

乳化沥青-水泥复合胶浆稠度研究

张庆^{1,2},董是^{1,3},常宏宇¹,侯德华^{3,4}

(1. 长安大学道路结构与材料交通行业重点实验室,陕西 西安 710064; 2. 河南师范大学绿色化学介质与反应教育部重点实验室,河南 新乡 453007; 3. 河南省高远公路养护技术有限公司,河南 新乡 453003; 4. 河南省高等级公路检测与养护技术重点实验室,河南 新乡 453003)

摘要 目的 研究乳化沥青-水泥复合胶浆的稠度性质,为乳化沥青混合料性能优化提供科学依据. 方法 采用自主研发的新型稠度测试仪,探究了水泥与乳化沥青不同用量比对复合胶浆稠度的影响,在此基础上,分析了水泥对乳化沥青-水泥复合胶浆稠度的贡献率. 结果 水泥与乳化沥青用量比为22%时,其胶浆稠度达到最大值,表现出较强的黏韧性;在25℃和45℃测试条件下,水泥稠度贡献率分别为65.5%和55.5%,且25℃测试条件下水泥对沥青黏结成膜状态的促进作用及其胶浆稠度的贡献程度更加显著. 结论 水泥和乳化沥青这两种胶结材料相互影响和制约,水泥水化物结构不仅对胶浆稠度具有提升作用,还对乳化沥青黏结成膜作用的优化具有一定的贡献.

关键词 乳化沥青;水泥;复合胶浆;稠度

中图分类号 TU535 文献标志码 A

Consistency Properties of Emulsified Asphalt-Cement Composite Mortar

ZHANG Qing^{1,2}, DONG Shi^{1,3}, CHANG Hongyu¹, HOU Dehua^{3,4}

(1. Key Laboratory of Road Structure and Material of Ministry of Communication of PRC, Chang'an University, Xi'an, China, 710064; 2. Key laboratory of Green Chemical Medium and Reaction of Ministry of Education of PRC, Henan Normal University, Xinxian, China, 453007; 3. Henan Gaoyuan Highway Maintenance Technology Co. Ltd., Xinxian, China, 453003; 4. Key Laboratory of High-grade Highway Detection and Maintenance Technology of Henan Province, Xinxian, China, 453003)

Abstract: The consistency of emulsified asphalt-cement composite cement was studied in order to provide a scientific basis for optimizing the performance of emulsified asphalt mixture. Effect of cement and emulsified asphalt different dosage ratio on the consistency of composite cement was studied by a new consistency tester independently developed. On this basis, the contribution rate of cement to the consistency of emulsified Asphalt-Cement composite mortar was analyzed. When the

收稿日期:2019-06-06

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFE0111000);河南省重大科技专项(151100310700);河南省杰出外籍科学家工作室资助项目(GZS2018006);新乡市重大科技专项(ZD19007)

作者简介:张庆(1979—),男,副教授,博士,主要从事道路结构与材料方面研究.

ratio of cement to emulsified asphalt is 22% ,the consistency of the composite mastic reaches the maximum, showing strong adhesiveness, At the same time, the contribution rates of cement consistency were 65.5% and 55.5% respectively at 25℃ and 45℃, under the test condition of 25℃, the contribution of cement to the adhesion formation of asphalt and composite mastic are more significant. Cement and emulsified asphalt interact and restrict each other. Cement hydrate structure not only enhances the consistency of composite mastic, but also contributes to the optimization of emulsified asphalt binder film formation.

