

文章编号:1671-8879(2017)06-0017-07

紫外光谱法评价乳化沥青破乳过程

孔令云^{1,2},唐樊龙^{2,3},徐 燕⁴,赵品晖⁴,张玉贞¹

(1. 中国石油大学(华东)化学工程学院,山东 青岛 266580; 2. 重庆交通大学 交通土建工程材料国家地方联合工程实验室,重庆 400074; 3. 中国科学院青岛生物能源与过程研究所,山东 青岛 266555; 4. 内江市交通运输局,四川 内江 641000)

摘 要:为了研究和评价乳化沥青的破乳过程,将现代分析仪器及化学计量算法应用到道路材料学研究领域,以紫外可见光谱和 Lambert-Beer 定律为基本原理,采用 CR22G II 高速离心机通过给乳化沥青附加离心场加速破乳,并引入紫外吸光度和乳化剂浓度这 2 个参数表征乳化沥青的破乳过程。在不同测试条件下,对乳化沥青以及经过集料拌和后的乳化沥青进行破乳过程验证。研究表明:乳化沥青破乳模拟方法显著影响破乳试验结果的精度,未经处理的乳化沥青上层清液浑浊,溶液中含有大量悬浮的沥青颗粒,对试验结果产生较大影响,导致紫外光谱测量结果紊乱,无法表征乳化沥青破乳过程;而经过处理后的上层清液含有极少悬浮状沥青颗粒,溶液清澈透明,所得紫外光谱图线性良好,与实际吻合。乳化沥青在高速离心场下能加速破乳,随着时间的推移,体系中的乳化剂浓度不断上升至一个定值,具体在紫外光谱图中表现为吸光度值不断上升直至趋于平稳状态,也即达到破乳平衡状态。对有紫外吸光度的乳化剂采用适当的乳化沥青加速破乳条件,用紫外分光光计法,并将所取上层清液中的乳化剂浓度控制在一定的范围内,根据紫外光谱图及 Lambert-Beer 定律能够精确描述乳化沥青破乳全过程;该方法可有效区分不同集料/乳化沥青系统的破乳速度。

关键词:道路工程;乳化沥青;Lambert-Beer 定律;紫外光谱;破乳速度

中图分类号:U414 **文献标志码:**A

Evaluation of emulsified asphalt demulsification process by UV spectrum method

KONG Ling-yun^{1,2}, TANG Fan-long^{2,3}, XU Yan⁴, ZHAO Pin-hui⁴, ZHANG Yu-zhen¹

(1. College of Chemical Engineering, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, Shandong, China; 2. National & Local Joint Engineering Laboratory of Transportation and Civil Engineering Materials, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 3. Qingdao Institute of Bioenergy and Bioprocess Technology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266555, Shandong, China; 4. Neijiang Transportation Bureau, Neijiang 641000, Sichuan, China)

Abstract: In order to research and evaluate the demulsification process of emulsified asphalt, modern analysis instruments and chemical measurement algorithm were applied to the field of road materials by omics technology. With UV spectrum and Lambert Beer law as the basic

收稿日期:2017-04-22

基金项目:国家自然科学基金项目(51508062);重庆市基础科学与前沿技术研究项目(cstc2017jcyjAX0367);

重庆市教委科学技术研究项目(KJ1500508)

