

高渗高黏环氧乳化沥青雾封层调配及性能研究

王 伟¹, 刘 杰², 胡其豪¹

(1. 中大智能科技股份有限公司, 湖南 长沙 410208; 2. 武汉市市政工程设计研究院有限责任公司, 湖北 武汉 430023)

摘 要: 研究了乳化沥青、水性环氧树脂、固化剂等材料掺量对环氧乳化沥青渗透性、黏结强度、水稳定性和抗老化性能的影响, 调配出一种高渗高黏的雾封层材料, 并从微观角度揭示了环氧乳化沥青强度形成机理。结果表明, 各组成材料中乳化沥青是黏结强度、水稳定性和抗老化性能的主要影响因素, 水性环氧树脂与固化剂的掺配比例是黏结强度的次要影响因素, 固化剂是渗透性的主要影响因素; 综合性能最佳情况下, 调配出的高渗高黏雾封层材料中乳化沥青占比 80%、环氧树脂占比 20% (水性环氧树脂: 固化剂=2:1); 微观角度发现, 调配好的环氧乳化沥青具有三维网状结构、表面疏水、接触角较大等特性; 对比于传统雾封层材料, 其初始热失重温度显著高于老化温度, 这表明环氧树脂材料的加入可不同程度提升雾封层渗透性、黏结强度、耐老化等性能。

关键词: 高渗高黏; 乳化沥青; 水性环氧树脂; 固化剂; 雾封层; 性能研究

中图分类号: U414

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)10-0255-06

Study on Preparation and Performance of High-Permeability and High-Viscosity Epoxy Emulsified Asphalt Fog Seal

WANG Wei¹, LIU Jie², HU Qihao¹

(1. Zhongda Intelligent Technology Co., Ltd., Changsha 410208, China; 2. Wuhan Municipal Engineering Design and Research Institute Co., Ltd., Wuhan 430023, China)

Abstract: The influence of the contents of emulsified asphalt, waterborne epoxy resin, curing agent and other materials on the permeability, bonding strength, water stability and anti-aging performance of epoxy emulsified asphalt is studied. A high-permeability and high-viscosity fog seal material is prepared, and the strength formation mechanism of epoxy emulsified asphalt is revealed from a microscopic perspective. The results show that the emulsified asphalt among the constituent materials is the main influencing factor on the bond strength, water stability and anti-aging performance. The blending ratio of water-based epoxy resin to curing agent is a secondary influencing factor on bonding strength. And the curing agent is the main influencing factor on the permeability. Under the optimal comprehensive performance, 80% emulsified asphalt and 20% epoxy resin (water-based epoxy resin: curing agent = 2:1) are used in the prepared high-permeability and high-viscosity fog seal material. From a microscopic perspective, it is found that the prepared epoxy emulsified asphalt has the characteristics such as a three-dimensional network structure, surface hydrophobicity, and a large contact angle. Compared with traditional fog seal materials, its initial thermal weight loss temperature is significantly higher than the aging temperature, which indicates that the addition of epoxy resin material can improve the permeability, bonding strength, aging resistance and other properties of the fog seal to varying degrees.

Keywords: high-permeability and high-viscosity; emulsified asphalt; water-based epoxy resin; curing agent; fog seal; performance study

0 引 言

雾封层是一种经济、环保、施工方便、快速恢复交通的预防性养护技术, 使老化沥青得以再生, 同时封闭路面微裂缝、改善外观、延长使用寿命等^[1-2]。

雾封层材料通常由高渗高黏的专用沥青组成, 必须具有良好的耐磨和防水性能^[3]。常用的雾封层材料有乳化沥青和 SBS 聚合物改性乳化沥青, 但紫外光作用下老化快、渗透性差、水稳定性及导水性差等问题仍然存在, 因此探索新型的雾封层材料具有重要意义^[4]。

