

DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.20210907001

文章编号: 1674-599X(2023)01-0035-07

基于XRD分析的钢渣填料沥青混合料水稳定性研究

方俊杰¹, 冯明杰², 谢涛³, 徐龙⁴

(1. 国家林业和草原局昆明勘察设计院, 云南 昆明 650021; 2. 昆明理工大学 建筑工程学院, 云南 昆明 650093;

3. 拉萨市设计院, 西藏 拉萨 850030; 4. 中交一公局海威工程建设有限公司, 北京 101119)

摘 要: 为探究钢渣矿物成分对沥青混合料性能的影响, 本研究采用不同种钢渣, 分别按0%、30%、60%和100%的掺量及陈化前后30%的两种K钢渣进行沥青混合料的水稳定性测试, 并采用XRD进行成分分析。研究表明: 相比于普通石灰岩矿粉及水泥, 不同钢渣的硅酸盐矿物及CaO等活性成分含量差异较大, 且其对沥青混合料性能的提升存在较大差异。马歇尔稳定度及劈裂强度提升28.0%~40.0%; K钢渣随掺量增加, 活性成分含量提高, 对混合料性能提升也略有提高, 马歇尔稳定度及劈裂强度提升38.0%~40.0%; 钢渣陈化后活性矿物成分减少, 对沥青混合料的提升效果减弱; 水稳定性随活性成分增多有所降低; K钢渣在30%掺量时, 水稳定性及劈裂强度性能提升最显著。

关键词: 道路与铁道工程; 沥青混合料; 钢渣; XRD

中图分类号: U414

文献标志码: A

Research on water stability of steel slag filling asphalt mixture based on XRD

FANG Junjie¹, FENG Mingjie², XIE Tao³, XU Long⁴

(1. Kunming Survey and Design Institute of National Forestry and Grassland Administration, Kunming 650021, China;

2. School of Construction Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China;

3. Lhasa Design Institute, Lhasa 850030, China; 4. China Communications First Public Bureau Haiwei Engineering Construction Co., Ltd., Beijing 101119, China)

Abstract: To explore the influence of steel slag mineral compositions on the performance of asphalt mixtures, this study conducted water stability tests on asphalt mixtures using different types of steel slag with 0%, 30%, 60%, and 100% blending ratios, as well as mixtures containing 30% K steel slag before and after aging, and conducted mineral composition analysis using XRD. The results showed that compared with ordinary limestone powder and cement, the content of silicate minerals and active minerals such as CaO in different types of steel slag varied greatly, and there were significant differences in the improvement of asphalt mixture performance with an increase in Marshall stability and splitting strength in the range of 28.0% to 40.0%. With the increasing amount of K steel slag, the content of active components increased, leading to improved performances of the asphalt mixture with an increase in the Marshall stability and splitting strength by 38.0% to 40.0%. After aging, the content of active minerals in steel slag decreased, and the improvement effect on the asphalt mixture weakened. Moreover, the water stability decreased with the increase of active components in the steel slag. The incorporation of 30% K steel slag resulted insignificant improvement in the water stability and splitting strength of the asphalt mixtures.