作者简介:孔令云(1976-),女,江苏如皋人,教授,工学博士,E-mail:43112443@qq.com。

principle, CR22G II high-speed centrifuge was adopted to accelerate the demulsification by adding centrifugal field to emulsified asphalt, two parameters, involving UV absorbance and the concentration of emulsifier, were introduced to character the demulsification process of emulsified asphalt. And under different test conditions, the demulsification process of emulsified asphalt and emulsified asphalt after aggregate mixing was verified. The results show that emulsified asphalt demulsification simulation method significantly affects the accuracy of demulsification test results. Untreated emulsified asphalt supernatant is cloudy. The solution containing a large amount of suspension asphalt particles has great influence on the test results, leading to the disorder of the UV spectrum measurement, which can not characterize the emulsification process of emulsified asphalt. And after processing, the supernatant liquid has few slurry asphalt particles, the solution is clear and transparent, and the UV spectra obtains good linear in accordance with the practicality. Emulsified asphalt in high speed centrifugal field can accelerate the demulsification. As time goes on, the concentration of emulsifier in the system continues to rise to a constant value, which is manifested in UV spectrum as the absorbance value continues to rise until it reaches a steady state, that is, reaches the demulsification equilibrium state. For emulsifier with UV absorbance, the use of appropriate emulsified asphalt can accelerate the demulsification conditions to accelerate the demulsification conditions. The concentration of emulsifier in the supernatant is controlled within a certain range by UV spectral light meter. According to the UV spectra and Lambert-Beer law, the whole process of emulsified asphalt demulsification can be accurately described. This method can effectively distinguish different aggregate/demulsification velocity of emulsified asphalt system. 4 tabs, 8 figs, 24 refs.

Key words: road engineering; emulsified asphalt; Lambert-Beer law; UV spectrum; demulsification speed

0 引言

乳化沥青类沥青混合料因其低碳、环保、使用空间大、性价比高等优点,越来越广泛地被应用于道路工程中,尤其是公路的维修养护等工程中^[1]。但是,破乳速度的控制问题逐渐成为继乳化沥青类冷拌混合料使用寿命短之后的另一个重要问题^[2-3]。

关于乳化沥青破乳过程、破乳速度的研究方法,目前主要是《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011) T0658—1993 中关于乳化沥青破乳速度的试验^[4]。该方法不足之处是:试验结果主观性强,只能定性分析,不能给出定量试验结果。《微表处和稀浆封层技术指南》中给出的拌和试验、破乳时间试验^[5],其弊端也是试验的主观性问题,不同人员操作,其试验结果可能存在较大差异,试验的重复性、再现性均较差。范宏建提出通过延缓击实时间与稳定度的关系图的方法,分析乳化沥青冷再生混合料的破乳时间规律,以确定破乳时间^[6];张久鹏等采用 Romero 等提出的乳化沥青胶浆黏度随破

乳过程的深入而增大的理论,对改性乳化沥青胶浆体系的破乳过程展开了研究^[7-10];李锋等利用旋转压实仪对不同养护时间下成型的试件,通过压实圈数、压实高度、15℃劈裂强度的曲线变化来确定破乳速度,认为在乳化沥青破乳后,混合料难以压实,压实高度变化不明显,且强度会达到最大值,以此来定量评价乳化沥青冷再生混合料破乳时间^[11];李云良等通过水泥乳化沥青胶浆粒径和新拌 CA 复合胶浆黏度的变化研究了 CA 胶浆体系的破乳过程^[12]。

综上,目前针对乳化沥青破乳过程、破乳速度的研究手段主要有:主观类、胶浆类、沥青混合料类。上述研究手段较为复杂,过程控制性因素多,试验的重复性、复现性较差。基于此,本文从紫外吸光度的角度^[13-15],提出快速、客观的评价乳化沥青破乳过程、破乳速度的试验方法。

1 试验原材料

1.1 沥青及集料的选取

采用昆仑 AH-70 沥青作为基质沥青,严格按照

《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)进行试验,其主要性能满足表 1 要求,表明基质性能良好,可以作为制备乳化沥青的基质沥青。

表 1 沥青性能指标要求

Tab. 1 Requirements of asphalt performance indices

指标	指标要求 ^[4]	实测值	检验方法
针入度(25 ℃,100 g,5 s)/0.1 mm	60~80	62	T0604
延度(5 cm·min ⁻¹ ,10 ℃)/cm	≥100	≥100	T0606
软化点(环球法)/℃	42~52	46.5	T0605
闪点(COC)/℃	≥260	270	T0605
含蜡量(蒸馏法)/%	≤2.2	1.7	T0615
密度/(g·cm ⁻³)		2.74	T0611
溶解度(三氯乙烯)/%	≥99.5	99.9	T0607
薄膜加热试验后的残留物(163 ℃,5 h)	质量损失/%	≤0.8	T0603
	针入度比/%	≥54	T0609
	延度(5 cm·min ⁻¹ ,10 ℃)/cm	≥6	T0604

