

水性环氧乳液的制备与 MS-2 型微表处性能

李悦¹, 赵晨轶¹, 吴玉生^{2,3}, 黄舟^{2,3}

(1. 北京工业大学城市与工程安全减灾教育部重点实验室, 北京 100124;

2. 中国建材检验认证集团厦门宏业有限公司, 厦门 361026;

3. 厦门市建筑工程性能检测与诊治重点实验室, 厦门 361026)

摘要: 以环氧树脂 E51 和聚乙二醇 (polyethyleneglycol, PEG) 为原料, 通过相反转法制备水性环氧乳液, 通过探究 PEG 相对分子质量和乳化剂用量对乳液的黏度、粒径以及稳定性的影响, 筛选出综合性能最佳的水性环氧乳液, 并分析该乳液固化后水性环氧树脂 (waterborne epoxy resin, WER) 的热稳定性、微观结构。使用荧光显微镜探究水性环氧树脂与乳化沥青的相容性, 并得出最佳的水性环氧树脂质量掺量。在此基础上制备 MS-2 型水性环氧树脂改性乳化沥青微表处, 考察不同水性环氧树脂改性乳化沥青制备方法、不同固化剂种类对微表处混合料施工性能和路用性能的影响, 并分析自制乳液和市售乳液的性价比及对应微表处性能的性能。结果表明, 当 PEG 相对分子质量为 6 000、乳化剂质量掺量为 20% 时得到的水性环氧乳液综合性能最佳, 对应的水性环氧树脂具备优异的热稳定性和良好的微观结构。水性环氧树脂质量掺量为 6% 时得到的水性环氧树脂改性乳化沥青相容性最好。最佳的水性环氧树脂改性乳化沥青制备方法是水性环氧乳液与乳化沥青混合后再加入水性环氧固化剂; 相较于基础胺类固化剂, 水性环氧固化剂制备的微表处具有更加优异的综合性能。自制水性环氧乳液性价比高于市售乳液, 具备较好的应用价值。

关键词: 道路工程; 水性环氧乳液; 改性乳化沥青; MS-2 型微表处; 施工及路用性能; 性价比分析

中图分类号: U 414

文献标志码: A

文章编号: 0254-0037(2023)08-0874-10

doi: 10.11936/bjutxb2022040010

Preparation of Waterborne Epoxy Emulsion and Properties of MS-2 Micro-surfacing

LI Yue¹, ZHAO Chenyi¹, WU Yusheng^{2,3}, HUANG Zhou^{2,3}

(1. Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering of Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

2. China Building Materials Test and Certification Group Xiamen Hongye Co., Ltd., Xiamen 361026, China;

3. Xiamen Key Laboratory of Performance Testing and Diagnosis of Building Engineering, Xiamen 361026, China)

Abstract: Using epoxy resin E51 and polyethylene glycol (PEG) as raw materials, waterborne epoxy emulsion was prepared by phase inversion method. By exploring the effects of PEG molecular weight and emulsifier dosage on the viscosity, particle size and stability of the emulsion, the waterborne epoxy emulsion with the best comprehensive performance was selected, and the thermal stability and micro-surfacing of the cured waterborne epoxy resin were analyzed. The compatibility between waterborne epoxy resin and emulsified asphalt was investigated by fluorescence microscope, and the optimum content of waterborne epoxy resin was obtained. On the basis of this, MS-2 waterborne epoxy resin modified emulsified asphalt micro-surfacing was prepared. The influences of different preparation methods and different curing agents on the construction performance and road performance of micro-surfacing mixture

收稿日期: 2022-04-28; 修回日期: 2022-06-14

基金项目: 北京市自然科学基金资助项目 (8202005); 北京市百千万人才工程资助项目 (2018A37)

作者简介: 李悦 (1972—), 男, 教授, 主要从事建筑材料方面的研究, E-mail: liyue@bjut.edu.cn

通信作者: 赵晨轶 (1995—), 男, 硕士研究生, 主要从事建筑材料方面的研究, E-mail: zhaohualong@vip.qq.com

were investigated, and the cost performance of self-made emulsion and commercial emulsion and the corresponding micro-surfacing performance were analyzed. Results show that when the molecular weight of PEG is 6 000 and the content of emulsifier is 20%, the waterborne epoxy emulsion has the best comprehensive performance, and the corresponding waterborne epoxy cured product has excellent thermal stability and good micro-surfacing. 6% waterborne epoxy resin has the best compatibility with emulsified asphalt. The best preparation method of waterborne epoxy resin modified emulsified asphalt is to mix waterborne epoxy emulsion with emulsified asphalt and then add waterborne epoxy curing agent. Compared with the basic amine curing agent, the micro-surfacing prepared by waterborne epoxy curing agent has excellent comprehensive properties. Self-made waterborne epoxy emulsion has higher cost performance than that of commercial emulsion, and has good application value.

