

文章编号:1007-9629(2021)04-0874-07

水性环氧树脂改性泡沫沥青冷再生混合料性能

李秀君¹, 高世柱¹, 赵麟昊¹, 乔向军², 邵 晗¹

(1. 上海理工大学 环境与建筑学院, 上海 200093; 2. 包头市市政设计研究院, 内蒙古 包头 014030)

摘要: 针对泡沫沥青冷再生混合料(CRMFB)高温稳定性和抗水损性能的不足,采用水性环氧树脂(WER)对其进行改性,研究了 WER 的掺加方式及掺量、混合料的储存时间和储存温度对 CRMFB 性能的影响.结果表明:WER 的最佳掺加方式为先将其加入拌和水中,再与矿料一起加入拌和锅内;WER 通过与松散细集料形成高黏性热固性胶浆以及生成固化产物对沥青分子进行“嵌锁”等方式改善 CRMFB 的性能;级配 S 和级配 Z 的 CRMFB 抗水损性能、高温稳定性均有提高;建议 CRMFB 在 45 min 内从拌和厂运送至现场摊铺压实,当施工气温较低或较高时,运输时间宜控制在 30 min 内.

关键词: 泡沫沥青; 水性环氧树脂; 高温稳定性; 抗水损性能

中图分类号:U414

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2021.04.027

Performances of Cold Recycling Mixture with Foamed Bitumen and Waterborne Epoxy Resin

LI Xiujun¹, GAO Shizhu¹, ZHAO Linhao¹, QIAO Xiangjun², SHAO Han¹

(1. School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

2. Baotou Municipal Design Institute, Baotou 014030, China)

Abstract: In view of the lack of high temperature stability and water damage resistance of cold recycling mixture with foamed bitumen (CRMFB), waterborne epoxy resin (WER) was used to modify it. The effects of mixing method, WER dosage, storage time and storage temperature on the performance of the CRMFB were studied in detail. The results show that the best mixing method of WER is to add it into the mixing water first, and then into mixing pot together with mineral materials. The performance of the CRMFB is improved by forming a high viscosity thermosetting slurry with loose fine aggregate and “locking” molecules of bitumen molecules with curing products. The water damage resistance and high temperature stability of graded S and graded Z mixtures are improved. It is recommended that CRMFB should be transported from the mixing plant to the site for paving and compaction within 45 min. No matter the working temperature is low or high, the transportation time should be controlled within 30 min.

Key words: foamed bitumen; waterborne epoxy resin; high temperature stability; water damage resistance

泡沫沥青冷再生技术因其造价低、资源再利用等优势不断应用于道路维修养护工程.但近年来,路面常因泡沫沥青冷再生混合料(CRMFB)高温稳定性和抗水损性能不足而发生病害^[1].添加外掺剂是一种改善泡沫沥青冷再生混合料性能的有效措施,但目前常见的外掺剂以颗粒状为主,改性后的沥青

存在发泡性能下降等问题^[2].因此,探寻一种能以冷拌方式来改善 CRMFB 性能的外掺剂具有重要意义.

水性环氧树脂(WER)是一种高分子化合物,能够在室温条件下发生聚合反应生成三维网状结构的热固性材料,可以有效弥补沥青高温稳定性不足等

收稿日期:2020-05-10; 修订日期:2020-06-22

基金项目:住房和城乡建设部 2018 年科学技术项目(2018-k9-062)

第一作者:李秀君(1976—),女,江苏江阴人,上海理工大学副教授,硕士生导师,博士. E-mail:363096289@qq.com

缺陷,其聚合产物也能改善水泥砂浆性能^[3].因此,近几年 WER 逐渐被用来改性乳化沥青冷拌材料,并取得了较好的效果^[4-9].为探索 WER 能否有效改善 CRMFB 的性能,本文研究了 WER 的掺加方式及掺量、混合料的储存时间和储存温度对 CRMFB 性能的影响.

