

DOI: 10.20035/j.issn.1671-2668.2024.03.016

引用格式: 陈海龙. WER-SBR 复合改性乳化沥青性能研究[J]. 公路与汽运, 2024, 40(3): 76-80.

Citation: CHEN Hailong. Study on properties of emulsified asphalt modified by WER-SBR composite[J]. Highways & Automotive Applications, 2024, 40(3): 76-80.

WER-SBR 复合改性乳化沥青性能研究

陈海龙

(佛山市公路桥梁工程监测站有限公司, 广东 佛山 528041)

摘要: 采用正交试验, 以水性环氧树脂 (Waterborne Epoxy Resin, WER) 掺量、丁苯橡胶 (Styrene Butadiene Rubber, SBR) 掺量与固化剂比例 [$m(\text{固化剂}) : m(\text{WER})$] 作为研究因素, 通过沥青基本性能试验和沥青混合料性能试验, 分析 WER 掺量、SBR 掺量与固化剂比例对 WER-SBR 复合改性乳化沥青路用性能的影响。结果表明, WER 可显著改善复合改性乳化沥青的高温稳定性, 但对低温延展性能会产生一定负面影响; 掺入 SBR 可提升复合改性乳化沥青的高温稳定性、低温延展性, 一定程度上平衡 WER 对复合改性乳化沥青低温性能的负面影响; 固化剂比例对复合改性乳化沥青性能的影响较小; 推荐采用 12% WER 掺量、4% SBR 掺量、1.0 : 1.0 固化剂比例作为 WER-SBR 复合改性乳化沥青的配比。

关键词: 公路; 水性环氧树脂 (WER); 丁苯橡胶 (SBR); 改性乳化沥青; 路用性能

中图分类号: U418.6

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2024)03-0076-05

乳化沥青作为一种以水为分散介质、沥青为分散质的乳液, 具有常温下呈液态的特点, 被广泛应用于路面黏结层、超薄磨耗层、雾封层、微表处等^[1]。单一乳化沥青的路用性能取决于沥青残留物, 而沥青的化学组成使其温度敏感性与耐久性存在一定局限^[2]。为提高乳化沥青的路用性能, 以适应日益增长的交通荷载作用与复杂的环境因素影响, 常采用物理或化学改性的方式提高乳化沥青的性能^[3]。目前道路工程中常用高分子聚合物对乳化沥青进行改性, 如苯乙烯-丁二烯-苯乙烯 (Styrene Butadiene Styrene, SBS)、丁苯橡胶 (Styrene Butadiene Rubber, SBR) 等, 其中 SBS 改性乳化沥青具有良好的高温稳定性和抗剪切性能, 但存在制备工艺较复杂、低温延展性能较差等问题; SBR 改性乳化沥青制备工艺较简单, 具有良好的低温延展性能, 但高温性能较差、黏附性不足、黏度较低^[4]。如何有效结合不同材料的优点制备性能良好的复合改性乳化沥青已成为研究人员的重要课题。水性环氧树脂 (Waterborne Epoxy Resin, WER) 是以水作为分散介质、环氧树脂微粒作为分散质的液相体系材料, 可在室温条件与潮湿环境下固化形成具有高强度的固化物, 将其用于乳化沥青改性, 可显著提高乳化沥青的高温稳定性、抗疲劳性能、黏附性等路用性能^[5-6]。基

于此, 本文采用 WER 进行 SBR 乳化沥青复合改性, 突破 SBR 单一改性乳化沥青的局限, 并通过沥青软化点试验、针入度试验与低温延度试验, 分析 WER 掺量、SBR 掺量及固化剂比例 [$m(\text{固化剂}) : m(\text{WER})$] 对复合改性乳化沥青路用性能的影响, 确定最佳配方, 并对改性乳化沥青混合料的路用性能进行检验, 为 WER 复合改性沥青的配比优化提供参考。

1 原材料

(1) 沥青。基质沥青采用东海牌 70# A 级沥青, 其技术指标见表 1。

表 1 东海牌 70# A 级沥青的技术指标

试验项目	实测结果
软化点 (R&B)/℃	45.2
针入度 (25 ℃, 5 s, 100 g)/(0.1 mm)	61.3
延度 (10 ℃)/cm	62
延度 (15 ℃)/cm	>100
针入度指数	0.7
相对密度 (25 ℃)	1.014
蜡的质量分数/%	2.0