水性环氧树脂作为一种新型的黏结材料, 具有较强的黏结能力和良好的渗透性, 可作为乳化沥青

收稿日期: 2025-02-28

作者简介: 王伟(1991—), 男, 本科, 工程师, 从事路桥检测工作。

改性剂,提高集料之间的黏结力^[5]。周启伟采用荧光显微镜和红外光谱等微观检测手段发现乳化沥青:环氧树脂=5:3时可形成环氧树脂为连续相及乳化沥青为分散相的相结构逆转,这时共混物储能模量、损耗模量和玻璃化转变温度与环氧树脂比例成正比相关^[6];郑木莲指出水性环氧树脂达到一定掺量时沥青高温性能显著提升,但低温韧性也有较大程度减弱,与其他合适的增韧类改性剂配合可以起到高低温平衡的作用^[7];王清州拟将水性环氧用于桥面铺装黏结层,测试结果表明不同掺量水性环氧黏结层的拉拔和剪切强度在0℃达到峰值,温度继续降低则力学性能快速衰减,掺量低于15%时力学性能对温度较敏感^[8];陆由付选用水性环氧改性乳化沥青原材料技术指标及试验温度作为输入因子、黏结拉拔强度作为输出因子,建立了GA-ELM黏结性能预测模型,对比于传统单隐层神经网络算法,误差降低80%左右^[9];惠冰指出水性环氧乳化沥青储存稳定性、离心稳定性不具有统一规律,BE-2型乳化沥青与阳离子固化剂复配后基本无固化剂残余,固化反应迅速,可在短时间内充分形成三维交联网状结构^[10]。

本研究通过改进的试验方法,研究了材料组分对水性环氧乳化沥青渗透性、黏结剪切强度、水稳定性和抗老化性能的影响,总结出一套雾封层专用配比,从微观角度揭示了强度的形成机理,并与传统雾封层材料进行了比对,验证了水性环氧乳化沥青雾封层材料的优异性能^[11]。

1 原材料及试样制备

1.1 原材料

原材料中乳化沥青为自制阳离子慢裂快凝型乳化沥青,满足规范及使用要求。固化剂为国产固化剂,其与水性环氧树脂乳液配伍性良好。

水性环氧树脂乳液采用反相法制备,并以稳定性为主要评价指标,成品水性环氧树脂乳液的亲水-亲油平衡指标(HLB)为14.3,表现出良好的离心稳定性。

在对比雾封层性能时,为模拟实际路面上面层,一般使用AC-13沥青混凝土试件,而黏结剪切强度试验时增加SMA-13沥青混凝土和C40水泥混凝土试件。AC-13和SMA-13选用级配范围中值,最佳油石比分别为4.8%和5.0%。

1.2 试样制备

相关研究表明,当沥青含量超过50%时,混合材

料偏向于沥青性质,材料抗拉伸性能显著提高,因此制备环氧树脂乳化沥青时沥青含量不应低于50%^[12]。本研究设定5种乳化沥青掺量(50%、60%、70%、80%、90%)和3种水性环氧树脂乳液与固化剂比例(2:1、3:1、4:1),共制备15种雾封层材料用于对比研究,采用符号A表征水性环氧树脂乳化沥青,如A₅₀(2)表示乳化沥青为50%、水性环氧树脂乳液:固化剂=2:1的水性环氧乳化沥青。

2 试验方法

本研究主要包括渗透试验、黏结剪切强度试验、水稳定性试验、老化试验等,其中渗透试验和黏结剪切强度试验为新开发试验方法。

2.1 渗透试验

在定量渗透试验中,乳化沥青实际渗透深度的确定受到渗透界面不均匀和“气阻”现象等影响,因此本文提出了一种改进的渗透率测试方法^[13],区别于传统渗透试验其增加了进液漏斗和底部透气筛网,可较好的保持渗透界面均匀和通畅排气,改进的渗透试验装置如图1所示。

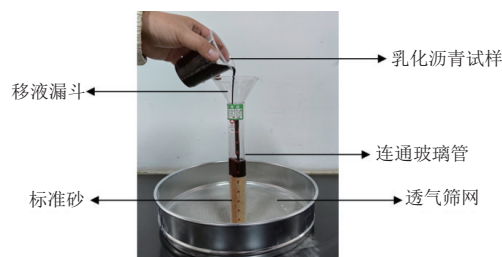


图1 改进的渗透试验装置

试验过程如下:(1)制备6g待测水性环氧树脂乳化沥青和60g标准砂;(2)将标准砂围绕漏斗旋转,确保玻璃管中标准砂密度均匀,准确记录充砂时间;(3)将待测样品倒入玻璃管中,测量样品全部流在标准砂表面上所需时间和完全渗透到标准砂里面所需时间,如样品在1min内未继续渗透,则将该时间作为渗透时间 t ;(4)渗透完成后,提起玻璃管并称量残留在筛网上标准砂质量;(5)基于式(1)计算待测样品的渗透速度 V ,并评估其渗透性。

