

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2020.07.001

# 含有钢渣的水性环氧树脂改性乳化沥青混合料的性能

季 节<sup>1,2</sup>, 王 哲<sup>1,2</sup>, 苑志凯<sup>1,2</sup>, 李 辉<sup>3</sup>, 张艳君<sup>4</sup>

(1. 北京建筑大学 土木与交通工程学院, 北京 100044; 2. 北京未来城市设计高精尖创新中心, 北京 100044;  
3. 齐鲁交通建设集团股份有限公司, 山东 济南 250101; 4. 交通运输部公路科学研究院, 北京 100088)

**摘要:** 为了研究含有钢渣的改性乳化沥青混合料的性能, 以水性环氧树脂为改性剂, 采用先乳化后改性的方法制备了多种改性乳化沥青。利用马歇尔方法设计了含有钢渣(全部替代细集料)的AC-16型改性乳化沥青混合料。通过土工击实试验和试拌法, 以混合料的工作和易性和拌和状态为控制目标, 逐步优选出改性乳化沥青类型及外掺水用量。利用失水率和马歇尔稳定度确定了混合料的最佳击实时间、养生方式及最佳水性环氧树脂掺量, 对含/不含钢渣的普通/改性乳化沥青混合料的路用性能进行了全面评价。试验结果表明: 为了保证含有钢渣的改性乳化沥青混合料具有良好的拌和工作状态, 需选用与水性环氧树脂配伍性好的阴离子乳化剂, 且将改性乳化沥青的酸碱性调节为碱性; 通过采用两次击实、常温养生、加入一定剂量水泥、提高水性环氧树脂掺量的方法, 使水性环氧树脂改性乳化沥青混合料具有良好的早期强度和优异的力学性能; 与含/不含钢渣的普通乳化沥青混合料及不含钢渣的水性环氧树脂改性乳化沥青混合料性能相比, 含有钢渣的水性环氧树脂改性乳化沥青混合料的综合性能最为优异, 且达到了热拌沥青混合料的性能要求。

**关键词:** 道路工程; 水性环氧树脂; 试拌法; 改性乳化沥青混合料; 钢渣

中图分类号: U416

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268(2020)07-0001-08

## Performance of Waterborne Epoxy Resin Modified Emulsified Asphalt Mixture Containing Steel Slag

JI Jie<sup>1,2</sup>, WANG Zhe<sup>1,2</sup>, YUAN Zhi-kai<sup>1,2</sup>, LI Hui<sup>1,2</sup>, ZHANG Yan-jun<sup>3</sup>

(1. School of Civil and Transportation Engineering, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China;  
2. Beijing Advanced Innovation Center for Future Urban Design, Beijing 100044, China;  
3. Qilu Transportation Construction Group Co., Ltd, Jinan Shandong 250101, China;  
4. Research Institute of Highway, Ministry of Transport, Beijing 100088, China)

**Abstract:** In order to study the performance of modified emulsified asphalt mixture containing steel slag, some modified emulsified asphalts using waterborne epoxy as modifier are prepared by means of emulsification before modification method. The AC-16 modified emulsified asphalt mixture containing steel slag as fine aggregate is designed by Marshall design method. Taking the workability and the mixing status of the mixtures as the control objective, the modified emulsified asphalt type and the externally added water amount are determined using the soil compaction test and trial mixing method. The water loss rate and the Marshall stability are applied as the indicators to determine the best compaction time, curing style and the optimize waterborne epoxy resin content, the pavement performances of the ordinary/modified emulsified asphalt

收稿日期: 2019-03-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(51778038); 北京市自然科学基金委-北京市教委联合项目(KZ201910016017); 长江学者和创新团队发展计划项目(IRT-17R06); 北京市属高校基本科研业务费项目(X18259)

作者简介: 季节(1972-), 女, 河南信阳人, 博士, 教授. (jijie@bucea.edu.cn)

mixture with/without steel slag are evaluated. The test result shows that (1) for ensuring the good mixing status of the modified emulsified asphalt mixture containing steel slag And adjust the acidity and basicity of modified emulsified asphalt to basicity, the anionic emulsifier with good compatibility with waterborne epoxy resin should be selected, and the acid-base properties of modified emulsified asphalt should be adjusted to basicity; (2) some methods, such as twice compaction, normal temperature curing, normal-temperature curing methods, adding a certain amount of cement, and increasing the waterborne epoxy resin content, are used to guarantee the good early strength and mechanical properties of the waterborne epoxy resin modified emulsified asphalt mixture; (3) compared with the performances of the ordinary emulsified asphalt mixture with/without steel slag and the waterborne epoxy resin modified emulsified asphalt mixture without steel slag, the comprehensive performance of the waterborne epoxy resin modified emulsified asphalt mixture containing steel slag is the best, and it meets the technical requirements of hot mix asphalt mixture.

**Key words:** road engineering; waterborne epoxy resin; trial mixing method; modified emulsified asphalt mixture; steel slag

## 0 引言

传统的热拌沥青路面技术在生产和施工过程中不仅消耗大量的燃油而且还会释放致癌物苯并吡等有害气体<sup>[1]</sup>,是一种典型的“高能耗、高排放、高污染”技术。随着人们对环保和节约资源意识的不断加强,道路建造的一些新技术也应运而生。乳化沥青混合料克服了热拌沥青混合料在生产和施工过程中对高温的要求,在常温下实现拌和、摊铺、碾压,是一种“低能耗、低排放、低污染”技术。与传统热拌沥青混合料相比,乳化沥青混合料不仅能节约能源,改善施工条件,还能降低工程造价。但目前常见的各类乳化沥青混合料却存在很多缺点,如早期强度低,储存稳定性差,与矿料之间的黏附性弱等,从而限制了其大规模推广使用,尤其是在高等级道路中的应用。因此,研究高性能乳化沥青混合料具有十分重要的科学意义和应用价值。