试验选取的集料为中国代表性路用石灰岩集料,并根据来源不同选取组分差异明显的石灰岩 1[#]、石灰岩 2[#] 作为试验集料。其基本性能见表 2。

表 2 集料的基本性能

Tab. 2 Aggregate basic performance

集料	粒径/mm	pH 值	碱值	Zeta 电位/mV	CaCO ₃ 含量/%	MgO 含量/%	SiO ₂ 含量/%
石灰岩 1 [#]	0.075	8.54	0.97	+20.38	50.19	2.41	4.31
石灰岩 2 [#]	0.075	8.87	0.84	+26.60	37.26	1.72	13.38

注:表中含量均为质量分数,下同。

由表 2 可知,石灰岩 1[#]、2[#] 的粒径、碱值、pH 值、Zeta 电位均无明显差异,石灰岩 2[#] 的 CaCO₃ 含量明显低于石灰岩 1[#],但其 SiO₂ 含量却较高。

1.2 乳化剂的选取

试验选取的乳化剂为美国 MeadWestvaco 公司提供的慢裂快凝型乳化剂 MQK-1D,其主要成分是由脂肪酸和多胺缩合生成的多胺基酰胺类化合物^[16],性质见表 3。

表 3 乳化剂 MQK-1D 的基本性质

Tab. 3 Basic properties of emulsifier MQK-1D

参数	密度(25 ℃)/(g·cm ⁻³)	物理形态	闪点/℃	倾点/℃	黏度(25 ℃)/(Pa·s)
参数值	1.02	液体	190	12	9.700

1.3 乳化沥青的制备

使用胶体磨进行乳化沥青制备,工艺流程如图

1 所示。

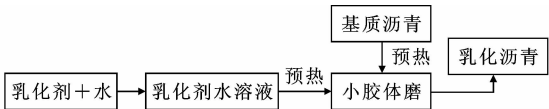


图 1 乳化沥青的制备工艺

Fig. 1 Preparation technology of emulsified asphalt

乳化沥青的制备工艺为:①将沥青加热至130 ℃~140 ℃,计量后备用;②将乳化沥青助剂加入水中,按一定的比例稀释,备用;③按照配比将乳化剂和稀释后的乳化沥青助剂溶于 40 ℃~80 ℃ 的水中,配制成皂液,并调整其 pH 到指定值;④将计量好的沥青和皂液同时经过胶体磨乳化,得到沥青乳液,冷却至室温制得乳化沥青成品。

1.4 乳化沥青性能检测

乳化沥青性能的基本检测主要考虑乳化沥青的恩氏黏度、筛上剩余量、蒸发残留物含量、蒸发残留物性质检测、颗粒粒径、贮藏稳定性等方面^[17],结合《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40—2004)中乳化沥青的性能要求对乳化沥青的性能进行检测^[18],结果如表 4 所示。

表 4 乳化沥青的性能测试结果

Tab. 4 Aggregate performance test results

指标	指标要求 ^[18]	试验结果
乳化剂用量 w _t /%		2
外观	浅褐色液体、均匀、无机械杂质	合格
粒子电荷		阳
恩氏黏度(25 ℃)	5~30	3.2
筛上剩余量(1.18 mm 筛)/%	≤0.1	0
残留物含量/%	≥60	60.86
残留物针入度(25 ℃,100 g,5 s)/0.1 mm	40~120	57
残留物延度(5 cm·min ⁻¹ ,15 ℃)/cm	>150	69
残留物软化点/℃		47.9
水泥混合性/%	<1.0	0.45
1 d 贮存稳定性/%	≤1.0	5.9
5 d 贮存稳定性/%	≤5.0	10.85

2 试验原理及试验设计

2.1 试验基本原理

乳化沥青在常温状态下为黑色黏稠状乳液,在外界条件发生改变时(机械搅拌、集料拌和、破乳剂)会出现破乳,但其在破乳过程中,从外观形貌上很难发现本质性区别,无法直接对乳化沥青破乳速度进行评价^[19-20]。但乳化沥青破乳过程的本质为油水两相的分离,在外界离心场下,水包油平衡体系被打

