

# 基于表面能理论的改性沥青与集料黏附性研究

李昇<sup>1</sup>, 张岩<sup>1</sup>, 焦凯<sup>2</sup>

(1. 西安科技大学 建筑与土木工程学院, 陕西 西安 710054; 2. 中国水利水电第三工程局有限公司, 陕西 西安 710016)

**摘要:** 沥青与集料的黏附性是沥青混合料水稳定性的关键影响因素,为定量分析沥青与集料之间的黏附性,采用表面自由能理论与改进水煮法分别进行评价。首先采用接触角测量试验测定了25℃条件下沥青、改性沥青、老化沥青与花岗岩、石灰岩、辉绿岩的表面能参数,并计算出不同沥青-集料系统的黏附功与剥落功,以黏附功与剥落功的绝对比值 $ER$ 作为黏附性评价指标。同时以通过改进水煮法得出的沥青质量损失率 $F$ 作为定量指标,对表面能理论试验结果加以验证。结果表明:掺入改性剂的90A沥青表面能减小了2.5%~6.2%,改性后的沥青-集料系统水稳定指标 $ER$ 增加了1.9%~7.8%,黏附性增强,其中掺抗剥落剂的改善效果最好,沥青老化后 $ER$ 值减小了4.3%~9.2%,黏附性减小。同类型沥青与不同种类集料的黏附性排序为沥青-石灰岩>沥青-辉绿岩>沥青-花岗岩,同种类集料与不同类型沥青的黏附性排序为90PA>90HC>90C≈90H>90A。通过延长水煮时间的改进水煮法得到的黏附性等级差异明显,其结果与表面能评价结果相同。评价指标 $ER$ 与质量损失率 $F$ 呈线性负相关,验证了表面能评价体系的可靠性。

**关键词:** 沥青; 集料黏附性; 表面能理论; 表面自由能; 水稳定指标

中图分类号:TV431+.5

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2022)02-0158-07

## Research on adhesion between modified asphalt and aggregate based on surface energy theory

LI Sheng<sup>1</sup>, ZHANG Yan<sup>1</sup>, JIAO Kai<sup>2</sup>

(1. College of Civil and Architectural Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 2. Sinohydro Bureau 3rd Co., Ltd., Xi'an 710016, China)

**Abstract:** Asphalt-aggregate adhesion is a key influencing factor for the water stability of asphalt mixtures. In order to quantitatively analyze the adhesion between asphalt and aggregates, surface free energy theory and improved boiling method were used for the evaluation. First, the surface energy parameters of asphalt, modified asphalt, aged asphalt, granite, limestone and diabase were measured at 25℃ by contact angle measurement test, and the adhesion and exfoliation work of different asphalt-aggregate systems were calculated. The absolute ratio  $ER$  between the work of adhesion and the work of exfoliation was used as the evaluation index of adhesion, and the quality loss rate  $F$  obtained by improved boiling method as the quantitative index to verify the test results of the surface energy theory. The results show that the surface energy parameters of 90A asphalt mixed with modifiers reduced by 2.5% to 6.2%, the water stability index  $ER$  of the modified asphalt-aggregate system increased by 1.9% to 7.8%, so the adhesion increased, of which the exfoliation agent presented the best improvement effect. However, the  $ER$  value of aged asphalt decreased by 4.3% to 9.2%, resulting in the decrease of the adhesion. The adhesion of systems with the same asphalt but different aggregates were ranked as follows: asphalt-limestone > asphalt-diabase > asphalt-granite; whereas that of different asphalt with the same aggregate were ranked as follows: 90PA > 90HC > 90C ≈ 90H > 90A. The adhesion grades obtained by the improved boiling

收稿日期:2021-05-29; 修回日期:2021-11-29

基金项目:国家自然科学基金项目(51509200)

作者简介:李昇(1997-),男,安徽怀宁人,硕士研究生,研究方向为酸性骨料在水工沥青混凝土的应用。

通讯作者:张岩(1982-),女,河南泌阳人,博士,硕士生导师,研究方向为酸性骨料在水工沥青混凝土的应用。

method with prolonged boiling time were significantly differentiated, and the results were consistent with those of the surface energy evaluation. The evaluation index  $ER$  had a linear negative correlation with the mass loss rate  $F$ , which further verified the reliability of the surface energy evaluation system.

