DOI:10.14048/j.issn.1671－2579.2019.03.054

水性环氧乳化沥青碎石封层性能研究

邓玉训[1]，谢群[2]

（1.九江市公路管理局，江西 九江 332000；2.江西省赣北公路勘察设计院）

摘要：针对传统乳化沥青、改性乳化沥青碎石封层黏结性差、集料易松散、抗滑性能差等缺点，研发了一种新型的基于水性环氧乳化沥青的碎石封层材料。通过室内试验，对比、分析不同水性环氧掺量下的水性环氧乳化沥青蒸馏后三大指标、黏度、拉拔和剪切强度；采用正交试验对水性环氧－乳化沥青碎石封层进行参数设计，并对其耐磨性能、抗滑性能进行测试。试验结果表明：水性环氧的加入能够极大地改善乳化沥青的热稳定性、塑性、黏度以及黏结强度；与传统的乳化沥青型碎石封层相比，水性环氧－乳化沥青碎石封层的磨耗值较低、构造深度及摩擦系数较大，具有良好的耐磨性和抗滑性。

关键词：路面预养护；乳化沥青；水性环氧；碎石封层

1 引言

碎石封层作为路面预防性养护和路面功能恢复常用的养护技术手段之一，具有简单、经济、快速、高效等优势，主要应用于新建路面的磨耗层和下封层、新建路面的罩面、旧路的养护罩面等。碎石封层具有提高路面抗滑性能、增强路表排水、保护路面结构、延缓沥青老化等作用，但目前常用的乳化沥青、改性乳化沥青型碎石封层存在黏结力差、易剥落松散、泛油、抗滑性能和耐磨性能较差等问题，严重制约了碎石封层的应用和进一步发展。

环氧树脂具有良好的热稳定性、黏结性、防水性和耐腐蚀性，对于固结路面松散集料、提高路面防水性能有明显效果。将环氧树脂用于沥青的改性，可提高沥青的强度、刚度、韧性以及耐疲劳性，且环氧沥青已经作为道路材料被广泛应用于道桥工程。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，可与乳化沥青相容，形成稳定的树脂－沥青复合型材料，兼具树脂和乳化沥青优势，具有稳定性好、固含量高、黏稠度低、黏度大等特点，在道路养护范畴具有较高的推广价值。

该文针对目前碎石封层存在的黏结力差、集料易松散、抗滑性和耐磨性差等问题，研发一种基于水性环氧乳化沥青的碎石封层材料。通过室内试验，研究水性环氧乳化沥青的性能，并确定水性环氧和乳化沥青的掺配比；根据正交试验确定水性环氧－乳化沥青碎石封层的设计参数，并对其路用性能进行测试。

2 水性环氧乳化沥青性能测试

2.1 原材料技术性质

试验中采用两种不同的阳离子乳化沥青（表1）作对比：SBS改性乳化沥青和SBR改性沥青，分别制备水性环氧乳液（表2）掺量为：2%、4%、6%、8%、10%的水性环氧－乳化沥青，并对这两种乳化沥青在5种不同环氧掺量下的蒸馏后三大指标、黏度、拉拔强度和剪切强度进行测试、对比。

表1 阳离子乳化沥青性能参数

沥青类型	固含量/%	标准黏度/s	针入度/(0.1 mm)	延度(5 ℃)/cm	溶解度/%	稳定性/%
SBS型	54.5	11.8	64.3	24.8	98.2	0.31
SBR型	53.5	10.3	68.4	26.4	99.2	0.43
技术要求	≥50	8～25	40～120	≥20	≥97.5	≤1

收稿日期：2018－10－20

作者简介：邓玉训，男，大学本科，高级工程师，E－mail：42365485@qq.com

表 2　水性环氧乳液性能参数

离子类型	pH 值	固含量/%	黏度/(mPa·s)	粒度/μm	环氧当量	存储稳定性/d
非离子型	6～8	60±3	100～900	≤0.3	850～1 000	>180

2.2　水性环氧掺量对蒸发残留物三大指标影响

水性环氧树脂固化后会对乳化沥青原有的体系产生影响，即：环氧树脂包裹着沥青颗粒，与沥青形成稳定的交联三维结构，改善乳化沥青的性能。测试的水性环氧－乳化沥青蒸发残留物三大指标见图 1～3。

