

# 抗剥落剂对沥青混合料水稳定性影响研究

Study on the Effect of Anti-spalling Agent on Water Stability of Asphalt Mixture

郭峰

(洛阳理工学院 土木工程学院, 河南 洛阳 471023)

**摘要:** 为改善沥青混合料水稳定性, 采用消石灰和水泥两种抗剥落剂改良沥青混合料, 并通过室内试验研究抗剥落剂对沥青混合料水稳定性影响规律。结果表明, 掺抗剥落剂的沥青混合料抗水损害能力提高, 抗剥落剂掺量每增加1%, 沥青混合料冻融劈裂抗拉强度比降低不超过2.6%; 消石灰掺量1%时, 沥青混合料残留稳定度最大, 较未掺抗剥落剂的沥青混合料残留稳定度提高11.4%以上; 抗剥落剂可减小沥青混合料浸水飞散损失, 抗剥落剂掺量 $\geq 1\%$ 时, 石灰和水泥掺量增加1%, 沥青混合料浸水飞散损失分别平均增大9.5%、9.6%。

**关键词:** 沥青混合料; 消石灰; 水泥; 水稳定性; 试验研究

中图分类号: U414 文献标志码: A 文章编号: 1005-8249 (2023) 06-0076-05

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2023.06.012

GUO Feng

(School of Civil Engineering, Luoyang Institute of Technology, Luoyang 471023, China)

**Abstract:** In order to improve the structural water stability of the asphalt mixture, the asphalt mixture was improved by two anti-spalling agents of lime and cement, and the influence of the anti-spalling agent on the water stability of the asphalt mixture was studied through indoor experiments. The results show that the water damage resistance of asphalt mixtures mixed with anti-spalling agents under freeze-thaw conditions is improved, and the tensile strength ratio of asphalt mixtures with anti-spallant dosage of 1% is significantly improved. The residual stability of the asphalt mixture is the largest when the amount of lime is 1% or 2% of the cement mixture, and the residual stability of the asphalt mixture is increased by more than 9.2% compared with the residual stability of the asphalt mixture without anti-spalling agent; Anti-spalling agent can reduce the loss of water immersion and scattering of asphalt mixture, when the amount of anti-spalling agent is  $\geq 1\%$ , the amount of lime and cement is increased by 1%, and the loss of water immersion of asphalt mixture is increased by an average of 9.5% and 9.6%, respectively.

**Keywords:** asphalt mixtures; lime removal; cement; water stability; experimental studies

## 0 引言

沥青混合料属于孔隙结构<sup>[1-2]</sup>, 在交通荷载、

湿度、温度等因素综合作用下, 沥青路面易出现不同程度的病害, 降低沥青路面使用质量和使用寿命。其中, 水损害已成为沥青路面病害的主要类型。水分浸入路面结构内部孔隙, 交通荷载下产生真空泵吸作用, 孔隙内部自由水冲刷沥青与集料黏结界面, 破坏混合料结构稳定性。因此, 针对沥青混合料水稳定性, 国内外学者通过改性沥青、调整级配或添加外掺剂等方面展开了研究。

作者简介: 郭峰 (1979—), 男, 硕士研究生, 讲师, 研究方向: 道路与桥梁工程。

收稿日期: 2023-06-25

李菁若等<sup>[3]</sup>研究了焚烧飞灰对沥青混合料颗粒对沥青混合料水稳定性影响,发现沥青混合料掺焚烧飞灰颗粒后的冻融劈裂强度提高。黄继蓉等<sup>[4]</sup>研究了冲刷参数对高黏沥青混合料水稳定性影响规律,冲刷速度和冲刷时间对其质量损失率影响最大。谭波等<sup>[5]</sup>研究了水泥、消石灰及抗剥落剂对酸性闪长岩沥青混合料水稳定性影响,发现抗剥落剂改性沥青易老化,且长期水稳定性差。王蕾等<sup>[6]</sup>采用浸水汉堡车辙试验,研究了水泥对沥青混合料抗水损害能力的影响,混合料掺入水泥后水稳定性提高。于立泽等<sup>[7]</sup>采用自制的渗水试验模型,研究了级配类型对沥青混合料渗水速率的影响,发现大孔隙结构的沥青混合料排水特性较优,低温性能和水稳定性较差。吴小恋<sup>[8]</sup>研究了消石灰及抗剥落剂掺量对沥青混合料水稳定性改善效果,发现抗剥落剂增大沥青与集料的黏附性,提高沥青混合料水稳定性。张彩利等<sup>[9]</sup>对比研究了热闷钢渣沥青混合料、冷弃陈渣沥青混合料及石灰岩沥青混合料路用性能,发现钢渣沥青混合料水稳定性优于石灰岩沥青混合料。