Key words: road engineering; waterborne epoxy emulsion; modified emulsified asphalt; MS-2 micro-surfacing; construction and road performance; cost-performance analysis

随着我国交通事业的不断发展,公路总里程飞速增长,汽车载重量增加,交通量剧增,公路养护需求呈现快速增长的趋势^[1]。因此,开发新型路面养护材料,具有重要的社会价值和社会效益。微表处是我国公路预防性养护技术手段之一,它可以有效修补路面的轻微损坏,提高路面的抗滑耐磨性能以及防水抗渗性能,且工艺简单,能耗小,能够快速恢复交通^[2-3]。微表处的强度主要来自沥青与集料之间的黏结力,因此乳化沥青是微表处混合料性能的关键^[4],但普通乳化沥青存在黏结强度低、柔韧性和稳定性差等缺点^[5]。所以,对乳化沥青进行合适的改性是提升微表处综合性能的关键。

水性环氧树脂(waterborne epoxy resin, WER)是以环氧树脂为分散相,以水为连续相的液相材料,既保留了传统环氧树脂具有良好的力学强度、黏结性和稳定性等特性^[6-7],又避免了溶剂型环氧树脂的缺点。在制备水性环氧乳液方面,由于相反转法的工艺简单、成本低廉,并且制得乳液平均粒径小,分布集中,稳定性较好,故绝大多数研究均采用相反转法制备水性环氧乳液^[8-12],但是对制备乳液的各项性能缺乏系统研究。近年来,水性环氧树脂作为乳化沥青的改性剂已经取得一定的研究进展。Zhang等^[13]得出水性环氧树脂的加入明显提升乳化沥青蒸发残留物的力学性能和高温性能。王佳炜^[14]和周启伟等^[15]证明在适当比例下水性环氧树脂与乳化沥青具备良好的相容性,同时水性环氧树脂的加入显著提高了乳化沥青的黏结性能^[16]。将水性环氧树脂改性乳化沥青应用于微表处,可有效提高微表处混合料的各项性能。陈舟宇等^[17]和郭寒等^[18]得出水性环氧树脂可以有效改善乳化沥青与矿料的黏结力,提高MS-3型微表处混合料的耐磨

耗、抗车辙、抗水损及抗滑性能。Liu等^[19]证明水性环氧树脂是比丁苯橡胶(butadiene-styrene rubber, SBR)更优良的微表处改性剂,改性后的微表处具有良好的路用及耐久性能。季节等^[20]和郑木莲等^[21]发现水性环氧树脂的加入显著改善MS-3型微表处混合料的耐高温性能,在抵御水分侵蚀与抗滑耐磨等方面具有良好的耐久性,但对低温性能产生不利影响。

综上所述,首先,当前绝大部分研究均针对MS-3型微表处,MS-2型微表处的性能研究较少;其次,多数工作集中在水性环氧树脂增强乳化沥青及微表处的研究上,缺乏水性环氧乳液、固化剂以及水性环氧树脂改性乳化沥青制备方法的对比研究。为此,笔者制备了反应型水性环氧乳化剂,采用相反转法制备水性环氧乳液,通过对乳液的黏度、贮存及离心稳定性、乳液粒径及其分布的分析,筛选出综合性能最佳的水性环氧乳液,将其用于MS-2型微表处混合料的制备;探究了不同基础胺类固化剂与水性环氧固化剂、不同水性环氧树脂改性乳化沥青制备方法对微表处施工及路用性能的影响,并分析了自制乳液与市售乳液的性价比。

1 实验部分

1.1 原材料

环氧树脂E51:工业级,江苏三木集团有限公司。聚乙二醇(PEG,相对分子质量分别为1 000、2 000、4 000、6 000、8 000、10 000),分析纯,西陇科学股份有限公司。过硫酸钾:分析纯,国药集团化学试剂有限公司。2款市售水性环氧乳液:JT-851,佛山隽途新材料公司;F0704,深圳吉田化工有限公司。自制水性环氧固化剂,技术指标见表1。4种基础

胺:三乙烯四胺,工业级,日本东曹株式会社;间苯二甲胺,工业级,日本三菱瓦斯化学株式会社;异佛尔酮二胺,工业级,万华化学集团股份有限公司;聚醚胺 D230,工业级,亨斯迈先进材料有限公司。阳离子型乳化石油沥青:工业级,漳州新立基沥青有限公司,技术指标见表 2。矿料:玄武岩,漳州金泉建设发展有限公司,MS-2 型级配,级配见表 3。填料:P·I 42.5 硅酸盐水泥,抚顺水泥股份有限公司。添加剂:自制分散破乳剂,固含量(固体质量占总质量的百分比)40%。

表 1 水性环氧固化剂技术指标

Table 1 Technical index of waterborne epoxy curing agent

测试项目	测试结果
颜色	淡黄色
固含量/%	49 ~ 51
pH	8 ~ 9
密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	1.05
胺值/($\text{mmol} \cdot \text{g}^{-1}$)	3.44
活泼氢当量/($\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$)	220

表 2 乳化沥青技术指标

Table 2 Technical index of emulsified asphalt

测试项目	测试结果	标准要求
破乳速度	慢裂	慢裂或中裂
粒子电荷	阳离子	
标准黏度 $C_{25,3}/\text{s}$	17.6	12 ~ 60
恩格拉黏度 E_{25}	7.9	3 ~ 30
筛上剩余量(1.18 mm 筛)/%	0.04	≤ 0.1
与粗集料的黏附性	$\geq 2/3$	$\geq 2/3$
蒸发残留物性质	残留物质量分数/%	≥ 60
	断裂强度/MPa	≥ 0.1
	断裂伸长率/%	≥ 50
	25 °C 针入度/(0.1 mm)	40 ~ 100
	软化点/°C	≥ 53
	15 °C 延度/cm	> 45
贮存稳定性/%	1 d	≤ 2
	5 d	≤ 10

表 3 矿料级配

Table 3 Mineral aggregate gradation

筛孔尺寸/mm	9.500	4.750	2.360	1.180	0.600	0.300	0.150	0.075
通过率/%	100.0	97.5	77.5	57.5	40.0	24.0	15.5	10.0