$$V = \frac{60 - m}{A \rho t} \quad (1)$$

式中: V 为渗透速度; m 为筛上剩余标准砂质量; A 为玻璃管有效截面面积, $A=4.91 \text{ cm}^2$; t 为样品渗透时间; ρ 为标准砂松散密度, $\rho=1.33 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。

2.2 黏结剪切强度试验

本研究开发了一种路面层间材料剪切强度测试

方法,采用两个圆柱形试件(高 50 mm、直径 100 mm),用 0.5 kg·m⁻² 雾封层材料将两个试件黏附在一起,并在 20 ℃条件下养生固化 7 d,对上部和下部试件分别施加竖向和水平荷载,竖向荷载 0.7 MPa,水平向加载速率为 10 mm/min,上下试件沿直径方向错开 10 mm 时记录试件破坏剪切力,根据式(2)计算黏结剪切强度,图 2 所示为黏结剪切强度试验示意图。

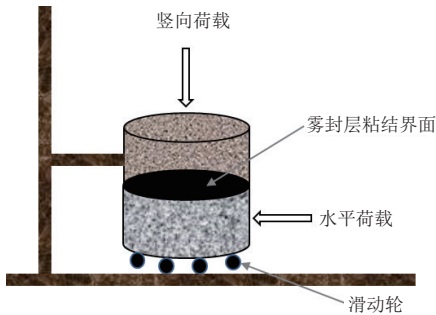


图 2 黏结剪切强度试验示意图

$$\tau=\frac{F}{S} \tag{2}$$

式中:τ 为黏结剪切强度;F 为破坏荷载;S 为试件截面面积,S=78.5 cm²;t 为待测样品在标准砂中的渗透时间。

3 试验结果分析

3.1 雾封层材料配比确定

3.1.1 渗透速度

渗透性试验表明,固化剂几乎不渗透标准砂,水性环氧乳液和乳化沥青渗透性良好,渗透速度均为水的 0.18 倍,即判定影响渗透性的决定性因素为固化剂。接着对不同掺量固化剂的水性环氧乳化沥青进行渗透性试验,结果如图 3 所示。

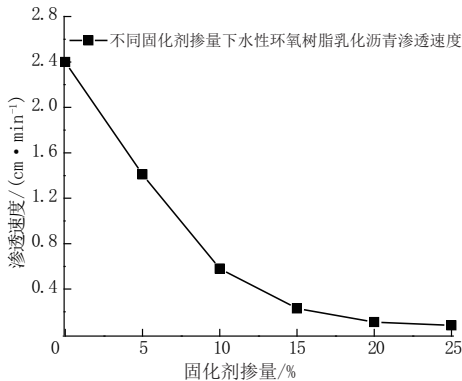


图 3 不同固化剂掺量下渗透速度试验结果

由图 3 可知,水性环氧树脂乳化沥青的渗透速度随固化剂掺量的增加呈明显反比关系。当固化剂掺量为 0%~10% 时,渗透性急剧下降,当掺量大于 10% 时,渗透速度下降率降低,超过 20% 时渗透速度基本

