

DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.20210409001

文章编号: 1674-599X(2023)01-0017-09

钢渣沥青混合料的路用性能及体积稳定性研究

罗程¹, 颜峰¹, 周彬², 夏海廷¹, 冯明杰¹, 高一弘¹

(1. 昆明理工大学 建筑工程学院, 云南省土木工程防灾重点实验室, 云南 昆明 655402;

2. 云南省公路科学技术研究院, 云南 昆明 650051)

摘 要:为探究钢渣粗集料对沥青混合料的路用性能和体积稳定性的影响,分别用石灰岩和不同膨胀性的两种钢渣为粗集料,设计配合比为AC-13C型的沥青混合料。通过浸水马歇尔、动稳定性、冻融劈裂、间接拉伸和体积稳定性试验,研究钢渣对沥青混合料性能的影响,并采用X-射线衍射、扫描电子显微镜分析其机理。研究结果表明:两种钢渣沥青混合料的路用性能均好于石灰岩沥青混合料的;两种钢渣的沥青混合料的间接拉伸疲劳性能分别为石灰岩沥青混合料的1.36倍和2.16倍,用钢渣2为粗集料的沥青混合料比用钢渣1为粗集料的沥青混合料更稳定。虽然钢渣沥青混合料的体积稳定性降低,但是两种钢渣沥青混合料的72 h浸水马歇尔稳定度分别是石灰岩沥青混合料的1.25倍和1.52倍。

关键词:钢渣;膨胀性;游离氧化钙;路用性能;体积稳定性

中图分类号:U414

文献标志码:A

Research on the road performance and volume stability of steel slag asphalt mixes

LUO Cheng¹, YAN Feng¹, ZHOU Bin², XIA Haiting¹, FENG Mingjie¹, GAO Yihong¹

(1. Faculty of Civil Engineering, Kunming University of Science and Technology,

Yunnan Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Kunming 655402, China;

2. Yunnan Provincial Highway Science and Technology Research Institute, Kunming 650051, China)

Abstract: In order to explore the influence of steel slag coarse aggregate on the road performance and volume stability of asphalt mixture, two different expansive steel slags were used as coarse aggregates and the limestone was used as fine aggregates to design the mix as AC-13C type asphalt mixture. The influence of steel slag on the performance of asphalt mixture was analyzed by immersion Marshall test, dynamic stability test, freeze-thaw splitting test, indirect tensile test and volume stability test. X-ray diffraction (XRD) and scanning electron microscope (SEM) was conducted to investigate the mechanism. The results showed that the road performance of steel slag asphalt mixture is better than that of limestone asphalt mixture. The indirect tensile fatigue properties of steel slag 1 and steel slag 2 asphalt mixtures were 1.36 and 2.16 times that of limestone asphalt mixture, respectively. The asphalt mixture produced with steel slag 2 had better stability than steel slag 1. Although the volume stability of steel slag asphalt mixture decreased, the Marshall stability of steel slag 1 and steel slag 2 asphalt mixture was still 1.25 times and 1.52 times higher than that of limestone asphalt mixture after 72 hours of immersion.

Key words: steel slag; expansiveness; f-CaO content; road performance; volumetric stability

钢渣是钢铁冶炼过程中产生的工业废弃物,其产量约为粗钢产量的10%~20%,其中,大约70%的

钢渣使用堆积和填埋方式进行处理^[1]。钢渣主要用于建筑材料、土壤改良剂等方面,其再利用率很

收稿日期:2021-04-19

基金项目:国家自然科学基金项目(11962009);昆明理工大学分析测试基金项目(2019M20182210087)

作者简介:罗程(1996—),男,昆明理工大学硕士生。

低^[2-3]。截至 2018 年末,中国公路里程已达 484.65 万 km,其中,养护里程为 475.78 万 km^[4]。中国每年有大量公路进行建设和养护,需消耗大量石料。钢渣具有硬度高、压碎值低和磨耗值良好的特性,且其表面粗糙易与沥青黏附,能提高路面的防滑性^[6],钢渣的利用可以减少道路建设及养护过程中大量开采山石带来的环境污染问题^[5-7]。

向晓东等^[8]研究了粗集料用钢渣代替石灰岩配制 AC-10C 型沥青混合料的方法,与传统石灰岩为粗集料的沥青混合料所修建的公路相比,采用钢渣为粗集料的沥青混合料所修建的路面抗滑性更好。牟存玉等^[9]研究了按一定质量分数将钢渣替换天然集料的沥青混合料的路用性能,当钢渣按 60% 的质量分数替换天然集料时,沥青路面的路用性能较好。卢发亮等^[10]研究了钢渣的化学性能、物理力学性能和级配对沥青混合料的影响,给出了 AC-20 型钢渣沥青混合料的级配范围。杨俊霖等^[11]考虑钢渣与石灰岩的密度差异,研究了以钢渣为粗集料、石灰岩为细集料,进行了级配优化设计的 AC-20 钢渣沥青混合料的性能,该种钢渣沥青混合料的路用性能优于石灰岩沥青混合料的。

这些研究主要集中在钢渣沥青混合料的配合比优化及路用性能方面,对钢渣沥青混合料的体积稳定性方面的研究较少。本研究分别用石灰岩和不同膨胀性的两种钢渣为粗集料,制备 AC-13C 型

级配的沥青混合料,采用浸水马歇尔、动稳定性、冻融劈裂、间接拉伸和体积稳定性试验,分析以钢渣和以石灰作粗集料的沥青混合料之间的区别,探究钢渣对沥青混合料的性能影响,并采用 X-射线衍射(X-ray diffraction, XRD)、扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)分析其机理,为钢渣应用于路面工程实践提供参考。