1 试验

1.1 原材料

选择镇海 A-70 沥青,其发泡性能见表 1.为提

高混合料高温稳定性和抗水损性能,同时兼顾干缩和低温性能,选取 P·O 42.5 水泥,掺量¹⁾为 1.8%.参照以剪切模量为指标的粗集料级配设计法(MAS 法),设计矿料级配 Z^[10],并以满足推荐级配范围的矿料级配 S 为参照,合成级配见表 2.铣刨料(RAP)选自某大修工程项目,新料采用玄武岩,各档铣刨料和新料质量比为 80.0:18.2.WER 包括环氧树脂乳液(组分 A)、固化剂(组分 B),组分 A、B 的主要性能指标见表 3,A、B 组分的质量比为 2:1,WER 固化物的主要性能指标见表 4.

表 1 沥青的发泡性能
Table 1 Foamability of asphalt

Foaming temperature/℃	w(H ₂ O)/%	Air pressure/Pa	Hydraulic pressure/Pa	Expansion rate/times	Half-life/s
165	2.0	5	4	16	12

表 2 矿料合成级配
Table 2 Synthetic gradation of mineral aggregates

Gradation	Passing ratio(by mass)/%						
	26.5 mm	19 mm	9.5 mm	4.75 mm	2.36 mm	0.3 mm	0.075 mm
Z	100.0	96.0	55.5	33.5	30.5	21.5	11.0
S	100.0	95.0	72.5	50.0	42.5	20.0	12.0
JTG/T 5521—2019	100	100—85	80—55	60—35	45—25	22—8	12—6

表 3 WER 中组分 A、B 的主要性能指标
Table 3 Main performance indexes of component A and B in WER

Component	Appearance	Solid content (by mass)/%	Epoxy value/ (mol·g ⁻¹)	Active hydrogen equivalent/ (mol·g ⁻¹)	Viscosity (20℃)/(Pa·s)	pH value
A	Milky white	50	1.50	—	275	4—5
B	Light yellow	42	—	2.60	2 000	9—10

表 4 WER 固化物的主要性能指标
Table 4 Main performance indexes of cured product of WER

Dry time (20℃)/min	Adhesion grade	Peeling grade	Flexibility(radius of curvature)/mm	Permeability/%	Water damage resistance at 7 d
120	1—2	4—5	0.5	70	Not bubbling

1.2 试验方案

表 5 为 CRMFB 的配合比及性能,其中: f_{ITS} 为

试件的劈裂强度;ITSR 为干湿劈裂强度比; f_{UCS} 为无侧限抗压强度;DS 为动稳定度.

表 5 CRMFB 的配合比及性能
Table 5 Mix proportions and performance of CRMFB

Gradation	w(H ₂ O)/%	w(bitumen)/%	f_{ITS} /MPa	ITSR/%	f_{UCS} /MPa	DS/(times·mm ⁻¹)
Z	4.8	2.4	0.66	84	2.18	7 461
S	5.2	2.8	0.54	76	1.69	4 806
DB33/T715—2018			0.50	80	1.60	5 000

1)文中涉及的掺量、含量等除特别说明外均为质量分数.

试验方案:

(1) WER 掺加方式: 因组分 A 在高温时会发生固化, 因此采用 3 种冷拌掺加方式, 分别记为 M1、M2、M3. M1 为先配制 WER, 再与矿料、水泥和水一起加入拌和锅中; M2 为先将配制好的 WER 加入拌和水中, 搅拌均匀后再与矿料一起加入拌和锅内; M3 为待 CRMFB 生产结束时, 将配制好的 WER 加入混合料中拌和均匀. 3 种掺加方式均确保混合料总拌和时间一致.

(2) WER 掺量: 根据水性环氧树脂掺量对沥青类混合料性能的影响研究^[11], 同时兼顾经济性, 本文设定 WER 掺量 w_{WER} 为 CRMFB 质量的 0%、0.5%、1.0%、1.5%、2.0%.

(3) 储存时间: 混合料从拌和厂运输至现场摊铺压实有一定的时间间隔. 本文参照实际工程运输时间, 设置储存时间 t 为 0、15、30、45、60 min, 储存方式为开放式.