Key words: emulsified asphalt; cement; composite mastic; consistency

乳化沥青混合料是由乳化沥青、水泥作为二元结合料与矿料拌和而成,其在常温或低温状态下仍具有较好的和易性,并且在工程实践中得到了广泛应用^[1-2]. 乳化沥青混合料强度由乳化沥青破乳形成的乳化沥青残留物、水泥水化生成的水泥水化物与石料粘结在一起共同起作用而形成^[3-4]. 胶浆理论认为沥青混合料是一种多级空间网状结构的分散系,沥青胶浆作为沥青混合料的一级分散介质,对混合料强度起着决定性作用. 刘矿军^[5]通过研究水泥掺量对沥青胶浆性能的影响,认为沥青胶浆是沥青混合料黏弹性的决定性因素,沥青混合料面层永久变形的产生与沥青胶浆的性质密切相关. 因此改善沥青混合料路用性能应该首先改善沥青胶浆性质^[6-7]. 杜少文等^[8]研究了水泥与沥青用量比对水泥乳化沥青混合料强度、收缩和疲劳性能的影响,并推荐出水泥与沥青用量比,但并未对水泥沥青复合胶浆的力学性能进行分析,而是通过水泥乳化沥青混合料的性能来确定水泥与沥青用量比. 其主要原因是目前对于沥青胶浆性能的评价方法是利用沥青测试指标评价沥青胶浆性能,而胶浆与沥青在组成上有较大的区别,测试时能否满足假设条件值得进一步商榷. 彭波等^[9]采用不同评价方法分析了沥青胶浆的性能,研究表明针入度仪测定沥青胶浆稠度是不精确的,胶浆是非均质的,测试结果显示出很大的离散性. L. Tashman^[10]采用旋转黏度试验测定沥青胶浆的黏度,研究认为胶浆可能存在填料沉

淀以及胶浆黏稠较大等问题,从而影响其测试结果. 同时试样桶与转子的间隙过小会造成填料颗粒摩擦试样桶侧壁而造成数据偏大. 李智慧等^[11]分析了沥青胶浆高低温性能的评价指标,认为应用动态剪切流变仪测得的重复蠕变劲度的黏性部分和应用弯曲梁流变仪测得的蠕变劲度模量分别作为沥青胶浆高低温性能的评价指标比较合理. 同样, H. Bahia等^[12]采用动态剪切流变仪评价沥青胶浆的流变特性,研究表明测试平板间距大于填料最大粒径两倍时,可以采用动态剪切流变仪评价沥青胶浆的性能,而 AASHTO 规范中规定若利用 DSR 测试胶浆时,掺加的填料粒径不应超过 0.250 mm. 由于狭义的填料粒径最大仅为 0.075 mm,所以 DSR 试验可以用于沥青胶浆性能评价. 但由于该仪器设备的价格高昂,在工程推广过程中很难普及,这就为沥青胶浆的评价带来了很大阻碍. 研究发现沥青胶浆的稠度是沥青混合料性质的重要指标之一^[13-14]. 通过分析沥青稠度指标与沥青常规指标的差别,以及稠度指标在重载交通沥青评价中的应用研究,表明稠度指标与沥青混合料车辙试验相关性较好,可以反映沥青混凝土路面的高温抗变形能力^[15]. 基于此,笔者采用自主研发的稠度仪建立了乳化沥青-水泥复合胶浆稠度测试方法,对乳化沥青-水泥复合胶浆稠度进行分析,并依据稠度提出水泥与乳化沥青用量比例,从而为乳化沥青混合料性能优化提供科学依据.

1 试验

1.1 试验原材料

试验选用克拉玛依 70#A 级沥青,其技

表 1 基质沥青技术指标

Table 1 Technical Indicators of Matrix Asphalt

技术指标来源	针入度(25℃)/ 0.1 mm	软化点/℃	延度(15℃)/ cm	薄膜加热试验(163℃,5h)		
				质量损失/%	残留针入度比 (25℃)/%	残留延度 (15℃)/cm
实测	68	49	>100	0.01	62.3	19
规范范围	60 ~ 80	≥46	≥100	≤0.8	≥61	≥15

乳化沥青的制备采用中裂快凝型阳离子乳化剂,沥青乳化试验使用鑫路 JM-5 乳化沥青试验机.在制备乳化沥青前,先用热水将乳化机转子预热到 70℃左右.将乳化剂提前稀释于定量的热水中,搅拌使其充分溶解,水温保持在 60℃,并调节 pH 值为 2~3.沥青加热温度控制在 140℃.先将乳化剂溶液置于剪切容器中,开动乳化机,之后把热沥青缓

技术指标符合《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40—2004),基质沥青技术指标如表 1 所示.