1 试验材料与方法

1.1 原材料

根据级配 AC-13 沥青混合料的组成,采用石灰岩石屑和两种产自不同钢厂的钢渣作为粗集料,石灰岩矿粉作为填料。沥青采用 SBS(I-D)聚合物作为改性沥青。集料的性能指标见表 1~3。

表 1 粗集料的性能

Table 1 Properties of coarse aggregates				%
项目	钢渣 1	钢渣 2	石灰岩	技术指标
压碎值	10.50	4.30	24.40	≤26.00
磨耗值	14.40	8.10	26.50	≤28.00
坚固性(集料的质量损失率)	3.00	1.90	7.00	≤12.00
针片状颗粒含量	5.30	4.70	6.70	≤15.00
集料膨胀率	3.62	1.46	—	≤2.00
f-CaO 含量	3.87	2.16	—	≤3.00

注:f-CaO 为游离氧化钙。

表 2 钢渣粗集料的化学成分

Table 2 Chemical composition of steel slag coarse aggregates

粗集料	w(CaO)	w(Fe ₂ O ₃)	w(SiO ₂)	w(MgO)	w(Al ₂ O ₃)	w(P ₂ O ₅)	w(MnO)	w(TiO ₂)	其他
钢渣 1	40.48	30.24	14.01	5.93	3.39	2.29	1.68	1.00	0.98
钢渣 2	43.92	27.28	17.00	4.40	4.14	0.92	0.85	0.70	0.79

表 3 SBS(I-D)聚合物改性沥青试验结果

Table 3 Test results of SBS(I-D) polymer modified asphalt

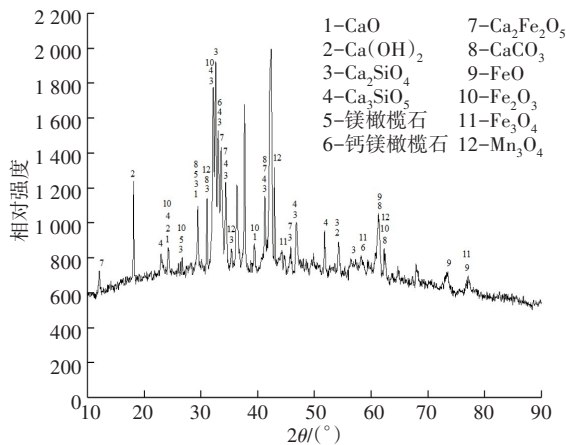
检测项目	技术指标	测试结果
沥青气针入度试验	针入度(25 °C, 5 s, 100 g)/(0.1 mm)	40 ~ 60
	针入度指数	≥0
沥青软化点试验	软化点(环球法)/°C	≥60
沥青延度试验	延度(5 °C)/cm	≥20
沥青闪点试验	闪点/°C	≥230
沥青弹性恢复试验	25 °C 弹性恢复/%	≥75
沥青旋转黏度试验	布氏旋转黏度 135 °C/(Pa·s)	≤3
沥青密度试验	密度(15 °C)/(g·cm ⁻³)	—
薄膜加热试验 (163 °C, 5 h)	贮存稳定性离析, 48 h 软化点差/°C	≤2.5
	质量变化/%	±1.0
	残留针入度比(25 °C)/%	≥65
	残留延度(5 cm/min, 10 °C)/cm	≥15

1.2 钢渣粗集料的 XRD 和 SEM 分析

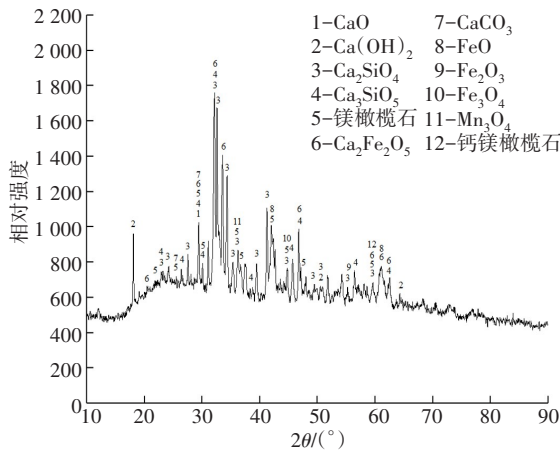
钢渣 1 和钢渣 2 粗集料在浸水前的 XRD 谱和钢

渣 1 和钢渣 2 粗集料在浸水 72 h 后表面颗粒物的 XRD 谱如图 1 所示。钢渣的部分物质具有水化活

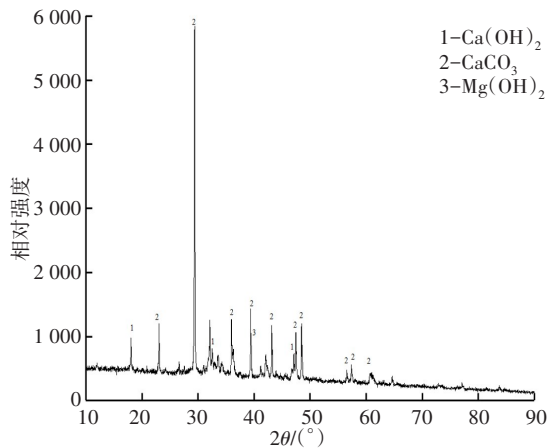
性,部分碱活性物质可与沥青中的酸性基团发生反应,这些均可以提高沥青混合料的路用性能^[12]。因此,钢渣沥青混合料的性能优于普通的石灰岩沥青混合料的。由表1可知,钢渣的抗磨耗性能比普通集料的更好,这是由于钢渣中的铁化合物提高了沥青混合料的耐磨性能。在浸水72 h后,钢渣中部分f-CaO(游离氧化钙)遇水生成Ca(OH)₂,Ca(OH)₂在60℃时与空气中的CO₂发生反应,在钢渣表面生成了CaCO₃。