(4) 储存温度: 温度对 WER 固化反应速度、水泥水化速度、泡沫沥青胶浆可塑性均有较大影响. 因此, 根据常见施工温度, 设置储存温度 T 为 20、30、40 °C.

用动稳定度 DS(60 °C) 和干湿劈裂强度比 ITS_R 来分别表征 CRMFB 的高温稳定性和抗水损性能, 无侧限抗压强度 f_{UCS} 、抗拉强度 f_{TSR} 和冻融劈裂强度比 TSR 分别表征混合料抗压、抗拉和抗冻性能.

2 结果与分析

2.1 掺加方式及掺量对 CRMFB 性能影响

2.1.1 抗水损性能

不同掺加方式和掺量下 CRMFB 的干湿劈裂强度比和空隙率如图 1 所示. 由图 1 可见: 对于级配 S 组混合料, 随着 WER 掺量的增加, CRMFB 抗水损性能均呈现先慢后快再趋于稳定的上升趋势; 对级配 Z 组混合料, 其抗水损性能随 WER 掺量增大呈现先增大后降低的趋势; 在级配 S、级配 Z 中 w_{WER} 为 1.5%、1.0% 时, CRMFB 的 ITS_R 可分别增大 11.8% 和 7.1%, 满足规范要求; CRMFB 的空隙率随 WER 掺量增加均呈降低趋势. 分析其原因: (1) 在混合料拌和过程中, WER 能够单独裹附松散的细集料而形成环氧树脂胶浆, 随着水分的蒸发, 生成黏结性能强、致密性高的聚合产物 (见图 2); (2) 水泥砂浆的空隙直径在几纳米至几千纳米之间, 因此 WER 能够对水泥砂浆中较大的空隙进行填充, 减少空隙数量, 提高密实性; (3) WER 中亲水性羟基和醚基能够吸附在水泥颗粒及水泥砂浆表面, 与水泥中的 Ca^{2+} 产生作用, 生成交联网络聚合物和胶性膜, 增强了水泥砂浆的致密性, 但 WER 掺量过高, 形成的胶性膜会隔断水泥砂浆的互联结构, 影响水泥产物结构的生成, 因此抗水损性能增长缓慢甚至下降^[12]; (4) 适量 WER 可与沥青胶浆形成交联结构, 对沥青颗粒有一定嵌锁和加筋作用, 提高混合料的致密性和稳定性^[13].

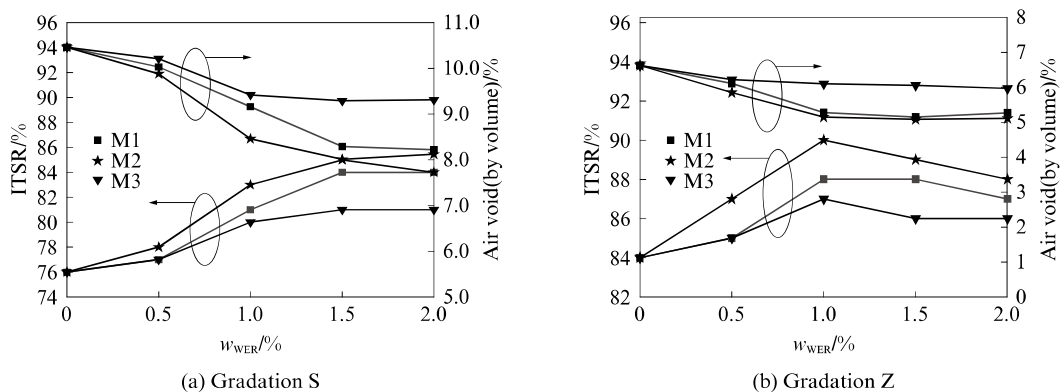


图 1 不同掺加方式和掺量下 CRMFB 的干湿劈裂强度比和空隙率

Fig. 1 ITS_R and voidage of CRMFB under different mixing methods and dosage

由图 1 还可见: 对比不同掺加方式 CRMFB 的抗水损性能, M2 最佳, M1 次之, M3 最差. 这是因为 M2 方式下, WER 随拌和水均匀地分布在胶结料中, 提高了其在混合料中的分散性, 充分发挥其对胶结料黏附性的改善作用; 而 M3 是在混合料生产结束后加入 WER, 此时 WER 难以进入水泥胶浆与泡沫沥青胶浆

