

文章编号:1671-8879(2018)05-0032-08

沥青与集料黏附性评价方法

李善强^{1,2}, 叶宏宇¹, 方 杨², 李 浩²

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 广东华路交通科技有限公司, 广东 广州 510420)

摘要:为了定量评价沥青与集料黏附性,提出新的沸煮试验方法,并与水煮法进行对比试验。选取 5 种 A 级 70[#] 基质沥青和 5 种 SBS 改性沥青,采用旋转薄膜老化试验(RTFOT)模拟沥青短期老化,采用压力老化试验(PAV)模拟沥青长期老化,以原样沥青为对照,制备成 30 种不同老化程度的样品,与 3 种岩性粗集料进行排列组合,共计开展 90 组黏附性试验,并提出了基于水煮法和沸煮法的沥青与集料黏附性综合评价方法。研究表明:水煮法试验中,随着沥青老化程度加深,基质沥青与集料的黏附性等级总体呈上升趋势,改性沥青老化前后与所有集料的黏附性等级均为 5 级,水煮法对改性沥青失效;沸煮法试验中,沥青的黏附时间从大到小依次为长期老化、短期老化、未老化试件,3 种集料的黏附时间从大到小依次为石灰岩、闪长岩、花岗岩;将不规则集料制备成直径为 19 mm 的球形集料,消除表面形状缺陷后,水煮法判定各种沥青与球形集料的黏附性等级均为 5 级,无法区分,而沸煮法仍可准确得到沥青与球形集料的黏附时间。水煮法用黏附性等级作为评价指标,沸煮法用黏附时间作为评价指标,以球形集料为标准试件,并给出基质沥青及改性沥青短期老化的技术要求。

关键词:道路工程;沸煮法;沥青与集料黏附性;评价标准

中图分类号:U416.03 **文献标志码:**A

Evaluation method of asphalt and aggregate adhesion durability

LI Shan-qiang^{1,2}, YE Hong-yu¹, FANG Yang², LI Hao²

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China;

2. Guangdong Hualu Transport Technology Co., Ltd., Guangzhou 510420, Guangdong, China)

Abstract: To quantitatively evaluate the adhesion between asphalt and aggregate, a boiling test was performed, and the results were compared with the water boiling method. Five types of A-class 70[#] matrix asphalt and five types of SBS modified asphalt was selected, rolling thin film oven tester(RTFOT) were adopted to simulate the short-term aging. Pressure ageing vessel (PAV) was adopted to simulate long-term aging. The original asphalt was used as contrast, 30 samples with different aging degrees were prepared using three types of lithologic coarse aggregate. Ninety adhesive tests were conducted in total. A comprehensive evaluation method of adhesion of asphalt and aggregate based on water boiling and boiling was proposed. The results show that the adhesion grade between the matrix asphalt and aggregate increases with the increase of asphalt aging degree, for the water boiling method, and the adhesion grades between

收稿日期:2018-01-19

基金项目:交通运输部建设科技项目(2014 314 J23 150)

作者简介:李善强(1981-),男,山东临沭人,广东华路交通科技有限公司教授级高级工程师,长安大学工学博士研究生,

E-mail:41565419@qq.com.

modified asphalt before and after aging with all kinds of aggregate are level 5. The water boiling method is ineffective to the modified asphalt. Boiling test results show that the rule of adhesion time is aging, short-term aging, non-aging from large to small, the adhesion time is limestone, diorite and granite from large to small. The irregular aggregate is prepared in the form of a spherical aggregate with a diameter of 19 mm to eliminate surface shape defects. The adhesive grade of all asphalt types and aggregates is level 5 of water boiling method. Water boiling method, is unable to distinguish adhesion time, however, the boiling method can still effectively evaluate the adhesion time of asphalt and spherical aggregates. To compare between the two methods of adhesion evaluation of asphalt and aggregate, the adhesive grade is used as the evaluation index in the water boiling method, and the adhesion time is used as the evaluation index in the boiling method and the spherical aggregate is used as the standard sample. The technical requirements for the short-term aging of matrix asphalt and the modified asphalt are proposed. 4 tabs, 7 figs, 23 refs.

Key words: road engineering; boiling method; adhesion between asphalt and aggregate; evaluation standard

0 引言

黏附性是表征集料表面沥青膜抗剥落与抗破损的能力,是路面原材料设计中的关键因素,并直接影响路面使用寿命与性能^[1-2]。黏附性不足易导致沥青路面松散、坑槽等水损坏,进而诱导路面产生其他病害^[3],特别是湿热地区,沥青路面处于高温多雨的环境中,极易导致因其黏附性不足引发的坑槽等一系列水损害,严重影响路面使用寿命和服务水平。

目前评价沥青与集料黏附性通常采用《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)中的水煮法,按照沥青剥落百分比划分黏附性等级^[4]。水煮法存在2个缺陷:①缺乏定量指标,需要经验丰富的试验人员评定,人为因素影响较大^[5-6];②无法评价改性沥青,普通沥青采用该方法尚能观察到不同程度的剥落,但改性沥青由于黏度大,油膜较厚,水在短时间内无法突破沥青膜,浸煮时基本不剥落^[7]。改性沥青无论与何种岩性集料组合,其黏附性均为5级,因此,可以认为该方法对改性沥青是失效的。