**Key words:** asphalt; aggregate adhesion; surface energy theory; surface free energy; water stability index

## 1 研究背景

沥青与集料的黏附性不良而发生沥青从集料表面剥落是造成水工沥青混凝土水损害的根本原因<sup>[1]</sup>。为了让水工沥青混凝土具有良好的耐久性,改善水工沥青混凝土的黏附性成为提高水工防渗结构水稳定性的关键问题。目前评价沥青黏附性的方法种类较多,有水煮法、水浸法、光电比色法等。最常用的水煮法操作简单但有两个缺陷,一是缺乏定量指标,受主观因素影响较大;二是无法准确评价改性沥青与集料的黏附性<sup>[2-4]</sup>。余国红等<sup>[5]</sup>采取延长水煮时间的方法并通过质量损失率定量评价了沥青黏附性的强弱。樊亮等<sup>[6]</sup>采用图像分析软件计算水煮法与水浸法的剥落面积,定量研究了沥青的黏附性。但这些方法和指标忽略了沥青混合料水损害的机理。

实际上,沥青混合料的水损害可以通过表面能理论来解释,随着表面能理论的发展,越来越多的学者开始用表面能来表征沥青与集料间的黏附性。2002年,Cheng等<sup>[7]</sup>通过测定不同沥青、集料的表面自由能,采用有水和无水状态下体系吉布斯自由能的变化量绝对比值作为表征沥青与集料黏附性优劣的指标,结果表明该指标评价结论与混合料加速水损害的试验结论基本一致。2007年,肖庆一等<sup>[8]</sup>根据润湿-吸附理论,通过水煮实验、电镜扫描(sanning electron microscope, SEM)试验以及接触角试验研究了沥青与集料的黏附性与黏附力的关系,结果表明黏附功结果与水煮法结果一致,而SEM只能做出定性评价,研究结果证明了采用黏附功表征沥青与矿料黏附性关系的可行性。2010年,刘亚敏等<sup>[9]</sup>测定了70A、SBS(styrene-butadiene-styrene)改性沥青与角闪片麻岩、石灰岩的表面能参数,以有水、无水情况下表面能的绝对比值作为评价指标,比较了不同系统的黏附性,结果表明SBS-角闪片麻岩的黏附性最佳。2014年,陈燕娟等<sup>[10]</sup>测定了2种沥青与4种集料的表面自由能参数,发现添加抗剥落剂后表面自由能中的极性分量增加,酸性集料的剥落功要大于碱性集料的剥落功,并发现剥落功表征的水稳定性的优劣与冻融劈裂试验TSR(indirect

tensile strength ratio)表征结果基本一致。2015年,Hamedi等<sup>[11]</sup>通过拉伸试验和表面能试验确定了4种定量指标的参数,结果表明无水条件下沥青-骨料界面表面能和无水与有水条件下沥青-骨料界面表面能差值的比值与抗拉强度之间相关性最好。2017年,王岚等<sup>[12]</sup>研究了老化前后CM(composite modified asphalt)、CRM(rubber crumb modified asphalt)、SBSM(styrene-butadiene-styrene modified asphalt)3种复合改性沥青和石灰岩、玄武岩、花岗岩的表面能参数,发现沥青老化后与集料的界面黏结特性发生改变,沥青的黏附性和抗水损害能力逐渐减弱。2017年,甘新立等<sup>[13]</sup>基于浸润参数和表面能理论测定了不同温度下沥青的表面张力,并结合理论分析建立了沥青表面张力与温度的关系模型。2017年,罗蓉等<sup>[14]</sup>采用插板法和蒸汽吸附法分别测定了沥青与集料的表面能参数,用表面能匹配性指标来评价不同沥青集料组合的黏附性能并通过水煮法验证了表面能评价体系的可靠性。2020年,韩森等<sup>[15]</sup>基于表面能理论分析了6种不同沥青掺消石灰对其黏附性的影响,结果表明在掺入消石灰后6种沥青的表面能参数均减小,但极性分量增大,黏附性能提高。2021年,董仕豪等<sup>[16]</sup>比较了不同目数和不同掺量石灰对沥青黏附性的影响,并通过拉拔试验进行了论证,研究发现掺量10%石灰对花岗岩-沥青的黏附性提升效果最好,拉拔试验结果与表面能试验结果具有良好的相关性。