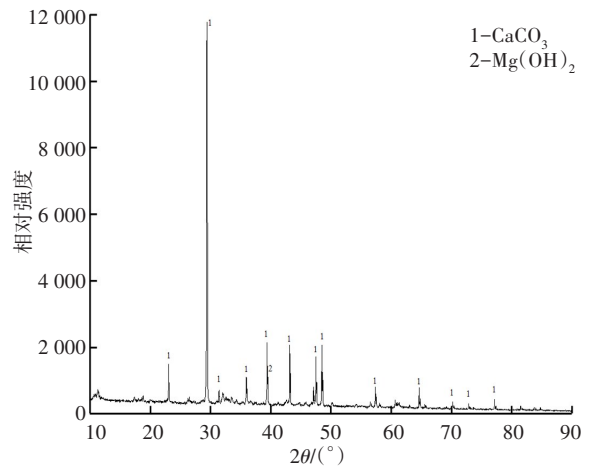
(a) 钢渣1(未浸水)



(b) 钢渣2(未浸水)



(c) 钢渣1(浸水72 h)

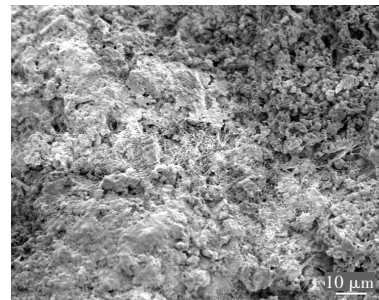


(d) 钢渣2(浸水72 h)

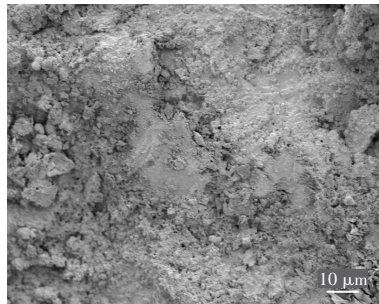
图1 钢渣粗集料的XRD图谱

Fig. 1 XRD spectrum of steel slag coarse aggregate

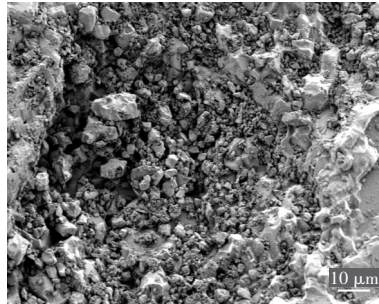
钢渣1、钢渣2和石灰岩粗集料在未浸水和浸水72 h后的表面SEM图和内部断面SEM图分别如图2~5所示。



(a) 钢渣1



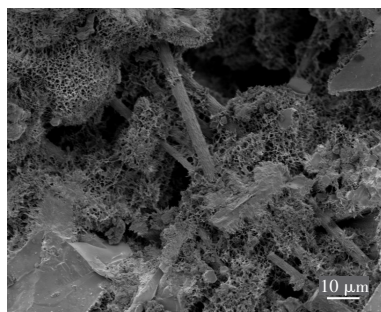
(b) 钢渣2



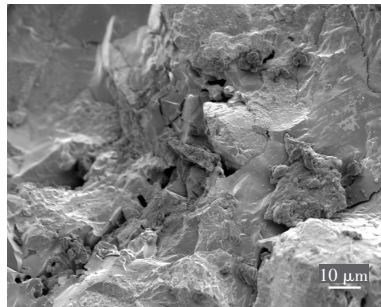
(c) 石灰岩

图2 3种粗集料放大1 000倍的表面SEM图

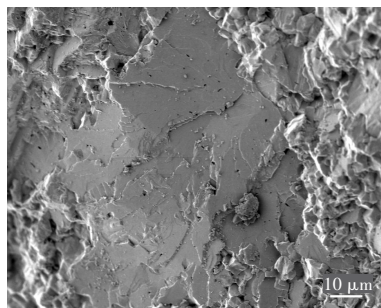
Fig. 2 SEM diagram of three coarse aggregate surfaces at 1 000 times magnification



(a) 钢渣 1



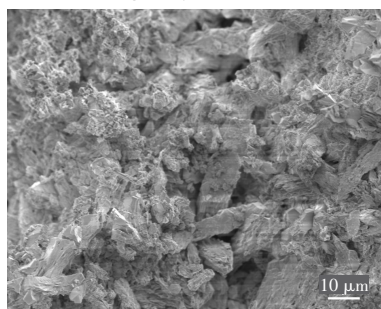
(b) 钢渣 2



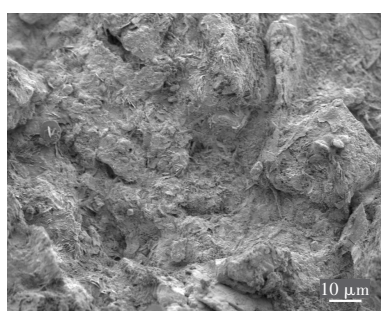
(c) 石灰岩

图3 3种粗集料放大1 000倍的断面SEM图

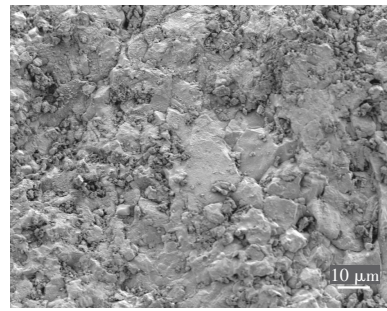
Fig. 3 SEM diagram of sections of three coarse aggregates enlarged by 1 000 times