1.2 反应型乳化剂的合成

按照一定比例将环氧树脂 E51 和聚乙二醇加入四口烧瓶中,加热至 150 °C 并搅拌混合均匀。于 2 h 内缓慢加入一定量过硫酸钾,加完后立即升温至 170 °C,根据 GB/T 1677—2008《增塑剂环氧值的测定》中的盐酸-丙酮法测试反应过程中乳化剂的环氧值,当环氧值为初始环氧值的一半时得到反应型乳化剂。

1.3 水性环氧乳液的制备

采用相反转法制备水性环氧乳液:将 1.2 中制得的乳化剂和环氧树脂 E51 按照一定比例加入四口烧瓶中并加热至 30 °C,使用电动搅拌器在 1 200 r/min 下混合均匀,然后边搅拌边在 30 min 内匀速加完水,加完后继续搅拌 10 min,得到固含量为 50% 的水性环氧乳液。

1.4 水性环氧树脂改性乳化沥青的制备

3 种水性环氧树脂改性乳化沥青制备方法分别如下。

方法 1:水性环氧乳液与乳化沥青先混合,再加入水性环氧固化剂混合。

方法 2:水性环氧乳液与水性环氧固化剂先混合,再加入乳化沥青混合。

方法 3:环氧树脂 E51 与水性环氧固化剂混合,补水后(因水性环氧乳液固含量为 50%,而 E51 固含量为 100%,需保证相同水量故补水)再加入乳化沥青混合。

1.5 测试与表征

1.5.1 乳化剂的红外光谱分析

采用 KBr 压片法,使用 Nicolet 6700 傅里叶变

换红外光谱仪进行测定。

1.5.2 水性环氧乳液的测试与表征

水性环氧乳液黏度:在 $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ 的室温下使用NDJ-8S型数字式旋转黏度计进行测试。

水性环氧乳液的贮存稳定性:将所制备水性环氧乳液放置在 $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ 的室温下密封静置,测定其发生分层的时间。

水性环氧乳液的离心稳定性:将所制备水性环氧乳液用LC-8S型离心机在 $3\,000\text{ r/min}$ 的转速下离心 30 min ,观察乳液的分层情况,并以分层容积率(上层清液体积占乳液总体积之比)表示乳液的离心稳定性。

水性环氧乳液的粒径分布:使用Bettersize 2000LD型激光粒度分布仪测试。

1.5.3 水性环氧树脂的测试与表征

水性环氧树脂的热稳定性:采用美国TA公司Trios型热分析仪对水性环氧树脂的热稳定性进行测试,测试的温度范围为 $20 \sim 800^\circ\text{C}$,升温速率为 10°C/min ,测试气体氛围为氮气。

水性环氧树脂的微观形貌:采用Quanta 200环

境扫描电子显微镜观察水性环氧树脂的微观形貌,放大倍数选择200倍和 $10\,000$ 倍。

1.5.4 水性环氧树脂改性乳化沥青性能表征

选用2.4节中制备方法1,在水性环氧固化剂加入 30 min ,即环氧还未完成固化时,采用北京普瑞赛司仪器有限公司Axio Vert. A1荧光显微镜表征水性环氧树脂与乳化沥青的相容性。

1.5.5 微表处混合料的制备及性能评价

使用自动混合料拌和机在持续搅拌的情况下依次加入矿料、填料、水、分散破乳剂、水性环氧树脂改性乳化沥青,混合后制得水性环氧树脂改性乳化沥青微表处混合料。

根据GB/T 38990—2020《道路用水性环氧树脂乳化沥青混合料》、JTG E20—2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》,通过可拌和时间、破乳时间、 30 min 和 300 min 黏聚力、浸水 6 d 湿轮磨耗值(用 A 表示)、车宽度变形率(用 B 表示)、拉伸及黏结强度对微表处混合料的施工及路用性能进行评价。微表处路用性能测试试样见图1。

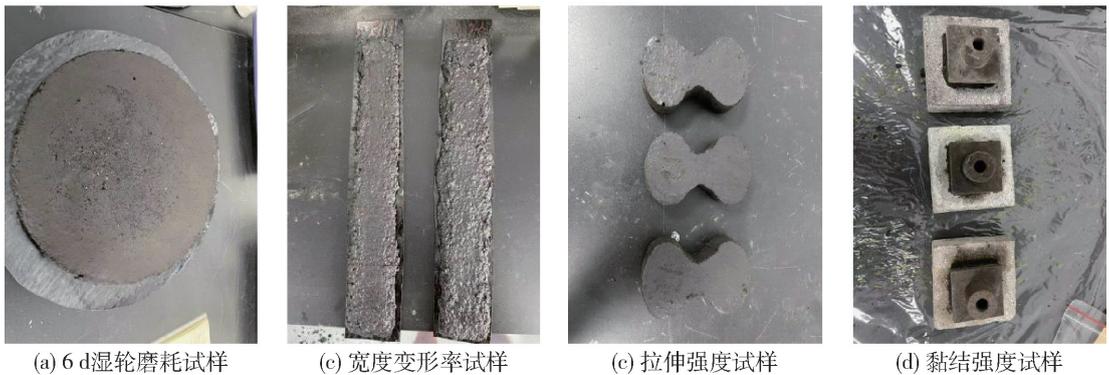


图1 微表处路用性能测试试样

Fig.1 Performance test specimen at micro-surfacing

2 结果与讨论

2.1 乳化剂的红外光谱分析

为表示乳化剂合成过程中官能团的变化,对环氧树脂E51、PEG6000、E51与PEG6000共熔物和乳化剂进行红外光谱分析,得到的红外光谱如图2所示。

由图2可以看出,PEG6000的红外谱图在 $1\,105\text{ cm}^{-1}$ 处有脂肪醚键 $\text{C}-\text{O}-\text{C}$ 不对称伸缩振动峰,此振动峰也在PEG6000共熔物及乳化剂谱线中。E51的红外谱图在 $1\,509\text{ cm}^{-1}$ 处有苯环特征峰,这些特征峰也存在于共熔物及乳化剂中。在E51的谱图中, 913 cm^{-1} 处为环氧基团的特征峰,而