由以上研究可以看出,现阶段国内外学者对表面能理论的研究仍以定性分析为主,并未定量分析表面能评价指标与水煮法黏附性评价指标的关系,且对于添加不同改性剂的沥青与不同集料的黏附性缺乏系统性研究。本文基于表面能理论,通过接触角试验测定不同集料与改性前后沥青的接触角大小,经过计算得到沥青和集料的表面能参数、沥青与集料间的黏附功以及沥青-集料体系的剥落功,采用黏附功与剥落功的绝对比值作为表征沥青与集料黏附性优劣的指标,结合改进水煮法的沥青质量损失率建立两者之间的关系,进一步研究不同沥青与集料之间的黏附性的量化指标。为准确量化不同改性剂的改善效果,准确评价不同沥青与不同集料之间的黏附性提供了思路。

## 2 表面能理论

在表面能理论<sup>[17]</sup>中,对于固液界面,其界面表面能为:

$$\gamma_{SL} = \gamma_s + \gamma_L - 2\sqrt{\gamma_s^d \gamma_L^d} - 2\sqrt{\gamma_s^p \gamma_L^p} \quad (1)$$

式中: $\gamma_{SL}$ 、 $\gamma_s$ 、 $\gamma_L$ 分别为固液界面、固体以及液体的表面能,  $\text{mJ}/\text{m}^2$ ;  $\gamma_s^d$ 与 $\gamma_L^d$ 分别为固体和液体的色散分量,  $\text{mJ}/\text{m}^2$ ;  $\gamma_s^p$ 与 $\gamma_L^p$ 分别为固体和液体的极性分量,  $\text{mJ}/\text{m}^2$ 。

根据表面物理化学理论,固液表面润湿性的优劣可采用黏附功作为评价指标,黏附功越大表明材料间的黏附性能越好。可以将表面能理论运用于沥青-集料系统当中,则沥青与集料发生黏附作用产生的表面能变化量为黏附功 $W_{as}$ ,其表达式为:

$$W_{as} = \gamma_a + \gamma_s - \gamma_{as} \quad (2)$$

式中: $\gamma_a$ 为沥青的表面能,  $\text{mJ}/\text{m}^2$ ;  $\gamma_s$ 为集料的表面能,  $\text{mJ}/\text{m}^2$ ;  $\gamma_{as}$ 为沥青与集料的界面能,  $\text{mJ}/\text{m}^2$ 。

将公式(1)代入公式(2)中得出:

$$W_{as} = 2\sqrt{\gamma_a^d \gamma_s^d} + 2\sqrt{\gamma_a^p \gamma_s^p} \quad (3)$$

式中: $\gamma_a^d$ 和 $\gamma_s^d$ 分别为沥青的色散分量和极性分量,  $\text{mJ}/\text{m}^2$ ;  $\gamma_a^p$ 和 $\gamma_s^p$ 分别为集料的色散分量和极性分量,  $\text{mJ}/\text{m}^2$ 。

当沥青混合料发生水损害时,这一过程可以看作是沥青与集料界面分离,并形成沥青-水、集料-水新界面。此过程表面能产生的变化量为剥落功 $W_{aus}$ ,其表达式为:

$$W_{aus} = W_{aw} + W_{sw} - W_{as} = 2\sqrt{\gamma_a^d \gamma_w^d} + 2\sqrt{\gamma_a^p \gamma_w^p} + 2\sqrt{\gamma_s^d \gamma_w^d} + 2\sqrt{\gamma_s^p \gamma_w^p} - 2\sqrt{\gamma_a^d \gamma_s^d} - 2\sqrt{\gamma_a^p \gamma_s^p} \quad (4)$$

式中: $W_{aus}$ 为剥落功,  $\text{mJ}/\text{m}^2$ ;  $W_{aw}$ 为沥青与水之间的黏附功,  $\text{mJ}/\text{m}^2$ ;  $W_{sw}$ 为集料与水之间的黏附功,  $\text{mJ}/\text{m}^2$ 。