Key words: road and railway engineering; asphalt mixture; steel slag; XRD

随着中国道路建设迅猛发展, 公路每年养护里程达到了80万 km, 其中, 高速公路养护里程超过

1.4万 km。道路建设和养护需要大量天然集料。传统的优质天然集料资源有限, 寻找其替代品日益迫

收稿日期: 2021-09-07

作者简介: 方俊杰(1983—), 男, 国家林业和草原局昆明勘察设计院高级工程师。

切^[1]。花岗岩是一种酸性岩石,力学强度好、坚硬耐磨、储量大,可解决道路建设石料短缺问题。武银君等^[2]研究花岗岩沥青混合料性能,发现花岗岩的黏附性能差,无法满足沥青路面的要求。现有研究表明:添加抗剥落剂和水泥可不同程度地提高沥青混合料的路用性能。这些方法已在部分高等级沥青路面施工中得到较成功的应用,而掺入消石灰后对提升沥青混合料性能的效果并不明显^[3-4]。由于新型抗剥落剂的价格太高^[5],因此,有必要研发一种对花岗岩沥青混合料路面性能提升效果明显,价格又相对低廉的新材料。钢渣可大量堆存,价格低廉,且含有大量碱活性成分,能与沥青的酸性基团发生化学反应,在其表面形成化学吸附层,提高黏附性,具备作为应用于沥青混合料的无机抗剥离剂的潜力^[2,6-7]。还有部分研究也表明钢渣作为无机抗剥落剂能不同程度地提升沥青混合料性能^[8-11]。温金保^[12]研究了钢渣的机械力化学效应,发现钢渣的化学成分随不同的生产工艺会产生较大差异。这些研究主要考虑钢渣填料对沥青混合料路面性能的影响,而从钢渣化学成分的角度分析其对沥青混合料性能影响的研究鲜见。因此,本研究对3种来自不同钢厂生产的钢渣S、T、K进行分析,其中,对K钢渣取部分陈化半年后的试样进行试验。采用X射线衍射光谱(X-ray diffraction, XRD)及X射线荧光光谱(X-ray fluorescence, XRF)分析测试技术对钢渣的矿物成分进行定性及半定量分析,对按不同掺量的矿渣粉替

换石灰岩矿粉的沥青混合料进行水稳定性试验,对比分析钢渣对沥青混合料性能影响规律。并将性能提升最明显的一组掺入水泥进行试验对比,研究其路用性能,以期钢渣填料在沥青混合料中的应用提供借鉴。

1 原材料及试验方案

1.1 沥青

本研究采用的沥青为克拉玛依90#A级基质沥青,其技术性能指标见表1。

表1 沥青技术性能指标

Table 1 Technical performance index of asphalt

技术指标	测试值	指标要求
针入度(25℃, 100 g, 5 g)/(0.1 mm)	94	80 ~ 100
软化点(环球法)/℃	46.5	>44
延度(5 cm/min, 15℃)/cm	>100	>100
蜡含量/%	1.8	<2.2
闪点/℃	269	>245
密度(15℃)/(g·cm ⁻³)	1.031	

注:该90#沥青所检指标均符合《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40—2004)的技术要求。

1.2 集料

1.2.1 粗集料

本研究采用花岗岩作为粗集料,采用X射线荧光光谱仪分析,其主要化合物组成见表2。

表2 花岗岩主要氧化物组分

Table 2 Main oxide components of granite

w(SiO ₂)	w(Al ₂ O ₃)	w(CaO)	w(Fe ₂ O ₃)	w(K ₂ O)	w(Na ₂ O)	w(MgO)	w(TiO ₂)	w(P ₂ O ₅)
63.96	17.66	5.26	4.07	3.38	3.02	1.53	0.51	0.19

其中,二氧化硅SiO₂的质量分数高达63.96%,花岗岩集料的硬度大幅度提高,花岗岩集料的黏附性则降低,其pH值小于7。

花岗岩粗集料的指标见表3。

表3 花岗岩粗集料指标

Table 3 Properties of granite as coarse aggregate

项目	压碎值/%	洛杉矶磨耗率/%	针片状颗粒含量/%	表观密度/(g·cm ⁻³)
检测值	12.2	7.97	12.5	2.71
规范值	≤26.0	≤28.00	≤15.0	≥2.50

1.2.2 花岗岩、河沙和机制砂细集料

本研究采用的细集料各项物理力学指标均满足《公路工程集料试验规程》(JTG E42—2015)规范要求,具体数值见表4。

表4 细集料特性

Table 4 Fine aggregate characteristics

细集料	表观密度/(g·cm ⁻³)	砂当量/%	棱角性(流动时间法)/s
河沙	2.33	68.7	12.5
机制砂	2.95	91.1	19.2
花岗岩	2.64	96.7	24.8