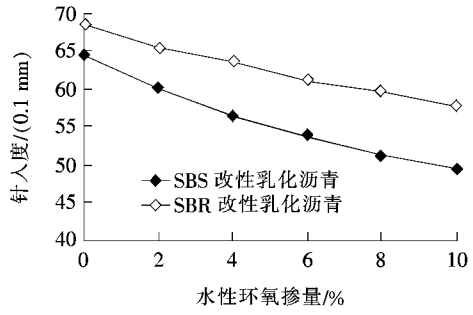

图 1　不同环氧掺量下的针入度

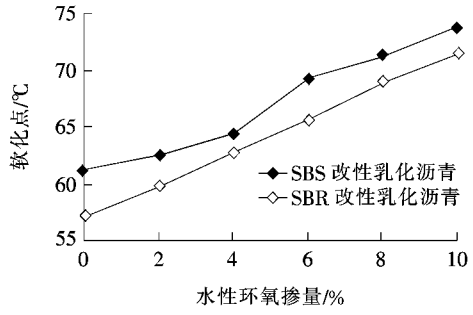

图 2　不同环氧掺量下的软化点

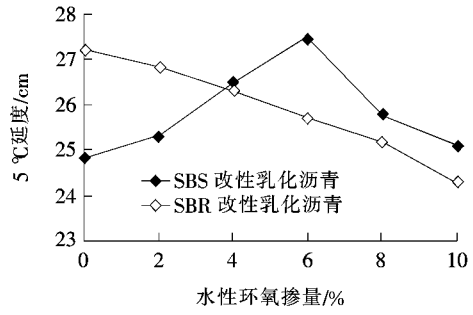

图 3　不同环氧掺量下的延度

由图 1～3 可知：水性环氧树脂能够极大地提高改性乳化沥青的高温性能。水性环氧树脂属于热固性材料，固化后树脂裹附着沥青，形成稳定的网状结构，提高了改性乳化沥青的稠度、黏结力，表现为随着水性环氧掺量的增大，两种改性乳化沥青蒸馏残留物的 25 ℃针入度不断下降、软化点不断升高；但同时水性环氧乳化沥青也兼具树脂低温易脆断的特点，表现为随着水性环氧掺量的增大，5 ℃延度呈现不断下降的趋势(SBR 型)，SBS 改性乳化沥青在环氧掺量小于 6%时，树脂、沥青的交联作用较弱，主要体现改性乳化沥青的性能，但当环氧掺量大于 6%时，低温脆性就比较明显。

2.3　水性环氧掺量对乳化沥青黏度的影响

碎石封层是在喷洒胶结料的同时撒布碎石，对于胶结料的黏度要求较高，既要保证常温和易性，又要保证与集料的黏结性，测试不同环氧掺量下水性环氧乳化沥青的标准黏度如图 4 所示。

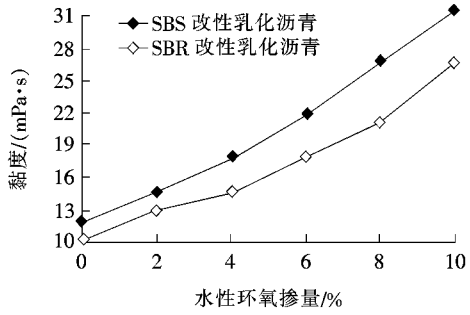

图 4　不同环氧掺量下的黏度

由图 4 可知：水性环氧树脂明显地提高了改性乳化沥青的黏度。主要由于水性环氧树脂在固化反应中形成了高分子环氧聚合物，增大了改性乳化沥青的黏稠性，即随着水性环氧掺量的增大，黏度也增大；在水性环氧掺量较小时，水性环氧与乳化沥青交联反应较慢，形成微凝胶体，黏度增长缓慢，当水性环氧掺量变大时，水性环氧树脂与乳化沥青不断发生聚合反应，交联作用增强，形成中、大凝胶体，黏度增长较快，即在掺量小于 4%时，两种改性乳化沥青的黏度增幅较小，当掺量大于 4%时黏度增长较快。

2.4　水性环氧掺量对乳化沥青强度的影响

道路使用过程中，路面表层受力较为复杂，既承受水平方向的摩擦力，也受到竖直方向荷载的重力，所以碎石封层的胶结料必须有良好的黏结力，为验证水性环氧乳化沥青的黏结性能，采用拉拔和斜剪试验，对其力学性能进行测试，结果如图 5、6 所示。