利用计算出的 $W_{as}$ 和 $W_{aus}$ 可分别评价在无水和有水条件下沥青与集料的黏附性能和抗剥落性能,但不能综合评价水对沥青-集料系统的影响<sup>[18]</sup>。Bhasin等<sup>[19]</sup>研究发现,采用黏附功与剥落功的绝对比值 $ER$ 作为评价沥青混合料水稳定性是可行的,其表达式如下:

$$ER = \left| \frac{W_{as}}{W_{aus}} \right| \quad (5)$$

式中: $ER$ 为评价沥青-集料系统的匹配性指标,即水稳定指标, $ER$ 值的大小与沥青混合料的水稳定性呈正相关关系。

## 3 材料与试验方法

### 3.1 试验材料

试验选用石灰岩、花岗岩、辉绿岩3种粗骨料,通过化学成分分析根据 $\text{SiO}_2$ 含量得知其分别为碱性、酸性、中性岩石,其技术指标满足《水工碾压式沥青混凝土施工规范》(DL/T 5363—2016)中的沥青混凝土骨料标准。沥青选取70A、90A及SBS3种类型,其相关指标满足《水工碾压式沥青混凝土施工规范》(DL/T 5363—2016)中的沥青指标要求,抗剥落剂选用PA-1型胺类,选用的水泥、消石灰等性能指标也均满足规范要求。试验采用的沥青和集料类型及其编号见表1。

表1 试验采用的沥青和集料类型及其编号

材料	类型	编号
沥青	70A 基质沥青	70A
	90A 基质沥青	90A
	SBS 改性沥青	SBS
	90A 基质沥青 + 10% 消石灰	90H
	90A 基质沥青 + 10% 水泥	90C
90A 基质沥青 + 改性剂	90A 基质沥青 + 5% 水泥 + 5% 消石灰	90HC
	90A 基质沥青 + 0.4% PA-1 型抗剥落剂	90PA
	70A - RTFOT (对 70A 基质沥青进行旋转薄膜加热)	70R
老化沥青	90A - RTFOT (对 90A 基质沥青进行旋转薄膜加热)	90R
	石灰岩	SHY
集料	花岗岩	HGY
	辉绿岩	HLY

### 3.2 试验方法

3.2.1 接触角试验 集料的制备采用SCQ-1型岩石切片机,将岩石切割成大小约为 $10\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 8\text{ mm}$ 的长方体,依次使用细度由粗到细的砂纸打磨抛光,以保证岩块两面光滑。将试验所选取的9类沥青(表1)分别加热至熔融状态,并浇筑在清洗过的载玻片上,然后放入 $160\text{ }^\circ\text{C}$ 的烘箱中悬挂放置 $2\text{ min}$ 使沥青在载玻片上自由流淌形成薄层,制备成沥青试件。每种沥青平行制备3组,最后将载玻片放入干燥器中 $12\text{ h}$ 后使用。

采用躺滴法测定接触角,选用 JC2000DM 型接触角测量仪,选取 3 种探针液分别测定表 1 中各类沥青与集料的接触角,通过表面能理论公式计算 3 种集料与不同沥青黏附作用的大小。探针液选取蒸馏水、丙三醇和甲酰胺 3 种,其表面能参数如表 2 所示。试验温度控制为 25 ℃,用注射器将探针液缓慢滴在样品表面,通过量角法测量液滴的左接触角和右接触角,每组试验重复测试 5 次,以其平均值作为该次测量最终的接触角。

表 2 3 种探针液的表面能参数

探针液	总表面能 $\gamma_L$	色散分量 $\gamma_L^d$	极性分量 $\gamma_L^p$	极性
蒸馏水	72.80	22.20	51.00	双极性
丙三醇	63.40	33.40	30.00	单极性
甲酰胺	57.90	38.90	19.00	单极性

3.2.2 改进水煮法 为了改进水煮法试验结果不易观察的缺点,同时减少人为因素的影响,本文在我国现行《水工沥青混凝土试验规程》(DL/T 5362—2018)中的试验方案基础上进行了改进。本试验以连续性试验(3、6、10、15 min)方法测定沥青-集料在水煮剥落过程中沥青剥落质量随时间的变化。针对花岗岩、辉绿岩与改性前后 90A 沥青的黏附性进行试验研究,每种集料各分为 5 组,并以 90A-石灰岩作为对照组,具体试验方案如表 3 所示。按照公式(6)计算得到质量损失率  $F$  (%),结合黏附性分级指标表评价沥青-集料之间的黏附性能。沥青的黏附性分级指标如表 4 所示。

$$F = \frac{M_2 - M_3}{M_2 - M_1} \times 100\% \quad (6)$$

式中: $M_1$  为骨料样品质量,kg;  $M_2$  为裹覆沥青的样品冷却后质量,kg;  $M_3$  为水煮后样品干燥 24 h 至恒重的质量,kg。