缓倒入剪切容器.在快速剪切乳化下使得沥青与皂液很好地乳化混合,形成稳定的乳化沥青,其技术指标符合《公路沥青路面再生技术规范》(JTG F41—2008),乳化沥青性能指标如表 2 所示.试验选用的水泥为普通硅酸盐水泥 P·O 42.5,其主要物理技术指标检测结果如表 3 所示.

表 2 乳化沥青性能指标

Table 2 Performance Indicators of Emulsified Asphalt

技术指标来源	破乳速度	粒子电荷	恩格拉黏度 E_{25}	筛上残留物 (1.18 mm 筛)/%	蒸发残留物			储存稳定性/%		
					残留分比例/%	针入度(25℃)/ 0.1 mm	延度(15℃)/ cm	溶解度/%	1 d	5 d
实测	中裂	阳离子 (+)	4.0	0.03	62.8	55	>100	98.8	0.4	3.8
规范范围	—	阳离子 (+)	3~30	≤0.1	≥62	50~300	≥40	≥97.5	≤1	≤5

表 3 水泥的物理技术指标

Table 3 Physical technical indexes of cement

技术指标来源	密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	比表面积/ ($\text{m}^2\cdot\text{kg}^{-1}$)	细度/%	初凝时 间/min	终凝时 间/min	3 d 抗压强 度/MPa	28 d 抗压强 度/MPa	三氧化硫质 量分数/%	氧化镁质 量分数/%
检测结果	3.02	380	3.2	170	305	21	50.7	2.1	3.7
技术标准	—	—	≤10	≥45	≤600	≥17	≥42.5	≤3.5	≤5

1.2 试验原理

试验采用河南省高远公路养护技术有限公司研发的新型稠度测试仪(见图 1)^[16],对不同水泥与乳化沥青用量比例的胶浆稠度进

行测试,该稠度测试仪如图 1(a)所示.胶浆稠度试验是在目标温度的水浴里以一定的剪切应变率剪切环形胶浆试样,由剪切过程中采集的剪切应力和应变率的比值定义为胶浆

稠度,是胶浆黏韧性的直观反映。图1(b)为自行研发的稠度测试仪的构造图。稠度试验的原理是通过剪切置于两个同轴圆筒间的环形沥青胶浆试样,以受控的应变率进行加载试验。加载期间可以测得位移和荷载,从而测定材料的稠度和黏韧性,稠度测试仪主要参数如表4所示。

试样模具主要包括A型和C型,以满足试验范围内的要求。A、C模是常规使用的标准模,分别用于较高的测试温度(45℃和60℃)和较低的测试温度(15℃和25℃)。样品模的几何参数如表5所示, G 为试模的厚度,mm; h 为试模高度,mm; m 为内环质量,

g ; d_1 、 d_2 分别为试模内径和外径,mm。实物如图2所示。

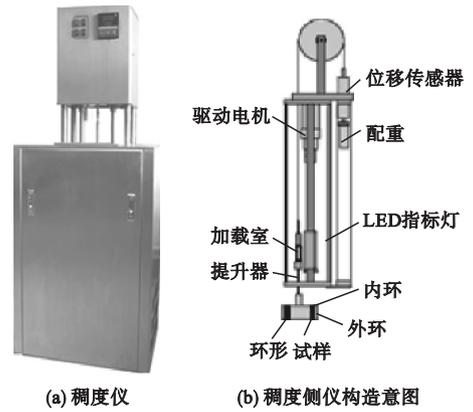


图1 新型稠度测试仪

Fig.1 New type consistency tester

表4 稠度测试仪主要参数

Table 4 Main parameters of consistency tester

型号	测力范围/N	测力精度/%	拉伸速度/(mm·s ⁻¹)	位移范围/mm	位移精度/mm	控温范围/℃	控温精度/℃
GYCD100A	0~300	0.1	0.5~100	0~10	0.05	5~100	±0.1