不再变化。已有研究表明,当固化剂含量达到约 10% 时,使固化材料形成较低交联密度,进一步阻碍理想交联网络形成,从而影响渗透性,即固化剂掺量不应超过 10%。

3.1.2 黏结剪切强度

按 2.2 节试验方法对 15 种水性环氧乳化沥青进行黏结剪切强度试验,试验结果如图 4 所示。

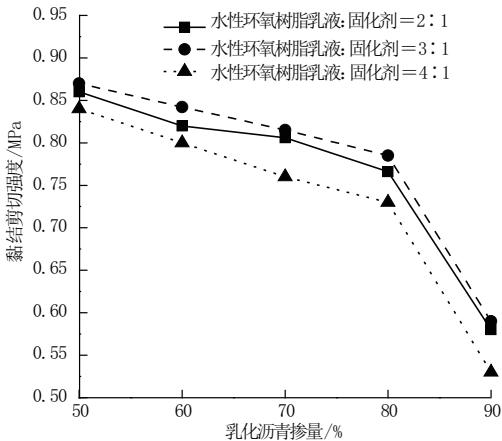


图 4 不同乳化沥青掺量下雾封层黏结剪切强度试验结果

由图 4 可知,水性环氧乳液:固化剂=3:1 时黏结剪切强度最大,这表明固化剂掺量与黏结剪切强度密切相关,且存在最佳的固化剂掺量。

由变化趋势可知,黏结剪切强度随乳化沥青掺量增加而降低。当乳化沥青掺量大于 80% 时,黏结剪切强度快速下降,这是由于乳化沥青较少时,未形成有效厚度的沥青膜,这时黏结剪切强度随乳化沥青用量增加而增大;当乳化沥青过量时,会在层与层之间形成滑动面,抵抗黏结剪切能力降低,因此乳化沥青掺量不应超过 80%。

3.1.3 抗水损性能

图 5 和图 6 所示为冻融劈裂试验结果,其中 MS₀ 为浸水残留稳定度,TSR 为冻融劈裂强度比。不同组分掺量雾封层材料的 MS₀ 和 TSR 相比于对照样品均有所提高,当乳化沥青掺量为 80% 时,指标提高程度最大,这时 A₈₀(2)、A₈₀(3)、A₈₀(4) 相比于对照样品 MS₀ 分别增加 10.7%、8.5%、7.3%,TSR 分别增加 15.6%、14.2%、12.8%,这是由于随乳化沥青掺量增加,混合料中游离沥青逐渐增加,填充了试件表面部分空隙,在一定程度上提升了混合料的渗透性和黏结剪切性能。

3.1.4 耐老化性能

图 7 所示为光热老化试验结果,采用质量损失率 M 表征耐老化性能。M 越低,则表明水性环氧树脂

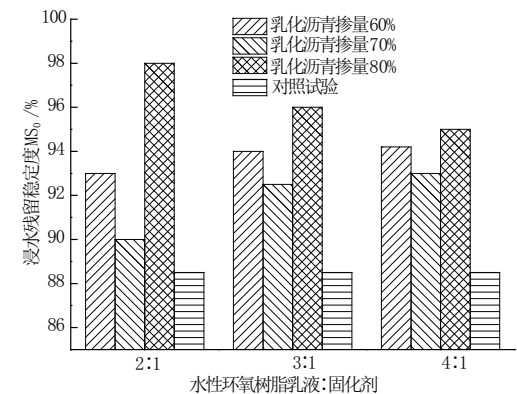


图5 不同雾封层材料浸水残留稳定度 MS_0 试验结果

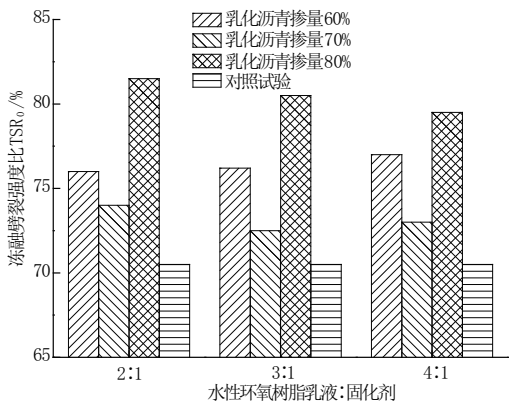


图6 不同雾封层材料冻融劈裂强度比 TSR 试验结果

乳化沥青的耐老化性越好。

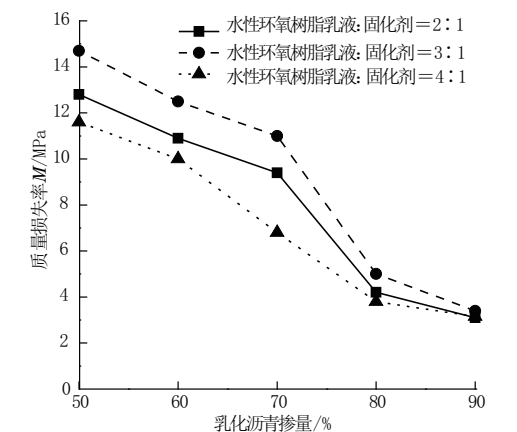


图7 不同雾封层材料质量损失率 M 试验结果

由图7变化趋势可知,随乳化沥青掺量的增加,光热老化后 M 逐渐降低,当乳化沥青掺量 $\geq 80\%$ 时, M 趋于稳定,三种水性环氧与固化剂比例下 M 基本一致。在一定乳化沥青掺量条件下,质量损失率 $A(3:1) > A(2:1) > A(4:1)$ 。综合分析,固化剂掺量对耐老化性能影响不大,因此乳化沥青掺量不应低于80%。