表 3 水煮法试验方案

集料	选用沥青种类	水煮时间/min
HGY	90A、90C、90H、90HC、90PA	3、6、10、15
HLY	90A、90C、90H、90HC、90PA	3、6、10、15
SHY	90A	3、6、10、15

## 4 结果与分析

### 4.1 以表面能评价沥青-集料的黏附性

图 1 为通过表面能理论中的接触角计算公式得

到的 12 组沥青与集料样品在 25 ℃ 条件下的表面能参数结果。由图 1 可知,3 种沥青的色散分量数值远大于极性分量,充分说明沥青为弱极性材料,其中 SBS 改性沥青表面自由能要大于 70A、90A 基质沥青,说明 SBS 改性沥青具有更大的内聚力,原因是 SBS 吸附了沥青中的芳香分、饱和分等非极性物质,将其转换为极性、黏度大的胶质和沥青质,使得极性分量增加;改性后的 90A 表面能相较于 90A 减少了 2.5%~6.2%,且极性分量增加,色散分量减小,其中掺抗剥落剂后的极性分量增加最多,究其原因,添加消石灰和水泥可促使化学吸附产生,改善了集料表面性质,添加抗剥落剂后降低了集料表面的张力并发生化学反应,均使得沥青极性增大;老化后沥青的极性分量和自由能总量均减小,其中 70R 和 90R 的极性分量分别减小了 63.5% 和 57.4%,究其原因主要是沥青发生了氧化老化反应,导致其极性和色散分量均减小,老化后沥青的胶质含量减少,沥青质含量增加,总表面能减小<sup>[21]</sup>。从 3 种集料的表面能参数可以看出,集料的表面能参数较大,属于高表面能材料。

表 4 沥青的黏附性分级指标表<sup>[20]</sup>

$F$ / %	黏附等级	沥青膜在集料表面的剥落情况
≤5	10	沥青膜完好无剥离,质量损失不超过 5%
5~10	9	沥青膜基本完好,边角有极少量剥落,称量沥青质量损失为 5%~10%
10~15	8	沥青膜基本完好,表面有少量剥落,称量沥青质量损失为 10%~15%
15~20	7	沥青膜部分剥落,称量沥青质量损失为 15%~30%
20~30	6	
30~40	5	沥青膜大量剥落,称量沥青质量损失为 30%~60%
40~50	4	
50~60	3	
60~70	2	沥青膜大面积剥落,称量沥青质量损失为 60%~70%
>70	1	沥青膜大面积剥落,称量沥青质量损失达到 70% 以上

将表面能参数结果依次代入公式(3)、(4)、(5)中,可得到相应沥青-集料组合的  $W_{as}$ 、 $W_{aus}$  和  $ER$  的

试验结果,如表5所示。由表5可知, $W_{as}$ 和 $W_{aus}$ 均为正值,说明黏附过程与剥落过程均为放热反应过程,其中改性后的90A沥青的黏附功相较改性前增大,说明无水条件下沥青集料的黏附性能提高。

为了更为直观地分析沥青-集料系统对水稳定性指标的影响,绘制不同沥青-集料组合的 $ER$ 值关系如图2所示。由图2可知,当沥青类型相同、集料种类不同时, $ER$ 值大小顺序为:沥青-石灰岩>沥青辉绿岩>沥青-花岗岩;当集料种类相同、沥青种类为90A基质时, $ER$ 值大小顺序为:90PA-集料>90HC-集料>90H-集料 $\approx$ 90C-集料>90A-集料。比较沥青改性前后 $ER$ 值的变化:与90A-集料

相比较,90C-集料的 $ER$ 值增大了1.9%~5.8%,90H-集料 $ER$ 值增大了2.1%~5.8%;90HC-集料的 $ER$ 值增大了3.2%~7.0%;90PA-集料的 $ER$ 值增大了3.9%~7.8%。总体来看,掺不同改性剂后沥青-集料组合的 $ER$ 值均有所增大,黏附性和抗水损害能力增强,掺抗剥落剂对 $ER$ 的影响最大,其原因可能是抗剥落剂的添加改善了沥青与集料之间的润湿性,并增强了两者的黏结力。比较沥青老化前后 $ER$ 值的变化:老化后的沥青-集料较老化前的 $ER$ 值分别减少了8.7%~9.2%和4.3%~5.3%,说明老化会不同程度减弱沥青的抗水损害能力。

