

赤泥矿粉沥青混合料的抗水损坏研究

付善春^{1,2}, 王冬冬^{1,2}, 沈红艳³

- (1. 信阳学院土木工程学院, 河南 信阳 464000;
2. 信阳市装配式建筑重点实验室, 河南 信阳 464000;
3. 信阳学院图书馆, 河南 信阳 464000)

摘要:为了解决制铝工业中排放的赤泥废弃料难题,为了探究赤泥矿粉替代量对沥青混合料抗水损坏性能的影响,提高废弃物资源的再利用率,采用“干法改性”方案,利用赤泥等质量代替沥青混合料中的石灰岩矿粉制成赤泥沥青胶浆和赤泥沥青混合料,通过赤泥沥青胶浆的吸持性能实验和赤泥沥青混合料的浸水马歇尔实验、冻融循环劈裂实验、浸水车辙实验来测试不同替代量赤泥沥青胶浆的粘附性能和赤泥沥青混合料的抗水损坏性能。结果表明:赤泥替代沥青混合料中的石灰岩矿粉能有效地改善沥青胶浆的粘附性能和沥青混合料的抗水损坏性能。而且通过对赤泥沥青胶浆粘附性能和沥青混合料抗水损坏的机理分析揭示了赤泥沥青混合料抗水损坏性能的原因,得出赤泥替代量为50%时沥青混合料性能较佳的结论。

关键词:赤泥矿粉;干法改性;抗水损坏性能;较佳替代量

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2022.05.005

中图分类号:TD989 文献标志码:A 文章编号:1000-6532(2022)05-0025-06

赤泥是制铝过程中产生的工业废料,随着经济的不断发展,每年都有数百万吨的废料产生^[1-3],大量排放引发了一系列的环境问题和安全问题,如何最大限度地处理赤泥废弃物已经成为了非常重要的课题。根据相关资料^[4],我国沥青路面的破坏大部分都和水损坏有关,为了延缓沥青路面的水损坏、增强沥青路面的整体性能,加强对沥青混合料抗腐蚀性能的研究具有重要的实践意义。通常情况下,沥青混合料中的矿粉不仅会起到填充作用,而且还会起到胶浆作用,矿粉与沥青结合在一起形成的胶浆会直接影响沥青混合料的基本性能。

目前,国内外关于基质沥青改性的研究主要集中在“湿法改性”上,研究者力图通过把改性剂以一定比例掺入到基质沥青中来改善基质沥青的某些性能指标^[5-7]。但是这种方法也有很大的缺陷,比如在具体施工过程中由于需要事先对基质

沥青进行“湿法改性”操作步骤,而会耽误大量的时间,不利于在施工过程中大规模推广。基于这样的研究背景,本文采用“干法改性”,通过用赤泥替代沥青混合料中的石灰岩矿粉,开展赤泥沥青混合料抗水损坏性能的研究。

1 实验材料与方法

1.1 实验材料

1.1.1 集料

实验采用某采石场棱角形、压碎值较高,表面纹理较好、片状较低的石灰岩作为矿质集料。根据《公路工程集料试验规程》JTG E42-2005与《公路沥青路面施工技术规范》JTG F40-2004中的要求对集料进行了10个档次的筛分实验,其结果均符合技术规范^[8-9]。

1.1.2 基质沥青

采用“东海牌”海牌青2级道路石油沥青,该

收稿日期:2020-05-30;改回日期:2020-07-07

基金项目:河南省科技攻关计划项目(222102210306);河南省高等学校重点科研项目:赤泥改性沥青混合料的综合利用研究(23B560013);信阳学院校级科研项目资助(No.2022-XJLYB-014)

作者简介:付善春(1989-),男,讲师,硕士,主要从事建筑材料方面的研究。

沥青 25℃ 常温下较硬,符合规范《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》JTG E20-2011 的要求。

1.1.3 赤泥

实验中采用某制铝过程中产生的赤泥废料,其主要化学成分见表 1。

1.1.4 石灰岩矿粉

采用的某矿粉厂生产的石灰岩矿粉,其化学成分见表 2,石灰岩矿粉技术指标检测结果见表 3。

表 1 赤泥的主要化学成分/%

Table 1 Main chemical composition of red mud

Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	其他
72.27	14.38	5.19	2.13	1.69	0.97	3.37

表 2 石灰岩的主要化学成分/%

Table 2 Main chemical constituent of limestone

Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	其他
33.86	16.32	1.23	2.22	37.81	6.52	2.04