以上结论可知,不同组分的水性环氧树脂乳化沥青差异较大,推荐乳化沥青掺量为80%,水性环氧乳液:固化剂=2:1,即在后续性能评估中采用 $A_{80}(2)$

进行研究。

3.2 水性环氧乳化沥青雾封层材料性能评价

本研究在进行水性环氧树脂乳化沥青雾封层材料性能评价时,与普通乳化沥青(B)、SBS改性乳化沥青(C)、雾封层常用基质沥青(D)等材料进行对比。

3.2.1 渗透性评价

图8为不同性质雾封层材料渗透性试验结果。从图中可看出 $A_{80}(2)$ 的渗透速度为1.31 cm/min,分别是B、C、D等常用雾封层的0.56、7.23、3.97倍,这表明 $A_{80}(2)$ 水性环氧树脂乳化沥青的渗透性略低于普通乳化沥青,但仍表现出较突出优势。

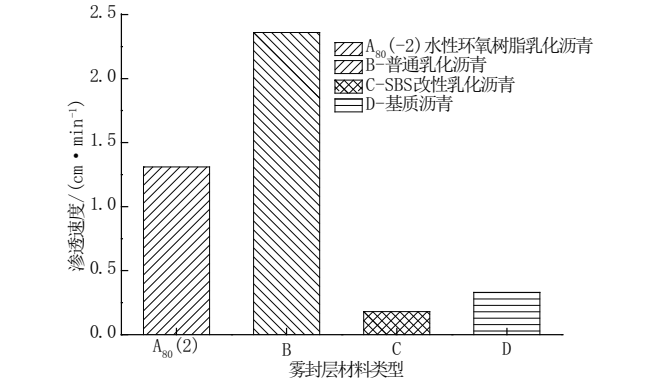


图8 不同性质雾封层材料渗透速度试验结果

在此基础上,对渗水系数进行统计,结果见表1。从表1可知,随着洒布量增加,不同性质雾封胶材料渗水系数不断减小,直至为零。对于 $A_{80}(2)$ 、C、D,洒布量为0.6 kg/m²时试件表现为完全不透水;对于B,洒布量为0.8 kg/m²时试件表现为完全不透水,这与雾封层材料的接触角和疏水性有关,通常接触角越大,疏水性和渗透性更强。

渗水系数/ (mL · min ⁻¹)	洒布量/(kg · m ⁻²)					
	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
1	97	29	11	0	0	0
6	97	43	20	14	0	0
7	97	33	15	0	0	0
8	97	30.5	12	0	0	0

3.2.2 黏结剪切强度评价

为对比雾封层材料在不同路面结构上的使用效果,在AC-13、SMA-13、水泥混凝土等三种常见路面混合料类型试件上进行黏结剪切强度试验,试验结果如图9所示。

由图9可知,AC-13和SMA-13试件的黏结抗剪强度相比于水泥混凝土试件相对较高,且不同性质雾封层材料表现较为一致。与B、C、D等材料相比,

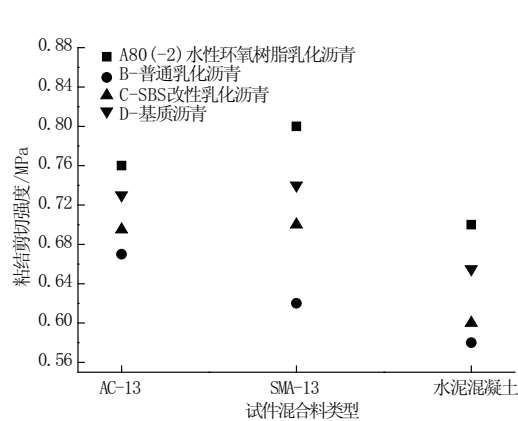


图9 不同性质雾封层材料黏结剪切强度试验结果

采用AC-13试件时A₈₀(2)黏结剪切强度最多提高13.4%,采用SMA-13试件时最多提高29.0%,采用水泥混凝土试件时最多提高20.7%,这是由于水性环氧树脂乳化沥青黏结剪切破坏时表面较粗糙且表现出较高的断裂韧性,同时表面具有网状骨架结构,有效提高了A₈₀(2)自身强度和耐磨性。