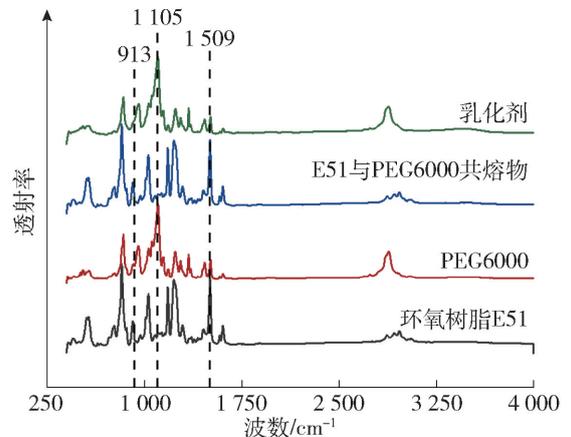


图2 原料和乳化剂的红外光谱

Fig.2 Infrared spectra of raw materials and emulsifiers

乳化剂谱图环氧吸收峰的峰值减小,说明乳化剂制备过程发生了环氧基团开环反应,但乳化剂中仍保留了一部分的环氧基团。

2.2 PEG 相对分子质量对乳液稳定性的影响

选择不同相对分子质量 PEG 制备的乳化剂,测试了乳化剂质量掺量为 20% 的水性环氧乳液的性能,并对乳液粒径进行了分析,测试及分析结果如表 4 所示。

由表 4 可以看出,随着 PEG 相对分子质量的增大,水性环氧乳液的黏度、贮存稳定性和离心稳定性呈现不断增加的趋势,但在 PEG 相对分子质量为

8 000 时乳液的黏度降低,并且贮存稳定性和离心稳定性都变差;PEG 相对分子质量为 10 000 时乳液黏度过大,对后续微表处的制备产生不利影响。PEG 相对分子质量为 6 000 时乳液黏度适中,贮存稳定性和离心稳定性优异,乳液的粒径分布宽度较小,10%、50% 和 90% 粒径值均较小。这是因为乳液颗粒粒径越小,越不易团聚导致沉降分层,并且乳液颗粒粒径分布宽度越小,表明乳液均一性越高,从而有利于乳液的稳定。因此,当 PEG 相对分子质量为 6 000 时制得的乳液综合性能最佳。

表 4 PEG 相对分子质量对乳液的黏度、稳定性及粒径分布的影响

Table 4 Effect of PEG molecular weight on viscosity, stability and particle size distribution of emulsion

PEG 相对分子质量	黏度/ (mPa·s)	储存 稳定性/d	离心 稳定性/%	10% 粒 径值/ μm	50% 粒径 值/ μm	90% 粒径 值/ μm	粒径分布 宽度
1 000	218	5	20	1.630	2.503	3.771	0.855
2 000	254	20	5	0.382	1.291	2.431	1.574
4 000	331	24	3	0.244	0.831	2.464	2.672
6 000	428	60	1	0.392	0.892	1.396	1.125
8 000	260	25	5	0.223	0.746	2.501	3.054
10 000	1 752	60	1	0.230	0.495	1.287	2.136

2.3 乳化剂质量掺量对乳液稳定性的影响

选择 PEG6000 制备的乳化剂,测试了不同乳化

剂质量掺量的水性环氧乳液的稳定性,并对乳液粒径进行分析,测试及分析结果如表 5 所示。

表 5 不同乳化剂质量掺量乳液的黏度及稳定性

Table 5 Viscosity and stability of emulsion with different emulsifier content

乳化剂 质量掺量/%	黏度/ (mPa·s)	储存 稳定性/d	离心 稳定性/%	10% 粒径 值/ μm	50% 粒径 值/ μm	90% 粒径 值/ μm	粒径分布 宽度
10	239	5	20	2.264	4.766	8.263	1.259
20	428	60	1	0.392	0.892	1.396	1.125
30	1 182	65	1	0.253	0.532	1.411	2.175

由表 5 可以看出,随着乳化剂质量掺量的增加,水性环氧乳液的黏度逐渐增加,乳化剂质量掺量为 20% 的乳液贮存稳定性和离心稳定性有较大提升,但继续提高乳化剂质量掺量,对稳定性的提升作用不明显。比对表中 10%、50% 和 90% 粒径值以及粒径分布宽度得出,当乳化剂质量掺量为 20% 时制得的乳液综合性能最佳。

2.4 水性环氧树脂微观结构分析

将 PEG6000、乳化剂质量掺量 20% 对应的水性环氧乳液与自制水性环氧固化剂以质量比 2:1 混合后固化形成水性环氧树脂。

2.4.1 热重分析

水性环氧树脂的热重测试结果如图 3 所示。采用 300 °C 质量损失率来表示热稳定性。其在 100 °C 的质量损失为 2.1%,这是环氧固化物残留水分蒸发导致;在 300 °C 时的质量损失仅为 7.1%,说明其具备优异的热稳定性,符合实际应用要求。随着温度的继续升高,固化物分子中部分化学键断裂,至 500 °C 时的质量损失达到 88.2%。在 800 °C 时,固化物几乎损失殆尽。