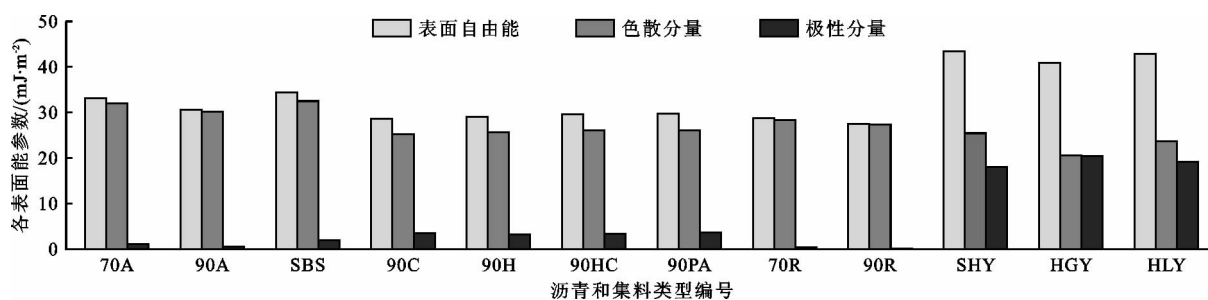


图1 不同沥青类型和集料的表面能参数

表5 各沥青-集料组合的表面能指标

集料	指标	沥青类型								
		70A	90A	SBS	90C	90H	90HC	90PA	70R	90R
HGY	$W_{as}/(\text{mJ}\cdot\text{m}^{-2})$	60.82	55.96	64.19	62.41	62.19	62.97	63.71	54.07	52.91
	$W_{aus}/(\text{mJ}\cdot\text{m}^{-2})$	114.04	112.05	115.72	118.11	117.79	117.95	118.41	111.75	111.68
	$ER$	0.533	0.499	0.555	0.528	0.529	0.534	0.538	0.484	0.474
SHY	$W_{as}/(\text{mJ}\cdot\text{m}^{-2})$	66.00	61.17	69.24	66.49	66.35	67.17	67.86	59.14	57.86
	$W_{aus}/(\text{mJ}\cdot\text{m}^{-2})$	109.69	107.65	111.49	114.84	114.45	114.56	115.08	107.49	107.55
	$ER$	0.602	0.568	0.621	0.579	0.580	0.586	0.590	0.550	0.538
HLY	$W_{as}/(\text{mJ}\cdot\text{m}^{-2})$	64.39	59.52	67.70	65.31	65.14	65.94	66.66	57.53	56.29
	$W_{aus}/(\text{mJ}\cdot\text{m}^{-2})$	111.63	109.63	113.36	116.36	116.00	116.12	116.61	109.44	112.09
	$ER$	0.577	0.543	0.597	0.561	0.562	0.568	0.572	0.526	0.520

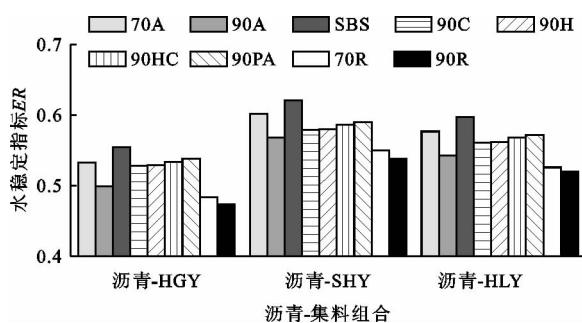


图2 各沥青-集料组合的 $ER$ 值

#### 4.2 以水煮法评价沥青-集料的黏附性

表6为水煮法测得的沥青-集料的黏附性试验结果。由表6可知,传统水煮法水煮时间为3 min时,各组合黏附等级均在8级及其以上且差距不明显,理论上满足《水工碾压式沥青混凝土施工规范》要求。随着水煮时间的加长,各组合质量损失率增大,黏附等级均有所下降且差距逐渐增大,水煮时间为15 min的各组合差距最为明显。各类型沥青与集料的黏附等级大小排序为90PA>90HC>