鉴于此,本文选用消石灰和水泥两种抗剥落剂,通过室内冻融劈裂试验、浸水马歇尔试验和浸水飞散试验,对比研究消石灰和水泥对沥青混合料水稳定性影响规律,为沥青路面材料设计提供参考。

## 1 原材料与试验方案

### 1.1 原材料

#### (1) 沥青

沥青选用镇海 A 级 90#石油沥青,按试验规程<sup>[10]</sup>测定其技术性质,见表 1。

表 1 沥青技术性质

Table 1 Technical properties of asphalt

测试项目	测试值	规定值
针入度 (25 ℃) /0.1mm	85.2	80~100
软化点/℃	48.5	≥44
延度 (15 ℃) /cm	113	≥100
质量变化/%	0.09	≤±0.8
RTFOT 老化后 残留针入度比 (25 ℃) /%	75.6	≥57
残留延度 (10 ℃) /cm	11	≥8

#### (2) 集料

粗集料选用玄武岩碎石,细集料选用机制砂,

按试验规程 [11] 测定集料技术性质,见表 2~表 3。

表 2 粗集料技术性质

Table 2 Technical properties of the crude aggregate

测试项目	测试值	规定值
压碎值/%	16.5	≤28
洛杉矶磨耗值/%	15.4	≤30
表观相对密度/ $g \cdot cm^{-3}$	2.728	≥2.5
坚固性/%	10.6	≤12

表 3 细集料技术性质

Table 3 Technical properties of the fine aggregate

测试项目	测试值	规定值
表观相对密度/ $g \cdot cm^{-3}$	2.678	≥2.5
坚固性/%	14.3	≥12
含泥量/%	2.1	≤3
砂当量/%	76	≥60
棱角性/s	42	≥30

#### (3) 填料

填料选用磨细的石灰岩矿粉,技术性质见表 4。

表 4 矿粉技术性质

Table 4 Technical properties of mineral powder

测试项目	测试值	规定值
表观相对密度/ $t \cdot m^{-3}$	2.610	≥2.5
含水量/%	0.3	≤1
外观	无团粒结块	无团粒结块
亲水系数/%	0.83	≤1

#### (4) 抗剥落剂

抗剥落剂采用消石灰、水泥,水泥采用普通硅酸盐水泥 P·O 42.5,3 d 抗压强度和抗折强度分别为 16.27 MPa、4.37 MPa;消石灰采用 I 级消石灰,MgO+CaO 含量为 76.2%。

### 1.2 试验方案

采用水泥、消石灰等量替代矿粉掺量,通过室内冻融劈裂试验、浸水马歇尔试验、浸水飞散试验,对比研究水泥、消石灰掺量对沥青混合料水稳定性影响规律。试验中,拟各类抗剥落剂掺量为 1%、2%、3%、4%。其中,掺抗剥落剂的沥青混合料为试验组,未掺抗剥落剂的沥青混合料为对照组,每组试验采用 4 个平行试件。抗剥落剂掺量为外加剂干质量与集料干质量的比值。

### 1.3 试件制备

按试验规程<sup>[10]</sup>中击实法成型  $\Phi 101.6 \times h 63.5$  mm 的沥青混合料马歇尔试件。沥青混合料拌和采用干掺法<sup>[12-14]</sup>,击实温度为  $(105 \pm 5)$  ℃,双面击实