表 3 石灰岩矿粉技术指标检测结果

Table 3 Test results of technical indexes of limestone powder

各项技术指标	规范要求	实验检测结果	实验方法
含水量,不大于, %	1	0.18	T0103烘干法
表观密度,不小于, t/m ³	2.50	2.685	T 0352-2000
粒度范围<0.075 mm, %	75~100	86.7	T 0351-2000
加热安定性	实测记录	与加热前矿粉颜色一致	T 0355-2000

1.2 矿料级配设计

本实验采用的是 AC-13 连续型密级配^[10],其关键性筛孔为 2.36 mm,通过率要求小于 40%;结合国内外表层沥青混合料 AC-13 级配控制对比表,确定 AC-13 型沥青混凝土矿料级配见表 4。

表 4 AC-13 沥青混合料级配设计

Table 4 AC-13 Asphalt Mixture Gradation Design

方孔筛/mm	通过的质量百分数/%			
	合成级配	级配上限	级配下限	目标级配
16	100	100	100	100
13.2	96.7	100	90	95
9.5	69.8	85	68	70.5
4.75	40.9	68	38	40.5
2.36	30	50	24	30.5
1.18	20.8	38	15	20.5
0.6	15.4	28	10	15
0.3	12.2	20	7	12
0.15	9.8	15	5	8.5
0.075	6.5	8	4	6

1.3 赤泥矿粉沥青胶浆配合比的确定

在实验的过程中,采用 m(矿粉): m(沥青)=2:1 配比,赤泥分别按质量替代石灰岩矿粉的 0、25%、50%、75%、100% 进行五组份实验。

1.4 试件制备

为了减少实验变量,采用同一个级配制作成五组试件:赤泥矿粉替代石灰岩矿粉占比为 0、25%、50%、75%、100%。在实验过程中,以 AC-

13 级配作为实验用级配,按照《公路工程沥青混合料及沥青混合料实验规程》(JTJ 052-2000)和《公路沥青路面施工技术规范》(JTGF 40-2004)中规定的方法制作成圆柱形试件,试件尺寸为 101.6 方法制作成圆柱,试件成型后,将其放在室温条件下干燥。

2 赤泥沥青胶浆的粘附性能实验

按照现行相关规范,在评价集料与沥青之间的粘附性时往往采用水煮法和水浸法,但是这种方法只能定性地对集料与沥青之间的粘结情况进行评价,存在一定的缺陷。为了准确地、定量地对集料和沥青间的粘附性能进行描述,本文采用吸持性能实验进行分析和描述。

2.1 吸持性实验

实验时参照纤维对沥青吸附能力的吸持性实验来评价赤泥矿粉替代石灰岩矿粉后的吸持程度^[11]。在实验开始前,称取一定质量的混合料放在圆形漏斗型网筛上,再将烧杯和网筛一起放进烘箱中恒温 15 min,烘箱温度依次设置为:140、160 和 170℃。恒温时间到后,将圆形漏斗型网筛与烧杯一起拿出,置于室内常温环境下,当网筛上不再滴落多余沥青时称取滴落下来的沥青质量。计算公式为:吸持量=(开始时的沥青质量-滴落下来的沥青质量)/开始时的沥青质量。具体实验结果见表 5。

表 5 不同赤泥矿粉掺量下沥青胶浆吸持量的变化情况
Table 5 Change of holding capacity of asphalt mortar with different red mud content

赤泥矿粉掺量/%	140 ℃ 的吸持量/%	160 ℃ 的吸持量/%	170 ℃ 的吸持量/%
0	61	49	31
25	73	56	39
50	85	69	44
75	91	75	49
100	95	80	51

由于赤泥的主要矿物为文石和方解石，是颗粒状物质，其直径大约是 0.088~0.25 mm，赤泥矿粉颗粒的碱性大于石灰岩矿粉，所以赤泥矿粉的吸持能力要优于石灰岩矿粉。从表 5 同样可以看出，用赤泥矿粉代替石灰岩矿粉可以有效地改善普通石灰岩矿粉对沥青的吸附能力。在一定条件下，随着赤泥矿粉替代量的增大，吸附能力也在不断增强。当赤泥矿粉的替代量在 50% 以下时，沥青的吸持量在快速增加；当赤泥矿粉的替代量大于 50% 时，沥青的吸持量虽然也在增加，但增加幅度明显减小，呈现出放缓的趋势。

