止条件设定为:当材料模量下降至其初始模量值的 70% 时停止加载。两种混合料疲劳寿命结果、初始劲度模量和相应的累计耗散能如表 10 所示。

结果显示,在 15℃ 时,钢渣沥青混合料的疲劳寿命较普通集料提升了 72%,累计耗散能增加 60%,在 25℃ 时,达到相同损伤度时,钢渣应力吸收层的疲劳寿命提升了 68.4%,累计耗散能增加 32%。两种混合料沥青用量较为接近,可见集料中掺入钢渣后,由于钢渣的碱性和丰富的微孔构造对沥青形成较强的界面吸附作用,降低了荷载重复作用下集料-沥青黏附界面处微损伤的发展,从而对于应力吸收层混合料的疲劳性能有着较大的改善效果。

表 10 疲劳试验结果

混合料类型	初始劲度模量 /MPa		加载次数 $N_f$ /万次		累计耗散能 /kJ	
	15℃	25℃	15℃	25℃	15℃	25℃
普通集料	6731	2490	23.0	1.9	351	22
掺钢渣集料	7400	3230	39.6	3.2	562	29
变化比例/%	10.0	30.1	72.0	68.4	60.0	32.0

### 3 抗裂性能

应力吸收层主要应对水泥路面接缝因为温度下降引起的裂缝张开等作用引起的开裂。参考了刘朋飞等<sup>[21]</sup>对混合料抗裂模式的研究结果,采用带有切缝处理的半圆弯拉试件以及万能材料试验机 UTM 可以实现 I 型开裂模式、I/II 复合型和 II 型开裂模式,如图 5 所示。试验试件通过成型大型马歇尔试件获得,首先制备标准尺寸的大型圆柱形马歇尔试件(规格为 152.4 mm × 95.3 mm),随后利用切割设备将该试件均等分割为四份形状一致的半圆形样本。接着根据试验所需的开裂条件,在半圆形试件的底部预先开设切口,切口深度设定为 20 mm,宽度严格控制在 2~3 mm 之间;随后将处理完毕的试件放入 5℃ 恒温环境中持续保温至少 6 h,确保其整体温度均匀达到试验要求。随后在相同温度条件下,利用 UTM 试验机配备的劈裂夹具实施加载试验,加载速率控制为 5 mm/min。试验的终止条件设定为:当试件荷载达到峰值后下降至该峰值荷载的 50% 时停止加载,此时试件处于临界破坏状态,可认定其

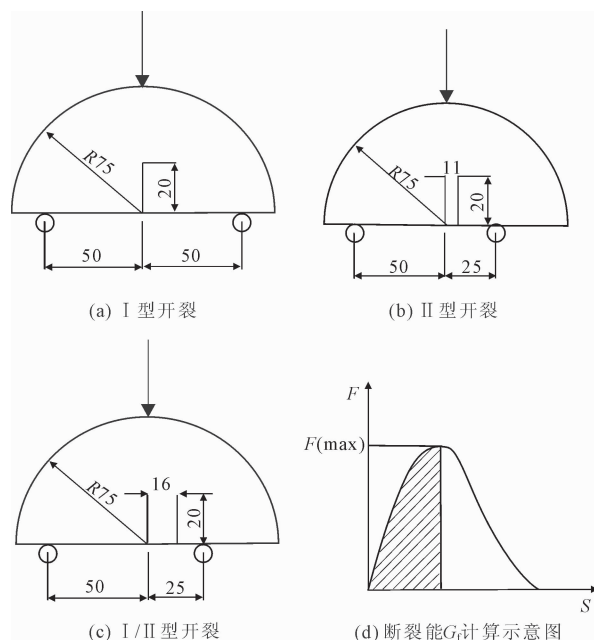


图 5 3 种开裂模式及断裂能  $G_f$  计算示意图

损伤程度已达到 100%。抗裂性能可以由试验获得的荷载峰值、试验结束时的位移、以及断裂能三种指标来表征。图 5(d) 为断裂能计算示意图。

### 3.1 I 型开裂模式

表 11 列出了两种混合料在 I 型开裂模式下的各项破坏指标试验结果,图 6 展示了试验中开裂试件的最终破坏形态,图 7 则呈现了混合料在开裂过程中的荷载-位移曲线。