2.4.2 微观形貌

水性环氧树脂的微观形貌如图 4 所示,由图 4(a)

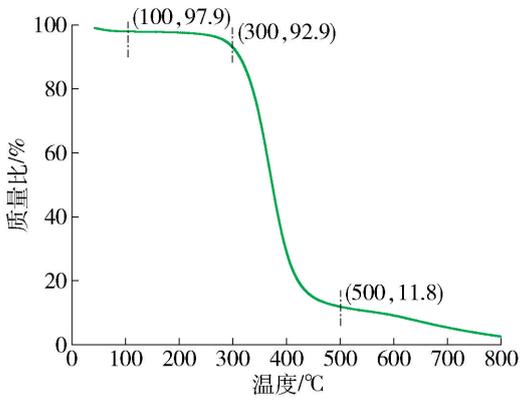


图 3 水性环氧树脂热重分析

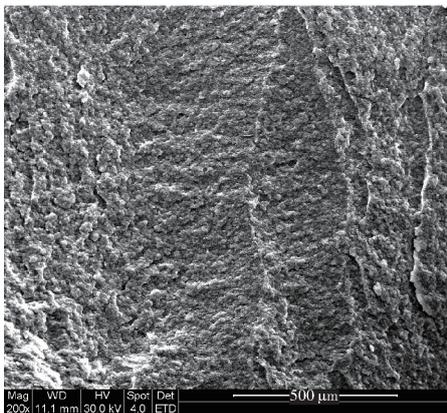
Fig. 3 Thermogravimetric analysis of waterborne epoxy resin

可以看出,水性环氧树脂表面结构致密且较为粗糙,交联密度大,表明其硬度大,强度高,并具备优异的防水抗渗性能;由图 4(b)可以看出,水性环氧树脂中形成了多层次的三维网状交联结构。综上所述,本研究中制备的水性环氧乳液固化后的水性环氧树脂具备良好的微观结构。

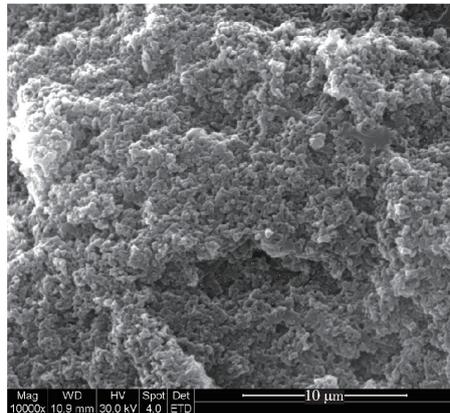
2.5 水性环氧乳液性价比分析

将本文制备的水性环氧乳液与市售 2 款水性环氧乳液进行性能对比,对比结果如表 6 所示。

由表 6 可以看出,本文制备的水性环氧乳液的粒径和稳定性均优于 2 款市售产品,且市场价格也略低于 2 款市售产品,表明本文制备的水性环氧乳



(a) 200×



(b) 10 000×

图 4 水性环氧树脂微观形貌

Fig. 4 Micro-morphology of waterborne epoxy resin

表 6 自制乳液与市售乳液性价比分析

Table 6 Performance comparison of waterborne epoxy emulsion

乳液名称	平均粒径/ μm	储存稳定性/d	离心稳定性/%	热稳定性/%	价格/(元 $\cdot\text{kg}^{-1}$)
自制乳液	0.89	60	1.0	7.1	23
JT-851	1.45	40	4.5	9.0	27
F0704	1.25	45	3.0	9.5	25

液具备较高的性价比。

2.6 水性环氧树脂与乳化沥青的相容性

由于在荧光显微镜下水性环氧树脂可被蓝色荧光激发呈现蓝绿色,而乳化沥青在荧光作用下不发光,因此,采用荧光显微镜观察水性环氧树脂改性乳化沥青的乳液颗粒分布及分散情况,结果如图 5 所示。

由图 5 可以看出,当水性环氧树脂质量掺量为 0,只有乳化沥青时,整个视野呈现暗色,乳液颗粒有明显团聚现象。当水性环氧树脂的质量掺量分别为 3%、6%、9%时,乳液的团聚现象消失,乳液颗粒分布均匀致密且粒径较小,表明上述质量掺量下水性

环氧树脂与乳化沥青相容性较好,其中 6% 的水性环氧树脂质量掺量得到的水性环氧树脂改性乳化沥青相容性最好。当水性环氧树脂质量掺量增大至 12%、15%时,乳液的颗粒粒径明显变大且出现明显的团聚现象,颗粒间的排布杂乱无序且其中夹杂很多空隙,表明该质量掺量下水性环氧树脂与乳化沥青相容性较差。综上,掺入 6% 的水性环氧树脂可最大程度改善乳化沥青的分散性,并与乳化沥青具备最佳的相容性。