## 材料科学

50 次。

### 1.4 性能测试方法

#### (1) 冻融劈裂试验

马歇尔试件分为两组，一组试件置于室温条件下备用，一组试件饱水后置于  $(-18 \pm 2)^\circ\text{C}$  恒温冰箱中 16 h 备用。试件按规定条件处理后，选用马歇尔试验仪分别测定两组试件劈裂强度，并计算冻融劈裂抗拉强度比 TSR，见式 (1)。试验中，马歇尔试验仪加载速率为 50 mm/min。

$$TSR = R_{T1} / R_{T2} \times 100 \quad (1)$$

式中：TSR 为冻融劈裂抗拉强度比，%； $R_{T1}$ 、 $R_{T2}$  分别为试件冻融前后劈裂抗拉强度平均值，MPa。

#### (2) 浸水马歇尔试验

马歇尔试件在  $60^\circ\text{C}$  恒温水浴箱中浸水 48 h 后，采用马歇尔试验仪分别测定浸水试件和非浸水试件稳定度，计算其残留稳定度。残留稳定度  $MS_0$  为浸水马歇尔试件与非浸水马歇尔试件稳定度的比值，表达式见式 (2)。

$$MS_0 = MS_1 / MS_2 \times 100\% \quad (2)$$

式中： $MS_1$  为浸水马歇尔试件稳定度，kN； $MS_2$  为非浸水马歇尔试件稳定度，kN。

#### (3) 浸水飞散试验

马歇尔试件置于  $60^\circ\text{C}$  恒温水浴箱中浸水 48 h 后，并于室温放置 24 h，用干毛巾擦拭试件，称取试件原始质量  $m_0$ 。采用洛杉矶试验仪开展飞散试验，旋转 300 转，转速为 30 r/min，称取试件剩余质量  $m_1$ ，计算质量损失。浸水飞散损失  $\Delta S$  为试件质量损失与剩余质量的比值，表达式见式 (3)。

$$\Delta S = (m_1 - m_0) / m_1 \times 100\% \quad (3)$$

## 2 沥青混合料配合比设计

参照 JTG F40-2004 《公路沥青路面施工技术规范》<sup>[15]</sup> 中 AC-16 沥青混合料的矿料级配，根据集料筛分试验结果初选矿料级配，见表 5。矿粉掺量为 4%。矿粉掺量为矿粉干质量与集料干质量的比值。

三种矿料级配的马歇尔试件物理力学性质见表 6。

表 5 矿料级配

级配类型	集料通过下列粒径 (mm) 通过质量百分率/%									
	19	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.075
A	100	97.2	87.9	74.6	49.8	40.0	30.6	17.4	10.0	6.7
B	100	96.5	82.3	68.6	43.1	35.0	28.1	17.4	10.8	8.2
C	100	94.5	81.6	63.7	38.5	30.0	23.2	13.6	8.2	7.8

表 6 沥青混合料物理力学性质

测试项目	下列矿料级配对应沥青混合料物理力学性质			规定值
	A	B	C	
油石比/%	4.6	4.8	5.0	—
毛体积相对密度	2.298	2.415	2.369	—
理论最大相对密度	2.511	2.516	2.509	—
空隙率/%	4.5	3.8	4.8	3~5
矿料间隙率/%	13.9	13.8	15.3	$\geq 13$
饱和度/%	68.7	74.6	65.1	65~75
稳定度/kN	9.11	9.43	8.65	$\geq 8.0$
流值/mm	2.9	3.1	3.5	2~4

由表 6 可知，采用矿料级配 B 制备的沥青混合料物理性质满足设计要求<sup>[14]</sup>，且稳定度高于矿料级配 A、C 制备的沥青混合料稳定度。故选用矿料级配 B 开展沥青混合料水稳定性研究，最佳沥青用量为 4.8%。