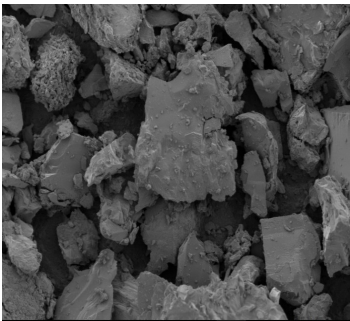
1.2.3 矿粉

本研究对照组采用的石灰岩矿粉、钢渣粉和水泥等填料的密度指标见表 5。

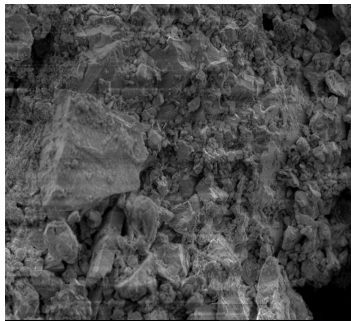
表 5 各类填料密度指标

Table 5 Density of various fillers g/cm ³				
石灰岩	水泥	K 钢渣	T 钢渣	S 钢渣
2.72	2.91	3.34	3.53	3.47

采用适当的研磨工艺控制钢渣粒径,使其比表面积小于或接近石灰岩矿粉的比表面积,缩小钢渣粉与沥青的接触面积,减少钢渣的物理因素对沥青混合料性能的影响。本研究使用扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)对经研磨工艺处理的 K 钢渣及石灰岩矿粉的微观形貌进行观测,



(a) K 钢渣粉



(b) 石灰岩矿粉

图 1 K 钢渣粉及石灰岩矿粉微观形貌对比图

Fig. 1 Comparison of microstructure of K steel slag powder and limestone powder

表 6 石灰岩矿粉及钢渣粉比表面积对比

Table 6 Comparison of the specific surface area of limestone powder and steel slag powder

填料	BET 比表面积/ (m ² •g ⁻¹)	t-plot 法微孔比表面 积/(m ² •g ⁻¹)	t-plot 法外比表面 积/(m ² •g ⁻¹)	孔容(孔体积)/ (cm ³ •g ⁻¹)	微孔体积/ (cm ³ •g ⁻¹)	平均径/nm	孔径范 围/nm
石灰岩矿粉	1.576	0.213	1.362	0.003	0.000 1	8.330	2~8
钢渣粉	0.833	0.433	0.400	0.001	0.000 2	4.760	0~4

表 7 各类填料主要氧化物组分质量分数

Table 7 Mass proportion of main oxide components of all kinds of fillers

填料	w(CaO)	w(Fe ₂ O ₃)	w(SiO ₂)	w(MgO)	w(Al ₂ O ₃)	w(MnO)	w(TiO ₂)	w(P ₂ O ₅)	w(V ₂ O ₅)
石灰石粉	55.780	0.105	1.816	0.562	0.188	—	—	—	—
水泥	56.480	2.940	17.290	2.920	5.820	—	—	0.320	—
K 钢渣	41.880	20.000	13.990	8.530	5.000	3.450	2.690	2.470	1.180
T 钢渣	43.920	27.280	17.000	4.400	4.100	0.850	0.700	0.920	0.090
S 钢渣	40.480	30.240	14.010	5.930	3.390	1.680	1.000	2.290	0.290

1.3 试验方案

先选用 K、T、S 钢渣及传统无机抗剥落剂水泥,其粒径均能通过 0.075 mm 的方孔筛,分别选用未陈化的掺量为 100%、60%、30%K 钢渣及自然陈化后的掺量为 30% 的 K 钢渣替代普通石灰岩矿粉。根据

观测结果如图 1 所示。

从图 1 可以看出,经研磨工艺处理的 K 钢渣颗粒表面相对光滑,且颗粒粒径比石灰岩矿粉的要稍大一些。采用比表面积测试法(brunauer-emmett-teller, BET)和 t-plot 法测试石灰岩矿粉与钢渣粉的比表面积、孔容等参数,具体数据见表 6。

由表 6 可知,研磨处理后的钢渣粉经 BET 法测试的其总比表面积小于石灰岩矿粉的,微孔比表面积大于石灰岩矿粉的。经 t-plot 法测试的钢渣的外比表面积不足石灰岩矿粉的 1/3,这表明经研磨得到的钢渣粉比石灰岩矿粉更光滑,研磨可排除钢渣物理因素造成的影响。