3.2.3 抗水损性能评价

图10为不同性质雾封层材料抗水损性能MS₀和TSR试验结果,整体上A₈₀(2)的MS₀和TSR最高,相比于B、C、D等材料,MS₀最大增加4.8%,TSR最大增加5.8%,表明A₈₀(2)表现出优异的渗透性和内聚力,能更好渗入路表空隙并与混合料黏结牢固。

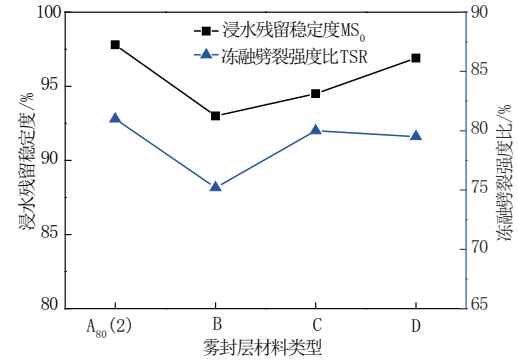


图10 不同性质雾封层材料抗水损性能试验结果

3.2.4 耐老化性能评价

图11所示为不同性质雾封层材料光热老化质量损失率M试验结果。与B、C、D等材料相比,A₈₀(2)在光热老化后质量损失率最低,抗光热老化性能最好。

3.3 机理分析

3.3.1 微观结构机理分析

图12所示为水性环氧乳化沥青电镜扫描表面微观结构。从图中可以观察到其黏结断裂面较粗糙,表明具有较好断裂韧性。沥青稀释剂石油醚对断裂

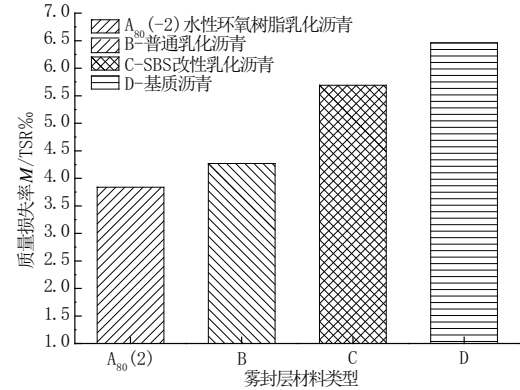


图11 不同性质雾封层材料光热老化试验结果

面进行处理后,环氧树脂网状结构逐渐显现,即环氧体系在乳化沥青中形成连续三维网状结构,促使水性环氧乳化沥青形成良好结构和力学性能,可有效提高材料黏结强度和耐磨性。

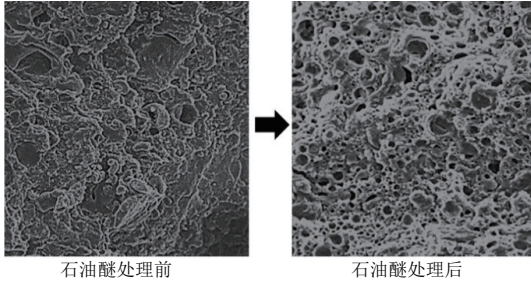


图12 石油醚处理前后水性环氧树脂乳化沥青的微观状态

3.3.2 渗透性机理分析

经测量水性环氧树脂乳化沥青和普通乳化沥青的残留物接触角分别为114.4°和97°,均具有疏水性表面,但对比来看前者的疏水性更好,作为雾封层材料渗透性更强。

3.3.3 热稳定性机理分析

图13为热重分析试验结果,两种材料表现出相同的热重损失趋势,在一定温度范围内出现质量损失基本保持不变的曲线平台。基质沥青初始热失重温度和全部分解温度相比于水性环氧树脂乳化沥青残留物分别高110℃和50℃。尽管后者的初始热失重温度较低,但仍高于环境老化温度。环氧树脂体系提升了材料温度分解范围,并减缓了沥青氧化分解速度,因此水性环氧树脂乳化沥青用作雾密封材料时热稳定性和耐老化性能更好。