针对沥青与集料黏附性的评价方法^[7],国内外进行了诸多研究。中国《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)规定的水浸法与水煮法相比,水浸法更为客观,但此试验为静态,无法模拟真实路面中动水压力的冲刷作用^[4]。Cheng等提出了表面能测试方法,其以沥青与集料的黏附功和剥落功作为评价指标^[8]。李海莲等运用自由能法研究了沥青老化程度对改性沥青接触角的影响,自

由能在短期老化后有下降趋势^[9]。郑晓光等采用吊片法和吸附法测得沥青与集料的表面自由能,并计算得到沥青与集料的自由能参数^[10]。美国战略公路研究计划(SHRP)中采用净吸附测试(NAT)沥青与集料黏附性,在沥青-水-矿料体系,将集料放在沥青-甲苯溶液中循环回流,用光度计测定溶液吸光度,计算沥青剥落量来评价黏附性^[11-12]。袁峻等运用超声波模拟动水压力,以集料表面剥落面积评价黏附性,指出黏附性与集料岩性、表面形态有关^[13]。美国公路学会的(AASHTO T 182)静水浸润试验是利用水的渗透作用,来模拟实际路面遇水后水损坏的情形,这种方法属于主观分析,试验时间长且精度有限,因而使用范围有限^[14]。超声波法通过电压和粘贴于超声波探头的环氧树脂之间拉力关系来反映沥青与集料之间的黏结力^[15]。张苛等利用质量分数5%的NaCl溶液代替传统沥青集料黏附性评价方法中的纯水进行试验,水煮试验结束后对集料进行图像采集,计算其在集料表面的剥落率,定量的评价沥青与集料黏附性^[3]。目前,国内外已对沥青路面水损坏的4种现象、6种机理和3种试验方法进行了研究,从不同的角度探索沥青或沥青胶浆与集料的相互作用,在不同程度上解释了水损坏产生的原因,但因试验方法不直观而需要很强的经验判断^[16],或因试验复杂、设备昂贵、操作繁琐而较难推广。综上,以上方法均未从沥青自加热、拌合、摊铺至营运等全过程角度分析其老化程度对集料黏附剥离的影响。

针对现行规范中水煮法和水浸法在沥青与集料

黏附性评价方面的不足,本文中提出了一种新的试验方法——沸煮法,采用沸煮法测得的沥青膜完全从集料表面剥离的时间作为黏附性评价指标。该方法强化了水对集料与沥青黏附性的影响,加强了水对沥青膜的冲击作用,加快了剥落,缩短了试验时间,能够较快的定量评价沥青与集料黏附性。同时,为消除集料形状对黏附性的干扰,将集料加工成球形并钻孔,通过球形集料黏附性试验,得到了不同沥青种类与不同集料类型的黏附性结果。该研究成果可为不同种类、不同老化程度的沥青与不同集料类型黏附性的定量评价提供一定的参考。

1 试验材料与方法

1.1 沥青与集料黏附性试验方案

1.1.1 原材料性能

选取广东地区常用的沥青,5种A级70[#]基质沥青:SK70[#]、埃索70[#]、茂名70[#]、壳牌70[#]、泰国70[#]。5种SBS改性沥青:壳牌改性、SK改性、埃索改性、泰国改性、茂名改性沥青。采用旋转薄膜老化试验(RTFOT)模拟沥青短期老化,采用压力老化试验(PAV)模拟沥青长期老化,加上原样沥青,共计制备30种不同老化程度的样品。各性能指标见表1。

试验所用的3种集料分别为石灰岩、花岗岩和闪长岩,集料性能指标如表2、表3所示。

1.1.2 试验方法

水煮法:按照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTGE20—2011)进行。将试件浸入微沸的水中浸煮3min,肉眼观察估算沥青剥落面积百分比,按照百分比划分黏附性等级。

沸煮法:将粗集料用水洗净,用细线或细铁丝系牢,置于水中浸泡24h后用拧干的湿毛巾擦干集料表面明水(至表面看不到发亮的水迹);将湿润集料浸入热沥青中,使集料颗粒完全被沥青膜包裹;提起集料,悬挂冷却15min;将集料浸入盛有沸水的烧杯中,保持水沸腾状态,记录集料从浸水到沥青膜完全从集料表面剥离的时间。

相对于水煮法,沸煮法的主要改进为:①以沸腾状态的水代替原方法中的微沸状态的水,加强了水对沥青膜的冲击作用,加快剥落,缩短试验时间;②摒弃了以剥落面积评价黏附性的方法^[17-18],以沥青膜完全剥落时间作为评价沥青与集料黏附性的指标,沥青从集料表面剥离并漂浮在水面上,试验终点现象容易观察判断,人为因素影响小。该方法的优点是强化了水对集料与沥青黏附性的影响,试验条