破,作为分散相的沥青微滴在离心力的作用下迅速聚集并下沉,而作为连续相的乳化剂分子迅速逃逸出乳液体系并悬浮于上层清液中,随着乳化沥青破乳的不断进行,上层清液中乳化剂浓度也随之增加,直至达到破乳平衡。基于此,本文采用紫外光谱法,通过考察上层清液中乳化剂浓度的变化来表征乳化沥青的破乳速度。

2.2 试验设计

2.2.1 试验仪器及设备

主要仪器和设备:分析天平、移液枪、量筒、烧杯(40 mL)、玻璃滴管、离心管(50 mL)、石英比色皿、离心设备选用 CR22G II 高速离心机,离心半径为 15 cm,最高转速为 15 000 r/min;紫外光谱仪为 Lambda25 紫外分光光度计,如图 2 所示。



图 2 CR22G II 高速离心机和 Lambda25 紫外分光光度计
Fig. 2 CR22G II high speed centrifuge and Lambda25 spectrophotometer

2.2.2 乳化剂浓度标准曲线建立

乳化剂选用 MQK-1D,浓度为 1%,进行全波段(200~900 nm)紫外扫描,发现乳化剂 MQK-1D 在可见光区域存在明显的紫外吸收,同时可以确定该乳化剂的紫外最大吸收波长 $\lambda_{\max}=304\text{ nm}$ 。

根据乳化沥青制备工艺中该乳化剂使用浓度为 2%,本试验选取乳化剂浓度分别为 1%、0.8%、0.5%、0.4%、0.2%、0.1%、0.05%、0.02%、0.01%。根据 304 nm 处的吸光度值建立乳化剂浓度和吸光度值的标准曲线,结果如图 3 所示。

由图 3 可以看出,乳化剂 MQK-1D 在浓度 0.01%~1% 范围内吸光度与浓度存在良好的线性关系,满足 Lambert-Beer 定律(当浓度为 2% 时,由于溶液浓度过高,已不满足 Lambert-Beer 定律的线性关系,即所测溶液的吸光度值必须在该拟合直线范围内才适用,若浓度过高则需进行稀释后方可进行吸光度值测量)。说明可以通过紫外光谱法来表征乳化沥青的破乳速度。

2.2.3 乳化沥青破乳过程模拟

取等量的乳化沥青 40 g,离心(温度 20 ℃)不同

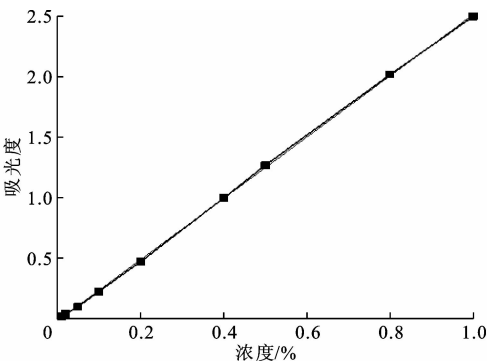


图 3 乳化剂标准浓度曲线(紫外吸光度)
Fig. 3 Emulsifier normal concentration curve (UV absorbance)

时间 t 后取上层清液进行紫外光谱测量,为得到合适的破乳过程模拟条件,现对该过程进行 3 次重复模拟:模拟过程 I,采用离心转速 3 000 r/min;模拟过程 II,采用离心转速 3 000 r/min,上层清液经过二次离心处理;模拟过程 III,采用离心转速 1 500 r/min,上层清液经过二次离心处理。测试过程如图 4 所示,测试结果如图 5~下页图 7 所示。

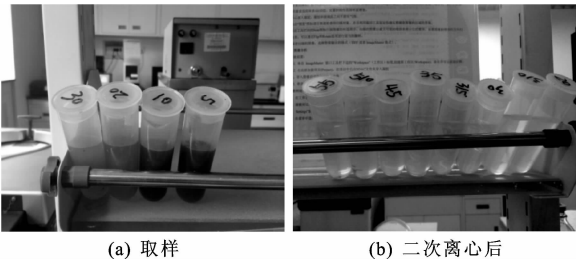


图 4 直接取样和经过二次离心后的上层清液
Fig. 4 Direct sampling and supernatant after two times of centrifugation