(a) 钢渣 1



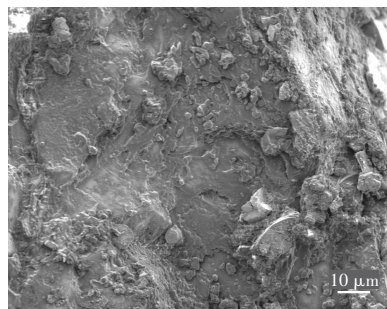
(b) 钢渣 2



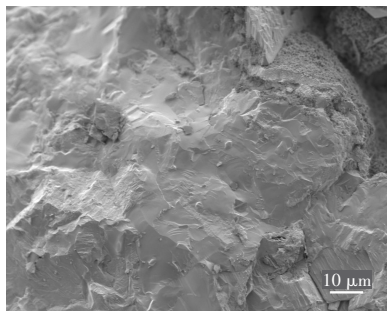
(c) 石灰岩

图4 3种粗集料浸水72 h后放大1 000倍的SEM图

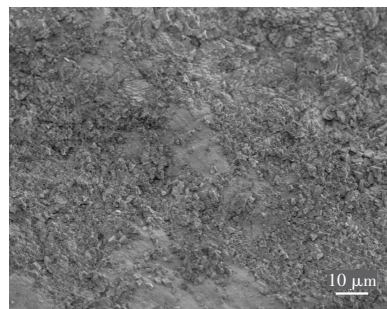
Fig. 4 Surface SEM diagram of three coarse aggregates after immersion for 72 h at 1 000 times



(a) 钢渣 1



(b) 钢渣 2



(c) 石灰岩

图5 3种粗集料浸水72 h后放大1 000倍的断面SEM图

Fig. 5 SEM diagram of sections of three coarse aggregates after immersion for 72 h at 1 000 times

结合XRD分析,钢渣1由于表面多孔且含有较多的活性物质,其遇水与石料中的水化活性物质发生反应。从图4~5可以看出,在浸水72 h后,钢渣1表面出现颗粒状物质,主要原因是生成了 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ^[13];在60℃时, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 易与 CO_2 发生反应,生成 CaCO_3 ,聚集在集料表面,导致表面颗粒脱

落,使得集料由外到内不断掉落颗粒状物质。最终,集料在水的作用下整体被破坏,影响了集料的耐久性能。钢渣2含有的活性物质较少,在浸水72 h后,钢渣2表面生成松散的片状物,但集料整体比较密实,其密实的表面和部分内部能阻止反应向内部继续进行。通过测试,钢渣2的集料性能比钢渣1的更好。石灰岩表面虽然有一定的松散颗粒,但颗粒下方仍为完整密实的形貌,浸水72 h后表面依旧保持密实。从图3~4可看出,石灰岩性质稳定,不易发生反应,其表面形貌浸水前后并未发生改变。

1.3 钢渣沥青混合料配合比设计

钢渣1、钢渣2和石灰岩沥青混合料的合成级配曲线如图6所示:

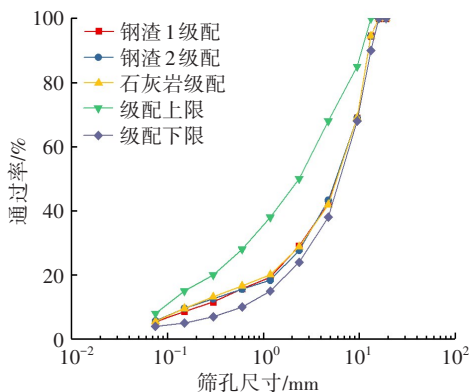


图6 沥青混合料的级配曲线

Fig. 6 Grading curves of asphalt mixes

依照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)的马歇尔试件成型方法制备试件。先选取钢渣1确定最佳油石比,分别采用4.3%、4.8%、5.2%、5.8%和6.3%五种油石比制作马歇尔试件,测试试件的毛体积密度、稳定度和流值,计算试件的体积指标,确定最佳油石比为5.2%。对于3种沥青混合料试件选取相同的沥青用量,测试3种沥青混合料的路用性能。

1.4 试验方法

1) 路用性能试验:根据规范《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)测试试件的动稳定度、浸水马歇尔稳定性和冻融劈裂强度^[14]。

2) 间接拉伸疲劳试验:试件在20℃下保温4~5 h,初始应变保持范围为100~400 μm ,选用应力为480 kPa,采用半正弦波,加载0.1 s,间隔0.4 s,进行间接拉伸疲劳试验,测试沥青混合料试件的疲劳性能。

3) 体积稳定性试验:根据规范《公路工程沥青

及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011),将试件放入60℃恒温水箱中,一部分试件保温0.5 h,测试马歇尔稳定度;另一部分保温72 h,测试沥青混合料的膨胀性;将完成测试的所有试件放入50℃烘箱保温到质量不再变化,测试试件的体积;测试完成后,将试件放入60℃恒温水浴箱中保温0.5 h,测试试件的马歇尔稳定度。

2 结果与讨论

2.1 沥青混合料的路用性能试验

3种粗集料的沥青混合料试件的动稳定度和马歇尔浸水残留稳定度见表4。由表4可知,以钢渣1和钢渣2为粗集料的沥青混合料试件的动稳定度分别是以石灰岩为粗集料的沥青混合料试件的1.42倍和1.87倍,钢渣2沥青混合料试件的动稳定度又是钢渣1沥青混合料试件的1.32倍。在浸水48 h后,以钢渣1为粗集料的沥青混合料试件的马歇尔稳定度下降了13.3%,以钢渣2为粗集料的沥青混合料试件的马歇尔稳定度下降了6.9%,以石灰岩为粗集料的沥青混合料试件的马歇尔稳定度下降了13.9%。3种混合料沥青的冻融劈裂强度与未冻融劈裂强度对比如图7所示。以钢渣1、钢渣2和石灰岩为粗集料的沥青混合料的冻融劈裂强度与未冻融劈裂强度之比分别为91.3%、94.7%和89.2%。