各类矿粉的主要氧化物质量分数见表 7。

《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40—2004)确定各组最佳沥青用量,并依据《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)制备马歇尔试件进行水稳定性试验,对比分析同一掺量下水泥与不同钢渣的水稳定性差异。

2 路用性能结果及分析

2.1 沥青混合料配合比设计

为研究沥青混合料整体性能,试验采用 AC-25C 沥青混合料,采用 5~10、10~20 和 15~30 mm 三档粗集料;采用花岗岩 0~5 mm、河沙和机制砂 3 种细集料。对照组为普通石灰岩矿粉。合成后的级配曲线如图 2 所示。

通过试验确定级配一为最佳级配,最佳沥青掺量为 4.5%,各档集料掺配比例见表 8。

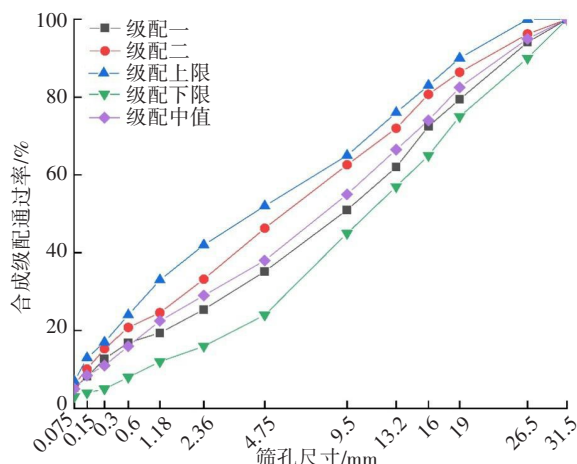


图 2 沥青混合料级配曲线

Fig. 2 Grading curve of asphalt mixture

表 8 集料掺配比例

Table 8 Aggregate mixing ratio %

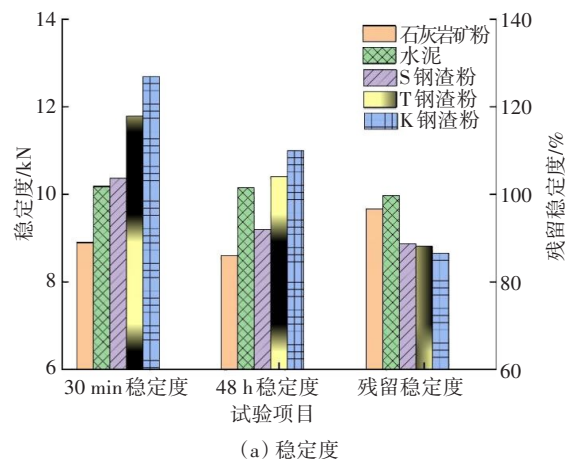
各粒径花岗岩集料的占比/mm				河沙	机制砂	矿粉
15~30	10~20	5~10	0~5			
20	30	15	6	10	15	4

2.2 不同种钢渣填料的水稳定性及化学成分分析

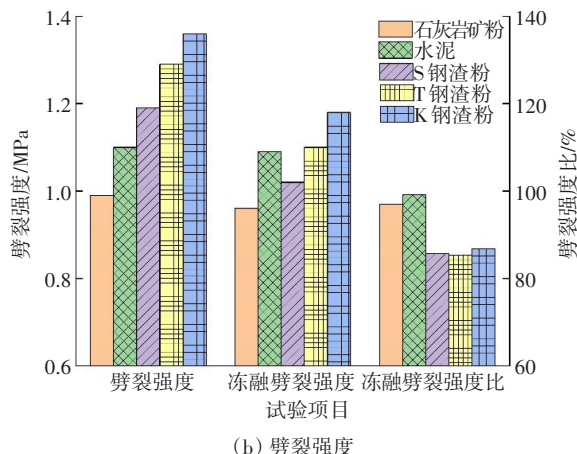
分别用 K、T、S 钢渣研磨得到的钢渣粉及传统无机抗剥落剂水泥,替代普通石灰岩矿粉,测试其马歇尔稳定度,试验结果如图 3 所示。