表1 沥青性能指标试验结果

Tab.1 Test results of asphalt performance indexes

沥青名称	PG 分级	老化状态	针入度 (25℃, 100 g, 5 s)/0.1 mm	软化 点/℃	延度(5℃, 5 cm· min ⁻¹)/cm
茂名70 [#] A	PG64-22	原样	64	48.0	35.8
茂名70 [#] B		短期老化	39	53.5	5.7
茂名70 [#] C		长期老化	23	58.6	0.3
壳牌70 [#] A	PG64-16	原样	60	49.0	28.4
壳牌70 [#] B		短期老化	37	53.5	5.5
壳牌70 [#] C		长期老化	20	58.0	0.0
埃索70 [#] A	PG64-22	原样	60	47.5	24.8
埃索70 [#] B		短期老化	40	52.0	5.8
埃索70 [#] C		长期老化	20	59.5	0.0
SK70 [#] A	PG64-22	原样	61	48.5	32.9
SK70 [#] B		短期老化	39	54.0	8.0
SK70 [#] C		长期老化	23	61.5	0.6
泰国70 [#] A	PG58-22	原样	62	48.5	100.0
泰国70 [#] B		短期老化	44	54.5	6.6
泰国70 [#] C		长期老化	24	57.0	1.8
茂名改性A	PG70-22	原样	53	69.0	33.1
茂名改性B		短期老化	39	68.5	16.6
茂名改性C		长期老化	29	65.0	6.0
壳牌改性A	PG76-22	原样	50	77.5	26.1
壳牌改性B		短期老化	39	79.0	18.3
壳牌改性C		长期老化	26	71.0	0.5
埃索改性A	PG76-22	原样	51	80.5	28.0
埃索改性B		短期老化	43	79.0	21.5
埃索改性C		长期老化	27	73.0	0.0
SK改性A	PG76-22	原样	53	69.0	27.3
SK改性B		短期老化	40	74.0	13.0
SK改性C		长期老化	24	72.0	0.6
泰国改性A	PG76-22	原样	52	83.0	29.9
泰国改性B		短期老化	40	79.5	19.8
泰国改性C		长期老化	31	64.5	0.4

表2 石灰岩性能指标试验结果

Tab.2 Test results of performance indexes of limestone

参数	表观密度/ (kg·m ⁻³)	自然堆积密 度/(kg·m ⁻³)	压碎指 标/%	针片状颗 粒含量/%	含泥量(质 量分数)/%
参数值	2 727	1 510	17.9	8.2	0.5

表3 花岗岩、闪长岩性能指标试验结果

Tab.3 Test results of properties of granite and diorite

指标	表观相 对密度	表干相 对密度	毛体积 相对 密度	水洗法< 0.075 mm 颗粒含量/%	针片状 颗粒含 量/%	压碎 值/%	洛杉矶 磨耗损 失/%
花岗岩	2.736	2.716	2.704		3.5	10.7	12.2
闪长岩	2.084			0.2	7.5	12.6	

件更加苛刻;以沥青膜剥离时间作为评价黏附性的

指标,比水煮法依靠肉眼观察、主观估算剥落面积并划分黏附等级的评价指标更客观、准确;操作简便且试验时间短,能够明显区分不同岩性集料与沥青黏附性的强弱。

沸煮法试验时^[19-21],水完全沸腾后放入样品,并同时计时,当水位有明显降低时,应及时补充沸水,保证样品始终位于液面以下。水煮法和沸煮法试验过程如图 1 所示。

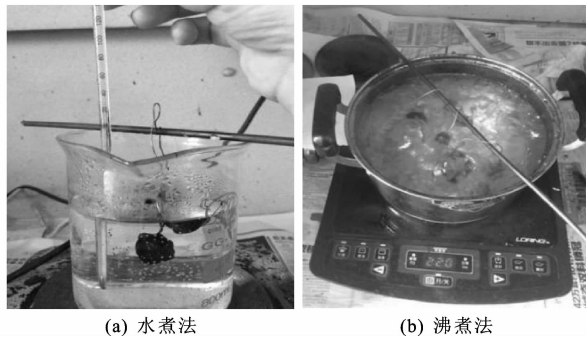


图 1 试验方法

Fig. 1 Test methods

1.2 球形集料与沥青黏附性试验方案

试验过程中沥青剥落总是优先从集料棱角处开始。分析认为,常规的不规则集料表面粗糙,棱角众多,界面过渡明显。沥青在棱角处裹附不足,油膜偏薄,导致沥青较容易从棱角处剥落。由于每颗集料形状和粗糙度不同,水煮法和沸煮法的试验精度会受到干扰。因此,为消除集料形状的影响,只考虑集料类型对黏附性的作用,本文将集料加工成球形并钻孔,直径为 19 mm,见图 2。