内部形成交联紧密的聚合物, 因此 CRMFB 性能较差. 对比 CRMFB 的 2 种级配, 级配 Z 混合料抗水损性能优于级配 S 混合料, 且其 ITS_R 达到最大时, WER 掺量较少, 这是因为级配 Z 在设计时充分考虑了集料的抗剪切性能和密实性, 且相比于级配 S, 级配 Z 的细集料含量较少, 所需的黏结剂也较少. 综上,

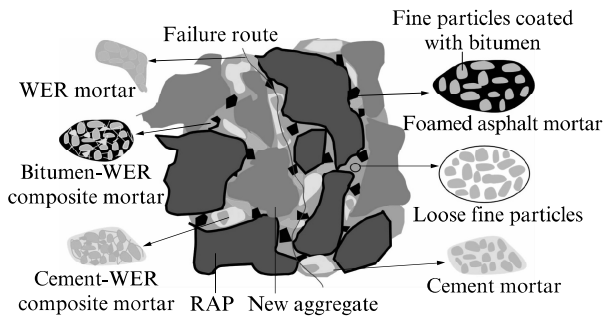


图2 WER掺入后 CRMFB 微观结构图示
Fig.2 Microstructure diagram of CRMFB with WER

就抗水损性能而言,建议级配 S 和级配 Z 混合料中 WER 的最佳掺量分别为 1.5% 和 1.0%。

2.1.2 高温稳定性

不同掺加方式和掺量下 CRMFB 的动稳定度 DS 如图 3 所示。由图 3 可见:随 WER 掺量增加,

CRMFB 的高温稳定性(以 DS 表征)呈先升高后趋于稳定甚至下降的趋势;级配 S 和级配 Z 的 CRMFB 中 WER 的最佳掺量分别为 1.5%、1.0%;最佳掺量下,级配 S 和级配 Z 的 CRMFB 动稳定度分别提高了 50.6%、34.7%。这是因为:一方面,WER 能与细集料形成黏结性能强的胶浆,且与水泥砂浆和沥青胶浆形成交联紧密的网状结构,提高了混合料中胶结料与集料的黏结性能;另一方面,WER 为热固性材料,且环氧固化产物具有嵌锁效果,WER 固化物穿过沥青分子,将黏度下降的沥青“锁住”,阻碍沥青分子流动,提高混合料在高温下的黏结性能和稳定性。但 WER 掺量过高时,环氧树脂在水泥产物表面成膜,影响水泥水化反应的进程,且 WER 固化物支撑荷载的能力小于水泥砂浆,因此,高 WER 掺量下 CRMFB 高温稳定性不再提高甚至有所下降。下文 CRMFB 中 WER 均采用最佳掺加方式和掺量。

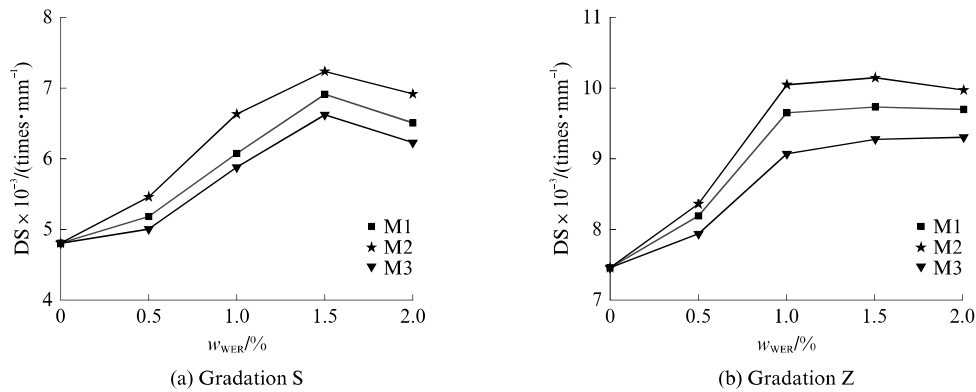


图3 不同掺加方式和掺量下 CRMFB 的动稳定度
Fig.3 Dynamic stability of CRMFB with different WER addition methods and amounts