从图 3 可以看出,不同钢渣粉对沥青混合料的稳定度及劈裂强度的提高程度存在差异,掺入 S 钢渣粉的沥青混合料的 48 h 浸水马歇尔稳定度及冻融后的劈裂强度均弱于掺入水泥的,掺入其他钢渣粉的沥青混合料的各项试验数据均有不同程度的提高,提升幅度从大到小依次为:掺入 K 钢渣粉的沥青混合料、掺入 T 钢渣粉的沥青混合料、掺入 S 钢渣粉的沥青混合料、水泥。其中,掺入 K 钢渣粉的沥青混合料各项性能提升得最为明显,提升幅度为 28.0%~42.7%。从图 3 还可以看出,掺入石

灰岩矿粉及水泥的混合料残留稳定度及冻融劈裂强度比为对照组的 95%~100%。而各钢渣组的残留稳定度及冻融劈裂强度比仅为对照组的 85%~90%,这表明掺入钢渣粉的沥青混合料的水稳定性较差。掺入钢渣的沥青混合料均具有稳定度及强度高的优点和水稳定性差的缺点。



(a) 稳定度



(b) 劈裂强度

图 3 不同钢渣及水泥填料沥青混合料水稳定性对比

Fig. 3 Comparison of water stability performance of asphalt mixtures with different types of steel slag and fillers

各钢渣 XRD 结果如图 4 所示。从图 4 可以看出,钢渣的衍射峰较多,这说明钢渣成分复杂。不同钢渣的衍射峰出现位置及强度不同,据此推断出不同钢渣的成分及含量不同。本研究主要列举硅酸盐矿物相(C-S-H、C₂S、C₃S 等),CaO、Ca(OH)₂及 FeO、MgO、MnO 为主的二价金属氧化物连续固溶体(RO 相)。对比各钢渣硅酸盐矿物相的主要衍射峰可知,各钢渣主要硅酸盐矿物成分差异较大,衍射峰强度也不同,各硅酸盐矿物相的衍射峰强度从大到小依次为:K 钢渣、T 钢渣、S 钢渣。这表明:各钢渣具有水化活性的 C-S-H、C₂S、C₃S 等硅酸盐矿物相成分的质量分数从大到小依次为 K 钢渣、T 钢渣和 S

钢渣。同理,对比各钢渣的CaO矿物相的含量差异,含量从高到低依次为K钢渣、T钢渣、S钢渣。K钢渣未检测出 $\text{Ca}(\text{OH})_2$,T钢渣和S钢渣的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含量差别不大。从图3还可以看出,各钢渣RO相的成分差异不大。

因此,沥青混合料性能与钢渣的成分相关,特别是与钢渣中的硅酸盐矿物和CaO的含量密切相关,这两者含量越高,沥青混合料稳定性越好。但是沥青混合料性能与钢渣中 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 矿物相及RO相的关系不大。

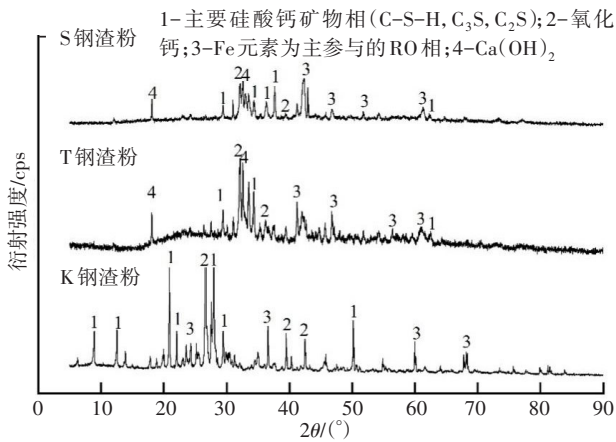
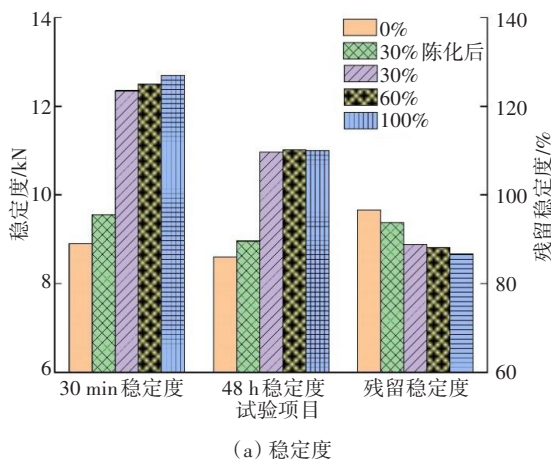