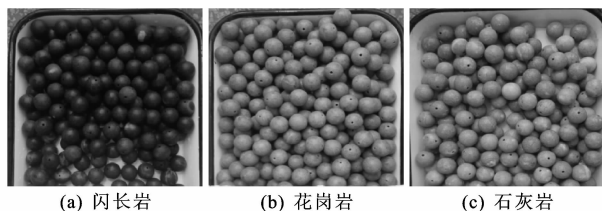


图 2 球形集料

Fig. 2 Spherical aggregate

2 结果分析

2.1 水煮法和沸煮法试验对比

水煮法(上)和沸煮法(下)试验结果如图 3 所示。从图 3 可以看出:水煮法试验中,沥青裹覆较好,仅有少量剥落;沸煮法试验中,沥青剥落较为完全,仅有少量沥青斑残留在集料表面上。

水煮法、沸煮法测得不同老化程度沥青与集料的黏附性等级如图 4 所示,黏附时间如图 5 所示。

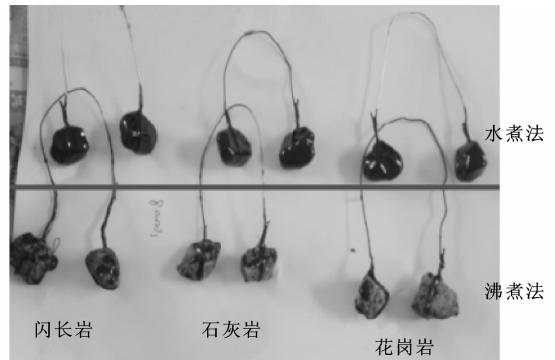


图 3 水煮法(上)和沸煮法(下)试验结果

Fig. 3 Test results of water-cooking method (top) and boiling method (below)

沸煮法中,当沸煮时间达到 1 500 s 时沥青膜仍未剥落,试验停止,结果记为大于 1 500 s。

由图 4 可知:5 种未老化的原样基质沥青与石灰岩黏附性最好,最低为 4 级,其次是闪长岩,最差为花岗岩;随着老化程度增加,基质沥青与集料的黏附性等级总体呈上升趋势,即老化后的基质沥青与集料的黏附性有所提高;5 种改性沥青老化前后与 3 种集料的黏附性等级均为 5 级,水煮法无法区分改性沥青老化程度和集料岩性对黏附性的影响,此时水煮法失效。

由图 5 可知:不同沥青、不同老化程度、不同集料之间的黏附性差异明显,沸煮法对各种组合的黏附性均能有效区分;3 种集料的黏附性试验中,有 7 种沥青的未老化样品黏附时间小于短期老化沥青和长期老化沥青;而 SK70[#]、茂名改性、泰国改性的未老化样品的黏附时间均大于短期老化样品;集料为石灰岩时,10 种沥青的短期老化样品的黏附时间小于长期老化样品;集料为花岗岩时,9 种沥青的短期老化样品的黏附时间小于长期老化样品,1 种沥青的短期老化样品的黏附时间大于长期老化样品;集料为闪长岩时,9 种沥青的短期老化样品的黏附时间小于长期老化样品,1 种沥青的短期老化样品的黏附时间大于长期老化样品。黏附时间从大到小依次为长期老化、短期老化、未老化,石灰岩、闪长岩、花岗岩。