表4 动稳定度和马歇尔浸水残留稳定度试验结果

Table 4 Dynamic stability and immersion residual stability test results

粗集料	油石比/%	动稳定度/(次 $\cdot\text{mm}^{-1}$)	浸水残留稳定度/%
钢渣1	5.2	7 974	86.7
钢渣2	5.2	10 502	93.1
石灰岩	5.2	5 602	86.1

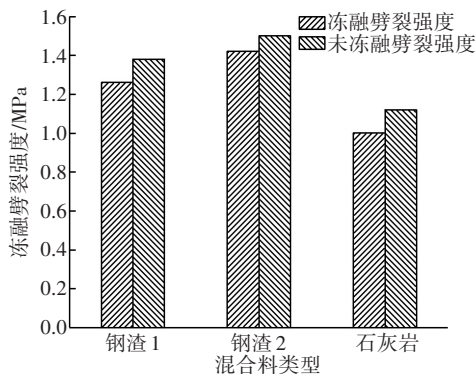


图7 3种粗集料的冻融劈裂强度

Fig. 7 Freeze-thaw splitting strength of three kinds of coarse aggregates

以钢渣为粗集料的沥青混合料有如下特点:①内部含有铁、锰等矿物成分;②压碎值较小;③混合料表面多孔,呈碱性,钢渣粗集料与沥青的结合能力好。以石灰岩为粗集料的沥青混合料与钢渣的相比,有如下特点:①表面平整、密实;②压碎值较大;③石灰岩与沥青之间的界面明显,结合能力差。优良的集料性使以钢渣为粗集料的沥青混合料的动稳定性在三者中表现最好;以钢渣为粗集料的沥青混合料的浸水残留稳定度均高于石灰岩为粗集料的沥青混合料的;以钢渣为粗集料的沥青混合料的冻融劈裂性能要比以石灰岩为粗集料的沥青混合料的好。

2.2 劈裂疲劳试验

应力为480 kPa时,3种不同粗集料的沥青混合

料试件的疲劳寿命曲线如图8所示,钢渣1、钢渣2和石灰岩为粗集料的沥青混合料试件的疲劳寿命分别为:4 531次、7 231次和3 341次,以钢渣1、钢渣2为粗集料的沥青混合料试件的疲劳次数,分别是以石灰岩为粗集料的沥青混合料试件疲劳次数的1.36倍、2.16倍。疲劳破坏分为三个阶段:第一阶段,荷载加载次数较少,沥青混合料试件变形特别是纵向变形较小;第二阶段,随着荷载加载次数的增加,沥青混合料试件处于荷载累积状态,变形不断增加,变形持续时间较长;第三阶段:位移迅速增大,试件发生明显变形,会突然发生脆断。不同粗集料的沥青混合料试件的疲劳寿命从大到小依次为:钢渣2>钢渣1>石灰岩。

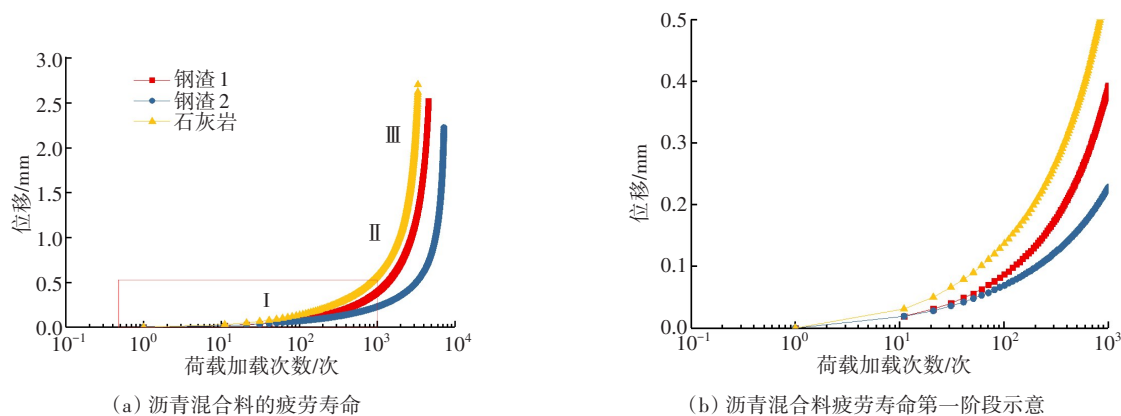


图8 沥青混合料的疲劳寿命

Fig. 8 Fatigue life of asphalt mixture

2.3 混合料体积稳定性试验

2.3.1 试件体积膨胀率

沥青混合料试件在60℃浸水72h的膨胀率结果见表5,沥青混合料试件在饱和水浸泡72h的表面开裂情况以及不同时间的内部微观变化情况如图9~11所示。以钢渣1为粗集料的沥青混合料试件的膨胀率为1.8%,超过规范要求的1.5%,以钢渣2和石灰岩为粗集料的沥青混合料试件的膨胀率分别为0.9%和0.4%,均小于规范要求的1.5%。两种以钢渣为粗集料的沥青混合料试件均出现膨胀开裂的情况。从图9可以看出,钢渣2粗集料试件的f-CaO含量低,试件表面只出现了细小裂纹;钢渣1粗集料试件的f-CaO含量高,试件表面出现明显的裂缝;以石灰岩为粗集料的沥青混合料试件的表面无裂缝。两种以钢渣为粗集料的沥青混合料试件的表面均出现了集料反应,生成粉末状物质,而以石灰岩为粗集料的沥青混合料试件无此现象发生。