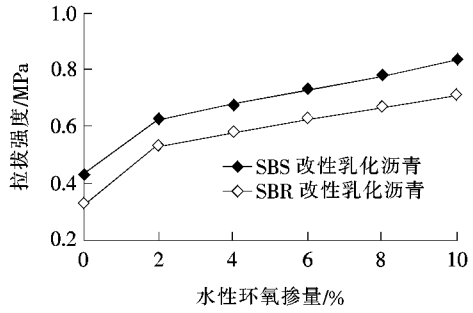

图 5 不同环氧掺量下的拉拔强度

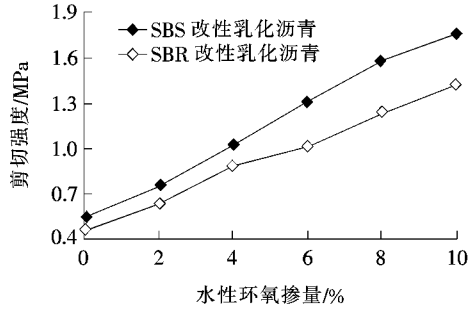

图 6 不同环氧掺量下的剪切强度

图 5、6 表明：水性环氧树脂能够大幅度地提高改性乳化沥青的黏结性能。随着环氧掺量的不断增大，拉拔强度和剪切强度都不断提高，且在环氧掺量为 2%时，抗拉能力和抗剪能力得到明显的提升。

通过对比不同环氧掺量下，SBS、SBR 两种乳化沥青蒸发残留物的三大指标、黏度及力学性能可知：SBS 环氧乳化沥青蒸发后针入度、软化点以及黏度、拉拔强度、剪切强度均高于 SBR 环氧乳化沥青，且在水性环氧掺量为6%时，SBS改性乳化沥青的延度最好，所以综合考虑，确定沥青为 SBS 改性乳化沥青，且水性环氧掺量为 6%。

3 水性环氧一乳化沥青碎石封层参数设计与性能测试

对于碎石封层的参数设计主要包括经验法和理论计算法，由于碎石的粒径以及平均高度等参数要求较高，该文采用经验配比法进行水性环氧乳化沥青碎石封层的设计，然而影响碎石封层质量的因素较多，包括沥青和集料的性能、用量、配比以及施工方法等，试验主要将水性环氧乳化沥青喷洒量、碎石撒布量、不同粒径碎石参配比例作为关键参数，采用正交试验的方法进行设计。

3.1 水性环氧一乳化沥青碎石封层正交试验设计

水性环氧乳化沥青的喷洒量是碎石封层设计的关键参数，其喷洒分为两层：第一层要求黏附住碎石且乳液不流淌，第二层要求封住因碎石堆积而产生的裂缝；碎石的撒布量决定了封层的抗滑性能，碎石过多则易剥落，降低路面平整度和驾驶安全性，碎石过少又达不到抗滑的效果；不同粒径碎石的配比是保证封层路用性能的重要设计环节，不容忽视。

根据工程经验，对水性环氧乳化沥青的喷洒量、碎石的撒布量、碎石粒径 2.36～4.74 mm 与 0～2.36 mm 的质量比，分别取 3 种不同掺量，进行 3 因素 3 水平的正交设计，并对不同因素下水性环氧乳化沥青碎石封层的构造深度、摩擦系数、1 h 磨耗进行测试研究，正交试验设计因素水平表、正交试验结果见表 3、4。

表 3 正交试验设计碎石封层的因素水平

水平	乳化沥青喷洒量/(kg·m^{-2})	碎石撒布量/(kg·m^{-2})	(2.36～4.74 mm)：(0～2.36 mm)
1	0.30＋0.1	1.2	20：80
2	0.35＋0.1	1.4	40：60
3	0.40＋0.1	1.6	60：40

3.2 水性环氧乳化沥青碎石封层正交试验结果分析

对于正交试验结果，采用极差分析法与方差分析法综合分析不同因素对试验结果的影响，其中极差法较为直观，极差值的大小能够反映各个因素对试验结果的影响主次关系，极差越大，对应的因素越主要；方差法通过显著性检验，判断各个因素对试验结果的影响程度，若各因素 F 值(因素水平变化引起的平均偏差平方和与平均误差平方和的比值)大于相应的临界值，则说明该因素对试验结果影响显著。该文分别对构造深度、摩擦系数、1 h 磨耗值进行极差及显著性分析，结果见表 5、6。

由表 5、6 可知：① 2.36～4.74 mm 碎石的掺量对构造深度、摩擦系数、磨耗值的影响最为显著；② (2.36～4.74 mm)：(0～2.36 mm)碎石的比例越高，碎石封层的构造深度和摩擦系数越大，即掺量比例为 60：40 时抗滑性能最好，但在该比例掺量下，碎石封层的磨耗值较大，耐磨性较差，而比例掺量为 40：60 时，磨耗值明显减小；③ 乳化沥青喷洒量会显著影响碎石封层的耐磨性能，且由表 4 可知，乳化沥青喷洒量越大，磨耗值越小，当喷洒量从(0.3＋0.1) kg/m^2 增加到(0.35＋0.1) kg/m^2 磨耗值下降了约 23.3%，从(0.35＋0.1) kg/m^2 增加到(0.40＋0.1) kg/m磨耗值