续表 1

试验项目		实测结果
溶解度/ %		99.8
动力黏度(60 ℃)/(Pa · s)		193
残留延度(10 ℃)/cm		24
RTFOT 后	残留延度(15 ℃)/cm	57
残留物试验	质量变化/ %	-0.423
	残留针入度(25 ℃)/ %	73

(2) SBR。采用阳离子 PC-1469 丁苯胶乳,其技术指标见表 2。

表 2 SBR 的技术指标

试验项目	实测结果	试验项目	实测结果
相对密度(20 ℃)	0.983	表面张力/(mN · m ⁻¹)	73
pH 值(25 ℃)	5.4	黏度(20 ℃)/(mPa · s)	42
闪点/℃	147	固含量/ %	65.8

(3) 乳化剂。采用阳离子慢裂快凝型沥青乳化剂,其技术指标见表 3。

表 3 乳化剂的技术指标

试验项目	实测结果	试验项目	实测结果
物理状态(25 ℃)	乳白色液体	相对密度(25 ℃)	1.01
组成成分	酰胺基胺类	固含量/ %	66.4
闪点/℃	187		

(4) 水性环氧树脂乳液。水性环氧树脂乳液与固化剂的技术指标见表 4。

表 4 水性环氧树脂乳液和固化剂的技术指标

材料名称	试验项目	实测结果
水性环氧树脂乳液	固含量/ %	51
	pH 值	5~6
	相对密度(20 ℃)	1.07
	环氧值(固体成分)/ [mol · (100 g) ⁻¹]	255
	固含量/ %	43
固化剂	pH 值	9~10
	相对密度(20 ℃)	1.06
	活泼氢当量(固体份)/ (g · mol ⁻¹)	260~280

2 试验方案

2.1 正交试验设计

通过三因素四水平的正交试验分析 WER 掺

量、SBR 胶乳掺量与固化剂比例对复合改性乳化沥青性能的影响,参考国内外相关文献与研究成果确定各因素水平取值^[7-10]。正交试验因素水平见表 5。

表 5 L₁₆(3⁴) 正交试验因素及水平

水平	影响因素的取值		
	WER 掺量/ %	SBR 掺量/ %	固化剂比例
1	8	2	0.9 : 1.0
2	10	4	1.0 : 1.0
3	12	6	1.1 : 1.0
4	14	8	1.2 : 1.0

2.2 WER-SBR 复合改性乳化沥青制备

首先将质量分数为 5% 的乳化剂溶解在 70 ℃ 蒸馏水中,充分搅拌均匀(500 r/min,剪切 5 min)后,将其与加热至熔融状态的基质沥青一同加入胶体磨中剪切分散,得到基质乳化沥青;然后将基质乳化沥青与一定掺量的 SBR 倒入烧杯中,使用高速剪切机进行搅拌(700 r/min,剪切 15 min),制得 SBR 改性乳化沥青;最后将一定比例的 WER 与固化剂加入 SBR 改性乳化沥青中,使用高速剪切机进行搅拌(500 r/min,剪切 10 min),制备得到 WER-SBR 复合改性乳化沥青^[11-12]。

3 试验结果与分析

3.1 改性剂掺量与固化剂比例对乳化沥青性能的影响

根据表 5 所示正交试验设计表,对 WER-SBR 复合改性乳化沥青进行基本性能试验,测试其软化点、针入度及延度,试验结果见表 6。

表 6 WER-SBR 复合改性乳化沥青基本性能试验结果

WER 掺量/ %	SBR 掺量/ %	固化剂比例	软化点/℃	针入度(25 ℃, 100 g, 5 s)/ (0.1 mm)	延度(5 ℃)/cm
8	2	0.9 : 1.0	70.2	54.7	55.3
8	4	1.0 : 1.0	74.1	49.6	80.5
8	6	1.2 : 1.0	79.5	49.8	100.0
8	8	1.1 : 1.0	77.5	47.6	100.0
10	2	1.0 : 1.0	80.1	47.8	76.8
10	4	1.2 : 1.0	84.5	46.3	85.3
10	6	1.1 : 1.0	85.2	43.2	100.0

续表 6

WER 掺量/%	SBR 掺量/%	固化剂比例	软化点/℃	针入度(25℃, 100 g, 5 s)/(0.1 mm)	延度(5℃)/cm
10	8	0.9 : 1.0	83.4	43.4	100.0
12	2	1.1 : 1.0	83.1	43.7	45.1
12	4	0.9 : 1.0	86.9	42.1	60.3
12	6	1.0 : 1.0	88.7	41.6	76.1
12	8	1.2 : 1.0	87.4	39.7	91.7
14	2	1.2 : 1.0	83.9	39.1	30.9
14	4	1.0 : 1.0	85.5	40.9	54.8
14	6	0.9 : 1.0	86.5	39.7	60.6
14	8	1.1 : 1.0	92.6	40.2	82.5

