

水性环氧乳化沥青路用性能及其在 微表处中的应用研究

江海,刘大昌

(湖北联投鄂咸投资有限公司,湖北 鄂州 436000)

摘要:为提高微表处路用性能,该文采用水性环氧树脂对乳化沥青进行改性并对改性乳化沥青相容性、微观结构、力学性能、流变性能及其混合料路用性能进行研究。储存稳定性试验表明:环氧乳液与乳化沥青相容性良好;随着水性环氧树脂掺量的增加,改性乳化沥青形成以环氧树脂为骨架结构的趋势;同时,随着水性环氧树脂掺量的增加,乳化沥青与集料黏附性、力学性能得到显著提升,在20%掺量下,黏结强度提高2倍以上,抗剪强度提升1倍以上;流变试验表明:水性环氧树脂能够提高乳化沥青抗车辙性能与弹性恢复率,高温性能得到显著提升。微表处混合料性能研究表明:水性环氧树脂能够显著提升乳化沥青水稳定性、抗车辙变形性能,在掺量达到20%后,混合料水稳定性和抗车辙性能趋于稳定。综上所述,对于该文中改性乳化沥青体系,建议水性环氧树脂掺量为10%~20%。

关键词:水性环氧树脂;乳化沥青;微表处;微观结构;水稳定性

中图分类号:U414

文献标志码:A

0 引言

微表处技术是目前中国公路养护中最为常用的养护技术之一,能够修护原有路面车辙、裂缝、坑槽等病害,施工周期短、工艺简单^[1-3]。在使用初期,微表处容易出现因乳化沥青水稳定性、黏结强度、抗剪强度不足而导致的早期病害,严重影响其长期服役性能。由于微表处厚度较小,混合料中存在较少的集料嵌挤结构,其力学强度主要由乳化沥青提供^[4-5]。因此乳化沥青的各项性能直接影响微表处混合料的耐久性,研究高性能乳化沥青材料成为提高微表处长期服役性能的关键。

水性环氧树脂是以水为分散介质,环氧树脂以液体微粒形式均匀分散其中的环保型材料,能在室温下固化,具有优异的力学性能、耐化学稳定性等优点^[6],将水性环氧树脂应用到沥青路面养护工程正受到广泛关注。王进勇等^[7]以水性环氧树脂为改性剂制备水性环氧乳化沥青冷补混合料,发现水性环氧树脂能够显著提高乳化沥青的黏结强度、高温稳

定性及耐久性;张庆等^[8]、李秀君^[9]等对水性环氧乳化沥青黏附性能进行了研究,发现水性环氧树脂能够显著提高乳化沥青的黏附性,水性环氧树脂的掺量对黏附性有直接影响。水性环氧乳化沥青具有优异的力学性能、高温稳定性等优点,将其应用于微表处也受到了重视。Liu^[10-11]等研究表明,水性环氧树脂能够提高微表处混合料早期路用性能,如黏结强度和抗车辙,同时也提高了微表处的耐久性;季节等^[12]采用正交试验对水性环氧乳化沥青最佳配比进行优选,研究表明其微表处混合料具有显著的抗滑性能。

综合以上研究来看,将水性环氧乳化沥青作为微表处材料的研究尚处于探索阶段,同时,目前研究都只侧重于水性环氧乳化沥青的宏观性能方面。本文从水性环氧乳化沥青微观结构出发研究水性环氧乳化沥青微观结构与宏观性能的关系,最后对水性环氧乳化沥青及其微表处混合料进行研究,为水性环氧乳化沥青在微表处技术中的应用提供一定参考。

收稿日期:2022-08-11(修改稿)

基金资助:交通土建工程材料国家地方联合工程实验室开放基金资助项目(编号:LHSYS-2020-003)