90C≈90H>90A,其中 90A-花岗岩在水煮时间为 15 min 时的黏附等级最低,为 1 级,而 90PA-花岗岩在水煮时间 15 min 时的黏附等级达到了 6 级,相较于 90A-花岗岩的  $F$  值减少了 50.25%,表明抗剥

落剂的添加使得沥青-集料组合的黏附性显著提高。90A-辉绿岩在水煮时间为 15 min 时的黏附等级为 4 级,而 90PA-辉绿岩相应的黏附等级为 6 级,相较于 90A-辉绿岩的  $F$  值减少了 18.01%。

表 6 各沥青-集料组合的黏附性水煮法试验结果

集料种类	沥青类型	水煮时间 3 min		水煮时间 6 min		水煮时间 10 min		水煮时间 15 min	
		黏附等级	$F$ /%	黏附等级	$F$ /%	黏附等级	$F$ /%	黏附等级	$F$ /%
HGY	90A	8	12.67	6	27.45	4	40.68	1	78.65
	90C	9	7.86	7	15.49	6	27.21	5	38.13
	90H	9	7.93	7	16.05	6	27.24	4	41.67
	90HC	9	6.85	7	15.27	6	24.12	5	33.64
	90PA	9	5.48	8	12.43	6	20.85	6	28.40
HLY	90A	9	7.72	6	22.39	5	32.40	4	43.33
	90C	9	5.86	8	13.76	6	22.32	5	30.76
	90H	9	5.49	8	13.14	6	21.75	5	30.35
	90HC	9	5.27	8	11.35	7	19.92	6	27.83
SHY	90A	10	4.89	8	10.32	7	17.67	6	25.32
	90A	9	7.23	7	16.64	6	26.18	5	34.67

上述结果表明,不同改性剂的添加使得沥青-集料的黏附能力增强程度不同。究其原因,是因为水泥中的硅酸盐属于碱性物质,消石灰是一种强碱,与沥青发生酸性物质反应生成具有一定吸附能力的产物,同时水泥和消石灰具有较强的极性,吸附在胶质和沥青质的表面,使沥青的总表面能增加,从而增强了沥青-集料的黏附力;而 PA-1 型抗剥落剂中的胺族能与集料表面发生反应生成具有连接作用的结合物,有效地增强了沥青与集料间的黏附力,因而改性机理有所不同。当沥青类型相同时,沥青-石灰岩的黏附性最佳,沥青-辉绿岩的黏附性次之,沥青-花岗岩的黏附性最差,这是由集料本身的性质决定的。

4.3 沥青质量损失率与水稳定指标的关系

图 3、4 分别为沥青-花岗岩、沥青-辉绿岩不同水煮时间下的  $F$  值与  $ER$  值的关系。由图 3、4 可知,两种岩石与沥青组合的  $F$  值与  $ER$  值均呈线性负相关,且线性拟合优度均大于 0.95,表明了表面能理论运用于沥青-集料黏附机理的准确性;当同一种类岩石与沥青组合时, $ER$  值越大,则  $F$  值越小,黏附性能也越好,随着水煮时间的加长, $F$  值不断增大。因此,综合考虑不同沥青与集料组合的  $ER$  值与  $F$  值可知,改性剂的添加对沥青与集料之间的黏附性与抗水损害能力有着不同程度的提高,沥青种类对抗水损害能力的大小排序依次为 90PA>90HC>90C≈90H>90A。