目前国内外一般使用 SBR, SBS 等对乳化沥青进行改性以提高其性能,但 SBR 改性乳化沥青的高温黏附性较差<sup>[2-3]</sup>。SBS 改性乳化沥青虽然具有优异的和易性、早期强度和路用性能,但却存在乳化难度大、容易破乳、不能长时间稳定储存、生产工艺复杂等问题<sup>[4]</sup>。因此,寻找一种改性效果好且生产工艺简单的改性乳化沥青技术十分必要。水性环氧树脂是以环氧树脂微粒为分散相、以水为连续相的液相体系材料,可在室温及潮湿环境下固化,具有热稳定性好、强度高和黏结力强的特点<sup>[5-7]</sup>。将水性环氧树脂用于乳化沥青的改性,可使乳化沥青的高温、黏附性等得到提高,且工艺简单可行,能弥补传统 SBS 和 SBR 改性乳化沥青的技术缺点,拓

展乳化沥青的应用范围<sup>[8-9]</sup>。Min<sup>[10]</sup>利用荧光显微镜和动态力学分析法,分析了水性环氧树脂改性乳化沥青力学性能和相行为,得出当沥青体积分数高于 40% 时,树脂基体相将会转变为沥青基体相,同时其力学性能迅速降低。Cong 等<sup>[11]</sup>、张庆等<sup>[12]</sup>、周启伟等<sup>[13]</sup>研究了水性环氧树脂改性乳化沥青性能与水性环氧树脂掺量之间的关系,发现改性后乳化沥青的黏弹性、黏度等会随着水性环氧树脂掺量的增加而提高,当水性环氧树脂掺量为 4% 时,改性乳化沥青的储存稳定性最佳。吕建伟等<sup>[14]</sup>、季节等<sup>[15]</sup>研究了水性环氧树脂掺量对 SBR 乳化沥青混合料性能的影响,发现水性环氧树脂可明显改善混合料的高温稳定性,但对低温性能却有不利影响,当水性环氧树脂掺量为 6% 时,混合料的抗车辙能力、耐磨耗性能、抗水损性能最好。季节等<sup>[16]</sup>采用先乳化后改性的方法制备水性环氧树脂改性乳化沥青混合料并与热拌沥青混合料性能相比,发现混合料的高温性能优越,但低温性能和疲劳性能不足,水稳定性能基本保持一致。通过上述研究可知,加入水性环氧树脂可以提高沥青及混合料的强度和高温性能,但低温性能会有所降低。

钢渣作为炼钢的副产品,以颗粒形式排放,具有耐磨、孔隙率大、水硬性好、多棱角等特点,是一种潜在的优良路用性能的建筑材料<sup>[17]</sup>。高振鑫等<sup>[18]</sup>、申爱琴等<sup>[19]</sup>、Hesami 等<sup>[20]</sup>对不同钢渣掺量的热拌及温拌沥青混合料水稳定性进行评价,并借助扫描电镜试验等分析了钢渣对混合料水稳定性的影响机理,结果表明钢渣呈超碱性,表面多孔隙,增大了其与沥青间的有效接触面积,提高了黏结性,可显著改善混合料的水稳定性。李伟等<sup>[21]</sup>通过室内

直剪试验,发现钢渣沥青路面的层间抗剪强度均高于传统沥青路面的抗剪强度。Ali 等<sup>[22]</sup>利用钢渣作为粗集料制备混合料并评价了其路用性能,发现钢渣沥青混合料的性能均优于同类型的石灰岩混合料。由此可见,钢渣作为沥青混合料中的粗骨料可明显改善混合料的路用性能尤其是水稳定性能,但由于钢渣细集料含有极易膨胀的游离 CaO 和 MgO 等多种氧化物,在一定环境下会发生电解水化反应,体积稳定性不良,其混合料的耐久性能有待改善,因此钢渣在沥青混凝土中通常被用作粗集料<sup>[23]</sup>。

国内外大多数的研究集中在水性环氧树脂改性乳化沥青混合料或钢渣沥青混合料的性能上,却很少研究将钢渣作为细集料用于改性乳化沥青混合料中。本研究利用钢渣自身的高强度和低吸水性,将其作为改性乳化沥青混合料中的细骨料使用,研究其对混合料性能的影响规律,为含有钢渣的水性环氧树脂改性乳化沥青混合料的推广应用提供理论和技术支持。

## 1 试验方案与材料

### 1.1 试验方案及方法

#### 1.1.1 试验方案

首先,采用不同的乳化剂制备乳化沥青,利用水性环氧树脂对乳化沥青进行改性,得到高性能的水性环氧树脂改性乳化沥青。其次,利用马歇尔设计方法设计 AC-16 型含有钢渣的水性环氧树脂改性乳化沥青混合料,通过土工击实试验和试拌法优选乳化沥青类型及外掺水用量,利用失水率和马歇尔稳定度确定水性环氧树脂改性乳化沥青混合料的最佳击实时间、养生方式以及最佳水性环氧树脂掺量。最后,评价含有钢渣水性环氧树脂改性乳化沥青混合料的性能,并与改性乳化沥青混合料(不含钢渣)和普通乳化沥青混合料(含钢渣/不含钢渣)进行性能对比。