从图10~11可以看出:在60℃浸水后,钢渣粗集料与沥青混合料试件的界面间存在过渡段,这是钢渣表面多孔,沥青进入钢渣内部所致的。石灰岩集料表面与沥青间的界面有明显的分界处。在饱和水和高温的作用下,随时间增加,以钢渣为粗集料的沥青混合料试件出现涨裂的现象,以钢渣1为粗集料的沥青混合料试件的涨裂裂缝最大,这主要是其内部水化活性物质含量高,遇水易发生膨胀所致。在试验中,当钢渣集料膨胀率满足要求时,两种以钢渣为粗集料的沥青混合料试件也会产生裂纹,两者相比,以钢渣2为粗集料的沥青混合料试件产生的裂纹较小。

表5 3种粗集料沥青混合料72h浸水马歇尔膨胀率

Table 5 Marshall expansion rate of three kinds of coarse aggregate asphalt mixture after 72 h immersion

粗集料	未浸水时体积/cm ³	浸水72h时体积/cm ³	体积膨胀率/%
钢渣1	503.9	513.2	1.8
钢渣2	521.9	526.9	1.0
石灰岩	506.7	508.6	0.4

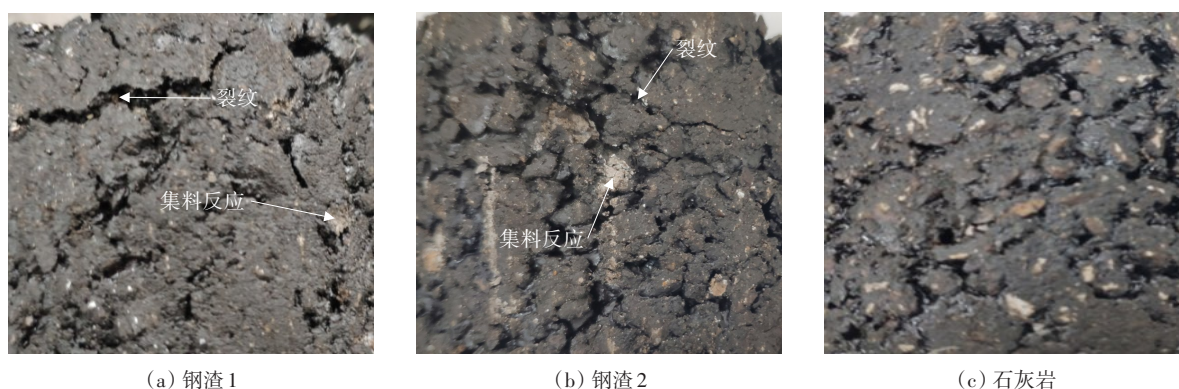


图9 3种粗集料沥青混合料浸水72 h的表面开裂情况

Fig. 9 Surface cracking of three kinds of coarse aggregate asphalt mixtures immersed in water for 72 hours

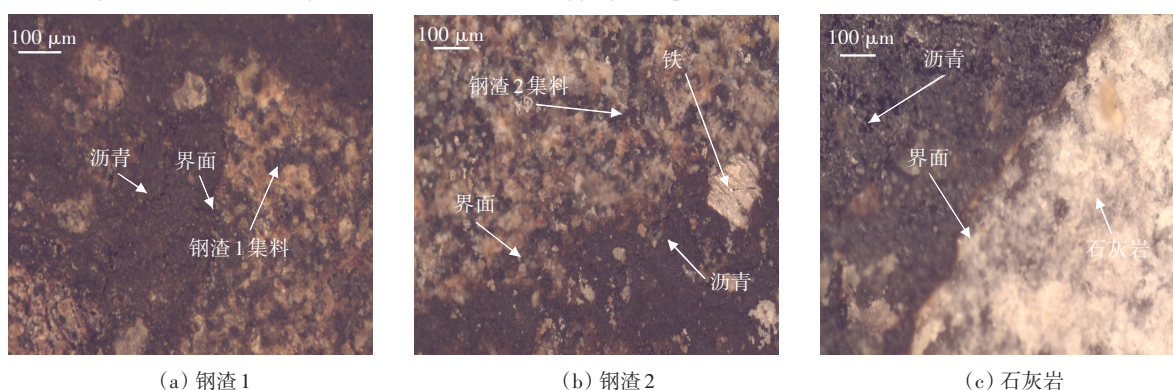


图10 3种粗集料的沥青混合料浸水48 h后的微观形貌

Fig. 10 Microtopography of asphalt mixture of three kinds of coarse aggregates after soaking for 48 hours

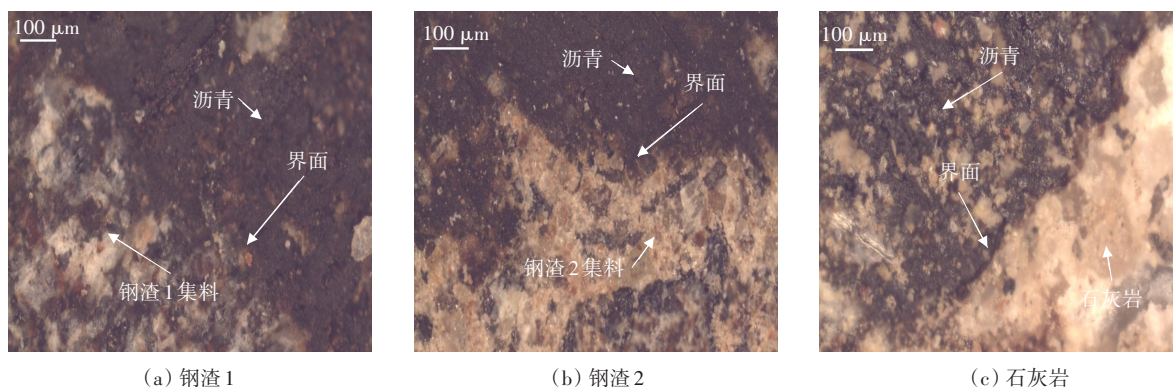


图11 3种粗集料沥青混合料浸水72 h后的微观形貌

Fig. 11 Microtopography of asphalt mixture of three kinds of coarse aggregates after soaking for 72 hours