## 3 试验结果与分析

### 3.1 冻融劈裂试验

掺抗剥落剂沥青混合料冻融劈裂试验结果见图 1。未掺抗剥落剂的沥青混合料冻融劈裂抗拉强度比（以下简称“劈裂强度比”）为 79.6%，满足 JTG E20-2011 中沥青混合料劈裂强度比要求，即  $TSR \geq 75.0\%$ 。

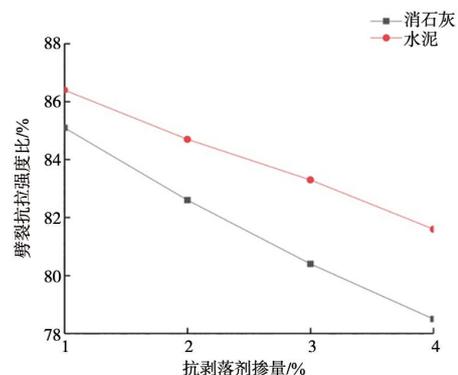
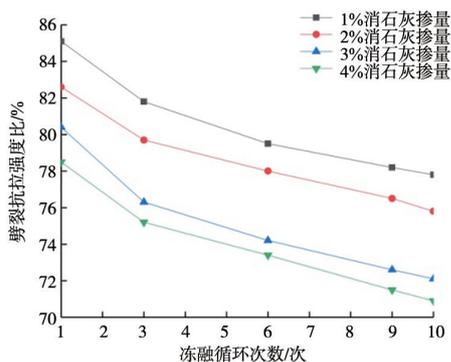
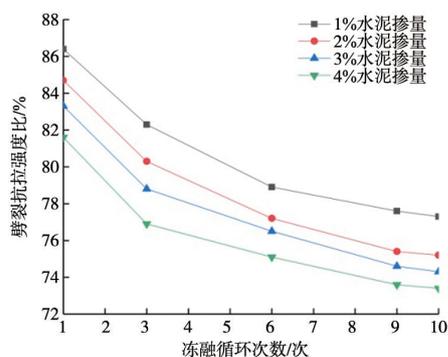


图 1 掺抗剥落剂沥青混合料劈裂试验结果  
Fig. 1 Results of splitting test for asphalt mixture with anti-stripping agent

由图 1 可知, 消石灰和水泥对沥青混合料劈裂强度比影响规律一致, 沥青混合料添加 1% 掺量抗剥落剂后, 沥青混合料劈裂强度比提高, 后随抗剥落剂掺量增加, 沥青混合料劈裂强度比呈线性趋势降低, 且掺消石灰的沥青混合料劈裂强度比降低速率较大。抗剥落剂掺量  $\geq 1\%$  时, 消石灰掺量增加 1%, 沥青混合料劈裂强度比降低 2.6%; 水泥掺量增加 1%, 沥青混合料劈裂强度比降低 1.9%, 说明水泥较消石灰对沥青混合料水稳定性改善效果较明显。另外, 与未掺抗剥落剂的沥青混合料相比, 掺 4% 消石灰的沥青混合料劈裂强度比降低, 劈裂强度比为 78.5%, 满足 JTG E20-2011 中沥青混合料劈裂强度比要求。



(a) 消石灰掺量~冻融条件下沥青混合料劈裂强度比关系



(b) 水泥掺量~冻融条件下沥青混合料劈裂强度比关系

图 2 掺抗剥落剂沥青混合料冻融劈裂试验结果

Fig. 2 Results of freeze-thaw splitting test for asphalt mixture with anti stripping agent

为较好模拟季冻区沥青路面冻融循环过程, 按冻融劈裂试验方法依次开展 3 次、5 次、7 次、9 次、10 次的冻融循环, 分析冻融循环条件下掺抗剥落剂的沥青混合料劈裂强度比变化规律。冻融