#### 1.1.2 试验方法

##### (1) 水稳定性

按照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)<sup>[24]</sup>中的相关规定进行浸水马歇尔试验和冻融劈裂试验。浸水马歇尔试验对照组和浸水组各成型 4 个马歇尔试件,试件采用二次击实法成型,具体过程:第 1 次击实 50 次,常温养生 24 h,第 2 次击实 25 次,常温静置 48 h 后进行试验,试验结果取平均值。冻融劈裂试验对照组和冻融组各成型 4 个马歇尔试件,试件采用二次击实法成型,具体过程:第 1 次击实 35 次,常温养生

24 h,第 2 次击实 15 次,常温静置 48 h 后进行试验,试验结果取平均值。

##### (2) 高温稳定性

按照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)中的相关规定进行车辙试验。成型 4 个车辙试件,试件尺寸为 300 mm × 300 mm × 50 mm,分 2 次压实养生成型。具体过程:装料后首先碾压 2 次,转换方向继续碾压 12 次,常温养生 24 h,第 2 次在碾压 12 次的方向继续碾压 6 次,将其置于室温下 48 h 后进行试验,试验结果取平均值。

##### (3) 低温抗裂性

按照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)中的相关规定进行低温小梁弯曲试验。成型 4 个低温小梁试件,试件尺寸为 250 mm × 30 mm × 35 mm,试验温度为 -10 ℃,加载速率为 50 mm/min,试验结果取平均值。

## 1.2 试验材料

### 1.2.1 基质沥青

采用 70<sup>#</sup>沥青,其性能见表 1。

表 1 70<sup>#</sup>沥青的性能

Tab. 1 Properties of asphalt No. 70

指标	25 ℃ 针入度/ (0.1 mm)	软化点/℃	10 ℃ 延度/ cm	15 ℃ 延度/ cm	质量变化/%	RTFOT 后残留物	
						25 ℃ 针入度 比/%	15 ℃ 延度/cm
试验结果	66.4	48.1	68.5	115.0	-0.15	63	19
技术要求	60~80	≥46	≥20	≥40	≤±0.8	≥54	≥15

### 1.2.2 乳化剂、水性环氧树脂与固化剂

选取 2 种不同乳化剂(阳离子和阴离子乳化剂)和 1 种水性环氧树脂与固化剂,其性能见表 2~表 3。

表 2 乳化剂性能

Tab. 2 Properties of emulsifier

型号	离子类型	pH 值	破乳速度	建议掺量/%	外观
LBPI	阳离子	8.2	慢裂	1.0~3.0	棕色黏稠液体
A3T1	阴离子	7.8	慢裂	3.0~4.0	棕色黏稠液体

表 3 水性环氧树脂与固化剂性能

Tab. 3 Properties of waterborne epoxy resin and curing agent

类型	外观	固含量/%	密度/ (g · cm <sup>-3</sup> )	黏度/ (Pa · s)	pH 值
水性环氧树脂	乳白色均匀液体	≥58	1.05~1.10	≤2	6~8
固化剂	淡黄色透明液体	≥50	1.05~1.10	≤10	11~13

### 1.2.3 集料

粗集料采用石灰岩,其性能见表 4。细集料采用唐山地区的转炉钢渣(唐山的钢产量约占国内钢铁总产量

的12.5%左右<sup>[25]</sup>。其主要化学成分为CaO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>等<sup>[26]</sup>其性能依据《道路用钢渣》(GB/T 25824—2010)<sup>[27]</sup>中的技术规定,见表5。

表4 粗集料性能

Tab. 4 Properties of coarse aggregates

指标	粒径/mm			技术要求
	15~20	10~15	5~10	
pH值	7.80	—	—	—
表观相对密度	2.81	2.85	2.84	≥2.60
吸水率/%	0.86	0.91	1.78	≤2.00
与沥青的黏附性(级)	5	5	5	≥4

表5 钢渣性能

Tab. 5 Properties of steel slags

指标	粒径/mm		技术要求
	3~5	0~3	
pH值	10.29	10.61	—
表观相对密度	2.87	2.81	≥2.80
与沥青的黏附性(级)	5	5	≥4
坚固性/%	4.8	5.6	≤12
压碎值/%	11.5	11.5	≤26

## 1.2.4 水泥

选用普通42.5#硅酸盐水泥,对其进行了性能测试,见表6。

表6 水泥性能

Tab. 6 Properties of cement

指标	比表面积/ (m <sup>2</sup> ·kg)	初凝时 间/min	终凝时 间/min	抗折强度/MPa		抗压强度/MPa	
				3 d	28 d	3 d	28 d
试验值	371	122	281	5.1	7.3	21.6	51.3
技术要求	≥300	≥90	≤600	≥3.5	≥6.5	≥16	≥42.5

## 2 结果与讨论

### 2.1 改性乳化沥青混合料的设计

#### 2.1.1 水性环氧树脂改性乳化沥青的制备

根据课题组前期研究成果<sup>[15-16,28]</sup>,室内采用先乳化后改性的方法制备水性环氧树脂改性乳化沥青,其中水性环氧树脂的掺量为4%,水性环氧树脂与固化剂的比例为1:1.25。首先将乳化剂、稳定剂和水按比例混合成皂液,将皂液加热到60℃,并用少许试剂(HCl/NaOH)调整皂液的pH值,在剪切仪下以2000 r/min的速度剪切5 min。其后将135℃沥青按比例缓缓加入到皂液中并保持温度为60℃,以4000 r/min的速度剪切30 min,之后冷却到室温。最后将水性环氧树脂乳液和固化剂按比例缓缓加入到乳化沥青中,在室温下以2000 r/min的速度剪切5 min,制备出水性环氧树脂改性乳化沥青,见图1。