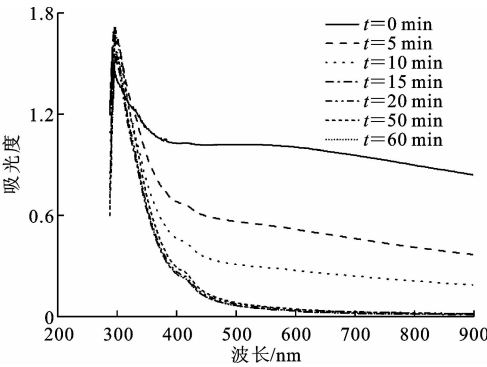


图 5 乳化沥青破乳过程模拟 I
Fig. 5 Simulation of emulsified asphalt demulsification process I

由上述试验结果可以看出:直接取样的上层清液浑浊,溶液中含有大量悬浮的沥青颗粒,对试验结果产生较大影响,导致紫外光谱测量结果紊乱,无法表征乳化沥青破乳过程;经过二次离心处理后的上层清液含有极少悬浮状沥青颗粒,溶液清澈透明,所

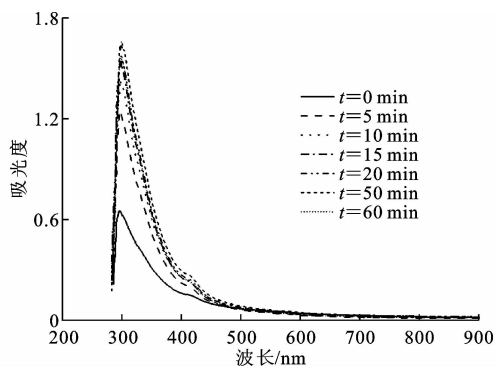


图6 乳化沥青破乳过程模拟Ⅱ

Fig. 6 Simulation of emulsified asphalt demulsification process II

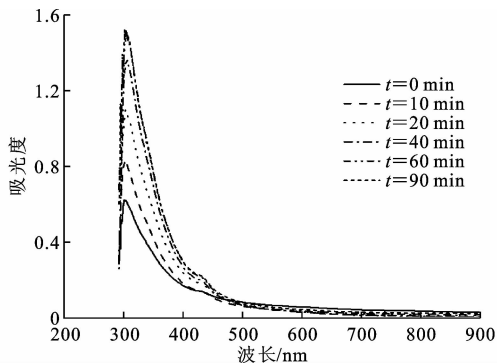


图7 乳化沥青破乳过程模拟Ⅲ

Fig. 7 Simulation of emulsified asphalt demulsification process III
得紫外光谱数据与实际乳化沥青破乳一致。

对比图6、图7可以看出:在转速3 000 r/min的条件下,乳化沥青破乳速度过快,在15 min时已经基本完成破乳;在转速1 500 r/min的条件下,乳化沥青的破乳过程出现均一等截距的紫外光谱曲线,破乳速度适中,满足破乳过程模拟的试验需求。因此试验确定以乳化沥青破乳过程模拟Ⅲ为最终破乳速度评价方法。

3 试验结果与分析

3.1 破乳速度评价

根据第2节乳化沥青破乳过程模拟所得的试验条件,对试验所选的乳化沥青进行破乳速度评价。选取乳化剂MQK-1D的最大吸收波长 $\lambda_{\max} = 304 \text{ nm}$ 作为单波长考察点,结果如图8所示。

由图8可知:在本试验条件下,乳化沥青MQK-1D在前40 min吸光度值上升较快,说明在此时间段内由于外界离心场的介入使得乳化沥青破乳速度较快;在40 min后出现第1个拐点,此时乳化沥青表现出趋于稳定的缓慢破乳;在60 min以后吸光度基本维持不变,说明此时乳化沥青已经完全破乳。