对比图 4、图 5 可知,黏附时间可以准确、定量判断不同沥青种类、不同老化程度与不同集料类型的黏附性,可用于沥青与集料黏附性评价。

2.2 球形集料与沥青黏附性

为消除不规则集料颗粒表面形态的影响,将 3 种集料统一加工成直径 19 mm 的球形,用球形集料分别进行水煮法和沸煮法试验,试验结果见图 6。

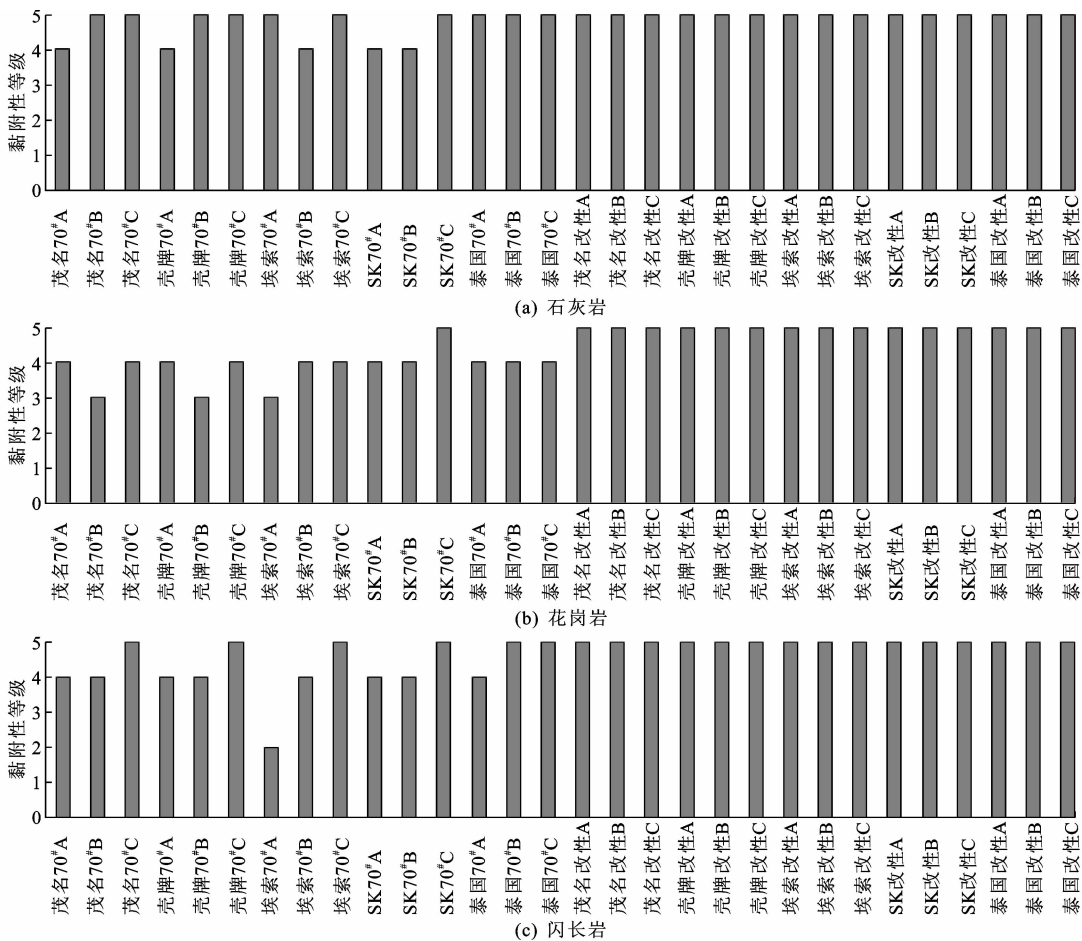


图4 不同老化程度沥青与集料黏附性等级

Fig. 4 Asphalt and aggregate adhesion grades of different aging degrees

研究发现:水煮法中,当集料形状为球形,消除表面棱角后,不论集料种类和沥青老化程度如何变化,黏附性等级均为5级,此时水煮法已经失去评价作用,无法判断沥青与集料黏附性;而沸煮法仍有很好的区分度,沸煮法试验结果见图7。

综合球形集料的水煮法和沸煮法试验可得:①基质沥青与球形集料黏附时间均随沥青老化程度加深而延长,沥青与球形集料黏附时间从大到小依次为石灰岩、闪长岩、花岗岩;②老化前后的泰国改性沥青与石灰岩和闪长岩集料黏附时间均达到1500 s,改性沥青与花岗岩的黏附时间随着老化程度的加深而延长,但黏附时间均没有达到1500 s;③沸煮法中基质沥青与球形集料的黏附性规律与不规则集料的规律一致。

2.3 沥青与集料黏附性评价标准

综上所述,现有的水煮法试验无法准确判断沥青种类、沥青老化程度、集料岩性等因素对黏附性的影响,而沸煮法则可以实现对多种因素的区分,且采用球形集料后,可进一步消除集料棱角因素影响,其

试验结果更加客观。同时现行技术标准只考虑了原样沥青的黏附性^[22-23],未考虑短期老化后沥青黏附性能,而实际沥青路面是经过施工阶段短期老化的,评价短期老化的沥青黏附性非常有必要。水煮法和沸煮法均对长期老化沥青的黏附性判断失效,故不做要求。根据以上分析及研究结果得出沥青与集料黏附性评价标准,如表4所示。

3 结语

(1)针对现行规范中水煮法在评价沥青与集料黏附性的不足,提出了以沸煮法为标准方法、以球形集料为标准试件的沥青与集料黏附性试验方法,并进行了不同老化程度的水煮法与沸煮法对比试验。