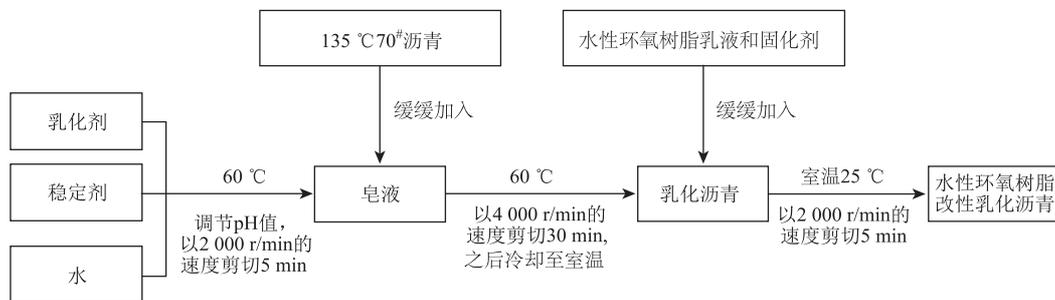


图1 水性环氧树脂改性乳化沥青的制备过程

Fig. 1 Preparation process of waterborne epoxy resin modified emulsified asphalt

#### 2.1.2 改性乳化沥青混合料的设计

改性乳化沥青混合料采用AC-16型,其中粗、细集料的比例为61.9:34.1(细骨料全部用钢渣替代),矿粉掺量为4.0%,矿粉由2.5%石灰岩矿粉和1.5%水泥组成(水泥用来提高混合料的早期强度)。通过马歇尔设计方法确定混合料的最佳油石比为7.2%,空隙率为4.1%。

#### 2.1.3 改性乳化沥青混合料的拌和工艺

根据前期研究成果<sup>[15-16,28]</sup>,确定改性乳化沥青混合料的拌和工艺。首先将干燥集料、水泥加入到拌和锅中常温拌和10 s,其次加入最佳用量的水

常温拌和30 s,再加入最佳掺量的改性乳化沥青常温拌和45 s,最后加入矿粉,常温拌和45 s,见图2。

#### 2.1.4 乳化沥青类型及最佳外掺水用量的筛选与优化

采用阳离子乳化剂LBP1设计3种不同乳化剂掺量下的乳化沥青,其中油水比为50:50,皂液pH值为4.0,对其蒸发残留物进行性能测试,结果见表7。

由表7可知,制备的3种乳化沥青各项技术指标均符合规范要求。基于前期研究,利用土工击实试验,初步确定外掺水用量在1.0%~2.0%

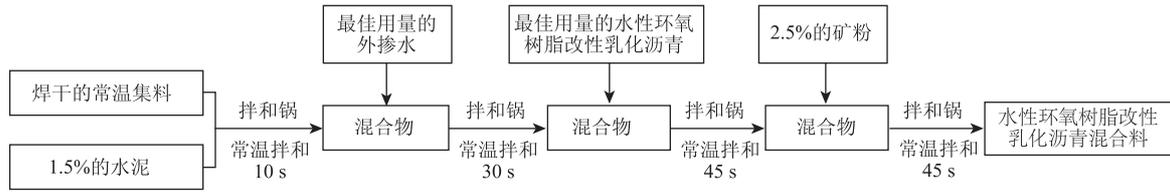


图 2 沥青混合料的拌和工艺

Fig. 2 Mixing process of asphalt mixture

表 7 不同乳化沥青的性能

Tab. 7 Properties of different emulsified asphalts

沥青编号	乳化剂 掺量/%	25 °C 针入度/ (0.1 mm)	软化 点/°C	15 °C 延度/cm	固含 量/%
1	1.4	79.8	47.8	80.3	61.0
2	3.0	93.8	46.8	82.9	64.0
3	4.0	88.1	48.5	78.4	64.0
技术要求	—	45 ~ 150	—	≥40	≥55

之间。根据设计出的改性乳化沥青混合料的级配和最佳油石比, 配制 1.5 kg 左右的混合料, 通过试拌法筛选与优化最佳外掺水用量, 其中以沥青混合料的拌和状态 (混合料的和易性和干湿状态良好、无浆体析出和气泡产生、无花白料出现、集料与沥青裹附性好、粗集料表面裹附均匀的细集料等) 为控制目标, 对上述 3 种乳化沥青在 1.0% 外掺水用量下进行试拌。

第 1 次试拌结果发现, 利用 3 种不同乳化沥青拌制的混合料多为花白料, 集料与沥青裹附性不均匀, 混合料呈松散状态, 偏干。一方面可能是外掺水用量太少, 另一方面由于乳化沥青呈酸性 (pH 值为 4.0), 可能与钢渣集料发生反应, 导致沥青破乳速度过快。因此, 增加外掺水用量至 1.5%, 调整沥青的酸碱性 pH 值至 7.0, 重新拌制混合料, 表 8 为调整后乳化沥青的性能。

表 8 不同乳化沥青的性能

Tab. 8 Properties of different emulsified asphalts

沥青编号	沥青 编号	乳化剂 掺量/%	25 °C 针入度/ (0.1 mm)	软化 点/°C	15 °C 延 度/cm
4	1.4	79.6	48.5	85.4	57.5
5	3.0	94.6	48.1	87.3	61.0
6	4.0	97.5	47.4	76.1	68.0
技术要求	—	45 ~ 150	—	≥40	≥55

由表 8 可知, 制备的 3 种乳化沥青各项技术指标均符合规范要求。第 2 次试拌结果发现, 利用 3 种不同乳化沥青拌制的混合料中有明显的浆体析出和大量的气泡产生, 一方面可能是由于外掺水用量过多, 另

一方面也可能是乳化沥青的酸碱性影响混合料的拌制效果。因此, 为进一步验证乳化沥青的酸碱性是否会对混合料的拌制效果产生影响, 保持外掺水用量不变 (1.5%), 将乳化沥青的酸碱性 pH 值调整至 9.5, 重新拌制混合料, 表 9 为调整后乳化沥青的性能。