2.2 储存时间和储存温度对 CRMFB 性能的影响

2.2.1 抗水损性能

不同储存时间及储存温度下 CRMFB 的干湿劈裂强度比见图 4。由图 4 可见:随着储存时间的增

加,CRMFB 的抗水损性能整体呈下降趋势;30 min 内,混合料抗水损性能削弱较小,而 45 min 以上,当储存温度为 20、40 °C 时,混合料的抗水损性能大幅度下降,甚至不满足规范限值 ITSR=80% 的要求。

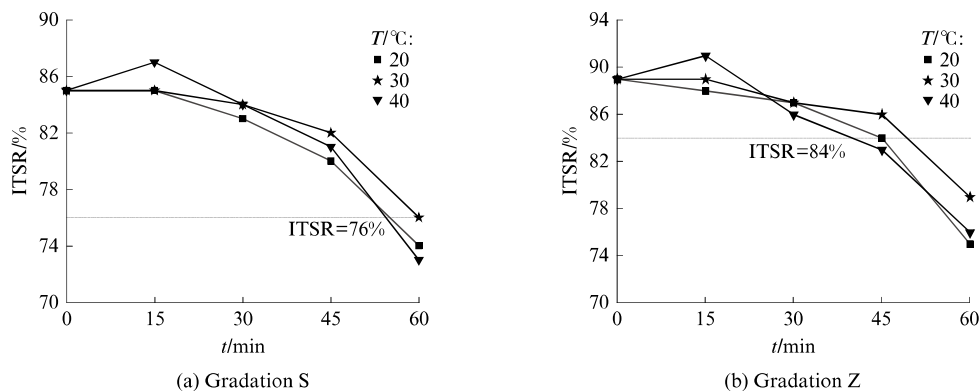


图4 不同储存时间和储存温度下 CRMFB 的干湿劈裂强度比
Fig.4 ITSR of CRMFB at different storage times and storage temperatures

WER 的固化产物呈透明,不同储存时间和储存温度下 WER 的固化过程见图 5. 由图 5 可见:当温度为 20 °C 时,WER 固化速度慢,但随着储存时间的增加,混合料温度下降明显,泡沫沥青胶浆结团,成型时不易压实,影响混合料的抗水损性能^[14];当温度升高至 40 °C 时,WER 的固化速度加快,当储存时间小于 15 min 时,WER 的固化程度仍较低,而混合料温度的提高降低了沥青的黏度,提高了混合料

的压实效果,抗水损性能显著提高,但随着储存时间的增加,WER 固化程度较高,成型试件时破坏了其交联结构,影响胶结料性能和密实性,混合料的抗水损性能有所下降;当储存温度为 30 °C 时,混合料中沥青胶浆的结团现象较少,且当储存时间小于 45 min 时,WER 固化程度仍较低,混合料具有较好的抗水损性能,当储存时间超过 45 min 以后,水泥胶浆的硬化加剧,混合料抗水损性能则大幅降低.