(2)水煮法试验对改性沥青及老化后沥青评价几乎失效,同时对集料岩性的区分度不明显;而沸煮法可以准确判定不同老化程度、不同沥青种类及集料岩性对黏附性的影响。

(3)球形集料可消除形状的影响,使不同集料的结果更有可比性。球形集料的水煮法试验黏附性等

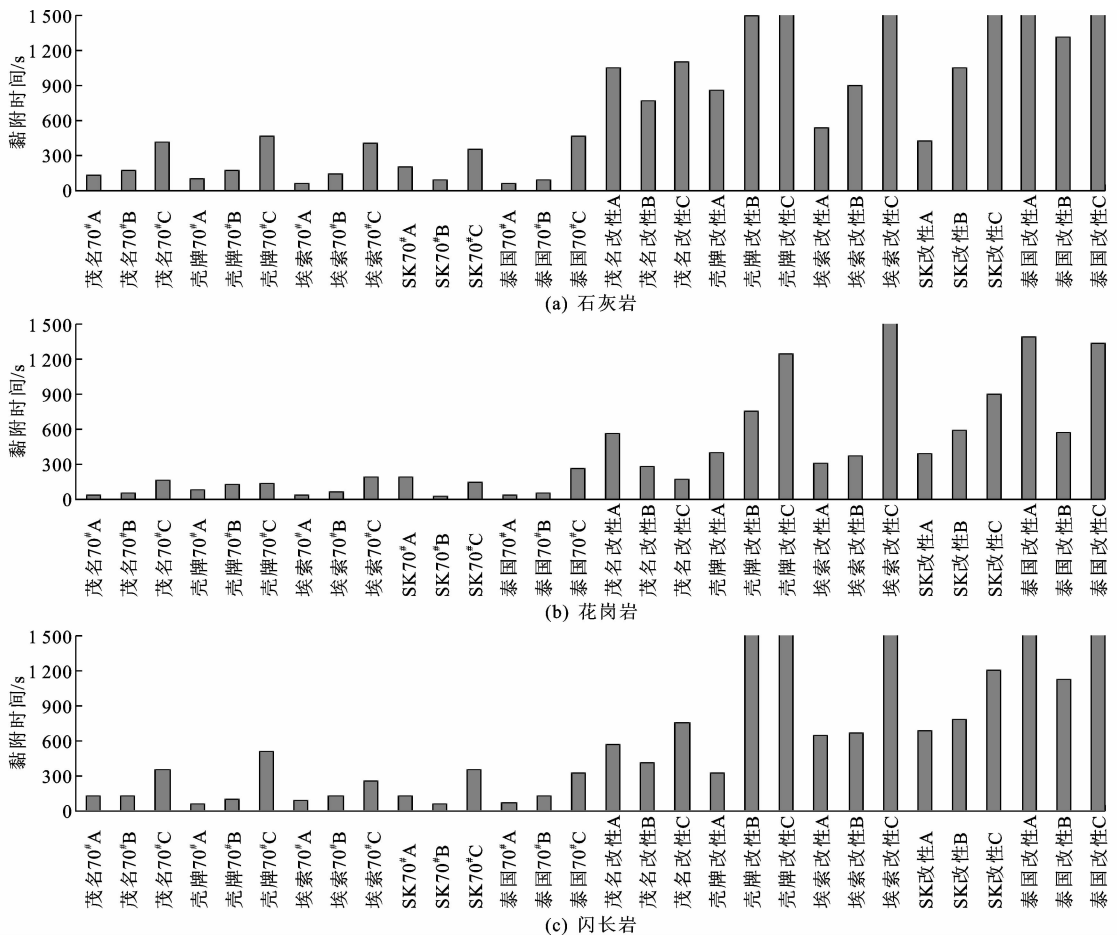


图 5 不同老化程度沥青与集料黏附时间

Fig. 5 Different aging degrees of asphalt and aggregate adhesion time

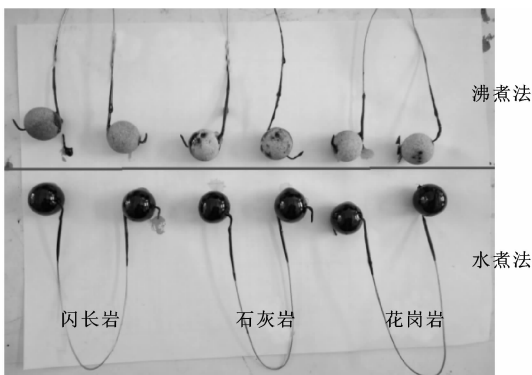


图 6 沸煮法(上)和水煮法(下)试验现象(球形集料)

Fig. 6 Test results of boiling method (top) and water-cooking method (below) of spherical aggregate

级均为 5 级,判定失效,而沸煮法可定量得到沥青与球形集料的黏附时间。

(4)综合考虑基质沥青及改性沥青老化后的黏附等级与黏附时间,提出了沥青与集料黏附性评价标准。

(5)本文虽基于球形试件和沸煮法试验在沥青与集料黏附性试验方法和定量评价方面进行了探索,其对原样和短期老化的普通沥青、改性沥青较适

用,但对长期老化的普通沥青、改性沥青区分度仍不明显,还有待进一步深入研究。

参考文献:

References:

[1] 郝尧生,刘兴东. 高速公路沥青路面坑槽病害成因与处治[J]. 中外公路,2012,32(3):118-120.
HAO Yao-sheng, LIU Xing-dong. Causes and treatment of potholes disease on expressway asphalt pavement[J]. Journal of China & Foreign Highway,2012, 32(3):118-120.

[2] NEJAD F M, ARABANI M, HAMED I G H, et al. Influence of using polymeric aggregate treatment on moisture damage in hot mix asphalt[J]. Construction and Building Materials,2013,47:1523-1527.

[3] 张 奇,张争奇. 沥青与集料黏附性的定量评价[J]. 合肥工业大学学报:自然科学版,2015,38(6):810-815.
ZHANG Ke, ZHANG Zheng-qi. Quantitative evaluation of the adhesion between asphalt and aggregate [J]. Journal of Hefei University of Technology: Natural Science,2015,38(6):810-815.