作者简介:江海,男,大学本科,高级工程师.E-mail:jianghai7501@163.com

1 试验

1.1 原材料

乳化沥青采用阳离子乳化剂,沥青原材料采用 SK-90[#]基质沥青,乳化沥青基本性能如表 1 所示。水性环氧乳液采用 BH-644,其性能如表 2 所示,水性固化剂采用 BH-560,配比为 $V(\text{BH-644}):V(\text{BH-560})=1.5:1$ 。微表处混合料中粗集料、细集料为石灰岩碎石,填料为磨细石灰岩矿粉,满足《微表处和稀浆封层技术指南》^[13]要求,级配采用 MS-3,如表 3 所示。

表 1 乳化沥青基本性能

离子 类型	残留物 含量/%	残留物性质		
		针入度 (25℃)/ (0.1 mm)	软化点/ ℃	延度 (15℃)/cm
阳离子(+)	59.6	80.9	46.6	69.3

表 2 环氧乳液基本性能

外观	固含 量/%	环氧当量 (固体份)	黏度(25℃)/ (mPa·s)	相对高度
乳白色流体	50±2	220~280	100~450	1.01~1.08

表 3 MS-3 级配范围

粒径/mm	通过率/%	粒径/mm	通过率/%
9.5	100.0	0.6	28.3
4.75	82.9	0.3	28.1
2.36	60.2	0.15	13.8
1.18	39.5	0.075	10.1

1.2 制备方法

水性环氧乳化沥青分为 A、B 两种组分,A 组分为环氧乳液与乳化沥青,B 组分为水性固化剂,对于 A 组分的制备采用简单机械搅拌的方式,水性环氧乳化沥青胶结料制备方法如下:将水性环氧树脂按照不同配比掺入到乳化沥青中制备得到 A 组分,然后按照水性环氧树脂的比例将 B 组分掺入 A 组分中,经过搅拌最终得到改性乳化沥青胶结料,试验采用环氧乳液与固化剂总掺量为 0、5%、10%、15%、20%、25%。

由于蒸发残留物会破坏水性环氧乳化沥青的两相结构,因此,高温流变试验样品制备如下:将上述 A、B 组分按比例混合均匀,倒入流变试验模具中,

80℃放置 48 h,烘干后进行流变试验。

微表处混合料的制备:将上述水性环氧乳化沥青胶结料拌和均匀备用,将一定质量的矿料掺入拌和锅,并掺入矿粉搅拌均匀,加入一定量的水搅拌均匀,最后掺入水性环氧乳化沥青,拌和 30 s 后出料进行成型试验,标准养生后,通过 1 h 湿轮磨耗试验与黏砂试验确定改性乳化沥青最佳用量为 7.5%。

1.3 性能测试

水性环氧树脂为热固性树脂,随着其固化程度的增加,最终形成以水性环氧树脂为骨架的空间网络结构,三大指标不能对其路用性能进行有效评价。采用储存稳定性试验、荧光显微镜、黏附性试验、流变试验、黏结强度和抗剪强度试验对水性环氧乳化沥青体系进行性能分析,并结合湿轮磨耗试验、车辙变形试验对其微表处混合料路用性能进行验证。

2 改性乳化沥青性能研究

2.1 储存稳定性

水性环氧乳化沥青 A 组分为环氧乳液与乳化沥青的复合体系,为验证 A 组分的储存稳定性,根据试验规程采用储存稳定性试验对 A 组分进行性能分析,不同水性环氧掺量下 A 组分储存 1 d 与 5 d 试验结果如图 1 所示。