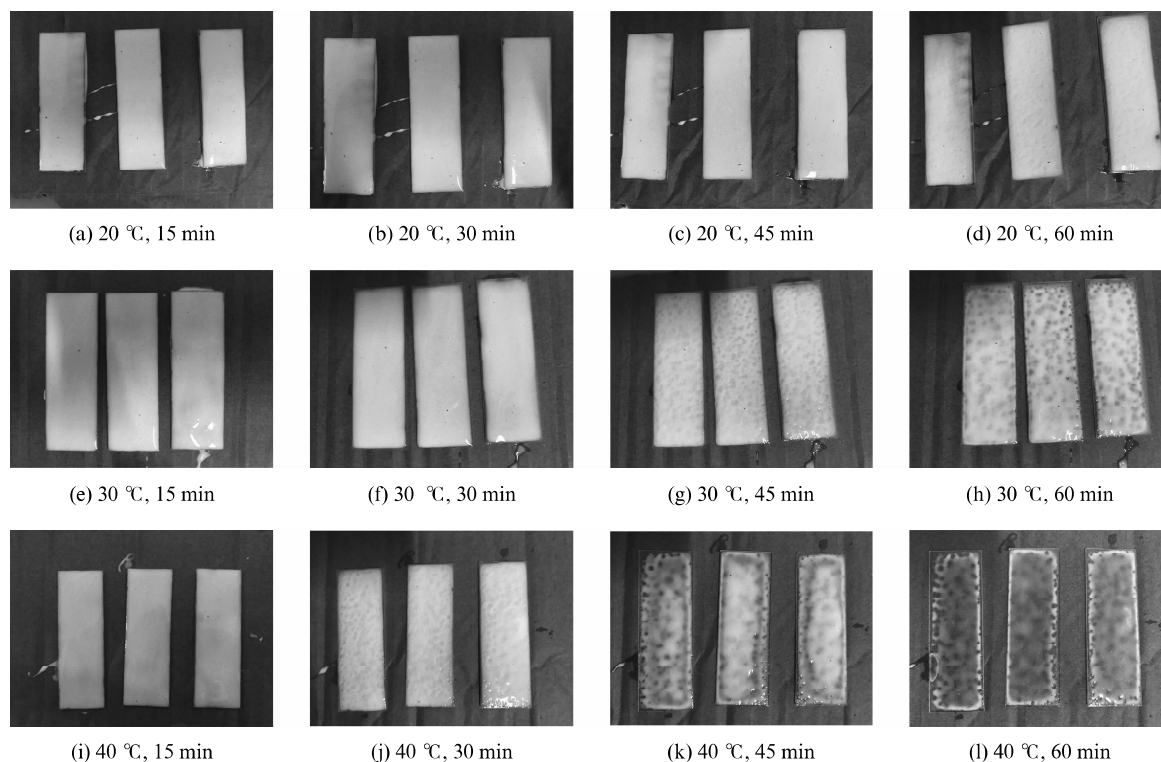


图 5 不同储存时间和储存温度下 WER 的固化过程

Fig. 5 Curing process of WER at different storage times and storage temperatures

2.2.2 高温稳定性

不同储存时间和储存温度下 CRMFB 的动稳定度如图 6 所示. 由图 6 可见:CRMFB 高温稳定性随储存时间增加呈加速下降趋势;储存温度对混合料高温稳定性有较大影响,其中温度过低或过高对 CRMFB 高温稳定性均有较大削弱. 分析其原因:当储存温度为 20 °C 时,混合料温度随储存时间增加持续下降,沥青胶结料及沥青颗粒结团,不利于混合料压实,而在 60 °C 车辙试验时,结团的沥青胶浆软化,降低了胶结料黏聚力和混合料的高温稳定性,当储存时间大于 45 min 时,水泥浆逐渐硬化,成型过程破坏水泥胶砂结构,降低胶结料黏结性能和混合料压实效果,混合料高温稳定性急剧下降;当储存温度为 40 °C 时,混合料温度较高,沥青结团现象减少,高温稳定性提高,但当储存时间大于 30 min 时,WER

固化程度提高,水泥浆逐渐硬化,导致混合料和易性变差,且破坏了环氧固化结构 and 水泥砂浆结构,高温稳定性急剧下降. 由图 6 还可知,级配 Z 的 CRMFB 高温稳定性远优于级配 S,这是因为级配 Z 在设计时充分考虑了骨架的抗剪切性能,当胶结料性能不佳时,骨架的抗剪作用发挥重要作用.

