

DOI: 10.20035/j.issn.1671-2668.2023.04.011

掺钢渣再生沥青混合料性能研究

刘莹

(湖南省农林工业勘察设计研究总院, 湖南 长沙 410007)

**摘要:**以钢渣代替粗集料,通过车辙试验、小梁弯曲试验、浸水马歇尔试验、半圆弯曲试验、构造深度与摆值试验等室内试验对不同再生沥青掺量(10%~30%)的掺钢渣再生沥青混合料性能进行评价,并与普通 SMA 混合料对比,研究掺钢渣再生沥青混合料的适用条件。结果显示,掺钢渣再生沥青混合料具有比 SMA 混合料更好的高温稳定性和抗断裂性能,可显著提高混合料的摆值;随着再生沥青掺量的增大,混合料高温稳定性提高、抗断裂性能略有下降、构造深度与摆值无显著变化;掺钢渣后混合料的水稳定性降低,且随着再生沥青掺量的增大而减小。综合分析,工程应用中,应根据工程项目所在气候分区的低温破坏应变要求选取再生沥青控制掺量。

**关键词:**公路;钢渣;再生沥青;路用性能

**中图分类号:**U416.217

**文献标志码:**A

**文章编号:**1671-2668(2023)04-0057-04

随着公路建设里程的飞速增长,公路养护里程增大。据统计,截至 2020 年底,公路养护里程达到 514.40 万 km,占公路总里程的 99.0%<sup>[1]</sup>。由于沥青路面占比大,沥青路面大中修产生的沥青混合料回收料急剧增多,其处置利用成为研究热点。目前对再生沥青、再生沥青混合料的应用进行了较广泛的研究,为沥青混合料回收料的有效利用奠定了较好的基础<sup>[2-3]</sup>。相较于新沥青,再生沥青性能有一定程度降低。经预处理的钢渣具有良好的物理、力学性能,在改善沥青混合料力学特性、抗滑性能方面具有较好的效果<sup>[4]</sup>。但钢渣作为高吸水性材料,对沥青混合料抗水损害性能有不利影响。本文将钢渣与再生沥青同时应用于沥青混合料中,通过室内试验,探究钢渣与再生沥青混合使用的可行性及适用条件。

1 原材料与试验方法

1.1 原材料

(1) 钢渣。电弧炉钢渣是炼钢厂在 1 500 ℃ 温度条件下熔炼铁屑产生的人工集料。钢渣冷却经适当工艺处理后,体积膨胀特性消除,具有良好的物理、力学性能,且抗裂、耐磨,可部分替代天然集料。为降低钢渣膨胀性及活性对沥青混合料性能的影响,采用陈伏 1 年的钢渣进行试验,其主要技术指标见表 1。由表 1 可知:除含水率外,钢渣的其他技术指标均符合 JTG F40—2004《公路沥青路面施工技

术规范》<sup>[5]</sup>对高等级公路上面层材料技术指标的要求,且钢渣的吸水率小于 3.0%,符合该规范对高速公路其他结构层材料技术指标的要求(≤3.0%)。钢渣吸水率过大主要是由于其表面微孔隙较多。

表 1 钢渣集料的主要物理、力学指标

检测项目	各档钢渣的技术指标		技术要求
	5~10 mm	10~15 mm	
吸水率/%	2.7	2.3	≤2.0
表观相对密度	3.395	3.276	≥2.6
压碎值/%	—	16.9	≤26
磨光值/%	—	55	≥42
洛杉矶磨耗值/%	15.3	15.7	≤28
针片状颗粒含量/%	6.9	10.1	粒径大于 9.5 mm 时, ≤12;粒径小于 9.5 mm 时, ≤18

(2) 沥青。采用 SBS 改性沥青和由高速公路上面层沥青混合料分离得到的 SBS 再生沥青(RA)。掺钢渣再生沥青混合料和普通 SMA 沥青混合料(对比组)均采用 SMA-13 级配,细集料采用石灰岩,填料采用石灰岩研磨矿粉,普通 SMA 沥青混合料的粗集料采用玄武岩,所有集料的技术性能均满足 JTG F40—2004《公路沥青路面施工技术规范》