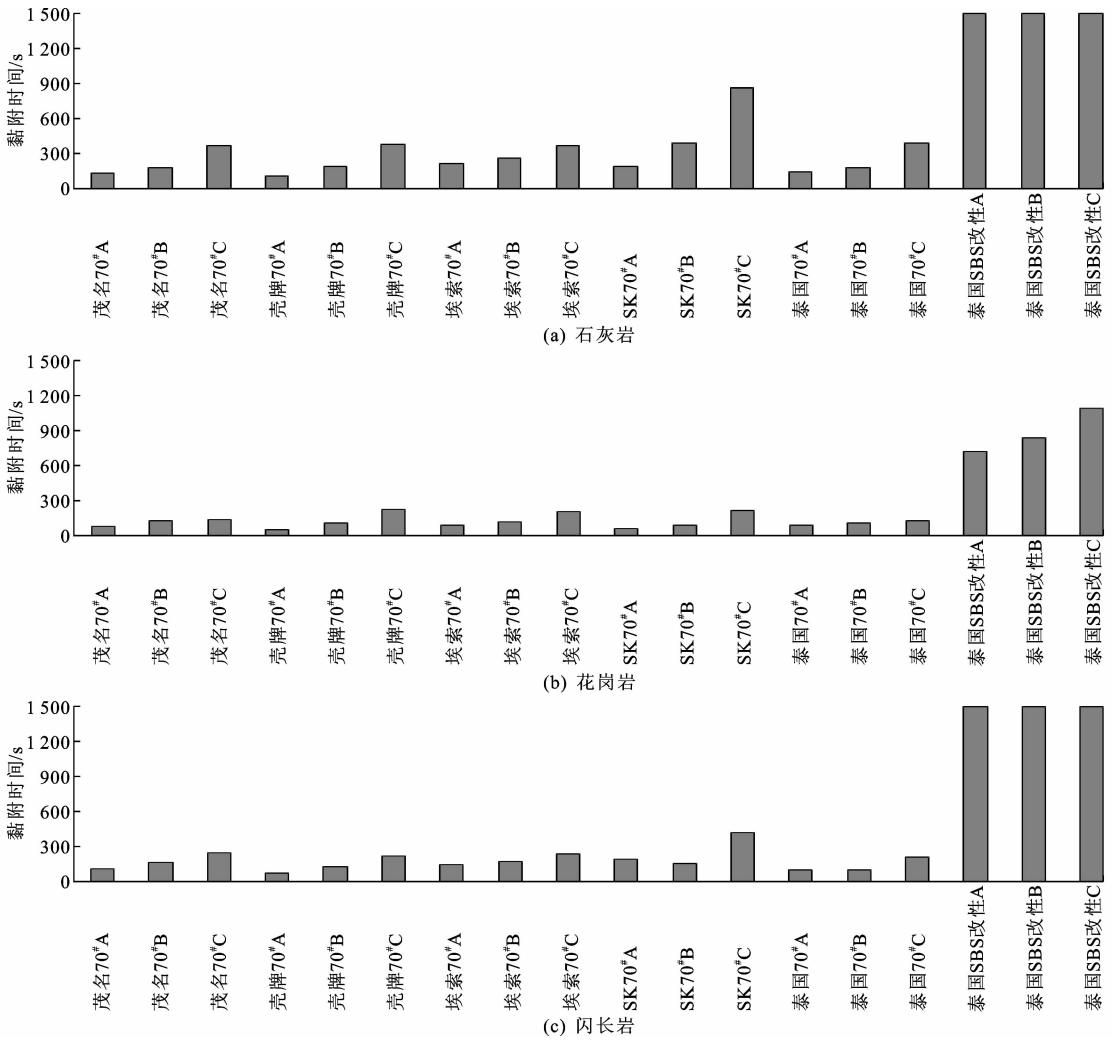


图7 基质沥青与集料黏附时间

Fig. 7 Adhesion time of aggregate to spherical limestone

表4 沥青与集料黏附性试验方法及评价标准

Tab. 4 Test methods and evaluation criteria for adhesion between asphalt and aggregate

项目	黏附性等级		黏附时间/s	
	原样沥青	短期老化沥青	原样沥青	短期老化沥青
改性沥青	≥5级	≥5级	≥500	≥650
普通沥青	≥4级	≥4级	≥40	≥60
试验方法	水煮法(不规则集料)		沸煮法(球形集料)	

[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 for bitumen and bituminous mixtures for highway engineering[S].

[5] 陈燕娟, 高建明, 陈华鑫. 基于表面能理论的沥青-集料体系的黏附特性研究[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2014, 44(1): 183-187.

CHEN Yan-juan, GAO Jian-ming, CHEN Hua-xin. Research on adhesion in asphalt-aggregate systems based on surface energy theory[J]. Journal of South-

east University: Natural Science Edition, 2014, 44(1): 183-187.

[6] 袁峻, 钱武彬, 张申, 等. 沥青-集料黏附性能简化计算模型[J]. 科学技术与工程, 2014, 14(28): 288-290, 297.