表5 A与C样品模几何参数

Table 5 Geometric Parameters of A and C Sample Module

试样模具	d_1 /mm	d_2 /mm	h /mm	m /g	G /mm
A模	25 ± 0.02	45 ± 0.02	40 ± 0.02	54.5 ± 0.02	10
C模	12 ± 0.02	22 ± 0.02	20 ± 0.02	18.8 ± 0.02	5

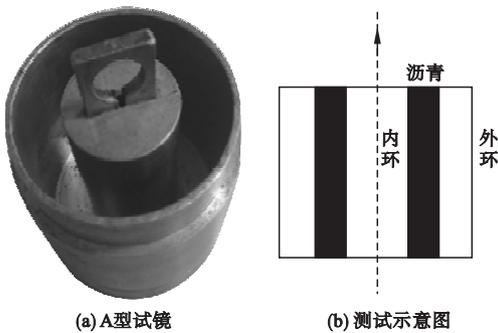


图2 稠度仪试模

Fig.2 Sample test model of consistency meter

1.3 试验方案

为提高稠度测试数据的客观性,须准确获取具有实际路用效果的乳化沥青-水泥胶浆残留物,同时也要考虑到水泥的水化反应需要足够的时间和用水量。传统试验常用的

高温蒸残乳化沥青获取残留物的方法对于制样存在一定的缺陷,主要是因为高温短时间条件下的乳化沥青蒸发残留物不利于水泥的水化反应,致使水泥仅以填料的形式存在,减少了水泥水化产物的生成,从而导致试验结果偏离乳化沥青-水泥胶浆的实际性能。因此,试验参考美国 AASHTO PP72-11 规程对其采用低温蒸残方法获取沥青胶浆残留物^[17]。稠度测试主要步骤:

(1) 将水泥分别按乳化沥青质量的 0%、6%、10%、14%、18%、22%、26%、30%、34%、42% 加入其中,并不间断的充分搅拌,使水泥能够均匀分布在乳化沥青中。

(2) 低温蒸残获取残留沥青胶浆的具体操作方法:将乳化沥青-水泥复合胶浆试样

倒在边长为 40 cm × 60 cm, 壁厚 1 cm 的正方形硅胶盘上, 并用抹刀涂布均匀, 形成覆盖厚度约为 1 mm 的乳化沥青 - 水泥膜。然后将托盘连同盛有试样的硅胶盘一起置于已恒温至 (60 ± 1) °C 的强制鼓风烘箱内, 保持 8 h 后从烘箱中取出后 (见图 3), 最后倒置于试模中。



图 3 低温蒸残获取乳化沥青 - 水泥胶浆残留物

Fig. 3 Emulsified Asphalt-Cement mortar residue obtained by low temperature steam residue

(3) 将试模放入水浴中恒温至测试温度。

(4) 固定外环, 拉伸内环, 记录拉伸过程中的拉力和拉伸速率, 并转换成沥青试样受到的剪应力和剪切应变率, 由此计算一定温度和剪变率下的胶浆稠度。胶浆稠度测试的基本原理与黏度基本概念完全同, 其稠度 C_d 计算式为