2.7 微表处混合料性能评价

将筛选出的乳液和 2 款市售乳液(技术指标见表

7)应用于MS-2型微表处混合料的制备。本研究采用的水性环氧树脂改性乳化沥青微表处混合料的配合比为:外加水6.00%,水性环氧乳化沥青7.50%,水

泥1.00%,分散破乳剂0.25%,水性环氧乳化沥青中水性环氧用量为乳化沥青用量内掺6%。

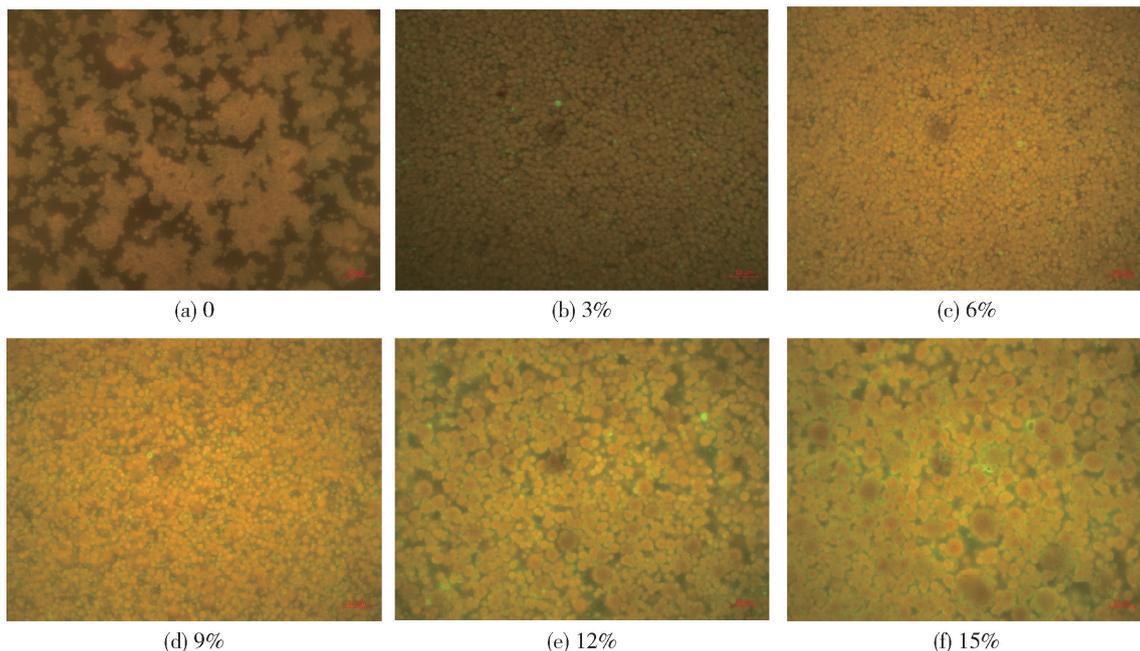


图5 不同水性环氧树脂质量掺量的乳化沥青混合乳液荧光照片

Fig. 5 Fluorescence photos of emulsified asphalt mixed emulsion with different waterborne epoxy resin content

表7 水性环氧乳液技术指标

Table 7 Technical index of waterborne epoxy emulsion

乳液名称	颜色	固含量/%	pH	密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	环氧当量/($\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$)
自制乳液	乳白色	50	7	1.05	220
JT-851	乳白色	58~62	7	1.08	360
F0704	乳白色	60	4~5	1.03	220

2.7.1 水性环氧树脂改性乳化沥青制备方法的选用
考察了3种水性环氧树脂改性乳化沥青制备方

法对微表处混合料性能的影响,微表处混合料性能如表8、9所示。

表8 不同水性环氧树脂改性乳化沥青制备方法的微表处混合料施工性能

Table 8 Construction performance of micro-surfacing mixture with different preparation methods

制备方法编号	25℃可拌和时间/s	破乳时间/min	30 min 黏聚力/($\text{N}\cdot\text{m}$)	300 min 黏聚力/($\text{N}\cdot\text{m}$)
1	200	10	1.5	2.6
2	197	10	1.6	2.7
3	230	20	1.0	2.2

表9 不同水性环氧树脂改性乳化沥青制备方法的微表处混合料路用性能

Table 9 Road performance of micro-surfacing mixture with different preparation methods

制备方法编号	$A/(\text{g}\cdot\text{m}^{-2})$	$B/\%$	拉伸强度/MPa	黏结强度/MPa
1	248.58	1.74	0.33	0.34
2	210.99	1.55	0.38	0.37
3	314.66	2.07	0.29	0.28

由表 8 看出,方法 1 和方法 2 的可拌和时间相近,破乳时间相同,方法 2 的黏聚力略优于方法 1。方法 3 的可拌和时间及破乳时间相较于前 2 种方法明显增加,黏聚力明显低于前 2 种方法。由表 9 看出:方法 2 的 A 和 B 较小,拉伸强度和黏结强度最高;方法 3 的 A 和 B 较大,拉伸强度和黏结强度较低。这是由于水性环氧乳液、水性环氧固化剂和乳化沥青均为水性体系,其相容性高于油性的 E51。同时,水性环氧乳液中的反应型乳化剂也能参与固化反应而不会对性能产生不利影响,因此,方法 1 和方法 2 均优于方法 3。方法 1 可以提前将水性环氧乳液与乳化沥青混合而省去一个施工步骤,因此方

法 1 为最优方法。

2.7.2 不同固化剂对微表处混合料性能的影响

考察 4 种基础胺类固化剂及水性环氧固化剂对微表处性能的影响。上述固化剂与水性环氧乳液各自的折合固体总量,即交联网络的总量相同,且上述固化剂与水性环氧乳液的质量比为固化剂活泼氢当量与乳液环氧当量之比。在选用水性环氧树脂改性乳化沥青制备方法 1 和相同流动性的条件下,基础胺类固化剂微表处外加水 8%,水性环氧固化剂微表处外加水 6%,不同固化剂的微表处性能如表 10、11 所示。