4 结论

(1)本研究提出一种具有高渗透性和黏结性能的水性环氧树脂乳化沥青雾封层材料,对比得到80%乳化沥青和环氧树脂乳液:固化剂=2:1为最佳的调配比例。

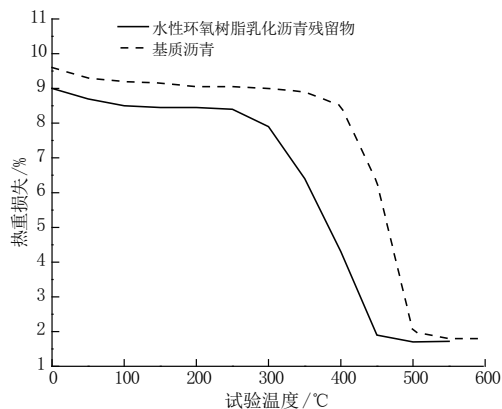


图13 热重分析试验结果

(2)进一步通过一系列试验验证了水性环氧树脂乳化沥青雾封层材料技术性能优越,与国内常用雾封层材料相比,推荐配方的水性环氧树脂乳化沥青雾封层渗透速度、黏结剪切强度和冻融劈裂强度比分别最大提升628%、29%、5.8%,质量损失率最大降低41%。

(3)水性环氧树脂乳化沥青中的环氧体系可以形成连续三维网状结构,从而提高材料的力学强度和耐磨性能,114.4°的接触角使其表现出良好疏水性和渗透性,初始热失重温度显著高于环境老化温度,表现出优异的热稳定性。

参考文献:

- [1] LI R, LENG Z, PARTL-MANFRED N, *et al.* Characterization and modelling of creep and recovery behaviour of waterborne epoxy resin

modified bitumen emulsion[J]. *Materials and Structures*, 2021, 54(1): 0-8.

- [2] ZHANG Z Q, WANG S Q, LU G D. Properties of new cold patch asphalt liquid and mixture modified with waterborne epoxy resin[J]. *International Journal of Pavement Engineering*, 2020, 21(13): 1606-1616.
- [3] 傅豪,王朝辉,刘鲁清,等.路用水性环氧改性乳化沥青组成优化及耐久性能评价[J]. *材料导报*, 2023, 37(18): 1-9.
- [4] WANG P P, TIAN X G, ZHANG R, *et al.* Effect of waterborne epoxy resin on properties of modified emulsified asphalt and its microstructure [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2021, 33(8): 4021177.
- [5] HU C C, ZHAO J Y, LENG Z, *et al.* Laboratory evaluation of waterborne epoxy bitumen emulsion for pavement preventative maintenance application[J]. *Construction and Building Materials*, 2019(197): 220-227.
- [6] 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.
- [7] 郑木莲,范贤鹏,李红印,等.道路用水性环氧乳化沥青的研究进展[J]. *中国科技论文*, 2019, 14(8): 821-829.
- [8] 王清洲,马小江,徐大伟,等.水性环氧改性乳化沥青桥面粘层性能研究[J]. *热固性树脂*, 2020, 35(1): 59-63.
- [9] 陆由付,樊振通,韩冰,等.基于GA-ELM的水性环氧乳化沥青黏结性能预测[J]. *中外公路*, 2021, 41(4): 336-340.
- [10] 惠冰,李扬,张炎棣,等.水性环氧乳化沥青相容性研究及固化机理分析[J]. *化工新型材料*, 2022, 50(10): 281-285.
- [11] 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.
- [12] 闵召辉,张占军,黄卫.不同沥青体分比环氧树脂沥青混合料的断裂性能[J]. *中国公路学报*, 2011, 24(3): 22-28.
- [13] 孟定宇.低冰点雾封层材料设计及性能评价[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2016.

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

官方网址: <http://www.csdqyfh.com> 电话: 021-55008850 联系邮箱: roadbridgeflood@163.com