在吸持实验中，当其他条件不变时，随着赤泥矿粉代替石灰岩矿粉量的增加，沥青的吸持量也在增大，这主要是由于赤泥矿粉对沥青材料中极性成分的吸附作用和牵引作用导致。但当温度升高到一定值时，由于沥青流动性不断增加，沥青膜外部沥青在自身重力作用下会发生剥落^[12]，在宏观上体现为沥青吸持量减少。

3 赤泥矿粉沥青混合料的抗水损坏性实验

水损坏是沥青路面的主要病害之一，它在很大程度上会影响到沥青路面的使用性能。因为水分的入侵不但会减弱沥青与集料间的粘结力而且可以使沥青薄膜与集料发生剥离，从而引发沥青混合料的结构破坏。从目前国内外的研究来看，评价沥青混合料的抗水损坏性主要通过浸水马歇尔实验、冻融劈裂实验、浸水车辙实验等方法来进行。本文仍采用这三种实验来评价沥青混合料的抗水腐蚀性。赤泥矿粉按照 0、25%、50%、75%、100% 的比例代替石灰岩矿粉进行实验。

3.1 赤泥矿粉沥青混合料的浸水马歇尔实验

根据 JTGE 20-2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》中的方法制备马歇尔试件，分别对不同掺量赤泥矿粉的马歇尔试件进行浸水马歇尔实验，测试结果见表 6。

表 6 赤泥矿粉沥青混合料的浸水马歇尔稳定度实验结果
Table 6 Test results of Marshall stability of red mud asphalt mixture immersed in water

赤泥矿粉掺量/%	未浸水稳定度/kN	浸水48 h后稳定度/kN	浸水残留稳定度/%
0	7.32	5.12	69.95
25	10.56	8.75	82.86
50	13.69	12.65	92.40
75	14.98	14.06	93.85
100	15.53	14.75	94.97

由表 6 可见，将赤泥矿粉掺加到沥青混合料中能够提高提高沥青混合料的抗腐蚀性能。当赤泥矿粉的替代量少于 50% 时，沥青混合料的浸水马歇尔稳定度随着赤泥矿粉替代量的增大而增大；当赤泥矿粉的替代量多于 50% 时，沥青混合料的浸水马歇尔稳定度增长速度略有降低。

3.2 赤泥矿粉沥青混合料的冻融劈裂实验

根据 JTGE 20-2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》中的方法制备马歇尔试件，分别对不同掺量赤泥矿粉的马歇尔试件进行冻融劈裂实验，测试结果见表 7。

从表 7 可见，与普通石灰岩矿粉沥青混合料

表 7 赤泥矿粉沥青混合料的冻融循环劈裂实验结果
Table 7 Test results of freeze-thaw cyclic splitting of red mud asphalt mixture

赤泥矿粉掺量/%	未冻融前劈裂抗拉强度 R_{T1} /MPa	冻融后的劈裂抗拉强度 R_{T2} /MPa	冻融劈裂抗拉强度比TSR/%
0	0.8125	0.5267	64.82
25	1.3845	0.9851	71.15
50	1.6871	1.4267	84.57
75	1.6999	1.4446	84.98
100	1.7109	1.4512	84.82

的冻融劈裂强度相比, 赤泥矿粉沥青混合料的冻融劈裂强度相比 (TSR) 明显更好。以赤泥掺量 50% 为例, 掺加赤泥矿粉后, 沥青混合料的冻融劈裂强度比 (TSR) 相比较于普通石灰岩矿粉从 64.82% 提高到 84.57%, 增大幅度约为 1.31 倍, 这充分说明: 将赤泥以矿粉的形式掺加到沥青混合料中能显著提高沥青混合料的抗腐蚀性能。这主要是因为赤泥具有粒径小、比表面积大、有利于和沥青小颗粒结合等特点, 从而在增大沥青膜厚

度、增大沥青粘度方面相比较于石灰岩矿粉有更大的优势。

3.3 赤泥矿粉沥青混合料的浸水车辙实验

根据 JTGE20-2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》中的方法制备长、宽、高分别为 300 mm、300 mm、50 mm 的车辙板试样, 而后分别对不同掺量赤泥矿粉的马歇尔试件进行浸水车辙实验, 测试结果见表 8。

表 8 赤泥矿粉沥青混合料的浸水车辙实验结果
Table 8 Rutting test results of red mud mineral powder asphalt mixture