表 9 不同乳化沥青的性能

Tab. 9 Properties of different emulsified asphalts

沥青编号	沥青 编号	乳化剂 掺量/%	25 °C 针入度/ (0.1 mm)	软化 点/°C	15 °C 延 度/cm
7	1.4	78.9	48.9	82.6	58.3
8	3.0	89.9	47.1	97.6	61.0
9	4.0	90.5	48.4	81.3	58.0
技术要求	—	45 ~ 150	—	≥40	≥55

由表 9 可知, 制备的 3 种乳化沥青的各项技术指标均符合规范要求。第 3 次试拌结果发现, 利用 3 种不同乳化沥青拌制的混合料中仍有明显的浆体析出和大量气泡产生。这说明调整乳化沥青的酸碱性和外掺水用量均不能达到良好的拌和效果, 这极可能与乳化剂的类型有关, 即乳化剂类型与水性环氧树脂之间存在着一定的配伍性。因此, 将原来采用的阳离子乳化剂调整为阴离子乳化剂。本研究采用 A3T1 型阴离子乳化剂, 按其产品要求配制乳化沥青, 其中乳化剂掺量为 3.5%, 油水比为 62:38, 皂液 pH 值为 12.0, 对其蒸发残留物的性能测试结果见表 10。

表 10 乳化沥青的性能

Tab. 10 Physical properties of emulsified asphalt binder

试验编号	25 °C 针入度/(0.1 mm)	软化点/°C	15 °C 延度/cm	固含量/%
1	92.2	47.3	96.5	67.0
技术要求	45 ~ 150	—	≥40	≥55

由表 10 可知, 制备的乳化沥青的各项技术指标均符合规范要求。对上述制备阴离子乳化沥青分别在 1.0%, 1.5%, 2.0% 外掺水用量条件下进行试拌。第 4 次试拌结果表明:

(1) 当外掺水用量为 1.0% 时, 混合料多为花白料, 整体偏干, 呈松散状态, 说明外掺水用量太低, 集料难以润湿, 导致集料与沥青裹附不均匀。

而当外掺水用量为 2.0% 时, 混合料中有明显的浆体析出和大量气泡产生, 说明外掺水用量偏高, 部分自由水会与水泥或钢渣发生水化反应。

(2) 当外掺水用量为 1.5% 时, 混合料无浆体析出和气泡产生, 集料与沥青裹附性好, 粗集料表面裹附均匀的细集料, 说明此状态下的混合料外掺水量最佳。这是因为适当的外掺水在湿润集料时能保证与沥青的黏附。同时, 由于采用强碱性 (pH 值为 12.0) 阴离子乳化沥青, 一方面与水性环氧树脂之间的配伍性好, 可减缓乳化沥青的破乳速度, 另一方面不会与钢渣发生反应。因此, 通过试拌法最终优选出的乳化沥青为强碱性阴离子乳化沥青, 最佳外掺水用量为 1.5%。

### 2.1.5 击实时间及养生方式的确定

为了合理确定沥青混合料的两次击实时间及养生方式, 选择 4 种不同时间 (50, 90, 130, 220 min) 进行击实。第 1 次击实后, 放置在常温条件下养生一定时间后进行第 2 次击实成型。其中, 第 2 次击实时间的确定是以失水率为控制指标, 控制沥青混合料的失水率在 30% ~ 40% 之间。结合前期研究, 通过对拌和状态的目测, 确定混合料的第 1 次击实时间为拌和后 130 min, 第 2 次击实时间一般控制在第 1 次击实时间后的 24 h, 第 1 次和第 2 次击实之间采用常温养生。

### 2.1.6 最佳水性环氧树脂掺量的确定

根据前期研究成果, 推荐的水性环氧树脂掺量为 4%, 水性环氧树脂乳液与固化剂的比例为 1:1.25, 但按此比例配制的改性乳化沥青混合料在常温养生 48 h 后的马歇尔稳定度在 4 kN 左右。为提高混合料的早期强度, 进一步调整水性环氧树脂掺量和水性环氧树脂与固化剂的比例 (调整至 1:1)。表 11 是水性环氧树脂掺量为 8% 和 12% 掺量下的混合料进行养生 24, 48, 72, 96 h 后的失水率和马歇尔稳定度测试结果。

表 11 沥青混合料在不同养生时间下的失水率和马歇尔稳定度

Tab. 11 Water loss rates and Marshall stabilities of asphalt mixture under different curing time

水性环氧树脂掺量/%	8				12			
	24	48	72	96	24	48	72	96
养生时间/h	24	48	72	96	24	48	72	96
失水率/%	52.2	62.1	66.3	70.2	52.1	58.3	65.2	72.3
马歇尔稳定度/kN	4.46	4.47	4.94	4.96	5.92	6.82	6.97	7.21
调整后失水率/%	—	—	—	—	38.2	50.1	53.9	56.3
调整后马歇尔稳定度/kN	—	—	—	—	6.32	7.13	7.31	7.96

注: 将水性环氧树脂乳液与固化剂的比例由 1:1.25 调整为 1:1。

从表 11 可知:

(1) 相同掺量下的改性乳化沥青混合料, 其马歇尔稳定度和失水率随养护时间的增加而增加, 失水率越大, 其马歇尔稳定度值也越高, 但相对而言马歇尔稳定度增长幅度不大。当水性环氧树脂掺量为 8%、混合料从 24 h 养生到 96 h 时, 失水率增加幅度约 30% 左右, 而马歇尔稳定度的增长幅度却仅有 10% 左右, 最大值为 4.96 kN。当水性环氧树脂掺量增加到 12%、混合料从 24 h 养生到 96 h 时, 失水率增加幅度为 30% 左右, 马歇尔稳定度增长幅度为 20% 左右, 最大值为 7.21 kN。由此可见, 提高水性环氧树脂的掺量可增强混合料的早期强度, 这与学者研究结果一致<sup>[29-30]</sup>, 即水性环氧树脂掺量越高, 混合料的力学性能增强越明显, 但此时养生时间长达到 96 h, 不利于开放交通。

(2) 在保持水性环氧树脂掺量不变 (12%) 的情况下, 调整水性环氧树脂与固化剂的比例, 由原来的 1:1.25 调整为 1:1, 进一步进行失水率和马歇尔稳定度的测试。发现随养护时间的增加, 如从 24 h 增加到 96 h 时, 混合料的失水率和马歇尔稳定度的增长幅度分别提高到 40% 和 30% 左右, 当养生时间为 48 h 时, 马歇尔稳定度已经达到 7.13 kN, 可开放交通。因此, 在其他条件不变的情况下, 确定水性环氧树脂最佳掺量为 12%, 水性环氧树脂与固化剂的比例为 1:1, 进一步进行改性乳化沥青混合料的性能评价。

## 2.2 改性乳化沥青混合料性能评价

分别制备含钢渣和不含钢渣的改性乳化沥青混合料和普通乳化沥青混合料, 对 4 种沥青混合料进行高温稳定性、低温抗裂性及水稳定性试验, 结果见表 12。

表 12 沥青混合料路用性能

Tab. 12 Pavement performance of asphalt mixtures

检验项目	动稳定度/	残留稳	TSR/	最大弯拉
	(次·mm <sup>-1</sup> )	定度/%	%	应变/ $\mu\epsilon$
改性乳化沥青混合料 (含钢渣)	12 352	117	80	2 546
普通乳化沥青混合料 (含钢渣)	6 631	71	51	—
改性乳化沥青混合料 (不含钢渣)	20 323	113	76	1 962
普通乳化沥青混合料 (不含钢渣)	4 228	75	59	—
技术要求	≥2 400	≥80	≥75	≥2 500

由表 12 可知:

(1) 综合考虑混合料的高、低温性能和水稳定性性能, 含钢渣的改性乳化沥青混合料性能最优, 其次为不含钢渣的改性乳化沥青混合料和含钢渣的普

通乳化沥青混合料, 不含钢渣的普通乳化沥青混合料的性能最差。

(2) 相对于其他3种沥青混合料, 只有含钢渣的改性沥青混合料的性能达到热拌沥青混合料的性能要求, 这主要是水性环氧树脂中高活性的环氧基团与固化剂中的活泼氢极易发生反应, 在沥青中形成牢固的三维立体网状结构, 加之钢渣集料表面多孔, 具有更为丰富的棱角性, 使得沥青能更有效地黏附在钢渣集料表面, 大大增强了沥青与集料界面之间的黏附性, 从而提高混合料的高、低温性能和水稳定性能。

(3) 不含/含钢渣的普通乳化沥青混合料除高温性能满足热拌沥青混合料的性能要求外, 其余的性能均不满足要求, 这主要是因为普通乳化沥青混合料中沥青与集料之间的黏附性较差, 在试验过程中也发现普通乳化沥青混合料在低温小梁试件制作和浸水马歇尔试验、冻融劈裂强度试验过程中容易出现断裂、松散等现象, 无法成型进行下一步试验。

### 3 结论

(1) 以改性乳化沥青混合料的拌和工作状态为控制目标, 通过试拌法优选出适用于含有钢渣骨料混合料的乳化剂类型为阴离子型, 且制备乳化沥青时应将其酸碱度调节到偏碱性, 以减少乳化沥青与钢渣之间的反应。

(2) 以失水率和马歇尔稳定度作为控制指标, 确定混合料的最佳击实时间、养生方式及最佳水性环氧树脂掺量。第1次击实时间为拌和后的130 min, 第2次击实时间一般控制在第1次击实时间后24 h (此时失水率一般在30%~40%之间), 养生方式为常温养生。最佳水性环氧树脂掺量为12%。

(3) 通过加入一定剂量水泥和提高水性环氧树脂掺量可保证混合料具有良好的早期强度和性能。相对于其他3种乳化沥青混合料, 只有含钢渣的改性乳化沥青混合料的性能达到了热拌沥青混合料的性能要求。