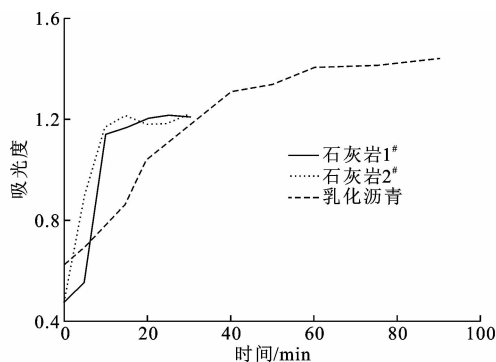


图8 破乳过程模拟

Fig. 8 Simulation of demulsification process

由于集料的拌和会对乳化沥青破乳速度产生影响^[21],为此选用上述石灰岩集料,采用紫外光谱法对石灰岩1[#]、石灰岩2[#]拌和后的乳化沥青(模拟过程Ⅲ,去上层清液,采用1 500 r/min离心后)进行破乳速度评价见图8。

由图8可以看出,随着集料石灰岩1[#]、石灰岩2[#]的加入,乳化沥青表现出不同的破乳速度。在加入石灰岩1[#]后,乳化沥青在10 min即出现拐点,说明集料的加入使得乳化沥青破乳速度明显加快;在加入石灰岩2[#]后,乳化沥青在15 min时也出现平衡点,相比于石灰岩1[#]其破乳速度略微减慢,但是较乳化沥青破乳速度依然明显加快。

3.2 分析与讨论

乳液的破乳实际上是油水两相之间界面的破裂^[22-24],在通常情况下,由于表面活性剂的存在,使得沥青颗粒通过乳化剂分子的桥接作用形成稳定的水包油乳状液。基于物理破乳法,通过对乳液施加外力,使乳液内部分子在离心场中迅速上浮或下沉,液滴之间频繁碰撞,使得油水界面膜破裂,加速了破乳,最终导致油水分离。

根据图8可以看出,乳化沥青在3种情况下的破乳速度由大到小的顺序依次为石灰岩1[#]、石灰岩2[#]、乳化沥青。

分析可知,由于集料的介入,使得乳液中的水相迅速与作为固相的集料接触并将其浸润,在其表面铺展形成一层吸附水膜。同时乳化剂分子的亲水基团也开始靠近集料,并通过毛细作用紧紧吸附于集料之上,此时亲油基团带动着沥青微滴也向集料表面靠近,并相互吸附、扩散、融合到一起,最终达到完全破乳。因此经过集料拌和后的乳化沥青破乳速度明显加快。

石灰岩1[#]的破乳速度略快于石灰岩2[#]。分析可知,尽管其集料均为石灰岩,但其组成成分却有显

著差异。石灰岩 1[#] 中的 CaCO_3 含量比石灰岩 2[#] 高 34.7%, 而 SiO_2 含量比 2[#] 集料低 63.7%。由于阳离子乳化沥青对碱性集料具有更强的吸附性和亲和性, 因此 CaCO_3 含量更高的石灰岩 1[#] 表现出更快的破乳速度, 而 SiO_2 含量更高的石灰岩 2[#] 破乳速度相对较慢。

本文研究发现, 部分乳化剂在紫外光谱范围内没有吸光度, 如十六烷基三甲基氯化铵、十八烷基三甲基氯化铵、十二烷基三甲基氯化等, 对于此类无紫外吸光度的乳化剂可采离心电导率法^[24] 进行评价。

4 结 语

(1) 提出采用紫外分光光度法评价乳化沥青破乳速度, 该方法可有效区分不同集料对乳化沥青破乳速度的影响。

(2) 乳化沥青破乳模拟方法显著影响破乳速度试验结果的精度, 本文推荐的乳化沥青加速破乳模拟方法为: 在转速 1 500 r/min 下离心, 然后其上层清液再次离心。

(3) 对有紫外吸光度的乳化剂, 采用本文提出的乳化沥青加速破乳条件, 用紫外分光光度法确定其破乳速度可行, 其浓度在小于 1% 时与紫外吸光度之间具有良好的线性关系, 可根据 Lambert-Beer 定律建立乳化剂标准浓度曲线。