表 10 不同固化剂对微表处施工性能的影响

Table 10 Effect of different curing agents on construction performance of microsurfacing

固化剂名称	25 °C 可拌和时间/s	破乳时间/min	30 min 黏聚力/(N·m)	300 min 黏聚力/(N·m)
三乙烯四胺	> 300	50	1.0	1.8
间苯二甲胺	> 300	45	1.3	2.2
异佛尔酮二胺	> 300	45	1.2	2.1
聚醚胺 D230	> 300	50	1.1	2.0
水性环氧固化剂	200	10	1.5	2.6

表 11 不同固化剂对微表处路用性能的影响

Table 11 Effect of different curing agents on pavement performance of microsurfacing

固化剂名称	$A/(g \cdot m^{-2})$	$B/\%$	拉伸强度/MPa	黏结强度/MPa
三乙烯四胺	370.44	4.91	0.13	0.12
间苯二甲胺	272.95	2.97	0.21	0.24
异佛尔酮二胺	300.57	3.05	0.18	0.23
聚醚胺 D230	341.84	4.15	0.15	0.13
水性环氧固化剂	248.58	1.74	0.33	0.34

由表 10、11 得出,掺 4 种基础胺类固化剂的微表处可拌和时间及破乳时间较长,其余各项性能显著低于水性环氧固化剂微表处。此外,4 种基础胺类固化剂各项性能由好到差的顺序是:间苯二甲胺、异佛尔酮二胺、聚醚胺 D230、三乙烯四胺。这是由于间苯二甲胺含有苯环,与环氧树脂相容性较好,容易进入环氧树脂内部完成固化;异佛尔酮二胺含有环己环,相容性次之;聚醚胺 D230 含有丙二醇结构单元,相容性再次之;三乙烯四胺含有亚乙基胺链段,相容性最差而水溶性最好,倾向留在水相中导致

固化速度慢,固化程度低。

2.7.3 不同乳液对微表处路用性能的影响

考察了自制水性环氧乳液与 2 款市售乳液对微表处混合料路用性能的影响,水性环氧改性乳化沥青制备方法选择方法 1,固化剂选择水性环氧固化剂。测试结果如表 12 所示。

由表 12 可以看出,本文制备的水性环氧乳液对应的微表处在各项路用性能方面均优于 2 款市售产品,并且价格较低,表明本文制备的水性环氧乳液在微表处应用中具备较高的性价比。

表 12 不同乳液对微表处路用性能的影响

Table 12 Effect of different emulsions on pavement performance of microsurfacing

乳液名称	$A/(g \cdot m^{-2})$	$B/\%$	拉伸强度/MPa	黏结强度/MPa
自制乳液	248.58	1.74	0.33	0.34
JT-851	301.78	2.68	0.26	0.25
F0704	294.52	2.32	0.27	0.25

3 结论

1) PEG6000 质量掺量为 20% 时合成的反应型乳化剂制得的水性环氧乳液黏度适宜, 贮存稳定性和离心稳定性最佳, 其黏度为 $428 \text{ mPa} \cdot \text{s}$, 贮存稳定性为 60 d, 离心稳定性为 1%。该乳液固化形成的水性环氧树脂 300 °C 时的质量损失仅为 7.1%, 具备优异的热稳定性和良好的微观结构。水性环氧树脂质量掺量为 6% 时, 得到的水性环氧乳化沥青相容性最好, 可应用于微表处混合料的制备。

2) 水性环氧乳液与乳化沥青先混合, 再加入水性环氧固化剂为最佳的水性环氧乳化沥青制备方法。相较于基础胺类固化剂, 水性环氧固化剂制备的微表处混合料具备更加优异的施工和路用性能。性能最佳的微表处混合料 25 °C 可拌和时间为 200 s, 破乳时间为 10 min, 30、300 min 黏聚力分别为 1.5、2.6 $\text{N} \cdot \text{m}$, A 为 248.58 g/m^2 , B 为 1.74%, 拉伸强度为 0.33 MPa, 黏结强度为 0.34 MPa。

3) 自制的水性环氧乳液具备较高的性价比, 在微表处等改性乳化沥青材料中具备较好的应用价值。

参考文献:

[1] 王玉杰. 水性环氧树脂改性乳化沥青的应用研究综述[J]. 江西建材, 2016(16): 181-184.
WANG Y J. Review on application research of waterborne epoxy resin modified emulsified asphalt [J]. Jiangxi Building Materials, 2016(16): 181-184. (in Chinese)

[2] 张小兵. 微表处技术在公路预防性养护中的应用[J]. 中国高新科技, 2021(8): 43-44, 70.
ZHANG X B. Application of micro surfacing technology in highway preventive maintenance [J]. China High Tech, 2021(8): 43-44, 70. (in Chinese)

[3] 何俊明. 微表处技术在公路预防性养护中的应用[J]. 江西建材, 2016(19): 138-137.
HE J M. Application of micro surfacing technology in highway preventive maintenance [J]. Jiangxi Building Materials, 2016(19): 138-137. (in Chinese)

[4] 张庆, 郝培文, 白正宇. 水性环氧树脂改性乳化沥青混凝土性能研究[J]. 筑路机械与施工机械化, 2016, 33(1): 54-57.
ZHANG Q, HAO P W, BAI Z Y. Study on performance of waterborne epoxy resin modified emulsified asphalt concrete [J]. Road Construction Machinery and Construction Mechanization, 2016, 33(1): 54-57. (in Chinese)

[5] 刘宁, 钟海燕, 杨志鹏, 等. 水性环氧树脂改性乳化沥青混凝土性能研究[J]. 现代交通技术, 2017, 14(4): 1-4.
LIU N, ZHONG H Y, YANG Z P, et al. Study on performance of waterborne epoxy resin modified emulsified asphalt concrete [J]. Modern Transportation Technology, 2017, 14(4): 1-4. (in Chinese)

[6] GU J W, YANG X T, LI C M, et al. Synthesis of cyanate ester microcapsules via solvent evaporation technique and its application in epoxy resins as a healing agent [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2016, 55(41): 10914-10946.

