

# 水性环氧树脂乳化沥青对开级配 抗滑磨耗层性能的影响

石福周,吴佳云,贾小军,王震,刘晓佩

(兰州理工大学 土木工程学院,甘肃 兰州 730050)

**摘要:**为了提高现有黏结材料的黏结性能,进而改善开级配抗滑磨耗层的抗滑耐磨性,制备不同掺量的水性环氧树脂乳化沥青,通过基本性能试验与黏结性能试验,确定水性环氧树脂的最佳掺量;借助荷载磨耗试验,研究了不同黏结材料对开级配抗滑磨耗层(OGFC-5)抗滑性能与抗剥落性能的影响。结果表明:添加水性环氧树脂可有效地改善乳化沥青的高低温性能与黏结性能,最佳掺量为20%;经20 000次荷载作用后,水性环氧树脂抗滑磨耗层的抗滑性能与抗剥落性能最好,摩擦系数降幅为28.57%,构造深度降幅为33.33%,质量剥落率最低为3.25%。

**关键词:**道路工程;抗滑磨耗层;黏结材料;抗滑性能

中图分类号:U416.217 文献标志码:A

## Effect of Waterborne Epoxy Emulsified Asphalt on Performance of Open—graded Skid—resistant Wearing Course

SHI Fu-zhou, WU Jia-yun, JIA Xiao-jun, WANG Zhen, LIU Xiao-pei

(School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, Gansu, China)

**Abstract:** In order to improve the bonding performance of the existing bonding materials, so as to enhance the skid and abrasion resistance of the open-graded skid-resistant wearing course, emulsified asphalt was prepared with different amounts of waterborne epoxy. Through the tests on basic performance and bonding performance, the optimal amount of waterborne epoxy was determined. Based on the load abrasion test, the effects of different bonding materials on the skid and stripping resistance of the open-graded skid-resistant wearing course (OGFC-5) were studied. The results show that the addition of waterborne epoxy can effectively improve the performance at high and low temperature and the bonding performance of the emulsified asphalt, and the optimal amount is 20%; after 20 000 times of loading, the open-graded skid-resistant wearing course with waterborne epoxy has the best skid and stripping resistance, with the coefficient of friction decreasing by 28.57%, the structural depth decreasing by 33.33%, and the lowest mass stripping rate being 3.25%.

**Key words:** highway engineering; skid-resistant wearing course; bonding material; skid resistance

## 0 引言

随着中国路网的不断扩展,交通量不断增长,繁重的交通量使路面抗滑性能与耐久性能不断下降,

交通安全事故频发,而处于多雨、重载等特殊环境下的高速公路安全事故更为严重<sup>[1-2]</sup>。为保障道路运营安全,道路行业研究学者对具有提升道路行驶安全与使用品质的各类养护技术开展了大量研究<sup>[3-7]</sup>;

收稿日期:2019-10-18

基金项目:甘肃省自然科学基金项目(1508RJZA073)

作者简介:石福周(1973-),男,甘肃白银人,副教授,工学博士,研究方向为道路工程。

Im J H 等对比了聚合物改性乳液与未改性乳液作封层黏结材料时的性能差别,表明聚合物改性乳液可显著改善抗滑封层的黏结性能、抗松散剥落性能与抗车辙能力<sup>[8-9]</sup>;Pretorius F J 等系统分析了不同级配的抗滑磨耗层的抗滑效果<sup>[10]</sup>;王秋胜等研究了级配组成与粉胶比对 Novachip-13 混合料性能的影响,确定了粗细集料比例与粉胶比对 Novachip-13 型超薄抗滑磨耗层性能的影响较为显著<sup>[11]</sup>;周铮等研究了改性树脂超薄抗滑磨耗层(HFS)的高低温及水稳定性能,提出了适用于钢桥面铺装的 HFS 技术<sup>[12]</sup>;胡曙光等研究了镶嵌式冷铺抗滑磨耗层材料的级配以及胶浆掺量对其力学性能与路用性能的影响规律,确定了胶浆的最佳掺量为 14%<sup>[13]</sup>;王玉江等将橡胶粉加入到开级配抗滑磨耗层 OGFC-13 中,系统研究其路用性能与降噪效果<sup>[14]</sup>;林生峰等研究了纤维对开级配抗滑磨耗层(OGFC)路用性能的影响规律,试验表明,纤维能提高 OGFC 沥青混合料的高温稳定性和抗车辙能力<sup>[15]</sup>。综上所述,现有开级配抗滑磨耗层的研究主要集中在黏结材料、填料与级配对开级配抗滑磨耗层路用性能的影响等方面,且已有研究表明表面聚合物改性乳液对抗滑封层的性能有一定的提升作用,但相关研究并未对性能优良的黏结材料展开研究,关于不同黏结材料