2.2.3 其他路用性能

通过前文,确定混合料制备条件为:WER 的掺加方式为 M2;级配 S、级配 Z 的 CRMFB 的 WER 最佳掺量分别为 1.5%、1.0%;储存时间为 45 min;储存温度为 20、40 °C. 对 CRMFB 抗压、抗拉和抗冻性能等路用性能进行验证,具体试验结果如表 6 所示. 由表 6 可见,在本文提出的 WER 掺加方式、最佳掺量、储存时间及储存温度限值内,CRMFB 的抗压、抗拉和抗冻性能均满足规范要求.

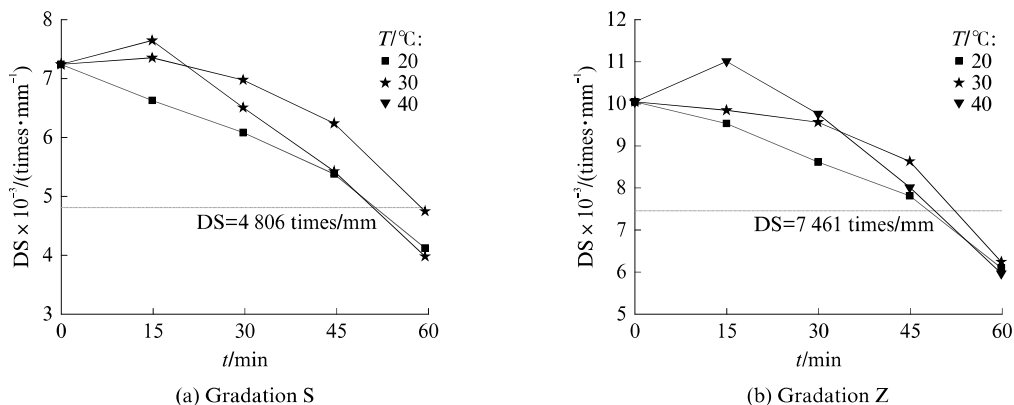


图 6 不同储存时间和储存温度下混合料的动稳度

Fig. 6 Dynamic stability of CRMFB under different storage times and storage temperatures

表 6 CRMFB 的其他路用性能
Table 6 Other road performance of CRMFB

Gradation	Storage temperature/°C	f_{UCS}/MPa	f_{ITS}/MPa	TSR/%
S	20	1.72	0.61	82.6
	40	1.86	0.58	83.3
Z	20	2.14	0.72	85.1
	40	2.22	0.67	84.7
DB33/T 715—2018		1.60	0.50	80.0

3 结论

(1) 水性环氧树脂通过裹附松散细集料形成高黏结性的热固性胶浆,并生成固化产物对水泥砂浆的危害空隙进行填充,对沥青分子产生“嵌锁”作用等方式改善了泡沫沥青冷再生混合料的性能。

(2) 水性环氧树脂的最佳掺加方式是先将其加入拌和水中,搅拌均匀后再与矿料一起加入拌和锅内。

(3) 掺入适量的水性环氧树脂可有效提高泡沫沥青冷再生混合料高温稳定性和抗水损性能,在最佳掺量和掺加方式下,级配 S 和级配 Z 混合料抗水损性能分别提高 11.8% 和 7.1%,高温稳定性分别提高 50.6% 和 34.7%,同时混合料抗压、抗拉和抗冻性能均满足规范要求。

(4) 储存时间和储存温度对水性环氧树脂改性泡沫沥青冷再生混合料性能有较大影响,为充分发挥水性环氧树脂的改善作用,建议混合料在 45 min 内从拌和厂运送至现场摊铺压实,当施工气温较低或较高时,运输时间宜控制在 30 min 内。

参考文献:

[1] 姚柒忠. 泡沫沥青再生混合料强度形成结构的微观研究及性能

分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.

YAO Qizhong. Microscopic study and performance analysis of strength formation structure of foamed bituminous recycled mixture[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018. (in Chinese)

[2] 邓海斌, 拾方治, 谭乐, 等. 泡沫沥青冷再生混合料高温稳定性改善方法的试验研究[J]. 公路, 2018, 63(5): 237-241.