根据表 6 中试验结果,得出图 1~3 所示各因素的不同水平与 WER-SBR 复合改性乳化沥青软化点、针入度及延度的关系。

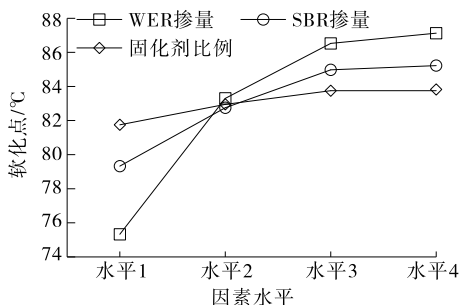


图 1 不同因素水平对 WER-SBR 复合改性乳化沥青软化点的影响

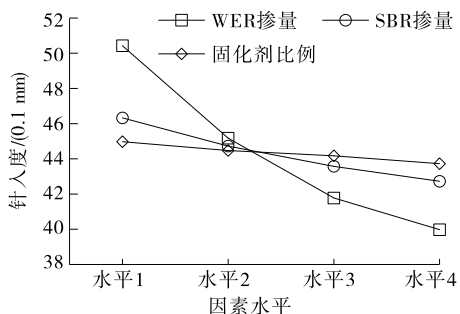


图 2 不同因素水平对 WER-SBR 复合改性乳化沥青针入度的影响

由图 1~3 可知:1) 随着 WER 掺量与 SBR 掺量的提高,改性乳化沥青的软化点增大、针入度减小,WER 与 SBR 的掺入可改善乳化沥青的高温稳定性。这是由于 SBR 在沥青中溶胀吸附大量轻质组分,形成空间网状结构,提高乳化沥青的软化点与

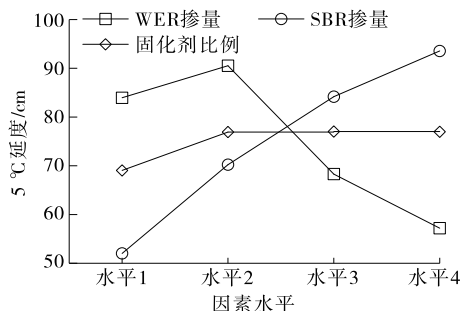


图 3 不同因素水平对 WER-SBR 复合改性乳化沥青延度的影响

稠度;另一方面,由于 WER 在乳化沥青中固化交联形成三维网络骨架结构,且固化物为热固性材料,具有良好的热稳定性,可限制沥青高温下的流动,乳化沥青的高温稳定性与黏度提高。2) 随着固化剂比例的增大,改性乳化沥青的软化点提高、针入度减小,但高水平条件下改善效果不明显。这是由于低水平条件下,固化剂增加,WER 乳液可以充分发生交联反应,提高固化物分子量,乳化沥青的软化点提高。当 WER 乳液固化完成后,继续增加固化剂,对 WER 固化形成热固性骨架结构的贡献减小,即对乳化沥青高温性能的改善幅度减小,软化点与针入度的变化较小。3) 随着 SBR 掺量的提高,改性乳化沥青的延度增大。这是由于 SBR 在乳化沥青中形成的柔性网络交联结构能有效消散应力,使乳化沥青在低温条件下具有良好的延展性能,乳化沥青低温抗裂性能提高。4) 随着 WER 掺量、固化剂比例的增大,乳化沥青的延度先增大后减小。这是由于 WER 掺量较低时,WER 固化形成的网络骨架结构起到增韧作用,乳化沥青的延展性提高;继续增大 WER 掺量,固化物无法形成连续分布式网络结构,固化物分布体系逐渐将沥青包裹住,由于两者模量相差大,乳化沥青的延展性大幅度下降,同时产生脆性。另一方面,固化剂用量过大,将导致高分子链快速终止,固化物分子量降低,固化时迅速释放热量,内应力增大,乳化沥青的脆性增大。

3.2 相关性分析

为探究 WER 掺量、SBR 掺量与固化剂比例对乳化沥青性能的影响,使用 SPSS 软件对试验数据进行 Pearson 相关性分析,结果见表 7。

由表 7 可知:各因素对复合改性乳化沥青软化点与针入度的相关性排序为 WER 掺量>SBR 掺量>固化剂比例,其中 WER 掺量与软化点和针入度存在显著相关性;对延度的相关性排序为 SBR 掺