对开级配抗滑磨耗层性能影响的研究相对较少。

鉴于此,本文基于制备不同掺量水性环氧树脂乳化沥青的试验,研究不同掺量水性环氧乳化沥青的基本性能与黏结性能变化规律,确定水性环氧乳化沥青最佳掺量;并研究了不同黏结材料对开级配抗滑磨耗层抗滑性能与抗剥落性能的影响规律,为开级配抗滑磨耗层的应用提供参考。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 试验材料

针对目前常用的改性乳化沥青黏度低、黏附性差等问题,选择固化后具有较高强度与黏结能力的水性环氧树脂作为改性剂,对阳离子乳化沥青直接进行改性。水性环氧树脂与固化剂选自济宁华凯树脂有限公司,技术指标见表 1。阳离子乳化沥青选自北京正泰兴达公路材料有限公司,同时为确定水性环氧树脂乳化沥青与常用 SBS 改性乳化沥青的性能差别,选择该公司生产的 SBS 改性乳化沥青进行对比,性能指标详见表 2。抗滑磨耗层所用集料为优质玄武岩,技术指标详见表 3,矿粉为石灰岩矿粉。普通集料与矿粉洁净、干燥、无杂质。原材料各项指标均符合《公路沥青路面施工技术规范》(JTGF 40—2004)的要求。

表 1 水性环氧树脂及固化剂的技术指标

原材料名称	外观	固含量/%	比重/(g·cm <sup>-3</sup> )	黏度/(Pa·s)	pH 值	环氧值	活泼氢当量
水性环氧树脂	乳白色液体	≥58	1.05~1.10	≤2	6~8	0.24~0.27	
固化剂	淡黄色液体	≥50	1.05~1.10	≤10	8~10		300

表 2 SBS 改性乳化沥青与乳化沥青技术指标

原材料名称	沥青标准黏度/s	筛上剩余量/%	24 h 存储稳定性/%	5 d 存储稳定性/%	蒸发残留物性能		
					针入度(25℃)/0.1 mm	软化点/℃	延度(10℃)/cm
SBS 改性乳化沥青	17.4	0.004	0.03	2.7	63.4	61.3	34.5
乳化沥青	10.3	0.01	1.0	3.8	65.5	49.5	22

表 3 集料主要技术指标

原材料名称	压碎值/%	磨耗值/%	表观相对密度	吸水率/%	与沥青的黏附性/%	针片状含量/%	磨光值(PSV)
玄武岩	17.1	13.8	2.8	0.96	5	10.2	46

### 1.2 级配

鉴于目前国内外关于开级配抗滑磨耗层级配范围的系统研究较少,无规范可供参考,本文调查相关单位及工程应用中选用的开级配抗滑磨耗层级配范围,综合考虑,选择交通部公路科学研究院推荐的 OGFC-5 级配,见表 4。

### 1.3 试验方法

(1)水性环氧树脂乳化沥青制备方法。将不同掺量的水性环氧树脂与固化剂加入到乳化沥青中,固化剂含量为水性环氧树脂掺量的 70%,利用剪切仪以 500 r·min<sup>-1</sup> 的速度剪切 10 min,混合均匀后即可制得水性环氧树脂乳化沥青。

表 4 OGFC-5 混合料级配要求范围及合成级配

筛孔尺寸/mm	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
OGFC-5 推荐范围/%	100	85~100	15~35	8~20	4~15	2~11	0~9	0~5
OGFC-5 合成级配/%	100	94	27	15	8	6	5	4