循环试验结果见图 2。

由图 2 可知, 同一抗剥落剂掺量下, 随冻融循环次数增加, 沥青混合料劈裂强度比缓慢降低, 即冻融条件下掺抗剥落剂的沥青混合料抗水损害能力减弱较小。当抗剥落剂选用消石灰时, 冻融循环初期沥青混合料劈裂强度比平均降低 3.8%, 后随冻融次数增加, 沥青混合料劈裂强度比劈裂强度比呈线性趋势降低, 冻融次数增加 1 次, 沥青混合料劈裂强度比约降低 0.8%。当抗剥落剂选用水泥时, 沥青混合料劈裂强度比随冻融次数增加逐渐降低, 且冻融次数  $\geq 9$  次, 其劈裂强度比趋于稳定; 冻融次数由 1 次增加至 3 次时, 沥青混合料劈裂强度比平均降低 5.3%; 冻融次数  $\geq 3$  次时, 冻融次数增加 1 次, 沥青混合料劈裂强度比约降低 0.8%, 说明冻融次数对掺不同抗剥落剂的沥青混合料影响规律大致相近, 这是由于沥青混合料强度主要由集料间的嵌挤作用和胶结料与集料间的黏结作用, 冻融循环作用下水与集料接触面积增大, 致使沥青剥落, 沥青与集料黏结力降低, 且集料间孔隙率增大, 故掺不同抗剥落剂的沥青混合料劈裂强度比降低规律相近。

### 3.2 浸水马歇尔试验

掺抗剥落剂沥青混合料浸水马歇尔试验结果见图 3。未掺抗剥落剂的沥青混合料残留稳定度为 80.8%。

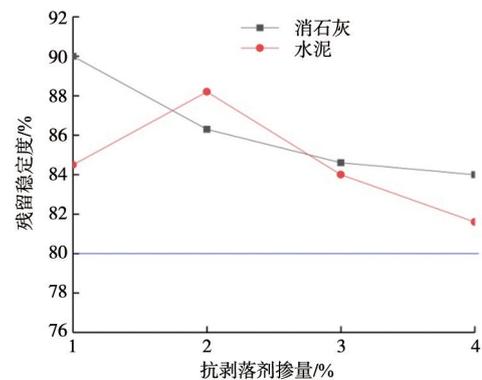


图 3 掺抗剥落剂沥青混合料浸水马歇尔试验结果

Fig. 3 Results of immersion Marshall test for asphalt mixture with anti stripping agent

由图 3 可知, 沥青混合料掺入抗剥落剂后, 其残留稳定度增大, 即抗剥落剂可提高沥青混合

## 材料科学

料水稳定性。随抗剥落剂掺量增加,沥青混合料残留稳定度先增加后降低,在消石灰掺量 1% 时,沥青混合料残留稳定度取得最大值,为 90.0%,较未掺抗剥落剂的沥青混合料残留稳定度提高 11.4%;在水泥掺量 2% 时,沥青混合料残留稳定度取得最大值,为 88.2%,较未掺抗剥落剂的沥青混合料残留稳定度提高 9.2%。另外,同一掺量的消石灰沥青混合料和水泥沥青混合料残留稳定度比值如图 4 所示,随抗剥落剂掺量增加,其比值先降低后增大,在掺量 2% 时,比值最小,为 0.98,其余掺量的沥青混合料残留稳定度比值均 > 1.0,说明消石灰较水泥改善沥青混合料水稳定性效果良好。

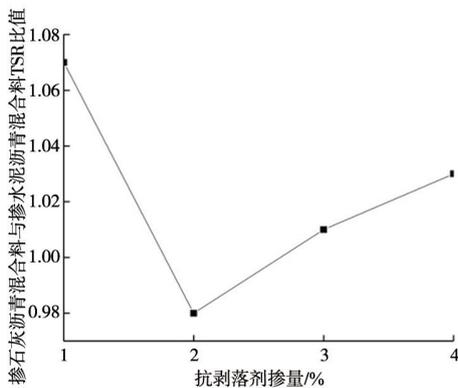


图 4 不同抗剥落剂沥青混合料的 TSR 比值关系  
Fig. 4 TSR ratio relationship of asphalt mixtures with different anti stripping agent