(4) 含有钢渣的改性乳化沥青混合料的疲劳性能和耐磨性还需进一步测试。

#### 参考文献:

#### References:

- [1] 王长安, 吴育良, 郭敏怡, 等. 乳化沥青及其乳化剂的发展与应用 [J]. 广州化学, 2006, 31 (1): 54-60.
- [2] 张久鹏, 朱红斌, 裴建中, 等. 基于龚帕斯模型的改性乳化沥青胶浆黏度与沥青破乳评价 [J]. 交通运输工程学报, 2015, 15 (5): 1-7.
- ZHANG Jiu-peng, ZHU Hong-bin, PEI Jian-zhong, et al. Evaluation of Asphalt Demulsification and Viscosity of Modified Asphalt Emulsion Mortar Based on Gompertz Model [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2015, 15 (5): 1-7.
- [3] 陈宪宏, 刘杉, 孙立夫. 纳米二氧化硅与SBR复合改性乳化沥青的性能研究 [J]. 橡胶工业, 2007, 54 (6): 337-340.
- CHEN Xian-hong, LIU Shan, SUN Li-fu. Preparation and Properties of Emulsion Asphalt Modified by Nano-silica/SBR Composite [J]. China Rubber Industry, 2007, 54 (6): 337-340.
- [4] 王锋. 水性环氧乳化沥青的制备及其混合料性能研究 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2014.
- WANG Feng. Preparation of Waterborne Epoxy Emulsified Asphalt and Study on Its Properties [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2014.
- [5] 闫福安. 水性树脂与水性涂料 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2009.
- YAN Fu-an. Water-based Resin and Coating [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2009.
- [6] 邹海良, 张亚峰, 邝健政, 等. 水性环氧乳液改性水泥复合材料的力学性能研究 [J]. 新型建筑材料, 2010, 37 (6): 15-19.
- ZOU Hai-liang, ZHANG Ya-feng, KUANG Jian-zheng, et al. Study on Mechanical Properties of the W-epoxy/Cement Composites [J]. New Building Materials, 2010, 37 (6): 15-19.
- [7] 裴强, 杜素军, 庞瑾瑜. 乳化沥青用水性环氧树脂的制备及性能研究 [J]. 石油沥青, 2016, 30 (2): 50-53.
- PEI Qiang, DU Su-jun, PANG Jin-yu. Preparation and Properties of Waterborne Epoxy Resin Used in Emulsified Asphalt [J]. Petroleum Asphalt, 2016, 30 (2): 50-53.
- [8] 何远航, 张荣辉. 水性环氧树脂改性乳化沥青在公路养护中的应用 [J]. 新型建筑材料, 2007, 34 (5): 37-40.
- HE Yuan-hang, ZHANG Rong-hui. Application of Emulsified Asphalt Modified with Water-epoxy Resin to Maintenance of Highway [J]. New Building Materials, 2007, 34 (5): 37-40.

- [9] 耿树泽. 水性环氧树脂改性乳化沥青黏层材料研究 [J]. 交通世界, 2015 (7): 114-115.  
GENG Shu-ze. Study on Water-based Epoxy Resin Modified Emulsified Asphalt Binder [J]. Transpo World, 2015 (7): 114-115.
- [10] MIN Z H. Phase Behavior and Mechanical Properties of Asphalt Modified with Low Cross-linking Epoxy Resin [C] // Eleventh International Conference of Chinese Transportation Professionals. Nanjing: ICCTP, 2011: 3655-3666.
- [11] CONG P L, YU J Y, CHEN S F. Effects of Epoxy Resin Contents on the Rheological Properties of Epoxy-asphalt Blends [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2010, 118 (6): 3678-3684.
- [12] 张庆, 郝培文, 白正宇. 水性环氧树脂改性乳化沥青制备及其黏附性研究 [J]. 公路交通科技, 2015, 32 (9): 9-14.  
ZHANG Qing, HAO Pei-wen, BAI Zheng-yu. Research on Preparation and Adhesion of Emulsified Asphalt Modified with Waterborne Epoxy Resin [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2015, 32 (9): 9-14.
- [13] 周启伟, 凌天清, 郝增恒, 等. 水性环氧树脂-乳化沥青共混物特性分析 [J]. 建筑材料学报, 2018, 21 (3): 414-419.  
ZHOU Qi-wei, LING Tian-qing, HAO Zeng-heng, et al. Feature Analysis of Waterborne Epoxy Resin-emulsified Asphalt Blend [J]. Journal of Building Materials, 2018, 21 (3): 414-419.
- [14] 吕建伟, 毕伟林, 任斌斌, 等. 水性环氧树脂掺量对SBR改性乳化沥青及其混合料的影响 [J]. 石油沥青, 2018, 32 (2): 5-9.  
LÜ Jian-wei, BI Wei-lin, REN Bin-bin, et al. the Influence of Waterborne Epoxy Resin Content on SBR Modified Emulsified Asphalt and Its Mixtures [J]. Petroleum Asphalt, 2018, 32 (2): 5-9.
- [15] 季节, 刘禄厚, 索智, 等. 水性环氧树脂改性乳化沥青微表处性能 [J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2017, 37 (5): 23-30.  
JI Jie, LIU Lu-hou, SUO Zhi, et al. Performances of Micro-surfacing with Waterborne Epoxy Resin Modified Emulsified Asphalt [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2017, 37 (5): 23-30.
- [16] 季节, 刘禄厚, 索智, 等. 水性环氧树脂改性乳化沥青混合料性能 [J]. 北京工业大学学报, 2018, 44 (4): 568-576.  
JI Jie, LIU Lu-hou, SUO Zhi, et al. Evaluation on Performances of Modified Emulsified Mixture with Waterborne Epoxy Resin [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2018, 44 (4): 568-576.
- [17] 王力野. 钢渣沥青混合料的马歇尔试验研究 [D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2011.  
WANG Li-ye. Study on Marshall Test of Steel Slag Asphalt Mixture [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2011.
- [18] 高振鑫, 申爱琴, 翟超伟, 等. 钢渣沥青混合料体积参数测定与水稳定性影响机理 [J]. 交通运输工程学报, 2018, 18 (2): 1-10.  
GAO Zhen-xin, SHEN Ai-qin, ZHAI Chao-wei, et al. Determination of Volumetric Parameters and Impacting Mechanism of Water Stability for Steel Slag Asphalt Mixture [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2018, 18 (2): 1-10.
- [19] 申爱琴, 陈祥, 郭寅川, 等. 基于灰靶决策理论的钢渣沥青混合料路用性能评价 [J]. 硅酸盐通报, 2019, 38 (4): 1245-1252.  
SHEN Ai-qin, CHEN Xiang, GUO Yin-chuan, et al. Road Performance Evaluate on Effects of Steel Slag Asphalt Mixture Based on Grey Target Decision [J]. Bulletin of The Chinese Ceramic Society, 2019, 38 (4): 1245-1252.
- [20] HESAMI S, AMERI M, GOLI H, et al. Laboratory Investigation of Moisture Susceptibility of Warm-mix Asphalt Mixtures Containing Steel Slag Aggregates [J]. International Journal of Pavement Engineering, 2015, 16 (8): 745-759.
- [21] 李伟, 王成元, 王达, 等. 钢渣沥青混合料路面层间剪切力学性能试验研究 [J]. 公路, 2017, 62 (4): 36-41.  
LI Wei, WANG Cheng-yuan, WANG Da, et al. Experimental Study on Interlaminar Shear Mechanical Properties of Steel Slag Asphalt Mixture Pavement [J]. Highway, 2017, 62 (4): 36-41.
- [22] ALI L, FIAZ A. Use of Fly Ash along with Blast Furnace Slag as Partial Replacement of Fine Aggregate and Mineral Filler in Asphalt Mix at High Temperature [C] // 2009 GeoHunan International Conference. Changsha: ASCE, 2009.
- [23] 李超, 陈宗武, 谢君, 等. 钢渣沥青混凝土技术及其应用研究进展 [J]. 材料导报, 2017, 31 (3): 86-95, 122.  
LI Chao, CHEN Zong-wu, XIE Jun, et al. A Technological and Applicational Review on Steel Slag Asphalt Mixture [J]. Materials Reviews, 2017, 31 (3): 86-95, 122.
- [24] JTG E20—2011, 公路工程沥青及沥青混合料试验规程 [S].