(2)水性环氧乳化沥青性能测试方法。水性环氧乳化沥青蒸发残留物的软化点、延度、针入度以及水性环氧树脂乳化沥青的黏度、筛上剩余量与贮存稳定性均参照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E 20—2011)进行测试。水性环氧乳化沥青剪切强度与拉拔强度均参照《道桥用防水涂料》(JC/T 535—2005)中的相关规定进行测试,其中剪切仪竖向应力为 0.2 MPa,剪切速率为 20 mm·min<sup>-1</sup>,拉拔仪拉拔速率为 5 mm·min<sup>-1</sup>。

(3)乳化沥青抗滑磨耗层性能测试方法。磨耗试验采用磨耗试验机进行,荷载为 0.7 MPa,构造深度与抗滑摆值的测试参照《公路路基路面现场测试规程》(JTG E 60—2008)的相关规定进行。

## 2 水性环氧树脂乳化沥青最佳掺量

### 2.1 掺量对乳化沥青蒸发残留物三大指标的影响

改性乳化沥青蒸发残留物的 25℃ 针入度、软化点与 5℃ 延度可表征改性乳化沥青的稠度、高低温性能,是改性乳化沥青的重要评价指标,因此研究水性环氧树脂 10%、20%、30% 三种掺量对水性环氧树脂乳化沥青蒸发残留物三大指标的影响,测试结果如图 1 所示。

分析图 1 可知以下几点。

(1)随着水性环氧树脂掺量的增加,25℃ 针入度不断减小,软化点不断增大,而 5℃ 延度表现出先增大后减小的趋势,其中水性环氧树脂掺量为 10% 的 3 项性能指标均低于 SBS 改性乳化沥青,而掺量增加到 20% 时,针入度低于 SBS 改性乳化沥青,软化点与延度均高于 SBS 改性乳化沥青。

(2)随着水性环氧树脂掺量由 10% 增加至 30%,相比乳化沥青,25℃ 针入度降幅为 6.42%~28.1%,并逐渐接近规范下限;5℃ 延度在水性环氧树脂掺量为 20% 时达到最大值,增幅为 19.5%;当水性环氧树脂掺量由 10% 增加到 20% 时,软化点的提高幅度较为显著,为 14.55%,而掺量由 20% 增加到 30% 的过程中,软化点改善幅度相对较缓,增幅为 5.86%。综上,建议水性环氧树脂掺量为 20%。

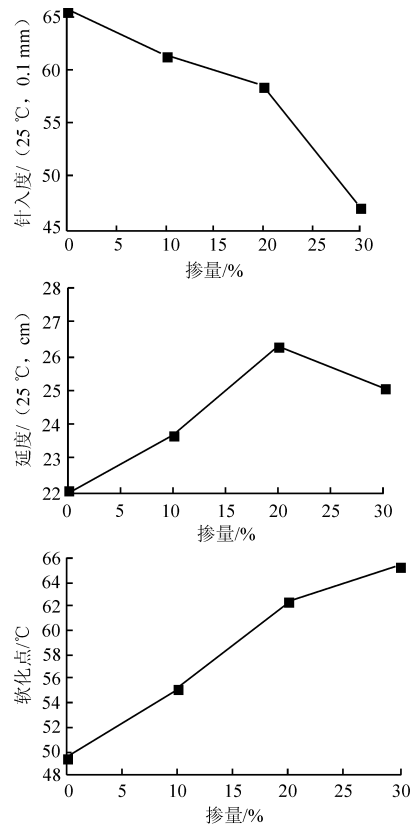


图 1 水性环氧树脂掺量对蒸发残留物三大指标的影响

### 2.2 掺量对乳化沥青黏度及筛上剩余量的影响

黏度可表征水性环氧树脂的流动性,筛上剩余量反映的是乳化沥青中是否存在未乳化的沥青块,它与乳化沥青的质量有关。因此研究水性环氧树脂 10%、20%、30% 三种掺量下水性环氧树脂乳化沥青黏度及筛上剩余量的变化规律,测试结果如图 2 所示。

分析图 2 可知:随水性环氧树脂掺量的不断增加,乳化沥青标准黏度不断增大,且均优于 SBS 改性乳化沥青,当掺量由 0 增加至 10% 时,增加幅度较缓,而在掺量由 10% 增加到 30% 时,增幅显著增加;筛上剩余量随水性环氧树脂掺量的增加不断减小,在水性环氧树脂掺量为 20% 时趋于平缓。综合考虑,建议水性环氧树脂掺量为 20%。