表 11 不同混合料 I 型开裂试验结果

混合料种类	断裂能 $G_f$ /J	荷载峰值 $F_{max}$ /kN	破坏位移/mm
普通集料	9.88	6.23	2.58
掺钢渣集料	11.68	6.78	2.85
变化幅度/%	18.2	8.8	10.5



图 6 I 型开裂破坏试件

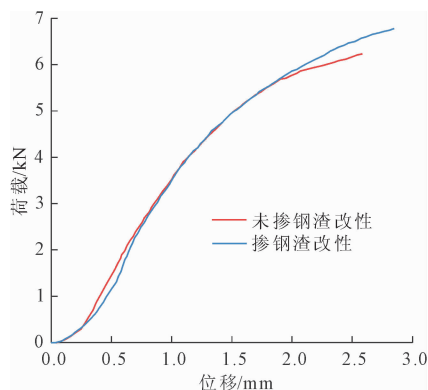


图 7 混合料 I 型开裂加载曲线

图 6 展示了在 I 型开裂模式下未掺钢渣改性混合料试件破坏后的形态。从图 6 可以看出,裂纹从切缝顶部开始萌生,并持续向加载点方向延伸,其扩展路径总体上保持直线形态。当裂纹扩展至试件顶部区域时,试件产生的平均水平位移约为 8 mm,该结果与 I 型开裂的基本特征相一致。两种混合料的荷载-位移曲线对比如图 7 所示,两类混合料的荷载-位移曲线在整体变化趋势上具有较高的一致性。在加载后期,普通改性沥青混合料表现出更为显著的荷载增长速率,而掺钢渣混合料在最终破坏时的荷载值与位移量均表现出更优的性能。

表 11 中试验数据结果还显示,在 I 型开裂模式

下,3 种破坏指标的判断结果均一致:掺钢渣沥青混合料 > 普通集料沥青混合料。还可以看出,指标不同,所表征的掺钢渣后混合料的抗裂性能提升幅度不同,由荷载峰值表征的提升幅度最小,为 8.8%,由断裂能表征的提升幅度最大,为 18%。

### 3.2 I/II 复合型开裂模式

表 12 为两种混合料在 I/II 复合型开裂模式下的各项破坏指标测试结果。

表 12 不同混合料 I/II 型开裂试验结果

混合料种类	断裂能 $G_f$ /J	荷载峰值 $F_{max}$ /kN	对应位移/mm
普通集料	14.87	8.16	3.19
掺钢渣集料	17.20	8.25	3.53
变化幅度/%	15.7	1.1	10.7

图 8 显示了 I/II 复合型开裂模式下未掺钢渣改性混合料试样破坏后的形态。从图 8 可以看出,裂缝起始于切缝顶端,并持续向荷载施加区域扩展,与初始切缝形成约  $10^\circ$  至  $15^\circ$  的夹角。在最终破坏时,试件同时产生了横向和竖向位移,横向位移约为 3 mm,竖向位移约为 2 mm,这一位移特征符合 I/II 复合型开裂的典型破坏模式。图 9 展示了两种混合料在加载过程中的荷载-位移曲线。从图 9 可以看出,二者的整体曲线发展趋势大致相同。随着加载持续进行,未掺钢渣的改性混合料表现出相对更快的荷载增长速率。然而在达到峰值荷载时,掺钢