的要求。普通 SMA 沥青混合料的最佳油石比为 5.8%。掺钢渣再生沥青混合料采用钢渣作为粗集料,再生沥青掺量分别为 10%、20%、30%(与沥青的质量比),再生剂掺量为再生沥青质量的 4%,最佳油石比为 6.0%。上述 4 组沥青混合料分别标记为 SMA、10%RA、20%RA、30%RA。

## 1.2 试验方法

对上述 4 组混合料的常规路用性能及抗断裂性能、抗滑性能等进行评价,评价指标包括动稳定度、车辙深度、低温破坏应变、残留稳定度、冻融劈裂强度、断裂能、构造深度、摆值(见图 1)。

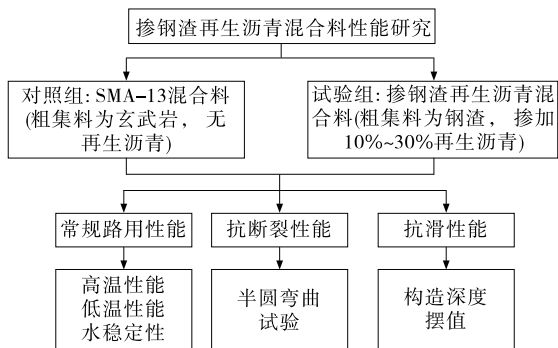


图 1 掺钢渣再生沥青混合料性能评价的技术路线

高温性能、低温性能和水稳定性试验参照 JTG E20—2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》<sup>[6]</sup>进行,构造深度、摆值试验参照 JTG 3450—2019《公路路基路面现场测试规程》<sup>[7]</sup>进行。抗断裂性能通过半圆弯曲试验评价<sup>[8-9]</sup>,试验步骤及评价指标如下:将直径 150 mm 的马歇尔试件切割成高度为 50 mm 的半圆形试件,在试件中部切割深度 15 mm、宽度 1.5 mm 的预留裂缝;在 25 ℃条件下,按图 2 所示方式进行试验,其中压头加载速率为 50 mm/min<sup>[10]</sup>;根据加载至破坏过程的荷载一位移曲线,按式(1)计算断裂能  $G_f$ 。

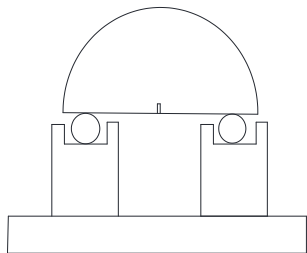


图 2 半圆弯曲试验示意图

$$G_f = \frac{W_f}{A_{lig}} \quad (1)$$

式中: $W_f$ 为试件断裂功; $A_{lig}$ 为试件韧性区面积。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 常规路用性能

#### 2.1.1 高温稳定性

按照 JTG E20—2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》对 4 组混合料进行高温车辙试验,试验温度 60 ℃,轮压 0.7 MPa,试件尺寸为 300 mm×300 mm×50 mm。试验前,将试件连同试模置于(60±1) ℃恒温烘箱中保温不少于 5 h。试验结果见图 3。