### 2.3 掺量对乳化沥青贮存稳定性的影响

贮存稳定性可表征水性环氧树脂乳化沥青在一定时间内的稳定性,是评价乳化沥青质量的重要指

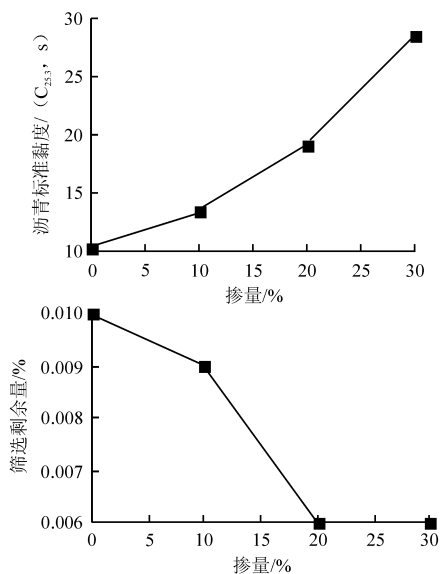


图2 水性环氧树脂掺量对黏度及筛上剩余量的影响

标,因此研究了水性环氧树脂 10%、20%、30% 三种掺量下水性环氧树脂乳化沥青贮存稳定性的变化规律,测试结果如图 3 所示。

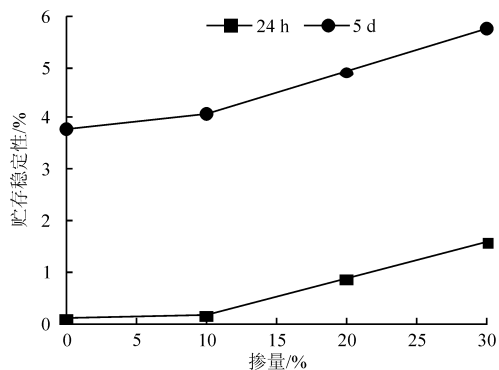


图3 水性环氧树脂掺量对乳化沥青贮存稳定性的影响

分析图 3 可知:随着水性环氧树脂掺量的增加,乳化沥青 24 h 与 5 d 的贮存稳定性均不断降低,在掺量由 0 增加至 10% 的过程中,降低幅度不太显著;当掺量由 10% 增加至 30% 时,贮存稳定性显著降低;且在水性环氧树脂掺量为 30% 时,24 h 与 5 d 的贮存稳定性已不满足规范要求。因此,建议水性环氧树脂掺量不超过 20%。

#### 2.4 掺量对乳化沥青黏结性能的影响

为确定水性环氧树脂的掺加对乳化沥青黏结性能有何改善情况,以抗剪强度与拉拔强度为评价指标,测试常温(25℃)下不同掺量水性环氧树脂乳化沥青的抗剪强度与拉拔强度,并与乳化沥青与 SBS 乳化沥青进行对比。水性环氧树脂乳化沥青 25℃ 的剪切与拉拔试验结果如图 4 所示。

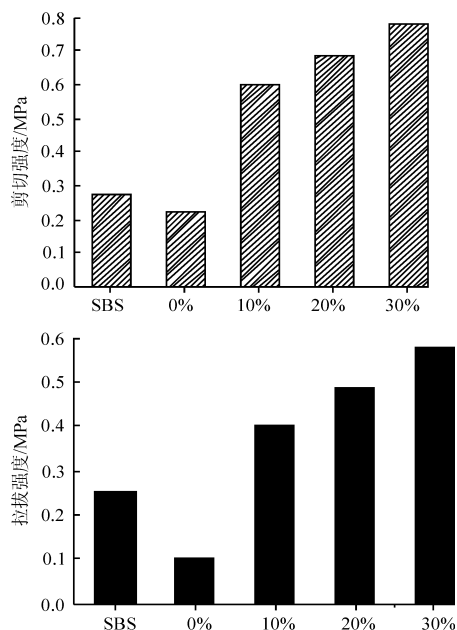


图4 25℃不同水性环氧树脂掺量的乳化沥青抗剪强度与拉拔强度

分析图 4 可知,随水性环氧树脂掺量的增加,乳化沥青抗剪强度与拉拔强度均得到显著提升,当水性环氧树脂掺量由 10% 增加至 30%,水性环氧树脂乳化沥青的抗剪强度是乳化沥青的 1.73~2.54 倍,是 SBS 乳化沥青的 1.22~1.89 倍,拉拔强度是乳化沥青的 3~4.8 倍,是 SBS 乳化沥青的 0.6~1.32 倍。综上可知,水性环氧树脂的添加可有效提高乳化沥青的黏结性能。