### 3.3 浸水飞散试验

掺抗剥落剂沥青混合料浸水飞散试验结果见图 5。未掺抗剥落剂的沥青混合料浸水飞散损失为 14.7%。

由图 5 可知,沥青混合料掺入抗剥落剂后,其浸水飞散损失降低,即抗剥落剂提高沥青混合料抗水损害能力,且同一掺量的消石灰和水泥改善沥青混合料抗水损害能力效果相当。当抗剥落剂掺量  $\geq 1\%$ ,沥青混合料浸水飞散损失随抗剥落剂掺量增加而逐渐增大,且增大速率逐渐降低。消石灰掺量增加 1%,沥青混合料浸水飞散损失平均增大 9.5%;水泥掺量增加 1%,沥青混合料浸水飞散损失平均增大 9.6%,说明抗剥落剂对沥青混合料浸水飞散损失影响较大。

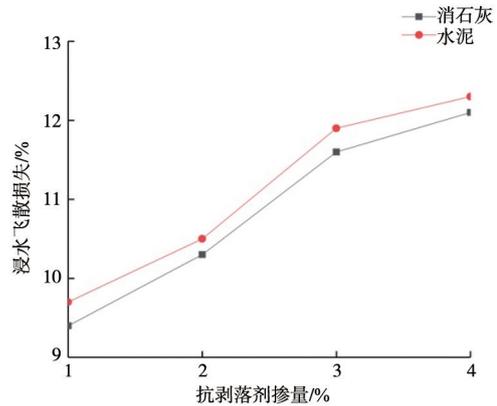


图 5 掺抗剥落剂沥青混合料浸水飞散试验结果  
Fig. 5 Results of immersion and dispersion test for asphalt mixture with anti stripping agent

## 4 结论

(1) 沥青混合料掺抗剥落剂后,沥青混合料劈裂强度比提高,抗水损害能力随冻融次数增加而减弱,且冻融循环作用对掺不同抗剥落剂的沥青混合料影响规律大致相近,冻融次数增加 1 次,冻融劈裂强度约降低 0.8%。

(2) 抗剥落剂可改善沥青混合料水稳定性,石灰较水泥提高沥青混合料残留稳定度效果较显著,消石灰掺量 1% 或水泥掺量 2% 时,沥青混合料残留稳定度最大,较未掺抗剥落剂的沥青混合料残留稳定度提高 9.2% 以上。

(3) 抗剥落剂可减小沥青混合料浸水飞散损失,同一掺量的消石灰和水泥改善沥青混合料飞散损失效果相当,抗剥落剂掺量  $\geq 1\%$  时,石灰和水泥掺量增加 1%,沥青混合料浸水飞散损失分别平均增大 9.5%、9.6%。

## 参 考 文 献

- [1] 徐良,杜西江,胡靖. 级配特征对沥青混合料细观孔隙结构影响 [J]. 公路, 2022, 67 (1): 27-32.
- [2] 万青青. 纤维透水沥青混合料的路用性能研究 [D]. 宁夏: 宁夏大学, 2020.
- [3] 李菁若,唐伯明,刘瑞全,等. 焚烧飞灰颗粒对沥青混合料水稳定性的影响 [J]. 建筑材料学报, 2021, 24 (5): 1048-1053.
- [4] 黄维蓉,王娇,杨玉柱,等. 基于动水冲刷试验的温拌高

(下转第 104 页)