图4 不同钢渣XRD衍射对比图

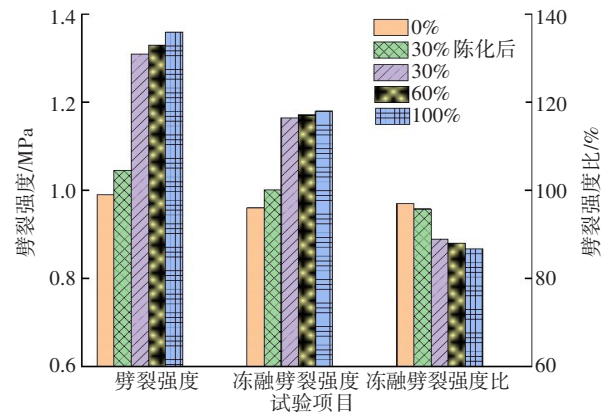
Fig. 4 XRD patterns of different types of steel slag

2.3 不同掺量及陈化前后钢渣填料的水稳定性及XRD分析

本研究选用对沥青混合料稳定度提升效果最好的K钢渣粉,分别采用掺量为0%、30%、60%、100%和掺量为30%的自然陈化180 d的K钢渣粉替换沥青混合料中的石灰岩矿粉,共分成5组,分别测试其水稳定性,试验结果如图5所示。



(a) 稳定度



(b) 劈裂强度

图5 K钢渣不同掺量水稳定性对比

Fig. 5 Effect of the type of steel slag on the water stability performances

从图5可以看出,掺入钢渣的沥青混合料的稳定度及劈裂强度均有不同幅度的提升,30%、60%、100%未陈化替代组相较于对照组,其稳定度及劈裂强度均有明显提升,且提升效果接近,提升幅度为28.0%~42.7%。30%陈化组与30%未陈化组相比,沥青混合料的稳定度及劈裂强度都有所降低,与对照组相比也无明显提升。随着钢渣掺量的增加,残留稳定度及冻融劈裂强度比逐渐减小,其值为85%~90%,陈化后的钢渣,其残留稳定度及冻融劈裂强度比的衰减幅度比未陈化钢渣的要小。

为研究K钢渣的陈化时间对沥青混合料性能的影响,采用XRD对未陈化及陈化180 d后的K钢渣进行矿物成分分析。陈化前后的K钢渣XRD如图6所示。从图6可以看出,陈化前后钢渣的主要衍射峰未发生改变,但衍射峰强度发生了明显的变化,这说明钢渣中主要的矿物成分未发生改变,但含量差异较大。未陈化钢渣的硅酸盐矿物相的衍射峰明显高于陈化后钢渣的,这表明:陈化后钢渣的硅酸盐矿物和CaO等活性物质含量明显减少;钢渣陈化前后的主要由Fe元素参与的RO相的衍射峰变化不明显,这表明RO相的成分和含量变化均不大。

钢渣陈化后,其内部硅酸盐矿物及CaO等活性成分含量明显下降,导致钢渣pH值上升,其与沥青作用形成胶浆的黏附性下降,最终导致沥青混合料的稳定度及劈裂强度明显下降。但由于钢渣内部活性物质减少,钢渣与水反应速率降低,提升了水稳定性。