### 3 开级配抗滑磨耗层性能评价

#### 3.1 抗滑性能评价

为确定水性环氧树脂乳化沥青对开级配抗滑磨耗层 OGFC-5 抗滑性能的影响,使用上文确定的最佳掺量为 20% 的水性环氧树脂乳化沥青,参照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTGE 20—2011)制备开级配抗滑磨耗层车辙板试件,测试不同作用次数后试件的摩擦系数(BPN)与构造深度(TD),具体试验结果如图 5 所示。

分析图 5 可知:随荷载作用次数的增加,开级配抗滑磨耗层的抗滑性能均出现不同程度的衰减,3 种黏结材料初始抗滑性能均相差不多,但随荷载作用次数的增减,使用水性环氧树脂乳化沥青的抗滑磨耗层抗滑性能衰减程度最为缓慢,其次为 SBS 改性乳化沥青,使用乳化沥青的抗滑磨耗层衰减程度最为严重;经 20 000 次荷载作用后,水性环氧树脂

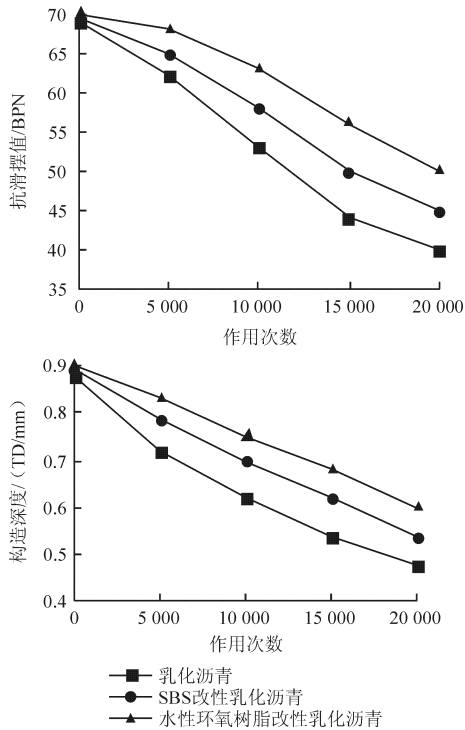


图5 不同作用次数下开级配抗滑磨耗层抗滑性能变化规律

抗滑磨耗层摩擦系数与未磨耗时相比降幅为 28.57%，构造深度降幅为 33.33%；SBS 改性乳化沥青摩擦系数降幅为 35.25%，构造深度降幅为 39.33%；乳化沥青摩擦系数降幅为 42.03%，构造深度的降幅为 45.45%。这表明水性环氧树脂乳化沥青相比其他黏结材料具有更加优异的耐磨性能。

### 3.2 抗剥落性能评价

在磨耗试验中，由于试件表面摩擦力的作用，使得试件表面极易发生剥落现象，测试试件在不同作用次数下集料的剥落质量，计算试件在不同作用次数下的质量剥落率，分析水性环氧乳化沥青对开级配抗滑磨耗层抗剥落性能的影响规律。试验结果如图 6 所示。