表 4　正交试验结果

试验编号	乳化沥青喷洒量/(kg·m^{-2})	碎石撒布量/(kg·m^{-2})	(2.36～4.74 mm)：(0～2.36 mm)	构造深度/mm	摩擦系数/BPN	磨耗值/(kg·m^{-2})
1	0.30＋0.1	1.2	20∶80	0.66	68	1.51
2	0.30＋0.1	1.4	40∶60	1.34	85	1.22
3	0.30＋0.1	1.6	60∶40	2.68	102	3.97
4	0.35＋0.1	1.2	40∶60	1.16	84	0.99
5	0.35＋0.1	1.4	60∶40	2.11	98	3.04
6	0.35＋0.1	1.6	20∶80	0.71	73	1.11
7	0.40＋0.1	1.2	60∶40	2.06	93	2.43
8	0.40＋0.1	1.4	20∶80	0.66	70	0.78
9	0.40＋0.1	1.6	40∶60	1.03	83	0.53

注：乳化沥青的喷洒分两次，第 1 次喷洒分别取 0.3、0.35、0.4 kg/m^2，第 2 次喷洒量均为 0.1 kg/m^2。

表 5　试验结果极差分析

水平	构造深度/mm			摩擦系数/BPN			磨耗值/(kg·m^{-2})		
	乳化沥青喷洒量	碎石撒布量	(2.36～4.74 mm)：(0～2.36 mm)	乳化沥青喷洒量	碎石撒布量	(2.36～4.74 mm)：(0～2.36 mm)	乳化沥青喷洒量	碎石撒布量	(2.36～4.74 mm)：(0～2.36 mm)
1	1.56	1.29	0.68	85.00	81.67	70.33	2.23	1.64	1.13
2	1.33	1.37	1.18	85.00	84.33	84.00	1.71	1.68	0.91
3	1.25	1.47	2.28	82.00	86.00	97.67	1.21	1.87	3.15
极差	0.31	0.08	1.61	3	4.33	27.33	0.98	0.23	2.24

表 6　试验结果方差分析

项目	构造深度				摩擦系数				磨耗值			
	乳化沥青喷洒量	碎石撒布量	(2.36～4.74 mm)：(0～2.36 mm)	误差	乳化沥青喷洒量	碎石撒布量	(2.36～4.74 mm)：(0～2.36 mm)	误差	乳化沥青喷洒量	碎石撒布量	(2.36～4.74 mm)：(0～2.36 mm)	误差
自由度	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
均方	0.078	0.024	2.028	0.41	9.000	14.333	560.333	4.333	0.731	0.044	4.545	0.083
F 值	1.907	0.597	49.451	—	2.077	3.308	129.308	—	8.779	0.534	54.596	—

注：方差分析中设定显著性水平为 0.05，且 $F_{0.05}(2,2)=19$。

下降了26.9%，且从试件成型过程来看，喷洒量为(0.4＋0.1) kg/m^2 时，沥青与碎石的裹附效果最好；④ 碎石撒布量对于碎石封层性能的影响不明显，但从节约、安全角度考虑拟采用1.4 kg/m^2。

综合考虑水性环氧碎石封层的抗滑性能与耐磨耗性能，建议水性环氧乳化沥青碎石封层设计参数分别为：乳化沥青喷洒量为(0.4＋0.1) kg/m^2，碎石撒布量为1.4 kg/m^2，碎石粒径(2.36～4.74 mm)∶(0～2.36 mm)＝40∶60。

3.3　水性环氧乳化沥青碎石封层路用性能测试

根据水性环氧乳化沥青碎石封层的设计参数，以水泥板为承载板，制备水性环氧乳化沥青碎石封层，并对其耐磨耗性能和抗滑性能进行测试，试验结果见图7～9。

由图 7～9 可知：① 对于耐磨耗性能，与传统乳化沥青碎石封层相比，水性环氧乳化沥青碎石封层耐磨性有极大的提高，随着磨耗时间的延长，磨耗值较小且变化较为平稳；② 对于抗滑性能，相比水泥试板和传