赤泥矿粉掺量/%	45 min 时的位移/mm	60 min 时的位移/mm	动稳定度/(次·mm ⁻¹)
0	3.896	4.324	2283
25	3.154	3.562	2984
50	2.652	2.841	3801
75	2.661	3.247	3654
100	2.559	3.004	3691

从表 8 可见, 与普通石灰岩矿粉沥青混合料的浸水车辙动稳定度相比, 赤泥矿粉沥青混合料的动稳定度有明显提高。以赤泥掺量 50% 为例, 掺加赤泥矿粉后, 沥青混合料的动稳定度相比较于普通石灰岩矿粉从 2283 次/mm 提高到 3801 次/mm, 提高幅度约为 1.66 倍。

从沥青混合料的浸水马歇尔实验、冻融劈裂实验、浸水车辙实验来看, 掺加赤泥矿粉后的沥青混合料抗水腐蚀性能优于普通石灰岩矿粉沥青混合料。在赤泥掺量为 50% 时, 沥青混合料的浸水马歇尔稳定度、冻融劈裂强度比 (TSR)、动稳定度都最大、宏观效果最好, 是整个实验中的拐点, 因此可以认为 50% 的赤泥矿粉掺量是最佳掺量。

4 赤泥矿粉对提高路面抗水损坏性能的机理分析

4.1 红外光谱分析

在材料鉴别中最常用的分析方法就是红外光

谱实验方法, 其原理就是根据试样的红外吸收光谱进行定性、定量分析和确定分子结构等方法, 红外光谱具有鲜明的特征性, 经实验出图的谱带其数目、位置、形状以及强度都会随着化合物不同而各不相同。采用 Thermo Nexus 470FT-IR 型傅立叶变换红外光谱仪对普通矿粉沥青混合料和掺加赤泥矿粉的沥青混合料进行分析, 见图 1。

根据图 1 (左) 解析得到, 1461 cm⁻¹, 1376 cm⁻¹ 为普通矿粉沥青混合料中烷烃弯曲振动的吸收峰, 2923 cm⁻¹, 2853 cm⁻¹ 为普通矿粉沥青混合料中烷烃伸缩振动的吸收峰, 这是普通矿粉沥青混合料主要的特征吸收峰; 根据图 1 (右) 解析得到, 1090 cm⁻¹ 为赤泥矿粉沥青混合料中 Si-O 伸缩振动的吸收峰, 467 cm⁻¹ 为赤泥矿粉沥青混合料中 Si-O 的弯曲振动峰, 这是赤泥矿粉沥青混合料主要的特征吸收峰。从普通矿粉沥青混合料 (左) 和掺加 50% 赤泥矿粉沥青混合料 (右) 的红外光谱曲线中可见: 50% 赤泥矿粉掺量的沥青混合料

图谱与普通矿粉沥青混合料图谱除了峰值大小和透光率有所差别之外,其他的振动吸收峰都几乎没有差别。然而,峰值大小和透光率只跟制样时溴化钾以及涂片的厚度有关,唯一的不同之处就在于掺加赤泥矿粉后的沥青混合料在 467 cm^{-1} 以

及 1090 cm^{-1} 处出现了硅-氧伸缩振动的吸收峰以及弯曲的振动峰,没有新的吸收峰产生,这种变化会使沥青混合料更加稳定,在一定程度上解释了掺加赤泥矿粉能够提高沥青混合料抗水损坏性能的原因。