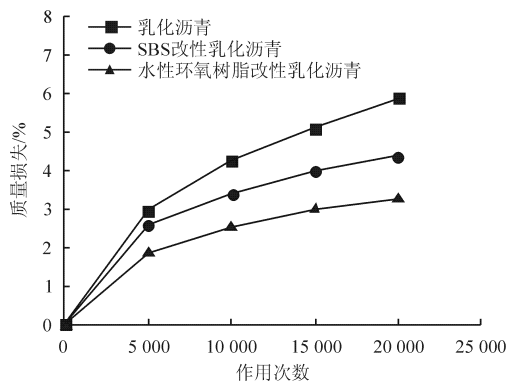


图6 不同作用次数下开级配抗滑磨耗层抗剥落性能的变化规律

分析图 6 可知：随荷载作用次数的增加，开级配抗滑磨耗层质量剥落率均不断增加，但 3 种黏结材料质量剥落率的增长速度均不相同，其中使用水性环氧树脂乳化沥青的抗滑磨耗层的质量剥落率增长速度最小，其次为 SBS 改性乳化沥青，使用乳化沥青的抗滑磨耗层质量剥落率增长速度最大，经 20 000 次荷载作用后，水性环氧树脂抗滑磨耗层质量剥落率为 3.25%，SBS 改性乳化沥青质量剥落率为 4.37%，乳化沥青质量剥落率为 5.89%，这表明水性环氧树脂乳化沥青相比其他黏结材料抗剥落性能更佳。

## 4 结 语

(1) 本文确定了水性环氧树脂掺量对乳化沥青基本性能的影响规律，随水性环氧树脂掺量的增加，25℃针入度、筛上剩余量与贮存稳定性不断降低，软化点与沥青标准黏度不断增大，而 5℃延度表现出先增大后减小的趋势，综合考虑，建议水性环氧乳化沥青最佳掺量为 20%。

(2) 以抗剪强度与拉拔强度为评价指标，评价了水性环氧乳化沥青掺量对乳化沥青黏结性能的影响规律，当水性环氧树脂掺量由 10% 增加至 30%，乳化沥青的抗剪强度最高可提高 2.54 倍，拉拔强度可提高 4.8 倍。

(3) 评价了 3 种黏结材料对开级配抗滑磨耗层抗滑性能的影响规律，经 20 000 次荷载作用后，水性环氧树脂抗滑磨耗层的抗滑性能降低幅度最小，摩擦系数降幅为 28.57%，构造深度降幅为 33.33%。

(4) 评价了 3 种黏结材料对开级配抗滑磨耗层抗剥落性能的影响规律，经 20 000 次荷载作用后，水性环氧树脂抗滑磨耗层质量剥落率最低为 3.25%。

### 参考文献：

[1] WANG D, CHEN X, YIN C, et al. Influence of Different Polishing Conditions on the Skid Resistance Development of Asphalt Surface[J]. *Wear*, 2013, 308(1-2): 71-78.

[2] REZAEI A, MASAD E. Experimental-based Model for Predicting the Skid Resistance of Asphalt Pavements[J]. *International Journal of Pavement Engineering*, 2013, 14(1): 24-35.

[3] HDABI A, AL N A, SETON H, et al. Performance of Gap Graded Cold Asphalt Containing Cement Treated Filler[J]. *Construction and Building Material*, 2014, 69(2): 362-369.

[4] GUO Z Y. Mixture Design of Fire-retarded OGFC in Road

(下转第 76 页)

(3)VA 含量增加会使 EVA 结晶度降低、极性增强,同时 VA 基团形成短支链的影响愈显著,由此使得相同 EVA 掺量下,改性剂中 VA 含量增加,改性沥青体系塑性增强,即黏度降低、车辙因子减小、极性分量增加、色散分量减小。高 VA 含量不利于提升体系高温稳定性和黏聚性。

参考文献:

[1] 刘宁. 直投式沥青混合料改性剂及其作用机理[J]. 筑路机械与施工机械化, 2018, 35(10): 50-52, 59.  
 [2] SENGOZ B, ISIKYAKAR G. Evaluation of the Properties and Microstructure of SBS and EVA Polymer Modified Bitumen[J]. Construction and Building Materials, 2008, 22(9): 1897-1905.  
 [3] 黄卫东, 吕伟民, 李套岭. EVA 改性沥青的研究[J]. 上海公路, 1999(1): 31-33.  
 [4] 刘亚. 聚合物改性环氧沥青的微观形貌和性能研究[D]. 南京: 南京大学, 2018.  
 [5] 范维玉, 任施松, 梁明, 等. EVA 分子结构对其改性沥青性能的影响[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2017, 41(5): 159-168.  
 [6] 袁昭华. EVA 改性沥青混合料的技术性能及施工工艺[J]. 中国公路学报, 1994, 7(1): 14-27.  
 [7] 吴恒澜, 丁雪佳, 薛海蛟, 等. EVA/EPDM 共混改性沥青的动态剪切流变性能[J]. 中国塑料, 2009, 23(5): 32-36.  
 [8] 沈化荣, 吕伟民. EVA 改性沥青的工艺特性与路用性能[J].