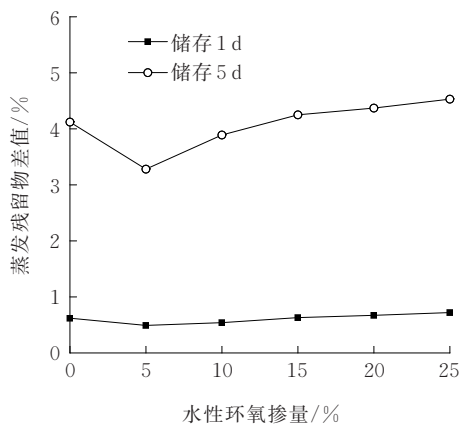


图 1 储存稳定性试验结果

由图 1 可知:在储存时间为 1 d 时,不同环氧乳液掺量下 A 组分的储存稳定性与基质乳化沥青相差不大,均满足规范要求($\leq 1\%$);当储存时间为 5 d 时,在较低环氧乳液掺量下,A 组分的储存稳定性增加,主要因为水性环氧微粒与乳化沥青微粒之间带电特性相同,储存稳定性能得到一定提高;但随着环氧乳

液掺量的提高,蒸发残留物差值升高,稳定性降低,这主要是因为环氧微粒的密度较乳化沥青大,储存时发生一定的聚沉现象,但依然满足规范要求。总的来说,环氧乳液与乳化沥青相容性较好,对乳化沥青储存稳定性影响较小。

2.2 微观结构

水性环氧乳化沥青胶结料的微观结构直接影响其宏观性能,为研究水性环氧树脂在沥青中的分布情况,将A、B组分混合均匀,待水性环氧完全固化后进行荧光显微分析,研究其微观两相结构,试验结果如图2所示。

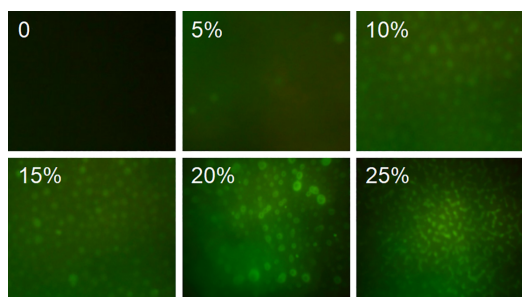


图2 水性环氧乳化沥青微观结构(200倍)

由图2可知:随着水性环氧树脂掺量的提高,水性环氧乳化沥青胶结料逐渐呈现黄绿色荧光。在掺量较小时,水性环氧树脂作为分散相分布在乳化沥青中,此时水性环氧树脂较为离散,不能形成空间网络结构;随着水性环氧树脂掺量的增加,水性环氧树脂分散越来越明显,微粒之间具有相互交联形成空间网络的趋势。

2.3 黏结强度变化规律

乳化沥青的黏结性能直接影响微表处混合料的力学性能、水稳定性及耐磨性能,目前对于乳化沥青黏结性能的研究较少,且尚未形成统一规范。水性环氧乳化沥青的强度会随着固化时间的增加而增大,采用附着力试验仪进行黏结强度试验,为保证基材平整度,选用废旧小梁试件作为基材(图3),试件成型好后放置于30℃烘箱中养生一定时间,研究不同水性环氧树脂掺量、不同养生时间下黏结强度的变化(图4)。

由图4可知:随着养生时间的增加,水性环氧乳化沥青黏结强度逐渐变大,但在养生初期,养生时间小于4h时,黏结强度增长缓慢,主要是因为乳化沥青强度的形成与水分挥发有关,养生初期水分较多



图3 拉拔试件

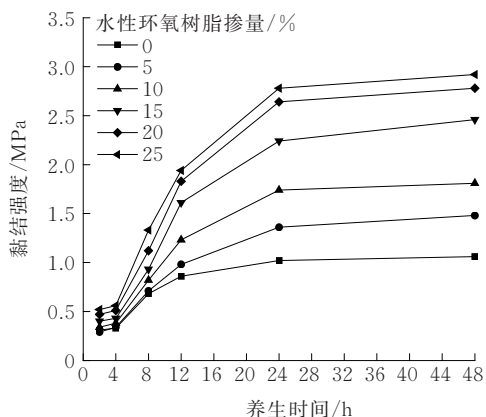


图4 拉拔试验结果

且水分挥发较慢,此时水性环氧乳化沥青黏结强度主要由乳化沥青提供。随着养生时间的增加,水性环氧树脂开始固化并且对体系强度的贡献越来越大,此时,体系的强度增长迅速。当养生时间达到一定阶段后,水性环氧树脂逐渐固化完全,体系强度增长缓慢,如在24~48h,体系黏结强度基本保持不变。在相同养生时间下,水性环氧树脂掺量越大,体系黏结强度也越大;在掺量为20%后,体系的最终黏结强度增长不大,在掺量20%时能够提高乳化沥青黏结强度2倍以上。