YUAN Jun, QIAN Wu-bin, ZHANG Shen, et al. A simplified model for calculating the affinity between bitumen and aggregate[J]. Science Technology and Engineering, 2014, 14(28): 288-290, 297.

[7] 邓敏, 甘林坤. 沥青与集料粘附性评价方法对比[J]. 公路交通技术, 2008(1): 45-47.

DENG Min, GAN Lin-kun. Comparison of evaluating methods for adhesion between asphalt and aggregate[J]. Technology of Highway and Transport, 2008(1): 45-47.

[8] CHENG D X, LITTLE D N, LYTTON R L, et al. Surface energy measurement of asphalt and its application to predicting fatigue and healing in asphalt mix-

- tures [J]. Transportation Research Record, 2002, 1810:44-53.
- [9] 李海莲,李波,王起才,等. 基于表面能理论的老化温拌SBS改性沥青结合料的粘附性[J]. 材料导报, 2017,31(16):129-133.
- LI Hai-lian, LI Bo, WANG Qi-cai, et al. Adhesion of aged SBS modified asphalt binder containing warm mix additive based on surface free energy[J]. Materials Review, 2017,31(16):129-133.
- [10] 郑晓光,王粲,杨群,等. 运用表面自由能理论分析沥青混合料水稳定性[J]. 中外公路, 2004,24(5):88-90.
- ZHENG Xiao-guang, WANG Can, YANG Qun, et al. Analysis of water stability of asphalt mixture by surface free energy theory[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2004,24(5):88-90.
- [11] 周卫峰. 沥青与集料界面粘附性研究[D]. 西安:长安大学, 2002.
- ZHOU Wei-feng. Study on the adhesion of asphalt and aggregate interface[D]. Xi'an:Chang'an University, 2002.
- [12] HIRATO T, MURAYAMA M, SASAKI H. Development of high stability hot mix asphalt concrete with hybrid binder[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering: English Edition, 2014, 1(6):424-431.
- [13] 袁峻,董文娇,钱武彬,等. 基于超声波的沥青集料粘附性试验方法研究[J]. 科学技术与工程, 2013,13(5):1388-1391,1396.
- YUAN Jun, DONG Wen-jiao, QIAN Wu-bin, et al. Research on test method of asphalt-aggregate adhesion based on ultrasonic[J]. Science Technology and Engineering, 2013,13(5):1388-1391,1396.
- [14] RAMANATHAN K, STALLINGS R L, NEWSOME J R. An ultrasonic technique for the measurement of adhesion of asphalt to aggregate[J]. Journal of Adhesion Science and Technology, 1991,5(3):181-190.
- [15] IZZO R P, TAHMORESSI M. Testing repeatability of the Hamburg wheel-tracking device and replicating wheel-tracking devices among different laboratories [J]. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 1999,68:589-612.
- [16] 刘延军,张玉贞. 不同类型沥青与集料润湿性能及其黏附功[J]. 石油化工高等学校学报, 2017,30(3):1-8.
- LIU Yan-jun, ZHANG Yu-zhen. Wettability and adhesion work between different kinds of asphalt and mixture[J]. Journal of Petrochemical Universities, 2017, 30(3):1-8.
- [17] CHENG, Ding-xin. Surface free energy of asphalt-aggregate system and performance analysis of asphalt concrete based on surface free energy[D]. Galveston: Texas A & M University, 2003.
- [18] ZOLLINGER C J. Application of surface energy measurements to evaluate moisture susceptibility of asphalt and aggregates[D]. Galveston: Texas A & M University, 2005.
- [19] BHASIN A, LITTLE D N. Characterizing surface properties of aggregates used in hot mix asphalt[R]. Alexandria: International Center for Aggregate Research, 2006.
- [20] HOWSON J, MASAD E, BHASIN A, et al. Comprehensive analysis of surface free energy of asphalts and aggregates and the effects of changes in pH[J]. Construction and Building materials, 2011, 25(5):2554-2564.
- [21] 肖庆一,郝培文,徐鸥明,等. 沥青与矿料粘附性的测定方法[J]. 长安大学学报:自然科学版, 2007,27(1):19-22.
- XIAO Qing-yi, HAO Pei-wen, XU Ou-ming, et al. New method for evaluating adhesion between asphalt and aggregate [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2007,27(1):19-22.
- [22] 廖玉春,史朝辉,霍典. 基于表面能评价沥青-石料界面黏结性能的研究[J]. 公路, 2013(5):94-97.
- LIAO Yu-chun, SHI Zhao-hui, HUO Dian. Research on evaluating asphalt stone interfacial bonding properties based on surface energy theory[J]. Highway, 2013(5):94-97.
- [23] 马峰,郝景贤,傅珍,等. 天然沥青改性沥青的表面自由能分析[J]. 交通运输工程学报, 2015,15(1):1671-1637.
- MA Feng, HAO Jing-xian, FU Zhen, et al. Surface free energy analysis of asphalt modified with natural asphalt[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2015,15(1):1671-1637.