(4) 本文仅对存在紫外吸收的乳化剂配制的乳化沥青破乳速度进行了研究, 由于现实中乳化剂类型多样, 且存在多种乳化剂复配, 使得紫外光谱法的应用具有一定的局限性, 其还需进一步研究; 还可开展对乳化沥青破乳速度的影响因素的细化研究, 从而建立乳化沥青破乳速度影响因素基因组学模型, 减少或避免大量重复性试验, 减少对物理试验的依赖, 使乳化沥青的研究发展快速化、高效化、全面化。

参考文献:

References:

- [1] 褚建军, 沈春林. 乳化沥青在喷涂速凝防水涂料中的应用[J]. 石油沥青, 2016, 30(2): 55-56.
CHU Jian-jun, SHEN Chun-lin. Application of emulsified asphalt in spraying rapid-hardening rubber-modified bitumen waterproof coating[J]. Petroleum Asphalt, 2016, 30(2): 55-56.
- [2] 李 波, 李艳博, 刘 祥. 电动力学在乳化沥青破乳速度测定中的应用[J]. 中外公路, 2015, 35(1): 279-283.
LI Bo, LI Yan-bo, LIU Xiang. Application of electro-

dynamics on emulsified asphalt emulsifying speed determination[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2015, 35(1): 279-283.

- [3] 徐 剑, 石小培, 秦永春. 乳化沥青冷再生路面性能衰变规律研究[J]. 公路交通科技, 2015, 32(1): 19-24.
XU Jian, SHI Xiao-pei, QIN Yong-chun. Research on performance decay law of emulsified asphalt cold recycled pavement[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2015, 32(1): 19-24.
- [4] JTG E20—2011, 公路工程沥青及沥青混合料试验规程[S].
JTG E20—2011, Standard test methods of bitumen and bituminous mixtures for highway engineering[S].
- [5] 交通部运输部公路科学研究院. 微表处和稀浆封层技术指南[M]. 北京: 人民交通出版社, 2006.
Research Institute of Highway Ministry of Transport. Micro table place and slurry seal technology guide[M]. Beijing: China Communications Press, 2006.
- [6] 范宏建. 关于乳化沥青冷再生混合料破乳影响因素研究[J]. 石油沥青, 2012, 26(5): 35-37.
FAN Hong-jian. Research on influencing factors of demulsification of cold recycling emulsified asphalt mixture[J]. Petroleum Asphalt, 2012, 26(5): 35-37.
- [7] 张久鹏, 朱红斌, 裴建中, 等. 基于龚帕斯模型的改性乳化沥青胶浆黏度与沥青破乳评价[J]. 交通运输工程学报, 2015, 15(5): 1-7.
ZHANG Jiu-peng, ZHU Hong-bin, PEI Jian-zhong, et al. Evaluation of asphalt demulsification and viscosity of modified asphalt emulsion mortar based on Gompertz model[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2015, 15(5): 1-7.
- [8] 张久鹏, 贾彦顺, 裴建中, 等. 集料特性对集料-改性乳化沥青胶浆黏度的影响[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2015, 45(3): 586-590.
ZHANG Jiu-peng, JIA Yan-shun, PEI Jian-zhong, et al. Effects of aggregate characteristics on viscosity of aggregate-modified emulsified asphalt mortar[J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2015, 45(3): 586-590.
- [9] ROMERO N, CÁRDENAS A, HENRÍQUEZ M, et al. Viscoelastic properties and stability of highly concentrated bitumen in water emulsions[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2002, 204(1/2/3): 271-284.
- [10] TADROS T. Viscoelastic properties of sterically stabilized emulsions and their stability[J]. Advances in