表 7 WER-SBR 复合改性乳化沥青性能影响因素的相关性分析

项目	各因素与软化点的相关性			各因素与针入度的相关性			各因素与延度的相关性		
	WER 掺量	SBR 掺量	固化剂比例	WER 掺量	SBR 掺量	固化剂比例	WER 掺量	SBR 掺量	固化剂比例
Pearson 相关性	0.789**	0.407	0.143	-0.889**	-0.306	-0.104	-0.546*	0.739**	0.127
显著性	0.000	0.118	0.596	0.000	0.250	0.703	0.029	0.001	0.638
试验组数量	16	16	16	16	16	16	16	16	16

注：* 表示在 0.10 水平上显著相关；* * 表示在 0.05 水平上显著相关。

量>WER 掺量>固化剂比例,其中 SBR 掺量与延度存在显著相关性(正相关),WER 掺量与延度存在明显相关性(负相关)。

根据各因素对复合改性乳化沥青性能的影响,推荐采用 12%WER 掺量、4%SBR 掺量与 1.0:1.0 固化剂比例作为 WER-SBR 复合改性乳化沥青的配比。

4 WER-SBR 复合改性乳化沥青混合料的路用性能

根据工程实践中乳化沥青的应用场合,选用 LB-13 级配作为 WER-SBR 复合改性乳化沥青混合料的级配(见表 8)。

表 8 LB-13 型 WER-SBR 复合改性乳化沥青混合料的级配

级配类型	下列筛孔(mm)的通过质量百分率/%									
	16.000	13.200	9.500	4.750	2.360	1.180	0.600	0.300	0.150	0.075
级配上限	100.0	100.0	95.0	60.0	40.0	20.0	15.0	12.0	8.0	5.0
级配下限	100.0	90.0	60.0	30.0	10.0	5.0	0.0	0.0	0.0	0.0
合成级配	100.0	95.0	77.5	45.0	25.0	12.5	7.5	6.0	4.0	2.5

根据表 8 中合成级配,按 SBR 掺量 4%、固化剂比例 1.0:1.0、WER-SBR 复合改性乳液用量 8.3%成型 WER-SBR 复合改性乳化沥青混合料试件,通过高温车辙试验、浸水马歇尔试验、低温弯曲试验分析 WER 掺量对复合改性乳化沥青混合料高温稳定性、水稳定性及低温抗裂性能的影响,结果见表 9。

表 9 WER-SBR 复合改性乳化沥青混合料路用性能试验结果

WER 掺量/%	60℃动稳定度/(次·mm ⁻¹)	破坏应变/10 ⁻⁶	残留稳定度/%
0	2 847	3 817	85.4
8	6 271	3 536	88.3
10	7 682	3 478	89.5
12	8 964	3 310	92.1
14	9 732	3 183	93.3

由表 9 可知:1) 掺入 WER 后,SBR 乳化沥青混合料的动稳定度与残留稳定度明显提高,且随着 WER 掺量的增大而增大,WER 能明显改善乳化沥青混合料的高温抗车辙性能与水稳定性。这主要是

由于 WER 产生固化反应后生成的三维网络构造能提高沥青的黏结性能,使胶结料与集料紧密黏结成整体,有效抵抗水的损害,混合料在高温条件下抵抗剪切变形的能力及水稳定性提高。2) 随着 WER 掺量的增加,乳化沥青混合料的低温破坏应变降低,表明 WER 对乳化沥青混合料低温抗裂性能会产生一定负面影响。这可能是由于环氧树脂的固化产物韧性较小、与沥青存在较大模量差,在低温条件下难以协同变形,更容易产生开裂,乳化沥青混合料的低温抗裂性能下降。

5 结论

(1) WER 可显著改善复合改性乳化沥青的高温稳定性,增强乳化沥青的黏度,且其掺量越大,性能提升越大,但高掺量水平(WER 掺量为 8%~14%)下 WER 对乳化沥青的低温延展性能会产生负面影响。

(2) 掺入 SBR 能提高复合改性乳化沥青的高温稳定性、低温延展性,一定程度上平衡 WER 对复合改性乳化沥青低温性能的负面影响。

(3) 固化剂比例对复合改性乳化沥青性能的影响

响较小,但固化剂比例过大或过小均会对乳化沥青性能产生消极作用。

(4) WER 掺量与复合改性乳化沥青软化点和针入度存在显著相关性,SBR 掺量与延度存在显著相关性,推荐采用 12% WER 掺量、4% SBR 掺量与 1.0 : 1.0 固化剂比例作为 WER-SBR 复合改性乳化沥青的配比。