## 材料科学

## 参 考 文 献

- [1] 贾鲁涛, 吴倩云. 煤矸石特性及其资源化综合利用现状 [J]. 煤炭技术, 2019, 38 (11): 37-40.
- [2] 盛燕萍, 乔云雁, 薛哲, 等. 工业固体废弃物在道路基层应用中的研究进展 [J]. 筑路机械与施工机械化, 2016, 33 (4): 78-81.
- [3] 孙康煤. 矸石混合料路面基层的力学性能研究 [D]. 河北工程大学, 2021.
- [4] 汪钺宸. 二灰稳定煤矸石作路面基层材料的试验及应用研究 [J]. 北方交通, 2017, (7): 112-115+118.
- [5] 李彩惠, 张亚鹏, 王海燕, 等. 煤矸石混合料路面基层施工工艺研究 [J]. 河北工程大学学报 (自然科学版), 2013, 30 (3): 54-56.
- [6] 李明, 李昶, 郭雨鑫, 等. 水泥稳定碎石-煤矸石混合料性能试验研究 [J]. 硅酸盐通报, 2019, 3809: 2895-2901+2909.
- [7] 冀欣, 盛燕萍, 路再红, 等. 掺加钢渣的半刚性基层材料性能 [J]. 长安大学学报 (自然科学版), 2021, 41 (4): 21-31.
- [8] 吴旻. 二灰钢渣土用于公路基层的试验研究 [D]. 南京林业大学, 2009.
- [9] ZHOU Q W, LING T Q, WU M. Application study of steel slag in pavement base [J]. Subgrade Engineering, 2011 (4): 144-146.
- [10] MA Q Q, LIU H. Analysis of obstacle of development and application that coal gangue used in china road engineering [J]. Advanced Materials Research, 2014 (900): 510-513
- [11] 中华人民共和国交通部 JTG /T F20—2015, 公路路面基层施工技术细则 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
- [12] 黄俊强, 陈仕周, 慕海瑞, 等. 均匀设计、回归分析在排水性混合料配比设计中的应用研究 [J]. 中外公路, 2009, 29 (5): 239-242.
- [13] 孟文清, 全建升, 崔邯龙, 等. 石灰-粉煤灰稳定煤矸石混合料抗压强度试验研究 [J]. 混凝土与水泥制品, 2012, 6: 70-72.
- [14] 徐献海, 王延, 张聚军, 等. 煤矸石混合料抗压回弹模量试验研究 [J]. 煤炭工程, 2014, 46 (7): 111-113.
- [15] 孟文清, 张志飞, 张亚鹏, 等. 煤矸石混合料劈裂强度试验研究 [J]. 施工技术, 2013, 4210: 58-60.
- [16] 中华人民共和国交通部 JTG E51—2009, 公路工程无机结合料稳定材料试验规程 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2009.
- [17] 黄祖德. 煤矸石混合料在路面基层中的应用性能研究 [D]. 河北工程大学河北省. 2014.
- [18] 黏沥青混合料水稳定性研究 [J]. 硅酸盐通报, 2021, 40 (11): 3847-3853.
- [5] 谭波, 刘学文. 不同处治方法下酸性闪长岩沥青混合料长期水稳性能室内试验 [J]. 华侨大学学报 (自然科学版), 2021, 42 (5): 605-610.
- [6] 王蕾, 张正全, 陈启明. 水泥对沥青混合料水稳定性影响试验研究 [J]. 路基工程, 2021 (4): 94-98.
- [7] 于立泽, 刘作强, 张海涛, 等. 功能性沥青混合料排水特性的评价研究 [J]. 重庆理工大学学报 (自然科学), 2021, 35 (8): 106-113.
- [8] 吴小恋. 沥青混合料水稳定性改善研究 [J]. 石油沥青, 2021, 35 (1): 57-60+72.
- [9] 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.
- [10] JTG E20—2011. 公路工程沥青及沥青混合料试验规程 [S]. 北京: 中华人民共和国交通运输部, 2011.
- [11] JTG E42—2005. 公路工程集料试验规程 [S]. 北京: 中华人民共和国交通运输部, 2005.
- [12] 唐俊成. 抗剥落剂对胶粉改性沥青及混合料性能影响研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2019.
- [13] 张盼. 抗剥落剂对季节性冻土区沥青混合料路用性能的研究 [D]. 兰州: 兰州理工大学, 2017.
- [14] 柴金玲, 栗威. 基于GTM的沥青混合料配合比设计方法试验研究 [J]. 材料导报, 2020, 34 (S2): 1283-1287.
- [15] JTG F40—2004. 公路沥青路面施工技术规范 [S]. 北京: 中华人民共和国交通运输部, 2004.

(上接第 80 页)