$$C_d = \frac{KFG}{S}, \quad (1)$$

$$K = \frac{2}{h\pi(d_1 + d_2)}. \quad (2)$$

式中: K 为试模应力系数; F 为最大拉力, N; S 为内柱体的拉出速度, mm/s。

2 复合胶浆稠度分析

2.1 水泥与乳化沥青用量比例对胶浆稠度影响

乳化沥青和水泥是组成复合胶浆的关键材料, 对不同水泥与乳化沥青用量比例的胶浆稠度进行试验, 测试温度为 25 °C, 测试结果

如图 4 所示。

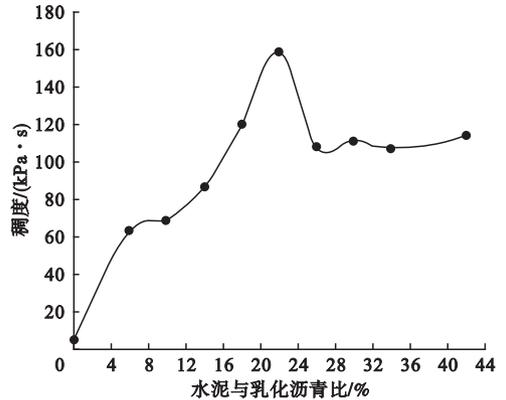


图 4 25 °C 胶浆组成对稠度的影响

Fig. 4 Effect of mastic composition on consistency at 25 °C

从图 4 中可以看出, 随着水泥与乳化沥青用量比例的增加, 复合胶浆稠度起初呈不断递增趋势, 然后又迅速上升, 直至稠度到达峰值, 表现出较强的黏韧性, 之后稠度又随着水泥与乳化沥青用量比例的增加而降低。这是由于前期随着水泥比例的增加, 水泥水化物随机分布在沥青胶浆中, 会增加胶浆的内摩阻力, 从而增加胶浆的剪切应力, 胶浆的稠度会逐渐上升, 但此时由于乳化沥青比例较高, 破乳后的沥青膜厚度较大, 会包裹水泥颗粒及其水化产物, 阻隔水泥的水化进程, 并且此时水泥水化产物大多被沥青膜包裹, 使得水泥水化产物直接搭接的空间结构尚未形成, 所以在这个阶段稠度上升幅度相对缓慢; 当水泥比例继续增加的时候, 单位体积胶浆内水泥增多而沥青减少, 有利于较多的水泥水化产物搭接成良好的空间结构形式, 并与沥青膜相互连接为网状的结构, 进一步提高了复合胶浆的稠度; 当水泥与乳化沥青用量比例过高的时候, 由于乳化沥青用量过少, 其破乳产生的水分不足以提供水泥充分水化所必需的水分, 使得水泥难以完全水化, 水泥对稠度的贡献作用被显著削弱。从图 4 可知, 在乳化沥青 - 水泥复合胶浆中, 水泥和乳化沥青这两种胶结材料相互影响和制约, 并且存在最佳的水泥与乳化沥青用量比使其稠度到

达最大值,在该试验条件下其比例为22%。

为进一步对比研究在较高温条件下水泥与乳化沥青用量对复合胶浆稠度的影响,在45℃条件下对其胶浆稠度进行测试,试验结果如图5所示。

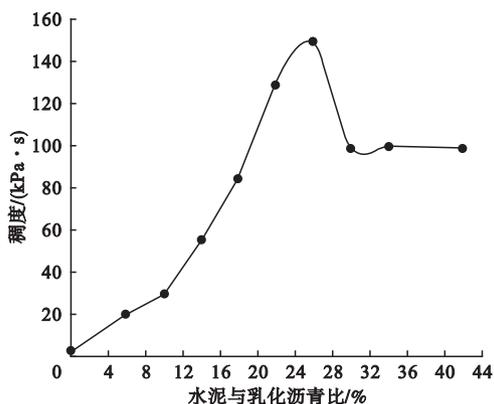


图5 45℃胶浆组成对稠度的影响

Fig. 5 Effect of mastic composition on consistency at 45℃

从图5可以看出,此温度下的稠度变化曲线与测试温度为25℃的变化趋势基本一致,也存在最佳的水泥与乳化沥青用量比例。说明当水泥与乳化沥青用量比例适宜的时候,水泥的水化物与沥青膜相互交织,形成了较为稳定的复合胶浆结构体系,这种胶浆结构具有良好的稠度,可有效保证混合料具有足够的黏韧性。对比两种测试温度下复合胶浆稠度随水泥与乳化沥青用量的变化情况,在相同水泥与乳化沥青用量下,25℃的复合胶浆稠度要略高于45℃的稠度。这是由于沥青在较高温下黏度更低的缘故。