DENG Haibin, SHI Fangzhi, TAN Le, et al. Experimental study on improving the high temperature stability of foamed asphalt cold recycled mixture[J]. Highway, 2018, 63(5): 237-241. (in Chinese)

[3] 沈凡. 水泥-乳化沥青-水性环氧复合胶结钢桥面铺装材料研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2012.

SHEN Fan. Research on composite steel bridge deck pavement of cement-emulsifying asphalt and waterborne epoxy [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2012. (in Chinese)

[4] 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 Xiujun, HUI Zhifu, YAN Huizhong, et al. Experimental analysis of adhesive performance of waterborne epoxy modified emulsified asphalt [J]. Journal of Building Materials, 2019, 22(1): 160-166. (in Chinese)

[5] 李秀君, 毕伟林, 拾方治, 等. 水性环氧树脂对 SBR 乳化沥青的复合改性作用[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2018, 37(11): 40-46.

LI Xiujun, BI Weilin, SHI Fangzhi, et al. Research on the compound modification effect of waterborne epoxy resin on sbr emulsified asphalt [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University(Natural Science), 2018, 37(11): 40-46. (in Chinese)

[6] 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.

LI Xiujun, WANG Chen, BI Weilin, et al. Study on road durability of multilevel built-in waterborne epoxy micro-surfacing [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2019, 36(11): 17-23. (in Chinese)

[7] 李泉. 水性环氧乳化沥青厂拌冷再生混合料性能试验研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2016.

- LI Quan. The performance study on the plant cold recycling mixture of the waterborne epoxy emulsified asphalt [D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2016.
- [8] 李亚菲. 不同水性环氧树脂掺量乳化沥青冷再生混合料耐久性试验研究[J]. 公路工程, 2016, 41(5): 82-87, 101.
- LI Yafei. Study on durability of emulsion asphalt cold recycled mixture with different dosage of waterborne epoxy resin[J]. Highway Engineering, 2016, 41(5): 82-87, 101. (in Chinese)
- [9] 汪德才, 郝培文, 李瑞霞, 等. 乳化沥青冷再生混合料低温抗裂性的试验研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2020, 44(1): 64-68.
- WANG Decai, HAO Peiwen, LI Ruixia, et al. Experimental study on low temperature anti-cracking performance of emulsified asphalt cold recycled mixture [J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2020, 44(1): 64-68.
- [10] 杜顺成, 戴经梁. 以剪切模量为控制指标的级配设计方法[J]. 公路交通科技, 2010, 27(5): 47-51.
- DU Shuncheng, DAI Jingliang. Grading design method based on shear modulus[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2010, 27(5): 47-51. (in Chinese)
- [11] 陈森荣. 水性环氧树脂改性乳化沥青胶结料界面粘结性能研究[J]. 公路交通技术, 2019, 35(5): 36-41.
- CHEN Miaoying. Study on interfacial adhesion properties of water epoxy emulsified asphalt binder[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2019, 35(5): 36-41. (in Chinese)
- [12] 黄展魏, 陈伟, 李秋, 等. 水性环氧树脂改性水泥砂浆力学性能及微观结构[J]. 硅酸盐通报, 2017, 36(8): 2530-2535, 2540.
- HUANG Zhanwei, CHEN Wei, LI Qiu, et al. Mechanical properties and microstructure of waterborne epoxy resin modified cement mortar[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2017, 36(8): 2530-2535, 2540. (in Chinese)
- [13] 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 Qiwei, LING Tianqing, HAO Zengheng, et al. Feature analysis of waterborne epoxy resin emulsified asphalt blend [J]. Journal of Building Materials, 2018, 21(3): 414-419. (in Chinese)
- [14] 李秀君, 拾方治, 田原. 施工气温对泡沫沥青冷再生混合料性能的影响[J]. 建筑材料学报, 2013, 16(2): 289-293, 305.
- LI Xiujun, SHI Fangzhi, TIAN Yuan. Effect of construction temperature on properties of cold recycling mixture with foamed bitumen [J]. Journal of Building Materials, 2013, 16(2): 289-293, 305. (in Chinese)