2.4 剪切强度

乳化沥青微表处结构较薄,在行车荷载作用下会产生较大的剪应力,抗剪性能不足极易发生拥包、开裂等病害,微表处混合料抗剪强度主要由乳化沥青性能决定。试验成型AC-13车辙板-水性环氧乳化沥青-AC-13车辙板复合结构试件,水性环氧乳化沥青涂抹量为 1.2 kg/m^2 ,经30℃、48h养生后切割为 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 立方体结构,进行斜剪试验,剪切强度计算如式(1)所示,试验结果见图5。

$$\tau = \frac{F}{A} \sin \alpha \quad (1)$$

式中: τ 为抗剪强度(MPa); F 为抗剪压力(N); α 为剪切角,取 40° ;A为剪切面积(mm^2)。

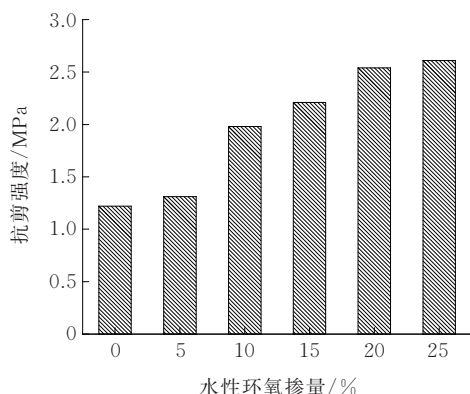


图5 剪切强度试验结果

由图5可知:随着水性环氧树脂掺量的增加,其改性乳化沥青抗剪强度逐渐增加,在水性环氧树脂掺量小于5%时抗剪强度变化不大,这主要是因为水性环氧树脂掺量较少,不能形成骨架结构,对体系强度贡献较少;当掺量达到10%以后,抗剪强度明显增强,表明水性环氧树脂能够在体系中形成交联结构,抗剪切破坏性能增强。在水性环氧树脂掺量为20%时,抗剪强度达到2.5 MPa以上,能够提升乳化沥青抗剪强度1倍以上。

2.5 黏附性

水损害是乳化沥青微表处主要破坏形式之一,影响水损害的主要因素是乳化沥青与集料的黏附特性。试验采用水煮法对不同掺量下水性环氧乳化沥青黏附性进行评价,试验结果如图6所示。

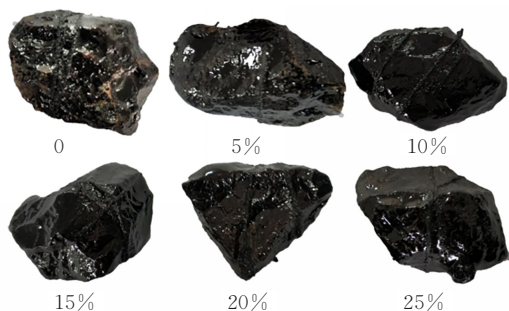


图6 不同水性环氧树脂掺量的黏附性试验结果

由图6可知:随着水性环氧树脂掺量的增加,经水煮后集料表面的沥青剥落程度越来越小,改性乳化沥青与集料的黏附性逐渐提高。在水性环氧树脂掺量为0时,集料表面有较多的剥落,这是因为水煮温度较高,达到了基质沥青的软化点,沥青趋于流动态,容易从集料脱落;水性环氧树脂掺量为10%以后,基本无剥落现象,这是因为水性环氧树脂与集料