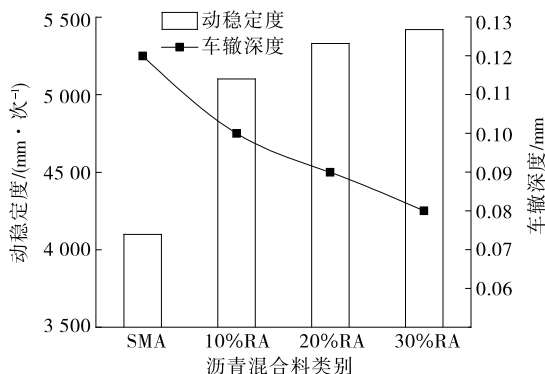


图 3 不同沥青混合料的高温稳定性对比

从图 3 可以看出:1) 4 种沥青混合料的动稳定度均符合 JTG F40—2004《公路沥青路面施工技术规范》对 SMA 改性沥青动稳定度 $\geq 3000$ 次/mm 的要求;掺钢渣再生沥青混合料的高温稳定性比普通 SMA 混合料更好,动稳定度提高 24%~32%,车辙深度降低 0.02~0.04 mm。这是由于相较于玄武岩,钢渣具有更好的棱角性,且钢渣表面更粗糙,嵌挤作用更好,因而沥青混合料抗剪强度和高温性能提高。2) 随着再生沥青掺量的增大,掺钢渣再生沥青混合料的动稳定度小幅增大、车辙深度减小,高温稳定性逐渐提高。这是由于再生沥青经历老化过程后黏度增大,在荷载作用下更难发生迁移,高温稳定性增强。

#### 2.1.2 低温抗裂性能与水稳定性

不同沥青混合料低温小梁弯曲试验(-10 ℃)、浸水马歇尔试验、冻融劈裂试验结果见图 4、图 5。

由图 4、图 5 可知:1) 与 SMA 混合料相比,掺钢渣再生沥青混合料的低温抗裂性能与水稳定性下降。这是由于钢渣吸水率较大,在水及冻融循环作用下,钢渣与沥青膜间的黏结性能下降,浸水、冻融后混合料的力学性能降低,导致低温破坏应变、残留稳定度及冻融劈裂强度比降低。2) 随着再生沥青

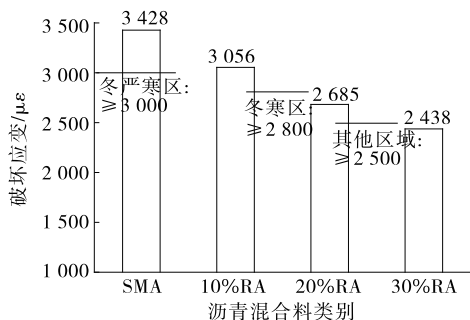


图4 不同沥青混合料的低温抗裂性能对比

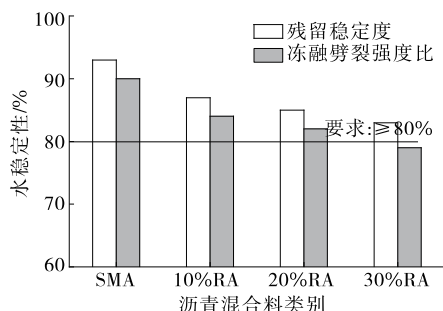


图5 不同沥青混合料的水稳定性对比

掺量的增大,掺钢渣沥青混合料的低温抗裂性能与水稳定性逐渐下降,掺量过高时不满足 JTG F40—2004 的要求。再生沥青掺量为 20% 时,掺钢渣再生沥青混合料的低温破坏应变不满足冬寒区使用性能要求;掺量达到 30% 时,低温破坏应变不满足 JTG F40—2004 对改性沥青混合料低温性能的要求,冻融劈裂强度不满足 JTG F40—2004 对改性沥青水稳定性的要求。就水稳定性而言,再生沥青掺量应控制在 20% 以内,且应根据工程项目所在气候分区的低温破坏应变要求选取再生沥青控制掺量。