(5) WER 能有效改善乳化沥青混合料的高温抗车辙性能与水稳定性,但对乳化沥青混合料的低温抗裂性能存在一定负面影响。

参考文献:

- [1] 王清洲,梁瑛硕,马小江,等.环氧掺量对水性环氧乳化沥青微观结构及性能影响[J].热固性树脂,2022,37(1):49-54.
- [2] 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.
- [3] 惠冰,李扬,张炎棣,等.水性环氧乳化沥青固化-破乳速率调控效能及作用机理[J].材料导报,2022,36(16):53-58.
- [4] 张长林,陈浩宇,陈宝,等.不同固化剂对路用水性环氧树脂工作性能的影响[J].公路,2021,66(11):38-44.

- [5] 王清洲,马小江,徐大伟,等.水性环氧乳化沥青桥面防水黏结层的性能研究[J].材料保护,2021,54(10):68-72.
- [6] 孔林,李骏,罗群星,等.水性环氧树脂乳化沥青制备及性能研究[J].应用化工,2021,50(8):2076-2081.
- [7] 陈峰阳,张海舰,张井亮,等.水性环氧树脂改性乳化沥青的研究及应用[J].化工新型材料,2021,49(5):249-251+256.
- [8] 王清洲,张志银,梁瑛硕,等.水性环氧乳化沥青道路工程应用研究进展[J].热固性树脂,2021,36(6):53-58+66.
- [9] 李媛媛,桑世林,王凯杰,等.非离子型水性环氧树脂乳化剂的制备与性能研究[J].涂料工业,2021,51(9):25-32.
- [10] 赵富强,王素青,路国栋,等.水性环氧新型冷补沥青混合料的性能对比分析[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2019,43(1):56-61.
- [11] 李冬红,范永将,李彤霞,等.非离子丁苯胶乳改性乳化沥青性能研究[J].化工新型材料,2011,39(3):123-125.
- [12] 冯雷雷,樊君,刘洪海.丁苯胶乳改性乳化沥青的制备及其性能[J].石油炼制与化工,2009,40(3):56-60.

收稿日期:2023-02-28

(上接第 75 页)

性沥青路面车辙预养护时机模型进行车辙预养护时机预测,中轻交通路面的预养护时机为通车后 9~10 年,重交通路面的预养护时机为通车后 8 年,特重交通路面的预养护时机为通车后 6 年。

(2) 路面整体芯样的复合平均应变率、车辙年增量与改性沥青层厚度呈负相关,改性沥青层厚度在面层结构中所占比例越大,整体芯样的抗车辙性能越好。相比 SMA13+AC20+AC25 和 SMA13+SUP20+SUP20,AC13+AC20+AC25 路面结构的抗车辙性能较弱。

参考文献:

- [1] 杨捷,孙建武.高抗车辙沥青路面技术在高速公路互通匝道路面维修中的应用[J].公路与汽运,2023(1):95-100.
- [2] 姚佩林,路畅,赵李军,等.高速公路日常养护市场化管理模式研究[J].公路与汽运,2022(6):144-148.
- [3] 交通运输部公路科学研究院.公路沥青路面预防养护

技术规范:JTG/T 5142-01—2021[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2021.

- [4] 张治强.高速公路沥青路面预防养护时机及养护措施选择的研究[J].路基工程,2021(4):138-141.
- [5] 董元帅,周绪利,侯芸,等.基于寿命周期的沥青路面预养护时机决策优化[J].公路,2020,65(4):325-331.
- [6] 龙小勇,蔡良才,张罗利.基于破损指数法的水泥道面预养护最佳时机决策模型[J].空军工程大学学报(自然科学版),2019,20(3):33-37.
- [7] 林俊涛,吴少鹏,刘全涛,等.沥青路面功能性预养护材料的养护时机研究[J].中国公路学报,2014,27(9):19-24.
- [8] 谭文英,林翔,潘小康.普通干线公路沥青路面预防性养护措施使用效果研究[J].公路,2018,63(3):243-246.
- [9] 赵帅,张金喜.考虑不同养护措施的路面性能衰变模型研究[J].公路,2018,63(1):244-248.

收稿日期:2023-03-27