的黏结能力较沥青强,同时水性环氧树脂固化后形成了骨架结构,束缚了沥青的流动,最终使得改性乳化沥青体系与集料的黏附性增强。

2.6 高温稳定性

乳化沥青的高温稳定性也是影响其路用性能的主要因素,高温性能不足则会导致车辙病害,影响微表处的使用寿命。采用DHR-2动态剪切流变仪对水性环氧树脂不同温度下的高温流变性能进行测试,应变范围采用1%,扫描频率为10 rad/s,以车辙因子评价其高温性能,结果如图7所示。

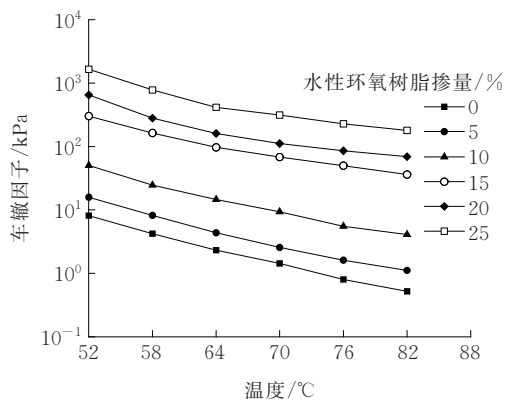


图7 车辙因子与温度关系曲线

由图7可知:随着温度的升高,车辙因子均呈现下降趋势,这是因为体系中含有较多的依然是沥青,其在高温条件下主要表现出黏性材料特征,导致抗变形能力下降。从变化趋势来看,6种乳化沥青体系的车辙因子与温度之间近似呈现对数直线关系,并且随着水性环氧树脂掺量的增加,乳化沥青车辙因子呈指数增长,其中在掺量较少时增长速度较慢,掺量超过10%以后增长逐渐加快,这主要是因为水性环氧树脂形成了骨架结构阻碍了形变的产生,其中水性环氧树脂掺量越大这种阻碍作用就越大。

2.7 高温弹性恢复性能

采用多重应力蠕变仪(MSCR)对不同掺量下水性环氧乳化沥青体系的高温弹性恢复性能进行研究,试验温度为64℃,应力水平选择3.2 kPa,按照加载1 s,卸载10 s方式重复10次,1次试验结果如图8所示,最终试验结果如图9所示。

在1次蠕变与恢复过程中,水性环氧树脂掺量为0时,相同剪切应力下乳化沥青产生应变响应越大,同时在恢复过程中应变基本无变化,这是因为试验温度超过了基质沥青的软化点,弹性特征逐渐消失,主要表现出黏性材料的特征。随着水性环氧树脂掺