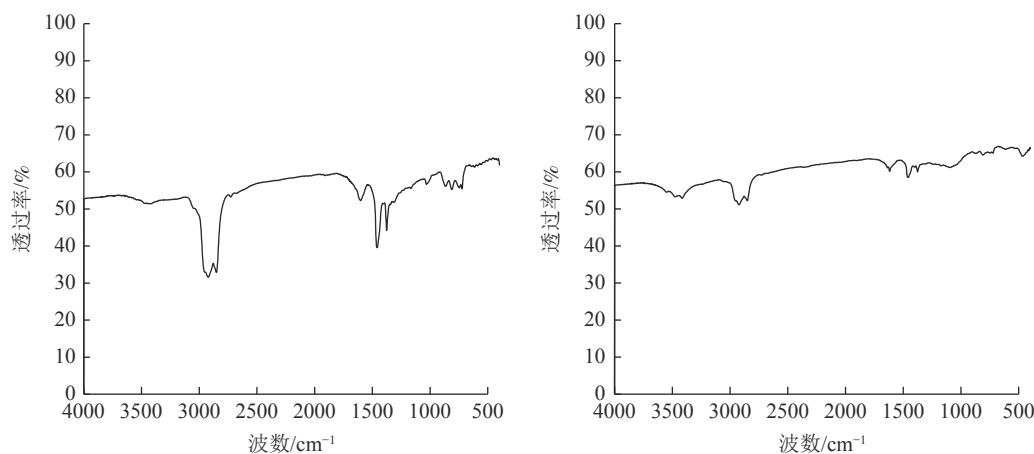


图1 普通矿粉沥青混合料(左)和掺加50%赤泥矿粉沥青混合料(右)的红外光谱曲线
Fig.1 Infrared spectrum curve of common mineral powder asphalt mixture (left) and 50% red mud mineral powder asphalt mixture (right)

4.2 差示扫描量热分析

差热扫描量热法本质就是一种热分析方法。采用 ZetzsehDSC204 型差示扫描量热仪,速率为

$5^{\circ}\text{C}/\text{min}$,氮气流速为 $50\text{ mL}/\text{min}$,测量起始温度为 -80°C ,结束温度为 100°C 。样品的 DSC 曲线见图2 (H_F 为热流, t 为温度)。

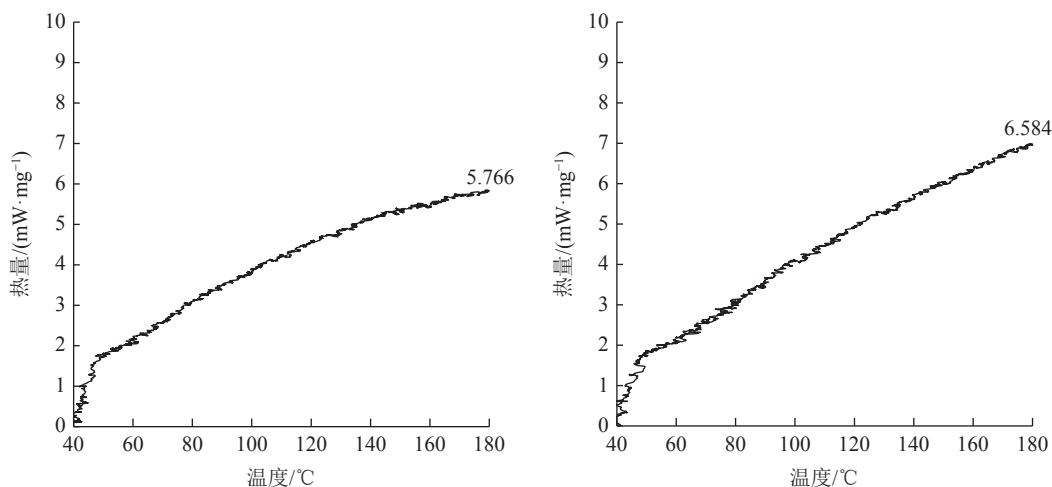


图2 普通矿粉沥青混合料(左)和掺加50%赤泥矿粉沥青混合料(右)的DSC曲线
Fig.2 DSC curve of common mineral powder asphalt mixture (left) and 50% red mud mineral powder asphalt mixture (right)

从表面化学能的角度来看,赤泥矿粉对沥青混合料的浸水马歇尔稳定度、冻融劈裂强度比、动稳定度的改善过程不仅仅是一个简单的共混过程,同时对沥青自身性质也是一个改变。它主要表现为:将普通石灰岩矿粉换成赤泥矿粉掺加到

沥青混合料中后,通过共混作用,沥青混合料的原有平衡被打破,沥青混合料的组分发生了重新组合建立起新的平衡状态。由于赤泥本身具有颗粒小、比表面积大的特点,所以它能够使沥青混合料与集料更好地粘结,改善沥青混合料的性

能。从图 2 可见, 经过赤泥矿粉改性后, 沥青混合料的吸热峰得到了提升; 50% 赤泥矿粉掺量的沥青混合料试件没有新的吸热峰产生, 这说明掺加赤泥矿粉后沥青混合料没有新物质出现, 所以赤泥矿粉沥青混合料的整体稳定性得到增强, 抗水损坏能力得到提高。