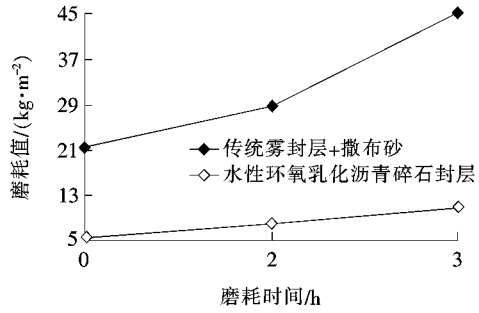

图 7 不同封层下荷载磨耗值

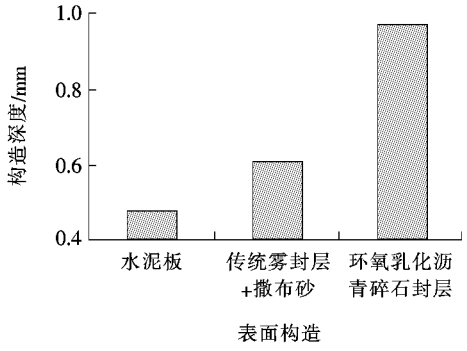

图 8 不同表面构造深度

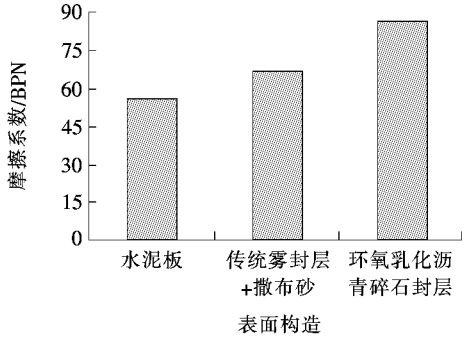

图 9 不同表面摩擦系数

统的乳化沥青碎石封层，水性环氧乳化沥青碎石封层的构造深度、摩擦系数都有大幅度的提高，具有较高的抗滑性。

4 结论

研发了一种新型的基于水性环氧乳化沥青的碎石封层，主要研究了水性环氧乳化沥青的黏结性能和力学性能，采用正交设计方法对水性环氧乳化沥青碎石封层进行参数设计并验证其性能，主要结论如下：

（1）水性环氧树脂能够提高乳化沥青的稠度和黏度，极大地改善乳化沥青的高温性能，但掺量过多乳化沥青的低温脆性较为明显。

（2）水性环氧树脂能够大幅度地提高乳化沥青的黏结性，其拉拔强度和剪切强度有很大的提高，在水性环氧树脂掺量为 2%时，变化最为明显。

（3）对于水性环氧乳化沥青碎石封层的参数设计，(2.36～4.74 mm)∶(0～2.36 mm)碎石的掺配比例对其构造深度、摩擦系数、磨耗值的影响最大，其次是水性环氧乳化沥青喷洒量。碎石撒布量对水性环氧乳化沥青碎石封层的功能性并无显著影响。

（4）对比传统的乳化沥青碎石封层，水性环氧乳化沥青碎石封层的耐磨耗性能和抗滑性能都有很大的提升，具有一定的应用和推广价值。

参考文献：

[1] 李曦.碎石封层性能影响因素试验研究[D].长沙理工大学硕士学位论文，2009.

[2] 张军伟.碎石封层早期黏结性能试验方法研究[D].大连理工大学硕士学位论文，2011.

[3] 周海生，吕晓希，等.碎石封层技术在国外乡村道路改造中的应用[J].石油沥青，2007(5).

[4] 张勇.水性环氧乳化沥青混合料路用性能研究[J].中外公路，2017(5).

[5] 刘丽，杨森，郝培文.基于沥青－集料黏结性能的碎石封层技术性能影响因素研究.[J].武汉理工大学学报，2013(11).

[6] 张庆，郝培文，白正宇.水性环氧树脂改性乳化沥青性能表征及机理研究[J].公路工程，2016(2).

[7] 刘浪.环氧沥青材料及混合料性能研究[D].长沙理工大学硕士学位论文，2012.

[8] 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(1).

[9] 张洪涛，黄锦霞.水性制备与应用树脂[M].北京：化学工业出版社，2011.

[10] 殷立文.水性环氧沥青在沥青坑槽修补技术中的应用[J].公路交通科技：应用技术版，2013(11).

[11] 曾德亮.水性环氧树脂改性乳化沥青在雾封层养护中的应用[J].公路，2015(2).

[12] 顾海荣.碎石封层中沥青和碎石用量的计算方法[J].公路，2008(4).

[13] 陈俊宇.水泥路面应用水性环氧改性乳化沥青砂雾封层技术研究[D].长安大学硕士学位论文，2015.

[14] 花艳丽.沥青碎石封层技术的施工工艺与施工装备运用[D].重庆交通大学硕士学位论文，2009.