- Colloid and Interface Science, 2015, 222: 692-708.
- [11] 李 锋, 严金海, 韩 鹏. 乳化沥青冷再生混合料早期强度评价[J]. 中外公路, 2015, 36(4): 273-275.
LI Feng, YAN Jin-hai, HAN Peng. Early strength evaluation of cold recycling emulsified asphalt mixture [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2015, 36(4): 273-275.
- [12] 李云良, 欧阳剑, 王山山, 等. 水泥沥青复合砂浆拌合物乳化沥青破乳过程研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2015, 36(7): 997-1000.
LI Yun-liang, OUYANG Jian, WANG Shan-shan, et al. Research on the demulsification process of cement asphalt mortar mixture-emulsified asphalt [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2015, 36(7): 997-1000.
- [13] 代雷雷. 基于紫外光谱的水质有机物污染异常检测方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
DAI Lei-lei. Research on water organic quality anomaly detection techniques based on UV spectra [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.
- [14] 王 露, 熊 庆, 郭彩红, 等. 紫外光谱法结合化学计量学用于环境水样中 2,4,6-三硝基甲苯及其分解物的同时测定[J]. 分析化学, 2017, 45(5): 754-761.
WANG Lu, XIONG Qin, GUO Cai-hong, et al. Ultra-violet spectroscopy combined with chemometrics for simultaneous quantitative determination of 2,4,6-trinitrotoluene and its degraded products in environmental water sample [J]. Chinese Journal of Analytical Chemistry, 2017, 45(5): 754-761.
- [15] 柴淑玲, 杨莉燕, 李晓萌, 等. 聚氨酯/聚丙烯酸酯复合乳液的紫外光谱研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2005, 25(5): 757-760.
CHAI Shu-ling, YANG Li-yan, LI Xiao-meng, et al. Studies on the ultraviolet spectra of PU/PA composite emulsions [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2005, 25(5): 757-760.
- [16] 张芹芹. SBS 改性沥青的乳化对其应用性能影响的研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2012.
ZHANG Qin-qin. Study on the influence of emulsification on the properties of SBS modified asphalts [D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2012.
- [17] 范维玉, 杨炎生, 王 哲, 等. 稳定剂对乳化沥青蒸发残留物性能的影响[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2012, 36(4): 155-159, 165.
FAN Wei-yu, YANG Yan-sheng, WANG Zhe, et al. Effect of stabilizer on performance of asphalt emul-
- sion evaporation residue [J]. Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Science, 2012, 36(4): 155-159, 165.
- [18] JTG F40—2004, 公路沥青路面施工技术规范[S].
JTG F40—2004, Technical specifications for construction of highway asphalt pavements [S].
- [19] 宋哲玉, 徐培华, 陶家朴. 乳化沥青破乳机理研究[J]. 石油沥青, 1995, 9(3): 23-29.
SONG Zhe-yu, XU Pei-hua, TAO Jia-pu. A study of emulsion splitting mechanism for emulsified asphalt [J]. Petroleum Asphalt, 1995, 9(3): 23-29.
- [20] 冯 虎, 王友刚. 阳离子乳化沥青化学破乳试验研究[J]. 石油沥青, 2012, 26(5): 32-34.
FENG Hu, WANG You-gang. Experimental study on chemical breaking of cationic emulsified asphalt [J]. Petroleum Asphalt, 2012, 26(5): 32-34.
- [21] 许国伟, 程怡然, 汤艳琦. 粗集料对乳化沥青冷再生混合料性能的影响[J]. 石油沥青, 2011, 25(5): 32-35.
XU Guo-wei, CHENG Yi-ran, TANG Yan-qi. Influence of coarse aggregate on property of cold recycled mixture with emulsified asphalt [J]. Petroleum Asphalt, 2011, 25(5): 32-35.
- [22] 刘燕燕, 凌天清, 蒋 科. 基于断裂能纤维增强乳化沥青碎石封层的抗裂性能[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2012, 32(5): 201-207.
LIU Yan-yan, LING Tian-qing, JIANG Ke. Crack resistance of fiber-reinforced emulsion asphalt crushed stone seal based on fracture energy [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2012, 32(5): 201-207.
- [23] 王 宏. 不同水泥掺量乳化沥青冷再生混合料细观空隙分布特征[J]. 公路交通科技, 2016, 33(7): 27-34, 67.
WANG Hong. Meso-microscopic void distribution characteristics of emulsified asphalt cold recycled mixture with different cement contents [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2016, 33(7): 27-34, 67.
- [24] 孔令云, 唐樊龙, 徐 燕, 等. 集料的酸碱性对乳化沥青破乳速度影响[J]. 公路交通科技, 2016, 33(10): 1-6.
KONG Ling-yun, TANG Fan-long, XU-Yan, et al. Effect of aggregate acid-base property on emulsion asphalt demulsification speed [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2016, 33(10): 1-6.