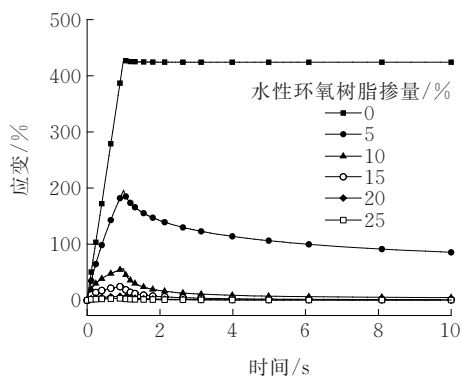


图8 蠕变与恢复曲线

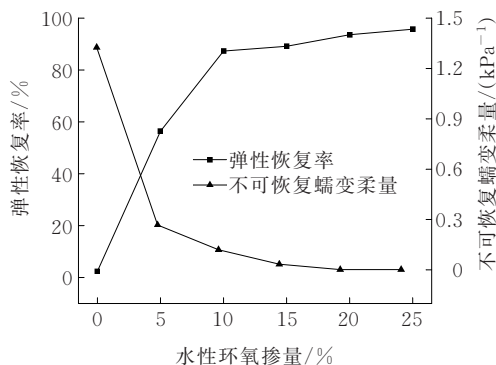


图9 MSCR试验结果

量的增加,改性乳化沥青弹性恢复增强。从图9可以看出:随着水性环氧树脂掺量的增加,改性乳化沥青弹性恢复率迅速增加,在掺量为10%时弹性恢复率超过了85%,掺量达到10%后弹性恢复率增长速度逐渐变缓,并达到稳定。不可恢复蠕变柔量也表现出相同的变化规律,在水性环氧树脂低掺量时下降幅度较大,同时在掺量为10%以后基本达到稳定状态。上述结果表明,水性环氧树脂的掺入能够大大提高乳化沥青的高温弹性恢复能力。

3 微表处混合料性能研究

3.1 水稳定性

水性环氧乳化沥青微表处混合料强度主要受到水分蒸发速率的影响,一方面在混合料成型早期水分蒸发速率较慢,主要靠乳化沥青作为主要胶结剂,可拌和时间受乳化沥青破乳速度影响较大,在水分逐渐蒸发后水性环氧逐渐从表面开始固化,混合料强度进一步提高;另一方面,混合料强度变化速率与水性环氧乳化沥青胶结剂黏结强度变化速率趋势一致。因此,本文采用标准养生方式对水性环氧乳化

沥青微表处混合料进行养生,并对其性能进行研究。

传统的微表处混合料水稳定性试验评价方法为浸水6 d后进行湿轮磨耗试验,虽然能够定量地评价水稳定性,但不能描述微表处混合料抗剥落性能变化趋势。因此本文对不同浸水时间微表处混合料进行湿轮磨耗试验,研究不同浸水时间水稳定性变化趋势,结果如图10所示。

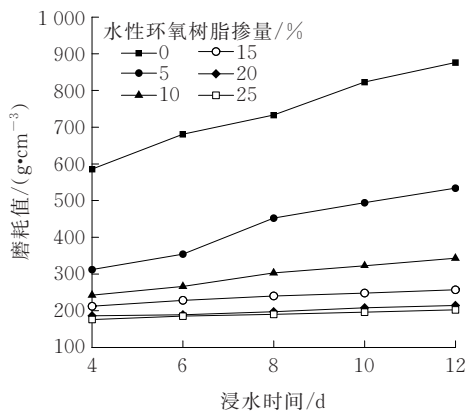


图10 水稳定性试验结果

由图10可知:相同浸水条件下,水性环氧树脂掺量越大,磨耗值越小,抗剥落性能越好,这也证明了水性环氧树脂能够提高微表处混合料抗水损性能,与黏附性试验结果一致。在水性环氧树脂低掺量时,如低于5%,磨耗值会随着浸水天数增加而迅速增加,这主要是因为水性环氧树脂并未形成结构强度,对荷载作用下抗剥落性能的阻碍作用较小。当水性环氧树脂掺量超过10%以后,磨耗值随浸水时间变化较小,甚至基本保持不变,如掺量为20%和25%时,变化趋势趋于直线并且接近于重合,表明水性环氧树脂掺量20%以后水稳定性基本保持不变,这主要因为在掺量20%后水性环氧树脂在乳化沥青中形成了空间网络结构并提供足够的结构强度,能够阻碍荷载和水共同作用对微表处混合料的磨耗。

3.2 抗车辙变形性能

微表处铺设厚度较薄,一般不作为结构层使用,但在行车荷载作用时受到各项应力较大,抗车辙变形性能不足则会直接影响微表处混合料路面长期服役性能。采用负荷轮载试验仪对微表处混合料抗车辙变形性能进行评价,车辙宽度变化率如图11所示。

由图11可知:水性环氧树脂能够大大降低微表处混合料的车辙宽度变化率,水性环氧树脂掺量为0~15%时下降速度最快,在这一掺量区间,水性环

氧树脂在乳化沥青中逐渐形成空间骨架结构,抗变形性能逐渐增强。掺量超过 20% 以后,宽度变化率变化趋势趋于稳定,主要是因为在该区间,水性环氧树脂的骨架结构在乳化沥青中基本形成,具有优异的抗变形性能,这与水性环氧乳化沥青流变试验结果一致,表明水性环氧树脂能够大大提高乳化沥青及其混合料抗变形性能。