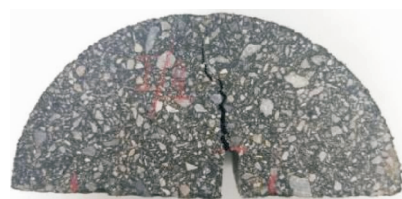


图 8 I/II 型开裂破坏试件

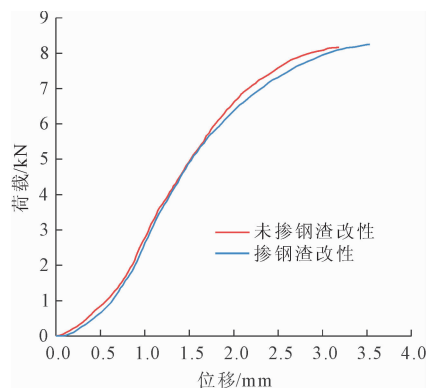


图 9 混合料 I/II 型开裂加载曲线

渣复合湿法改性混合料无论是在最大荷载值还是最终位移方面,均显示出优于未掺钢渣改性混合料的性能。

表12中试验数据结果显示,在I/II型开裂模式下,位移和断裂能2种破坏指标的判断结果均一致:掺钢渣沥青混合料>普通集料沥青混合料,而由荷载峰值表征的抗裂能力则非常接近。由断裂能表征的抗裂能力在掺钢渣以后提升幅度最大,为15.7%。由图9可知,在沥青含量非常接近的情况下,两种沥青混合料的位移-变形曲线形态也非常接近,但是区别在于掺钢渣后混合料能承受的最大位移增大,从而断裂能也相应增加,原因应该与疲劳试验一致,这主要是由于钢渣与沥青之间的粘结性能优于普通集料,从而使得掺入钢渣的沥青混合料表现出更优异的抗裂性能。

### 3.3 II型开裂模式

表13为两种混合料在II型开裂模式下的各项破坏性能指标测试结果,图10展示了试验中开裂试件的破坏形态,图11则提供了混合料在加载过程中的荷载-位移响应曲线。

表13 不同混合料II型开裂实验结果

混合料种类	断裂能 $G_f/J$	荷载峰值 $F_{max}/kN$	对应位移 /mm
普通集料	12.26	6.43	3.64
掺钢渣集料	15.14	6.73	3.97
变化幅度/%	23.5	4.7	9.1



图10 II型开裂破坏试件

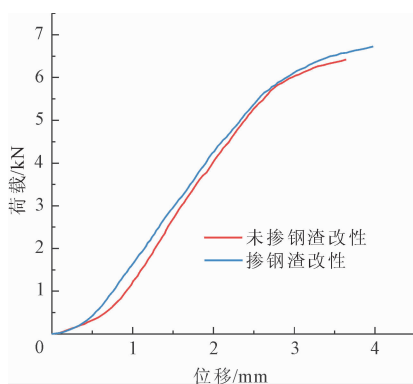


图11 混合料II型开裂加载曲线

表13中试验数据结果显示,在II型开裂模式下,2种破坏指标的判断结果均一致:掺钢渣沥青混合料>普通集料沥青混合料。还可以看出,指标不同,所表征的掺钢渣后混合料的抗裂性能提升幅度不同。由荷载峰值表征的提升幅度为4.7%,由断裂能表征的提升了23.5%。图10展示了II型开裂模式下未掺钢渣混合料破坏后的试样形态。从图10可见,在裂纹萌生阶段,其扩展路径与受力方向基本保持平行;随着裂缝进一步扩展,在后期发展阶段逐渐朝向荷载作用点偏转。破坏发生时,试件的横向位移小于1mm,竖向位移处于3mm~4mm范围内,方向与外力方向大体一致,且数值与加载点的竖向位移值相近,表明试件的破坏模式主要表现为剪切破坏。图11为两种混合料的荷载-位移曲线对比,两者曲线总体变化趋势相似。在加载初期,未掺钢渣改性混合料的荷载增长较为缓慢,而掺钢渣混合料则表现出更明显的增幅。随着试验的进行,未掺钢渣混合料的荷载增长率逐渐提高。但在达到峰值荷载时,掺钢渣沥青混合料在荷载承载能力和变形能力两方面仍优于未掺钢渣改性混合料。

综上,I型、I/II复合型和II型三种开裂模式的抗裂性能试验结果表明,从荷载峰值、破坏位移和断裂能等不同角度判断,掺钢渣应力吸收层沥青混合料的抗裂能力均优于普通沥青混合料。这应该是由于钢渣集料本身的碱性和粗糙的表面结构,使其与沥青之间的物理粘结效果优于常规石质集料。同时,钢渣中含有多种活性化学成分,在高温拌和过程中,钢渣可能与沥青发生化学吸附作用,并在界面区域形成化学键合,从而有效提升混合料的抗裂能力。

## 4 结论

本文采用复合改性沥青,将集料部分替代成钢渣,研究了普通集料和掺钢渣应力吸收层沥青混合料的高温、低温、水稳以及疲劳性能,得到结论如下:

(1) 与普通集料应力吸收层混合料掺钢渣应力吸收层混合料的动稳定度提高了12.3%;而低温性能与水稳定性相当。

(2) 疲劳试验结果表明,集料掺钢渣可以较大幅度地提升混合料的抗疲劳性能,15℃时的疲劳寿命、累计耗散能分别提升了72%、60%;25℃时则提高了68%、32%。