2.3.2 试件体积指标

通过测量3种试件在60℃水中浸泡12 h后体积指标和歇尔稳定度,综合对比其性能变化情况。

将试件置于60℃水中,浸泡72 h后,再放入烘箱50℃保温至质量不再变化,测量沥青混合料试件的体积指标。发现沥青混合料试件表面的沥青薄膜出现剥落,所有沥青混合料试件的体积分数下降约0.1%。以钢渣1、钢渣2和石灰岩为粗集料的沥青混合料试件的空隙率分别增加了0.6%、0.4%

和0.5%;以钢渣1、钢渣2和石灰岩为粗集料的沥青混合料试件的矿料间隙率分别增加了0.5%、0.3%和0.4%,以钢渣1、钢渣2和石灰岩为粗集料的沥青混合料试件的饱和度分别降低了2.6%、2.0%和2.8%。

将试件置于60℃水中浸泡72 h后,附着在石料上的部分沥青薄膜出现分离现象。置于60℃水中浸泡72 h的试件的沥青体积分数和饱和度均有所降低。其中,以钢渣为粗集料的沥青混合料试件内部发生膨胀,形成空隙使空隙率增大,具体数据见表6。

表 6 72 h 浸水马歇尔体积指标

Table 6 Marshall volume index of immersion for 72 hours

粗集料	浸水时间/h	沥青体积百分率/%	空隙率/%	矿料间隙率/%	沥青饱和度/%
钢渣 1	0	13.3	4.3	17.6	75.6
	72	13.2	4.9	18.1	73.0
钢渣 2	0	11.3	4.1	15.4	73.4
	72	11.2	4.5	15.7	71.4
石灰岩	0	11.0	3.1	14.1	78.0
	72	10.9	3.6	14.5	75.2

2.3.3 试件的马歇尔稳定度

将试件置于 60℃ 水中,浸泡 72 h 后进行马歇尔稳定度试验,结果见表 7。由表 7 可知,分别将以钢渣 1、钢渣 2 和石灰岩为粗集料的沥青混合料试件置于 60℃ 水中浸泡 72 h 后的马歇尔稳定度比其浸泡 0.5 h 后的试件的分别降低了 15.9%、1.7% 和 3.5%;以钢渣 1、钢渣 2 为粗集料的沥青混合料试件的 72 h 马歇尔稳定度分别是以石灰岩为粗集料的沥青试件的 1.25 倍和 1.52 倍。

以钢渣为粗集料的沥青混合料的马歇尔稳定性仍比以石灰岩为粗集料的沥青混合料试件的好。这主要是因为钢渣的集料性能优于石灰岩的集料性能。

表 7 马歇尔稳定度

Table 7 Marshall stability kN

粗集料	不同浸水时间下的马歇尔稳定度	
	0.5 h	72.0 h
钢渣 1	19.23	16.17
钢渣 2	19.87	19.53
石灰岩	13.36	12.89

3 结论

1) 本研究通过动稳定度、浸水马歇尔稳定度、冻融劈裂和间接拉伸疲劳试验发现:以钢渣为粗集料的沥青混合料的性能优于石灰岩为粗集料的沥青混合料的,钢渣可作为一种较优质的粗集料应用于道路工程。

2) 通过体积稳定性试验发现:当钢渣粗集料的 f-CaO 含量较高时,沥青混合料的膨胀率会接近,甚至超过 1.5%,这时混合料表面部分集料会发生粉化和膨胀开裂现象,导致路面病害,影响路面的使用

寿命。随着钢渣集料的 f-CaO 含量的降低,沥青混合料的膨胀率也随之减少,沥青混合料的开裂和集料的粉化情况均减弱。虽然钢渣沥青混合料出现了开裂和粉化现象,但是以钢渣为粗集料的沥青混合料的马歇尔稳定度优于石灰岩为粗集料的沥青混合料的。

3) 本研究建议采用膨胀率和 f-CaO 含量都低的钢渣作为粗集料,减少沥青混合料路面在车辆荷载和夏季高温雨水的作用下出现开裂、粉化等病害情况,这对钢渣的资源化利用具有重要意义。

参考文献(References):