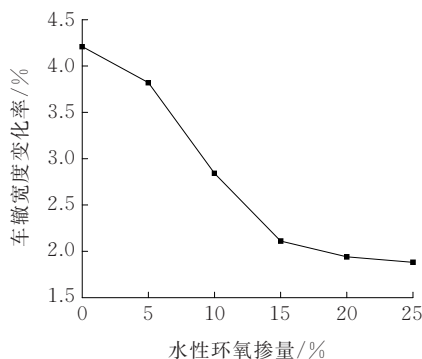


图 11 微表处混合料抗车辙试验结果

4 结论

采用水性环氧树脂对乳化沥青进行改性,对其储存稳定性、力学性能、微观结构、流变性能进行分析,同时对其微表处混合料进行研究,得到如下结论:

(1) 水性环氧树脂与乳化沥青相容性良好,随着水性环氧树脂掺量的增加,环氧树脂在乳化沥青中的分散越来越明显,具有形成以环氧树脂为骨架结构的趋势。

(2) 力学性能试验表明:在养生时间低于 4 h 时,改性乳化沥青强度增长缓慢,4 h 后增长较快,在掺量超过 20% 后改性乳化沥青黏结强度能够提升 2 倍以上,抗剪强度提高 1 倍以上;同时,水性环氧树脂能够提高乳化沥青与集料的黏附性。

(3) 流变试验表明:掺入水性环氧树脂后,乳化沥青车辙因子呈指数增长、高温弹性恢复性能迅速增强、不可恢复蠕变柔量降低,掺量超过 10% 弹性恢复性能达到 85% 以上,高温稳定性能明显增强。

(4) 随着水性环氧树脂掺量的增加,湿轮磨耗值迅速降低,水稳定性能显著提高,当掺量超过 20% 后

水稳定性基本保持不变;同时水性环氧树脂也能够显著提高乳化沥青抗车辙变形性能。对于本文中水性环氧乳化沥青体系,推荐水性环氧树脂掺量为 10%~20%。

参考文献:

- [1] 罗正斌. 沥青用 SBS 胶乳的制备及其在微表处中的应用[D]. 西安:长安大学, 2019.
- [2] WANG A, SHEN S, LI X, et al. Micro-surfacing mixtures with reclaimed asphalt pavement: Mix design and performance evaluation[J]. Construction and Building Materials, 2019, 201:303-313.
- [3] 王燕婷, 董元帅, 侯芸, 等. SBS 改性乳化沥青最佳乳化因素及性能研究[J]. 中外公路, 2018, 38(6):248-252.
- [4] 邓玉训, 谢群. 水性环氧乳化沥青碎石封层性能研究[J]. 中外公路, 2019, 39(3):260-264.
- [5] 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.
- [6] 张玥, 陈利麟, 李媛媛, 等. 水性环氧树脂涂料固化机理的研究[J]. 涂料工业, 2020, 50(1):42-46.
- [7] 王进勇, 陈飞, 程谓, 等. 水性环氧-乳化沥青及其混合料性能研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2020, 39(1):85-91.
- [8] 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.
- [9] 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):164-170.
- [10] LIU M, HAN S, WANG Z, et al. Performance evaluation of new waterborne epoxy resin modified emulsified asphalt micro-surfacing[J]. Construction and Building Materials, 2019, 214:93-100.
- [11] LIU M, HAN S, PAN J, et al. Study on cohesion performance of waterborne epoxy resin emulsified asphalt as interlayer materials[J]. Construction and Building Materials, 2018, 177:72-82.
- [12] 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.
- [13] 交通部公路科学研究院. 微表处和稀浆封层技术指南[M]. 北京:人民交通出版社, 2006.