2.2 水泥对胶浆稠度的影响

为进一步分析水泥对胶浆稠度影响,用水泥稠度贡献率 K_{cd} 指标可以对比不同温度下,水泥对复合胶浆稠度的贡献程度。

$$K_{cd} = \frac{C_{dmax} - C_{d0}}{n_{max}} \times 100\% \quad (3)$$

式中: K_{cd} 为水泥稠度贡献率,%; C_{dmax} 为水泥与乳化沥青复合胶浆稠度最大值, $\text{Pa}\cdot\text{s}$; C_{d0} 为沥青稠度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$; n_{max} 为复合胶浆稠度最大值时水泥用量,%。

通过分析两种温度下的水泥稠度贡献率,得出25℃和45℃条件下的水泥稠度贡献率分别为65.5%和55.5%,即25℃水泥稠度贡献率高于45℃水泥稠度贡献率。通过分析水泥稠度贡献率能够反映出水泥对乳化沥青黏结成膜状态的影响。在25℃条件下,乳化沥青在没有外加水泥的情况下,由于乳化沥青破乳过程中水分消散的原因,沥青颗粒之间会产生微孔隙,所以并不能形成真正完全连续的膜状结构。而当水泥介入到乳化沥青材料中,水泥水化与乳化沥青破乳同时进行,随着水泥水化过程的持续,消耗的水分越来越多,同时在水泥及其水化物的吸附架桥作用下,有效促进了沥青颗粒紧密聚集成膜,最后形成了水泥水化物和沥青膜复合交织的网状结构。而在45℃条件下,环境温度使得沥青自身具有一定流动性,因此有利于沥青连续膜状结构的形成,弱化了水泥水化物对胶浆稠度的影响。所以,在高温条件下水泥对沥青黏结成膜状态的影响几乎不能体现,稠度增长率也就相对低一些。通过水泥对复合胶浆稠度贡献率的分析可知,水泥水化物结构除了对胶浆稠度的提升作用,还对沥青连续成膜状态的优化具有一定的贡献^[18]。