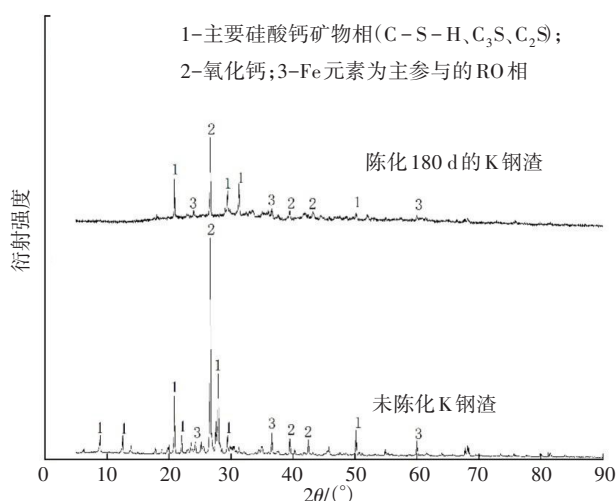


图6 陈化前后钢渣XRD衍射对比

Fig. 6 XRD patterns of steel slag before and after aging

3 结论

1) 不同钢渣的硅酸盐矿物及CaO等成分差异较大,导致最终形成的沥青混合料的水稳定性能差异较大。钢渣的硅酸盐矿物及CaO等活性成分含量高,有利于提升沥青混合料的马歇尔稳定度及劈裂强度,但高含量的硅酸盐矿物及CaO又会加剧内部的水反应,降低沥青混合料的水稳定性。

2) 对于同种钢渣,随自然陈化时间的延长,硅酸盐矿物及CaO等活性成分含量逐步下降,导致其作为填料的沥青混合料的马歇尔稳定度及劈裂强度性能下降,水稳定性提高。

3) 对于K钢渣,30%掺量的沥青混合料的稳定度及劈裂强度有明显提升,随掺量的增加,混合料性能未出现明显提升,水稳定性逐渐下降。

4) 从不同种类及不同掺量钢渣粉的替代中可以看出,钢渣粉能提高马歇尔稳定度、劈裂强度单一性能,但会使以残留稳定度及劈裂强度为代表的水稳定性性能下降,因此有必要研究复掺方案以提高整体性能。

参考文献(References):

[1] 何亮,詹程阳,吕松涛,等.钢渣沥青混合料应用现状[J].交通运输工程学报,2020,20(2):15-33.
HE Liang, ZHAN Chengyang, LYU Songtao, et al. Application status of steel slag asphalt mixture [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2020, 20(2):15-33.
[2] 武银君,王福满,张宜洛.不同类型抗剥落剂对花岗岩

沥青混合料性能影响研究[J].中外公路,2016,36(1):289-292.

WU Yinjun, WANG Fuman, ZHANG Yiluo. Study on the influence of different anti-stripping agents on the performance of granite asphalt mixture [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2016, 36(1):289-292.

[3] 陈杰,周智密,熊剑平,等.花岗岩沥青混合料压实特性分析[J].公路,2019,64(5):30-35.

CHEN Jie, ZHOU Zhimi, XIONG Jianping, et al. Analysis of compaction characteristics of granite asphalt mixture [J]. Highway, 2019, 64(5):30-35.

[4] 高畅,冯德成.花岗岩沥青混合料的路用性能研究[J].公路,2008,53(10):161-166.

GAO Chang, FENG Decheng. Study on road performance of granite mixture [J]. Highway, 2008, 53(10):161-166.

[5] 王富强,阳利君,莫品疆.提高花岗岩沥青混合料水稳定性试验研究[J].公路,2020,65(11):328-330.

WANG Fuqiang, YANG Lijun, MO Pinjiang. Experimental study on improving water stability of granite asphalt mixture [J]. Highway, 2020, 65(11):328-330.

[6] 李鸿轲,梁铎,肖志峰,等.钢渣粉性能表征及其对沥青混凝土水稳定性能的影响研究[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2020,44(3):536-540.

LI Hongke, LIANG Duo, XIAO Zhifeng, et al. Characterization of steel slag powder and its effect on moisture susceptibility of asphalt concrete [J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2020, 44(3):536-540.