## 2.2 抗断裂性能

4 种沥青混合料的半圆弯曲试验结果见图 6。

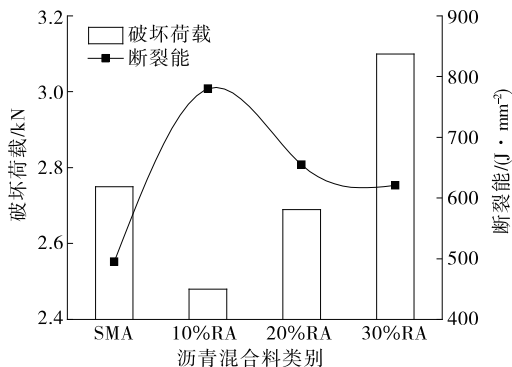


图6 不同沥青混合料的半圆弯曲试验结果对比

从图 6 可以看出:1) 掺钢渣再生沥青混合料破

坏荷载的变化规律与断裂能的变化规律不一致,掺入钢渣后,再生沥青混合料的破坏荷载降低、断裂能增大,随着再生沥青掺量的增大,破坏荷载逐渐增大、断裂能逐渐降低。相关研究结果表明,断裂能可反映加载破坏过程中能量的消耗,相较于破坏荷载,采用断裂能评价混合料的抗断裂性能更全面<sup>[8-9]</sup>。因此,推荐采用断裂能作为抗断裂性能评价指标。2) 掺入钢渣后,再生沥青混合料的断裂能增大,增大幅度为 25%~58%,表明掺钢渣可在一定程度上增强再生沥青的抗断裂性能。随着再生沥青掺量的增大,断裂能逐渐减小,但仍比普通 SMA 混合料的断裂能大。

## 2.3 抗滑性能

通过构造深度与摆值试验分析掺入钢渣与再生沥青对混合料抗滑性能的影响。构造深度表示试件表层沟槽的平均深度,为试件宏观纹理构造,对高速行驶车状态下抗滑性能影响显著。摆值可反映橡胶片与试件的动态摩擦阻力,对低速行车状态下抗滑性能影响显著<sup>[11-12]</sup>。4 种沥青混合料构造深度与摆值测试结果见图 7。

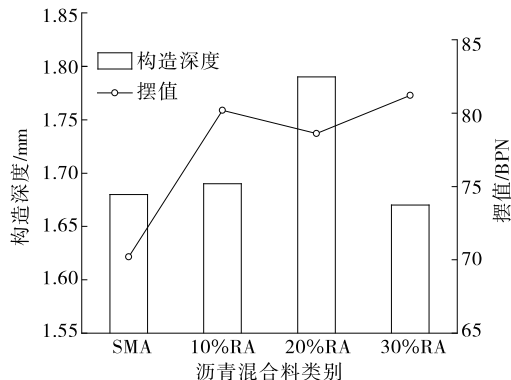


图7 不同沥青混合料的抗滑性能对比

从图 7 可以看出:1) 掺入钢渣前后,沥青混合料的构造深度变化不明显,变化范围为 -0.01~0.09 mm。这是由于掺入钢渣前后沥青混合料级配保持不变,仅油石比发生小幅变化,在相同级配条件下,混合料表面构造不会受到较大影响。另外,随着再生沥青掺量的增大,掺钢渣再生沥青混合料试件的构造深度无显著变化,表明再生沥青掺量对试件构造深度无显著影响。2) 掺入钢渣后,试件摆值显著增大,但随着再生沥青掺量的增大,摆值变化不显著。掺入钢渣后,摆值增大 8.4~11 BPN,增幅最大为 15.7%。这是由于钢渣质地较坚硬,且表层粗糙度大,虽然表层包裹沥青膜,但仍可显著提高摆值。

在实际路面服役过程中,当路表沥青膜在行车作用下剥落后,作为粗集料的钢渣将较传统集料发挥更好的抗滑性能。

### 3 结论

(1) 掺钢渣与再生沥青可提高沥青混合料的高温稳定性,且高温性能随着再生沥青掺量的增大而提高。

(2) 掺钢渣再生沥青混合料的低温抗裂性能、水稳定性比普通 SMA 混合料差,且再生沥青对二者有不利影响。为保障掺钢渣再生沥青混合料的水稳定性符合要求,建议控制再生沥青掺量在 20% 以内,并根据工程项目所在气候分区的低温破坏应变要求选取再生沥青控制掺量。