[7] CREYTENS K, GILISSEN L, HUYGENS S, et al. A new application for epoxy resins resulting in occupational allergic contact dermatitis: the three-dimensional printing industry[J]. Contact Dermatitis, 2017, 77(5): 349-351.

[8] 何丽红, 杨帆, 谷雨, 等. 非离子型水性环氧树脂乳化剂的制备及其乳液性能的研究[J]. 电镀与涂饰, 2017(14): 32-36.
HE L H, YANG F, GU Y, et al. Preparation of nonionic waterborne epoxy resin emulsifier and study on its emulsion performance [J]. Electroplating and Finishing, 2017(14): 32-36. (in Chinese)

[9] 金永香, 连海兰. 环氧树脂的相反转乳化技术研究进展[J]. 涂料工业, 2018, 48(9): 70-76.
JIN Y X, LIAN H L. Research progress of phase inversion emulsification technology of epoxy resin [J]. Coating Industry, 2018, 48(9): 70-76. (in Chinese)

[10] 杨红光, 杨建军, 吴庆云, 等. 非离子型水性环氧-聚氨酯乳液的制备及性能研究[J]. 涂料工业, 2016, 46(8): 53-57.
YANG H G, YANG J J, WU Q Y, et al. Preparation and performance study of nonionic waterborne epoxy-

- polyurethane emulsion [J]. Coating Industry, 2016, 46(8): 53-57. (in Chinese)
- [11] 龙杰,黄雪立,闫锦. 基于相反转法合成的水性环氧树脂性能研究[J]. 塑料科技, 2020, 48(12): 58-62. LONG J, HUANG X L, YAN J. Study on properties of waterborne epoxy resin synthesized by phase inversion method [J]. Plastic Science and Technology, 2020, 48(12): 58-62. (in Chinese)
- [12] 贺绍辉,闫福安,张志丰. 水性环氧乳液乳化剂合成及其乳液制备[J]. 中国涂料, 2021, 36(2): 25-31. HE S H, YAN F A, ZHANG Z F. Synthesis of waterborne epoxy emulsion emulsifier and its emulsion preparation [J]. China Coatings, 2021, 36(2): 25-31. (in Chinese)
- [13] ZHANG Q, XU Y H, WEN Z G. Influence of waterborne epoxy resin content on performance of waterborne epoxy resin compound SBR modified emulsified asphalt for tack coat [J]. Construction and Building Materials, 2017, 153: 774-782.
- [14] 王佳炜. 水性环氧—乳化沥青结构形成及性能影响因素研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2015: 24-28. WANG J W. Study on structure formation and performance influencing factors of waterborne epoxy emulsified asphalt [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2015: 24-28. (in Chinese)
- [15] 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 Q W, LING T Q, HAO Z H, et al. Characteristic analysis of waterborne epoxy resin emulsified asphalt blends [J]. Journal of Building Materials, 2018, 21(3): 414-419. (in Chinese)
- [16] 李秀君,惠致富,严慧忠,等. 水性环氧树脂改性乳化沥青黏结性能试验分析[J]. 建筑材料学报, 2019, 22(1): 160-166. LI X J, HUI Z F, YAN H Z, et al. Experimental analysis of adhesive performance of emulsified asphalt modified by waterborne epoxy resin [J]. Journal of Building Materials, 2019, 22(1): 160-166. (in Chinese)
- [17] 陈舟宇,刘鲁清,闫兆柏. 水性环氧改性乳化沥青微表处制备及性能研究[J]. 筑路机械与施工机械化, 2020, 37(5): 7-10, 14. CHEN Z Y, LIU L Q, YAN Z B. Micro-surfacing preparation and performance study of waterborne epoxy modified emulsified asphalt [J]. Road Construction Machinery and Construction Mechanization, 2020, 37(5): 7-10, 14. (in Chinese)
- [18] 郭寒,韩森,王兆宇. 水性环氧微表处路用性能研究[J]. 内蒙古公路与运输, 2019(2): 51-55. GUO H, HAN S, WANG Z Y. Study on road performance of waterborne epoxy micro-surfacing [J]. Inner Mongolia Highway and Transportation, 2019(2): 51-55. (in Chinese)
- [19] LIU M M, HAN S, WANG Z Y, et al. Performance evaluation of new waterborne epoxy resin modified emulsified asphalt micro-surfacing [J/OL]. Construction and Building Materials, 2019, 214: 93-100 [2023-06-19]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061819309894?via%3Dihub>.
- [20] 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 J, LIU L H, SUO Z, et al. Micro surface treatment performance of waterborne epoxy resin modified emulsified asphalt [J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2017, 37(5): 23-30. (in Chinese)
- [21] 郑木莲,范贤鹏,刘富强,等. 复配型水性环氧乳化沥青微表处耐久性[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2020, 40(1): 68-76. ZHENG M L, FAN X P, LIU F Q, et al. Micro-surfacing durability of compound waterborne epoxy emulsified asphalt [J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2020, 40(1): 68-76. (in Chinese)

(责任编辑 郑筱梅)