- [1] 宋赞. 国内外钢渣资源化利用现状及发展趋势[J]. 中国钢铁业, 2019(8): 39-41.
SONG Zan. Domestic and overseas slag recycling status quo and development[J]. China Steel, 2019(8): 39-41.
- [2] 梁秀兰, 王新华, 何肖飞, 等. 转炉双渣冶炼半钢渣矿物相分析及回收利用[J]. 钢铁研究学报, 2014, 26(10): 15-20.
LIANG Xiulan, WANG Xinhua, HE Xiaofei, et al. Mineral phase and utilization of semisteel slag produced during BOF double slag process[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2014, 26(10): 15-20.
- [3] 李灿华, 陈琳, 刘思. 钢渣沥青混凝土路面及其服役性能研究[J]. 安徽工业大学学报(自然科学版), 2011, 28(2): 136-140.
LI Canhua, CHEN Lin, LIU Si. Study on the steel slag asphalt concrete pavement and its service performances [J]. Journal of Anhui University of Technology (Natural Science), 2011, 28(2): 136-140.
- [4] 交通运输部. 2018 年交通运输行业发展统计公报[N]. 中国交通报, 2019-04-12(2).
Ministry of Transport. statistical official report of transport industry development in 2018 [N]. China Communications News, 2019-04-12(2).
- [5] 韩先瑞, 张宝虎, 余天航, 等. 铁尾矿沥青混合料水稳定性试验研究[J]. 交通科学与工程, 2019, 35(2): 6-10.
HAN Xianrui, ZHANG Baohu, YU Tianhang, et al. Experimental study on the moisture stability of the asphalt mixture with iron tailings [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2019, 35(2): 6-10.
- [6] HUANG L S, LIN D F, LUO H L, et al. Effect of field compaction mode on asphalt mixture concrete with basic oxygen furnace slag [J]. Construction and Building Materials, 2012, 34: 16-27.

- [7] 谢勇,张逸圣,辛顺超. 基于钢渣骨料的沥青混合料路用性能研究[J]. 公路,2014,59(12):186-190.
XIE Yong,ZHANG Yisheng,XIN Shunchao. Research on performance of asphalt mixtures for pavement with steel slag aggregates[J]. Highway,2014,59(12):186-190.
- [8] 向晓东,习嘉晨,李灿华. 钢渣AC-10C型改性沥青混合料配合比及性能[J]. 兰州理工大学学报,2016,42(6):142-146.
XIANG Xiaodong,XI Jiachen,LI Canhua. Mixture ratio and performance of mixture of steel slag with AC-10C-type modified asphalt[J]. Journal of Lanzhou University of Technology,2016,42(6):142-146.
- [9] 牟存玉,凌天清,陆亚,等. 钢渣SAC-10沥青混合料路用性能研究[J]. 中外公路,2019,39(2):249-255.
MOU Cunyu,LING Tianqing,LU Ya, et al. Study on road performance of steel slag SAC-10 asphalt mixture [J]. Journal of China & Foreign Highway,2019,39(2):249-255.
- [10] 卢发亮,李晋. 钢渣沥青混合料级配特征研究[J]. 公路,2013,58(7):222-227.
LU Faliang,LI Jin. Study on gradation characteristics of steel slag mixture[J]. Highway,2013,58(7):222-227.
- [11] 杨俊霖,罗蓉,樊向阳,等. 基于多孔钢渣的沥青混合料设计与路用性能研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2018,42(1):68-71.
YANG Junlin, LUO Rong, FAN Xiangyang, et al. Research on design and road performance of asphalt mixture with porous steel slag [J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering),2018,42(1):68-71.
- [12] ARRIBAS I, SANTAMARÍA A, RUIZ E, et al. Electric arc furnace slag and its use in hydraulic concrete [J]. Construction and Building Materials,2015,90:68-79.
- [13] 许丁斌. 钢渣沥青混合料的材料及性能研究[D]. 南京:东南大学,2018.
XU Dingbin. The material and performance research of steel slag asphalt mixtures [D]. Nanjing: Southeast University,2018.
- [14] 李友云,陈佳,王硕,等. 沥青混合料劈裂疲劳损伤力学特性多尺度研究[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版),2022,19(1):1-11,80.
LI Youyun, CHEN Jia, WANG Shuo, et al. Multi-scale research on mechanical characteristics of splitting fatigue damage of asphalt mixture [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science),2022,19(1):1-11,80.

(责任编辑:刘国奇;校对:欧兆虎;英文编辑:陈璐)

(上接第6页)

- 物理,2004,33(6):438-442.
MOU Qunying, LI Xianjun. Applications of microwave heating technology[J]. Physics,2004,33(6):438-442.
- [10] TORRINGA E, ESVELD E, SCHEEWE I, et al. Osmotic dehydration as a pre-treatment before combined microwave-hot-air drying of mushrooms [J]. Journal of Food Engineering,2001,49(2/3):185-191.
- [11] 王宝和. 干燥动力学研究综述[J]. 干燥技术与设备,2009,7(2):51-56.
WANG Baohe. Review of drying kinetics [J]. Drying Technology & Equipment,2009,7(2):51-56.
- [12] 李志刚. 城市污水厂污泥微波干燥效能研究[D]. 重庆:重庆大学,2007.
LI Zhigang. Study on microwave drying efficiency of sludge from municipal sewage plant [D]. Chongqing: Chongqing University,2007.
- [13] 包承纲,詹良通,龚壁卫. 非饱和土的特性及其抗剪强度问题[C]//中国土木工程学会第八届土力学及岩土工程学术会议论文集. 南京:中国土木工程学会,1999:184-187.
BAO Chenggang, ZHAN Liangtong, GONG Biwei. Properties and shear strength of unsaturated soils [C]// Proceedings of the 8th Conference on soil mechanics and geotechnical engineering of Chinese society of civil engineering. Nanjing: China Civil Engineering Society,1999:173 - 176.(in Chinese))
- [14] PEDARLA A, ACHARYA R, BHEEMASETTI T, et al. Influence of mineral montmorillonite on soil suction modeling parameters of natural expansive clays [J]. Indian Geotechnical Journal,2016,46(3):291-298.
- [15] 朱赞成,孙德安,王小岗,等. 基于膨润土微观结构确定土水特征曲线的残余含水率[J]. 岩土工程学报,2015,37(7):1211-1217.
ZHU Zancheng, SUN Dean, WANG Xiaogang, et al. Determination of residual water content in SWCC based on microscopic structure of bentonite[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2015,37(7):1211-1217.

(责任编辑:欧兆虎;校对:李脉;英文编辑:陈璐)