(3) 采用半圆弯曲试验进行沥青混合料抗断裂性能评价时,应优先采用断裂能作为评价指标。掺钢渣再生沥青混合料的抗断裂性能比普通 SMA 混合料高,但随着再生沥青掺量的增大略有降低。

(4) 综合分析,掺钢渣再生沥青混合料的各项路用性能均符合规范要求,且掺钢渣可以显著提高沥青混合料的摆值,掺钢渣再生沥青在沥青路面养护(如薄层罩面)中具有较好的应用前景。

#### 参考文献:

- [1] 中华人民共和国交通运输部.2020 年交通运输行业发展统计公报[EB/OL].[2021-05-19].[http://www.gov.cn/xinwen/2021-05/19/content\\_5608523.htm](http://www.gov.cn/xinwen/2021-05/19/content_5608523.htm).
- [2] 徐金枝,郝培文,郭晓刚,等.厂拌热再生沥青混合料组成设计方法综述[J].中国公路学报,2021,34(10):

72—88.

- [3] 郭鹏,谢凤章,孟建玮,等.沥青再生过程中新一旧沥青界面混溶行为综述[J].材料导报,2020,34(13):13100—13108.
- [4] 首钢资源综合利用科技开发公司,冶金工业信息标准研究院.耐磨沥青路面用钢渣:GB/T 24765—2009[S].北京:中国标准出版社,2010.
- [5] 交通部公路科学研究所.公路沥青路面施工技术规范:JTG F40—2004[S].北京:人民交通出版社,2004.
- [6] 交通运输部公路科学研究院.公路工程沥青及沥青混合料试验规程:JTG E20—2011[S].北京:人民交通出版社,2011.
- [7] 交通运输部公路科学研究院.公路路基路面现场测试规程:JTG 3450—2019[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2019.
- [8] 朱洪洲,范世平,李正浩.基于 SCB 试验的沥青混合料宏观断裂愈合性能研究[J].建筑材料学报,2018,21(3):426—432.
- [9] 冯德成,崔世彤,易军艳,等.基于 SCB 试验的沥青混合料低温性能评价指标研究[J].中国公路学报,2020,33(7):50—57.
- [10] 薛佳悦.基于扩展有限元的沥青路面反射裂缝扩展行为研究[D].南京:东南大学,2020.
- [11] 谭忆秋,肖神清,熊学堂.路面抗滑性能检测与预估方法综述[J].交通运输工程学报,2021,21(4):32—47.
- [12] 孔令绅,李雪萍,冯志强.超黏精薄层罩面沥青混合料性能研究[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2021,18(4):9—15.

收稿日期:2022-04-25

\*\*\*\*\*  
(上接第 56 页)

- [6] LING J M, WEI F L, ZHAO H D, et al. Analysis of air-field composite pavement responses using full-scale accelerated pavement testing and finite element method[J]. Construction and Building Materials, 2019, 212:596—606.
- [7] SAAD B, MITRI H, POOROOSHAB H. Three-dimensional dynamic analysis of flexible conventional pavement foundation[J]. Journal of Transportation Engineering, 2005, 131(6):460—469.
- [8] XUE Q, LIU L, ZHAO Y, et al. Dynamic behavior of asphalt pavement structure under temperature-stress coupled loading [J]. Applied Thermal Engineering, 2013, 53(1):1—7.

- [9] 廖公云,黄晓明.ABAQUS 有限元软件在道路工程中的应用[M].2 版.南京:东南大学出版社,2014.
- [10] 严作人.层状路面体系的温度场分析[J].同济大学学报,1984,12(3):76—85.
- [11] 中交路桥技术有限公司.公路沥青路面设计规范:JTG D50—2017[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2017.
- [12] 谢浩,谢军,汤旭,等.基于路面平整度的车辆荷载影响分析[J].交通科学与工程,2023,39(3):26—37.
- [13] 严明星,王金昌.ABAQUS 有限元软件在路面结构分析中的应用[M].杭州:浙江大学出版社,2016.

收稿日期:2021-11-05