5 结 论

(1) 利用赤泥代替普通石灰岩矿粉制备出的赤泥矿粉沥青胶浆可以明显提高沥青的粘附性能。

(2) 利用赤泥代替普通石灰岩矿粉制备出赤泥矿粉沥青混合料能够显著地改善其马歇尔稳定度、浸水马歇尔稳定度、冻融劈裂强度等指标。

(3) 赤泥矿粉沥青混合料的浸水马歇尔实验、冻融劈裂实验和浸水车辙实验结果表明, 能够有效提高沥青混合料抗水破坏性能的最佳赤泥替代量为 50%。

(4) 通过红外光谱分析和差示扫描量热分析显示, 掺加赤泥矿粉后沥青混合料没有新物质出现, 赤泥矿粉沥青混合料的整体稳定性得到增强, 进一步揭示了赤泥矿粉对提高沥青混合料抗水损坏性能的机理。

参考文献:

- [1] 朱晓波, 李望, 管学茂. 赤泥综合利用研究现状及分析[J]. 中国金, 2016(1):7-10.
- ZHU X B, LI W, GUAN X M. Research status and analysis of comprehensive utilization of red mud[J]. China Gold, 2016(1):7-10.
- [2] 李建伟, 马炎, 马挺, 等. 赤泥制备免烧砖的研究现状及技术要点探讨[J]. 矿产综合利用, 2019(3):7-10.
- LI J W, MA Y, MA T, et al. Research status and technical points of preparation of unburned brick by the red mud[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2019(3):7-10.
- [3] 郭庆, 陈书文, 张军红, 等. 微波强化赤泥制备 Fe-Al 基絮凝剂工艺研究[J]. 矿产综合利用, 2019(4):117-121.
- GUO Q, CHEN S W, ZHANG J H, et al. Study on preparation of Fe/Al-base flocculant from red mud by microwave[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2019(4):117-121.
- [4] 沈金安. 解决高速公路沥青路面水损害早期损坏的技术路径[J]. 公路, 2000(5):71.
- SHEN J A. Technical Path to Solve the Early Damage of Asphalt Pavement Water Damage[J]. Highway, 2000(5):71.
- [5] 陈瑞峰. 循环荷载作用下赤泥改良黄土的动力特性研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2018.
- CHEN R F. Study on dynamic characteristics of red mud modified loess under cyclic loading [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2018.
- [6] 曾梦澜, 赵宇, 潘浩志, 等. 欧洲岩沥青改性沥青结合料使用性能试验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2016(5): 125-130.18037-18042.
- ZENG M L, ZHAO Y, PAN H Z, et al. Experimental study on service performance of European rock asphalt modified asphalt binder[J]. Journal of Hunan University (Natural Science Edition), 2016(5): 125-130. 18037-18042.
- [7] 孙璐, 辛宪涛, 王鸿遥, 等. 多维数多尺度纳米材料改性沥青的微观机理[J]. 硅酸盐学报, 2012(10):1437-1447.
- SUN L, XIN X T, WANG H Y, et al. Micromechanism of asphalt modified by multidimensional and multiscale nanomaterials[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2012(10):1437-1447.
- [8] JTJ052-2000, 公路工程沥青及沥青混合料试验规程[S]. 北京: 人民交通出版社, 2000.
- JTJ052-2000, Test code for asphalt and asphalt mixture in highway engineering [S]. Beijing: People's Communications Press, 2000.
- [9] 公路工程沥青及沥青混合料试验规程 JTGE20-2011[S]. 北京: 人民交通出版社, 2011.
- Test specification for asphalt and asphalt mixture in highway engineering [S]. Beijing: People's Communications Press, 2011.
- [10] 薛小刚. 沥青混合料级配优化及配合比设计方法研究[D]. 西安: 长安大学, 2005.
- XUE X G. Study on optimization of asphalt mixture grading and mixture proportion design method [D]. Xi'an: Chang'an University, 2005.
- [11] 覃峰. 锰渣矿粉沥青混合料抗腐性能研究[J]. 新型建筑材料, 2012(10):56-58.
- QIN F. Research on anti-corrosion property of manganese slag and asphalt powder mixture[J]. New Building Materials, 2012(10):56-58.
- [12] 孙雅珍, 侯艳妮, 王金昌, 等. 橡胶沥青应力吸收层抗疲劳作用机理研究[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2020, 45(1):10-16.
- SUN Y Z, HOU Y N, WANG J C, et al. Study on fatigue resistance mechanism of rubber asphalt stress absorbing coating[J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition), 2020, 45(1):10-16.