石油沥青, 1999, 13(2): 19-23.

[9] 陈燕娟, 高建明, 陈华鑫. 基于表面能理论的沥青-集料体系的粘附特性研究[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2014, 44(1): 183-187.  
 [10] 刘亚敏, 韩森, 李波. 基于表面能理论的沥青与矿料黏附性研究[J]. 建筑材料学报, 2010, 13(6): 769-772.  
 [11] CHENG D. Surface Free Energy of Asphalt-aggregate System and Performance Analysis of Asphalt Concrete based on Surface Free Energy[D]. College Station, USA: Texas A & M University, 2002.  
 [12] 魏建明. 沥青、集料的表面自由能及水分在沥青中的扩散研究[D]. 青岛: 中国石油大学, 2008.  
 [13] 杜蓉华. 表面自由能理论在沥青混合料中的应用研究现状[J]. 山西交通科技, 2016(2): 13-15.  
 [14] FOWKES F M. Dispersion Force Contributions to Surface and Interfacial Tensions, Contact Angles, and Heats of Immersion[J]. Advances in Chemistry Series, 1964, 43(1): 99-111.  
 [15] OWENS D K, WENDT R C. Estimation of the Surface Free Energy of Polymers[J]. Journal of Applied Polymer Science, 1969, 13(8): 1741-1747.  
 [16] YOUNG T. An Essay on the Cohesion of Fluids[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 1805, 95(3): 65-87.  
 [17] 肖庆一, 薛航, 徐金枝, 等. 基于表面能理论的沥青路面水损坏模型研究[J]. 武汉理工大学学报, 2007, 29(5): 71-73, 97.

[责任编辑: 杜卫华]

(上接第 70 页)

Tunnel[J]. Road Materials & Pavement Design, 2005, 6(2): 255-268.  
 [5] PASAQUINI E, CANESTRARI F, CARDONE F, et al. Performance Evaluation of Gap Graded Asphalt Rubber Mixture[J]. Construction and Building Material, 2011, 25(4): 2014-2022.  
 [6] 姚晓光, 张争奇, 罗要飞, 等. 间断级配纤维微表处性能及指标研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2016, 47(9): 3264-3272.  
 [7] 赵喆. 超黏磨耗层与纤维同步碎石封层的应用对比研究[J]. 公路, 2017(1): 215-219.  
 [8] IM J H, KIM Y R. Methods for Fog Seal Field Test with Polymer-modified Emulsions[J]. Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board, 2013, 2361(1): 88-97.  
 [9] IM J H, KIM Y R. Performance Evaluation of Chip Seals for Higher Volume Roads Using Polymer-modified Emulsions;

Laboratory and Field Study in North Carolina[J]. Journal of Testing & Evaluation, 2016, 44(1): 20140544.

[10] PRETORIUS F J, WISE J C, HENDERSON M. Development of Application Differentiated Ultra-thin Asphalt Friction Courses for Southern African Application[C]//Proceedings of the 8th Conference on Asphalt Pavements for Southern Africa (CAPSA'04). 2004, 12: 16.  
 [11] 王秋胜. 超薄抗滑磨耗层结构组成的优化设计[J]. 中外公路, 2017, 37(1): 254-257.  
 [12] 周铮, 陈强, 孙杨勇, 等. 新型超薄抗滑磨耗层钢桥面铺装的试验研究[J]. 中外公路, 2015, 35(1): 284-288.  
 [13] 胡曙光, 卢吉, 赵明宇, 等. 镶嵌式冷铺抗滑磨耗层材料性能研究[J]. 武汉理工大学学报, 2015, 37(3): 1-7.  
 [14] 王玉江, 周翔. 橡胶高粘改性升级配抗滑(磨耗)层降噪性能研究[J]. 中外公路, 2013, 33(6): 302-305.  
 [15] 林生峰, 张荣辉. 纤维对升级配抗滑磨耗层沥青混合料性能的影响[J]. 新型建筑材料, 2010, 37(9): 75-77.

[责任编辑: 杜卫华]