- Evaluation Based on Grey Relational Analysis [J]. *Systems Engineering—Theory and Practice*, 2008, 28 (10): 125–130.
- [14] 杜二鹏, 马松林, 景海民. 基于灰色系统理论的沥青路面使用性能预测 [J]. *同济大学学报: 自然科学版*, 2010, 8 (11): 4–11.  
DU Er-peng, MA Song-lin, JING Hai-min. Asphalt Pavement Performance Prediction Model Based on Gray System Theory [J]. *Journal of Tongji University: Natural Science Edition*, 2010, 8 (11): 4–11.
- [15] 王浩. 灰色系统理论在高速公路沥青路面养护管理决策中的应用 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2008.  
WANG Hao. Application of Grey System Theory in Decision Making of Expressway Asphalt Pavement Maintenance Management [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2008.
- [16] 邵飞, 邓卫. 基于AHP灰色理论的大城市公交系统综合评价方法 [J]. *解放军理工大学学报: 自然科学版*, 2009, 10 (6): 536–541.  
SHAO Fei, DENG Wei. Comprehensive Evaluation Method of Metropolitan Public Transportation System Based on Analysis Hierarchical Process and Grey Theory [J]. *Journal of PLA University of Science and Technology: Natural Science Edition*, 2009, 10 (6): 536–541.
- [17] 秦先涛, 陈拴发, 祝斯月, 等. 沥青路面矿物纤维复合阻燃材料及其热重行为研究 [J]. *公路交通科技*, 2013, 30 (12): 7–14.  
QIN Xian-tao, CHEN Shuan-fa, ZHU Si-yue, et al. Composite Flame Retardant Materials with Mineral Fiber for Asphalt Pavement and Their Thermogravimetric Behaviors [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2013, 30 (12): 7–14.
- [18] GREENFIELD M L, ZHANG L. Developing Model Asphalt Systems Using Molecular Simulation [J]. *Molecular Simulation*, 2009, 4 (1): 23–24.

(上接第8页)

- JTG E20—2011, Standard Test Methods of Bitumen and Bituminous Mixtures for Highway Engineering [S].
- [25] 赵巍, 王竦, 李巨成. 唐山钢铁行业发展现状成因及转型升级创新研究 [J]. *当代经济*, 2016 (30): 30–32.  
ZHAO Wei, WANG Zhu, LI Ju-cheng. Study on Causes of Development of Tangshan Iron and Steel Industry and Its Transformation and Upgrading Innovation [J]. *Contemporary Economies*, 2016 (30): 30–32.
- [26] 武建民, 杨永利, 周雄. 钢渣在沥青路面工程中的应用 [J]. *筑路机械与施工机械化*, 2016, 33 (7): 32–35.  
WU Jian-min, YANG Yong-li, ZHOU Xiong. Application of Steel Slag in Asphalt Pavement Projects [J]. *Road Machinery & Construction Mechanization*, 2016, 33 (7): 32–35.
- [27] GB/T 25824—2010, 道路用钢渣 [S].  
GB/T 25824—2010, Steel Slag for Road [S].
- [28] 杨松. 水性高分子改性乳化沥青及其混合料性能研究 [D]. 北京: 北京建筑大学, 2016.  
YANG Song. Study on Properties of Waterborne Polymer Modified Emulsified Asphalt and Its Mixture [D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2016.
- [29] 李秀君, 王晨, 毕伟林, 等. 多级嵌挤型水性环氧树脂微表处的路用耐久性研究 [J]. *公路交通科技*, 2019, 36 (11): 17–23.  
LI Xiu-jun, WANG Chen, BI Wei-lin, et al. Study on Road Durability of Multilevel Built-in Waterborne Epoxy Micro-surfacing [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*. 2019, 36 (11): 17–23.
- [30] 李亚菲. 不同水性环氧树脂掺量乳化沥青冷再生混合料耐久性试验研究 [J]. *公路工程*, 2016, 41 (5): 82–87, 101.  
LI Ya-fei. Study on Durability of Emulsion Asphalt Cold Recycled Mixture with Different Dosage of Waterborne Epoxy Resin [J]. *Highway Engineering*, 2016, 41 (5): 82–87, 101.