(3) 抗裂试验结果表明,I型、I/II复合型和II型三种开裂模式下,从荷载峰值、破坏位移和断裂能等不同角度判断,掺钢渣应力吸收层沥青混合料

的抗裂性能均优于普通沥青混合料。

### 参考文献:

- [1] 黄有洋. 钢渣填料除磷特性与机理研究[D]. 长沙:中南林业科技大学, 2024.
- [2] 王君天, 丁 鹏, 沈建方, 等. 冶金固体废物综合处理应用实践[J]. 冶金设备, 2024, (S1): 159-162, 142.
- [3] Tang Xianyuan, Guo Bin, Ma Jiuling, et al. Study on the compressive strength of Ultra-High performance concrete formulated with steel slag powder instead of quartz powder [C]//2021 7th International Conference on Hydraulic and Civil Engineering & Smart Water Conservancy and Intelligent Disaster Reduction Forum (ICHCE & SWIDR), Nanjing, China, 2021: 669-674.
- [4] Tomar G, Panwar G. Partial replacement of cement by using steel slag [C]//2022 3rd International Conference on Intelligent Engineering and Management (ICIEM), London, United Kingdom, 2022: 244-248.
- [5] 万佳磊, 冯亚松, 李双杰, 等. 干湿循环对新型钢渣基固化剂处理镍锌复合污染黏土的浸出和物理力学特性影响研究[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(S2): 213-216.
- [6] 吴景卿, 郜华萍, 万 欣, 等. 改性钢渣对水中磷吸附性能的研究[J]. 非金属矿, 2021, 44(3): 96-98, 102.
- [7] Wang Xuying, Zhao Jianye, Wang Lin, et al. Strength test of steel slag powder-ground granulated blast-furnace slag powder-fly ash-cement solidified soft soil [C]//2021 7th International Conference on Hydraulic and Civil Engineering & Smart Water Conservancy and Intelligent Disaster Reduction Forum (ICHCE & SWIDR), Nanjing, China, 2021: 578-582.
- [8] 王利波, 吕维前, 王雨露, 等. 钢渣集料表面形貌对沥青吸收与黏附性能的影响分析[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(33): 14406-14419.
- [9] 胡培琦, 安伟亮, 陈先华. 基于表面能理论评价钢渣粗集料-沥青黏附性[J]. 现代交通与冶金材料, 2025, 5(1): 109-114. .
- [10] 宋俊涛. 热再生钢渣沥青混合料性能研究[J]. 中外公路, 2021, 41(4): 287-291.
- [11] 张彩利, 王 超, 李 松, 等. 钢渣沥青混合料水稳定性研究[J]. 硅酸盐通报, 2021, 40(1): 207-214.
- [12] 曹 静. 钢渣表面改性对沥青混合料疲劳耐久性的影响[J]. 新型建筑材料, 2020, 47(2): 32-35, 44.
- [13] 杨泓全, 王龙林, 王祺顺, 等. 季冻区钢渣沥青混合料路用性能和冻融耐久性[J]. 公路工程: 2022, 47(1): 123-129.
- [14] Hassan Khaled E, Mohamed I E Attia, Murray Reid, et al. Performance of steel slag aggregate in asphalt mixtures in a hot desert climate [J]. Case Studies in Construction Materials, 2021, 14: e00534.
- [15] 李鹏飞. 复合式应力吸收层的路用性能与动态响应研究[D]. 保定: 河北大学, 2022.
- [16] 王漾博. 玄武岩纤维橡胶沥青应力吸收层性能试验研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2022.
- [17] 刘俊斌. 摊铺式橡胶沥青应力吸收层混合料设计和性能研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2021.
- [18] 赵 彦. 高弹改性沥青在应力吸收层中的应用研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2021.
- [19] 贾 鹏. 不同沥青混合料应力吸收层路用性能研究[J]. 青海交通科技, 2024, 36(6): 69-72.
- [20] 刘 勇. 福建省钢渣沥青混合料的制备与应用研究[D]. 福州: 福州大学, 2020.
- [21] 刘朋飞. 干湿循环作用对沥青混合料混合断裂模式的影响分析[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2020.