3 结论

(1)在乳化沥青-水泥复合胶浆中,水泥和乳化沥青这两种胶结材料相互影响和制约,当水泥与乳化沥青用量比为22%时,其胶浆稠度达到最大值,表现出较强的黏韧性。

(2)在25℃和45℃测试条件下的水泥稠度贡献率分别为65.5%和55.5%,且25℃测试条件下水泥对沥青黏结成膜状态及其胶浆稠度的贡献作用更加显著。

(3)新型稠度测试仪以及相应的试样制备方法可以快速准确测得复合胶浆的稠度,且可直接反映出胶浆的黏韧性。

参考文献

[1] 肖晶晶,沙爱民,蒋玮,等.水泥乳化沥青混合

- 料动态模量特性[J]. 建筑材料学报, 2013, 16(3): 446-450.
(XIAO Jingjing, SHA Aimin, JIANG Wei, et al. Dynamic modulus characteristics for cement emulsified asphalt mixtures [J]. Journal of building materials, 2013, 16(3): 446-450.)
- [2] 屈鑫, 郝培文. 乳化沥青混合料新型拌和成型方法的研究[J]. 中外公路, 2014, 34(4): 314-317.
(QU Xin, HAO Peiwen. Research on new mixing and forming method of emulsified asphalt mixture [J]. China foreign highway, 2014, 34(4): 314-317.)
- [3] 王振军, 侯小红, 张明祥, 等. 结合料对水泥乳化沥青混合料干缩性能的影响[J]. 西安理工大学学报, 2013, 29(4): 464-468.
(WANG Zhenjun, HOU Xiaohong, ZHANG Mingxiang, et al. Effects of binder on the dry shrinkage of cement emulsified asphalt mixtures [J]. Journal of Xi'an university of technology, 2013, 29(4): 464-468.)
- [4] 王振军, 沙爱民, 杜少文. 结合料对水泥乳化沥青混合料性能的影响[J]. 公路, 2008(10): 156-161.
(WANG Zhenjun, SHA Aimin, DU Shaowen. Influence of binder on performance of cement emulsified asphalt mixtures [J]. Highway, 2008(10): 156-161.)
- [5] 刘矿军. 水泥掺量对沥青胶浆影响分析[J]. 交通世界, 2012(9): 262-263.
(LIU Kuangjun. The influence of cement content on asphalt mortar [J]. Transportation world, 2012(9): 262-263.)
- [6] 刘丽, 郝培文. 沥青胶浆粘度特性分析[J]. 河北工业大学学报, 2006(2): 109-113.
(LIU Li, HAO Peiwen. Analysis of viscosity character of asphalt mortar [J]. Journal of Hebei university of technology, 2006(2): 109-113.)
- [7] 张争奇, 王永财. 沥青胶浆对沥青混合料高温性能的影响[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2006, 26(2): 1-5.
(ZHANG Zhengqi, WANG Yongcai. Influence of asphalt mortar on hot mix asphalt performance at high and low temperature [J]. Journal of Chang'an university (natural science edition), 2006, 26(2): 1-5.)
- [8] 杜少文, 李立寒, 袁坤. 水泥乳化沥青混合料中合理CA比的试验研究[J]. 建筑材料学报, 2010, 13(6): 807-811.
(DU Shaowen, LI Lihan, YUAN Kun. Study on the rational CA ratio of cement asphalt emulsion mixture [J]. Journal of building materials, 2010, 13(6): 807-811.)
- [9] 彭波, 丁智勇, 戴经梁. 不同类型沥青胶浆路用性能对比[J]. 交通运输工程学报, 2007, 7(3): 61-65.
(PENG Bo, DING Zhiyong, DAI Jingliang. Road performance comparison of different asphalt mastics [J]. Journal of transportation engineering, 2007, 7(3): 61-65.)
- [10] TASHMAN L, PEARSON B. Characterisation of stone matrix asphalt mixtures [J]. International journal of pavement engineering, 2012, 13(4): 297-309.
- [11] 李智慧, 谭忆秋, 周兴业. 沥青胶浆高低温性能评价体系的研究[J]. 石油沥青, 2005, 19(5): 23-26.
(LI Zhihui, TAN Yiqiu, ZHOU Xingye. Research on the high-an-low temperature performance evaluating system of asphalt-mineral filler mastic [J]. Petroleum asphalt, 2005, 19(5): 23-26.)
- [12] BAHIA H, DAVIES R. Role of crumb rubber content and type in changing critical properties of asphalt binders [J]. Asphalt paving technology, 1995, 64: 130-162.
- [13] 陈俊, 黄晓明. 沥青粘度和稠度本质及其关系研究[J]. 石油沥青, 2007(4): 40-44.
(CHEN Jun, HUANG Xiaoming. Study on hypostasis and relationship between viscosity and consistency of asphalt [J]. Petroleum asphalt, 2007(4): 40-44.)
- [14] 陈平, 黄晓明. 稠度在沥青性能研究中的应用[J]. 石油沥青, 2006(1): 55-59.
(CHEN Ping, HUANG Xiaoming. Using of consistency at the research of asphalt performance [J]. Petroleum asphalt, 2006(1): 55-59.)
- [15] 郭成超, 曾凡奇, 王鹏. 沥青稠度指标与重载交通车辙试验相关性分析[J]. 公路, 2006(10): 159-165.
(GUO Chengchao, ZENG Fanqi, WANG Peng. Relativity analysis between asphalt consistence index and heavy load wheel rutting test [J]. Highway, 2006(10): 159-165.)
- [16] 河南高远公路养护技术有限公司. 稠度测试仪器: 200320109626. 3 [P]. 2004-10-20.
(Henan Gaoyuan Highway Maintenance Technology Co. Ltd. consistency testing system; 200320109626. 3 [P]. 2004-10-20.)
- [17] RUAN Y, DAVISON R R, GLOVER C J. The effect of long-term oxidation on the rheological properties of polymer modified asphalts [J]. Fuel, 2003, 82(14): 1763-1773.
- [18] 王军. 水泥对乳化沥青混合料性能影响研究[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2018, 14(4): 51-53.
(WANG Jun. Study on the influence of cement on the performance of emulsified asphalt mixture [J]. Journal of highway and transportation research and technology (engineering technology), 2018, 14(4): 51-53.)

(责任编辑:徐玉梅 英文审校:唐玉兰)