[7] 吴少鹏,廖卫东,薛永杰,等.钢渣SMA-13在武黄大修工程中的应用研究[J].武汉理工大学学报,2003,25(12):113-115.

WU Shaopeng, LIAO Weidong, XUE Yongjie, et al. Application study of steel slag SMA-13 in Wuhuang highway heavy-repairing project [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2003, 25(12):113-115.

[8] 李继文.钢渣粉对沥青混凝土水稳定性影响研究[J].公路交通科技(应用技术版),2020,16(4):93-95.

LI Jiwen. Study on influence of steel slag powder on water stability of asphalt concrete [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development (Applied Technology Edition), 2020, 16(4):93-95.

[9] 姚爱玲,徐德龙,孙治军.矿渣粉作为填料的沥青混合料性能试验[J].中国公路学报,2006,19(6):25-29.

YAO Ailing, XU Delong, SUN Zhijun. Performance test on asphalt mixture of slag powder as filling [J]. China

- Journal of Highway and Transport, 2006, 19(6): 25-29.
- [10] 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 Canhua, XIANG Xiaodong, ZHOU Xiying. Investigation of performance of porous open graded steel slag asphalt mixture [J]. Journal of Building Materials, 2015, 18(1): 168-171.
- [11] 叶勇, 周新星, 刘全涛. 细集料对钢渣沥青混合料黏附性的影响研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2016, 40(3): 423-427.
- YE Yong, ZHOU Xinxing, LIU Quantao. Effect of fine aggregates on the adhesive properties of steel slag based asphalt mixtures [J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2016, 40(3): 423-427.
- [12] 温金保. 钢渣的机械力化学效应研究[D]. 南京: 南京工业大学, 2003.
WEN Jinbao. The study of mechano-chemical effect for the steel slag [D]. Nanjing: Nanjing Tech University, 2003.
- (责任编辑: 刘国奇; 校对: 欧兆虎; 英文编辑: 李岳林)

(上接第34页)

- prediction of highway subgrades based on genetic optimization neural network [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2019, 41(1): 124-130, 207.
- [7] 李建新, 刘小生, 肖钢, 等. 基于PSR-WSVM模型的边坡位移预测[J]. 大地测量与地球动力学, 2020, 40(6): 577-580.
LI Jianxin, LIU Xiaosheng, XIAO Gang, et al. Slope displacement prediction based on PSR-WSVM model [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2020, 40(6): 577-580.
- [8] 岳振华, 沈涛, 毛曦, 等. 循环神经网络的地面沉降预测方法[J]. 测绘科学, 2020, 45(12): 145-152.
YUE Zhenhua, SHEN Tao, MAO Xi, et al. Study on prediction method of land subsidence based on recurrent neural network [J]. Science of Surveying and Mapping, 2020, 45(12): 145-152.
- [9] 刘青豪, 张永红, 邓敏, 等. 大范围地表沉降时序深度学习预测法[J]. 测绘学报, 2021, 50(3): 396-404.
LIU Qinghao, ZHANG Yonghong, DENG Min, et al. Time series prediction method of large-scale surface subsidence based on deep learning [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2021, 50(3): 396-404.
- [10] CHO K, VAN MERRIENBOER B, GULCEHRE C, et al. Learning phrase representations using RNN encoder - decoder for statistical machine translation [C]// Proceedings of the 2014 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing (EMNLP). Doha, Qatar. Stroudsburg, PA, USA: Association for Computational Linguistics, 2014.
- [11] 杨亚波. 基于深度置信网络的边坡位移预测研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2020.
YANG Yabo. Study on slope displacement prediction based on depth confidence network [D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2020.
- [12] BOULANGER-LEWANDOWSKI N, BENGIO Y, VINCENT P. Modeling temporal dependencies in high-dimensional sequences: application to polyphonic music generation and transcription [C]// Proceedings of the 29th International Conference on International Conference on Machine Learning. 26 June 2012, Edinburgh, Scotland. New York: ACM, 2012: 1881 - 1888.
- (责任编辑: 欧兆虎; 校对: 罗容; 英文编辑: 陈璐)