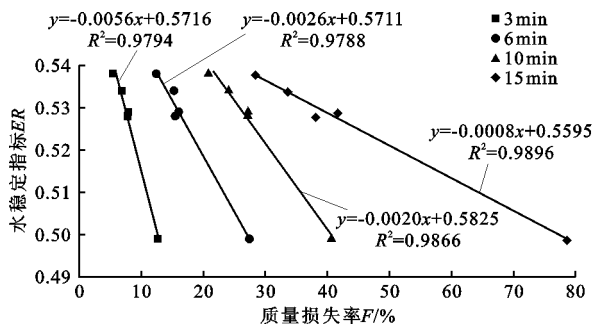


图 3 不同水煮时间下沥青-花岗岩的  $F$  值与  $ER$  值的关系

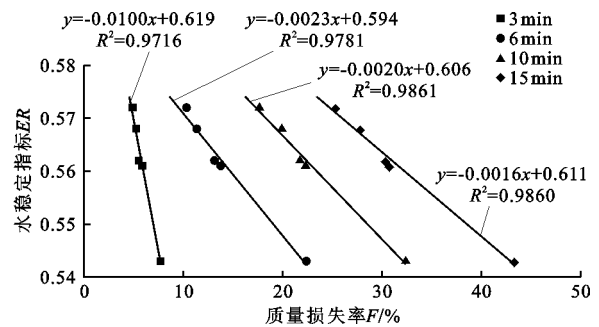


图 4 不同水煮时间下沥青-辉绿岩的  $F$  值与  $ER$  值的关系

## 5 结 论

(1) 基于表面能理论建立的水稳定指标  $ER$  与水煮法的质量损失率  $F$  之间具有线性负相关关系, 可以有效评价沥青-集料系统的黏附性能及沥青混合料的抗水损害能力。

(2) 通过表面能试验, 3种原样沥青的色散分量远大于极性分量, 表明沥青为弱极性材料; 掺入改性剂后的 90A 沥青表面能总量减小了 2.5% ~ 6.2%, 沥青极性变大, 使沥青-集料之间的润湿性增加, 增强了两者的黏结力; 沥青老化后总表面能减小, 极性减小, 黏附性能减弱。

(3) 采用水稳定指标  $ER$  定量评价沥青-集料的黏附性强弱, 结果表明集料相同时掺改性剂的 90A 沥青黏附性大小排序为 90PA > 90HC > 90C ≈ 90H > 90A, 沥青相同时黏附性大小排序为沥青-石灰岩 > 沥青-辉绿岩 > 沥青-花岗岩。该评价方法相对于水煮法更为准确客观, 能够有效减小试验过程的主观因素影响。

(4) 通过改进水煮法, 在一定时间范围内, 连续水煮时间越长, 越容易比较出不同类型沥青与集料之间黏附性的差异, 通过比较得出抗剥落剂的改性效果最好。

### 参考文献:

- [1] 原健安, 张登良. 沥青与矿料粘附性研究[J]. 中国公路学报, 1995, 8(4): 7-10.
- [2] 王 勇. 基于表面能理论的沥青与集料粘附性研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2010.
- [3] 彭余华, 王林中, 于 玲. 沥青与集料粘附性试验新方法[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2009, 25(2): 282-285.
- [4] 汪正兴. 骨料与沥青黏附性评价方法及水工沥青混凝土长期水稳定性评估研究[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2020.
- [5] 余国红, 袁万杰, 孙长新. 矿料与沥青粘附性评价技术研究[J]. 公路工程, 2010, 35(2): 140-143+146.
- [6] 樊 亮, 张玉贞, 王 林. 沥青黏附性试验的图像分析方法初探[J]. 公路, 2011(12): 151-154.
- [7] CHENG Dingxin, LITTLE D, LYTTON R, et al. Surface energy measurement of asphalt and its application to predicting fatigue and healing in asphalt mixtures[J]. Transportation Research Record, 2002, 1810(1): 44-53.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] HAMEDI G H, NEJAD F M. Using energy parameters based on the surface free energy concept to evaluate the moisture susceptibility of hot mix asphalt[J]. Road Materials and Pavement Design, 2015, 16(2): 239-255.
- [12] 王 岚, 王利强, 常春清. 基于表面自由能理论研究改性沥青-集料复合材料黏附性能[J]. 复合材料学报, 2017, 34(9): 2061-2069.
- [13] 甘新立, 郑南翔, 丛卓红. 基于浸润参数和表面能理论的沥青与集料黏附性分析[J]. 北京工业大学学报, 2017, 43(9): 1388-1395.
- [14] 罗 蓉, 郑松松, 张德润, 等. 基于表面能理论的沥青与集料黏附性能评价[J]. 中国公路学报, 2017, 30(6): 209-214.
- [15] 韩 森, 李 微, 刘梦梅, 等. 基于表面能的掺消石灰沥青黏附性分析[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2020, 41(4): 491-496.
- [16] 董仕豪, 韩 森, 尹媛媛, 等. 基于表面能理论的石灰改性沥青黏附性研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2021, 40(3): 89-97.
- [17] 滕新荣. 表面物理化学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2009.
- [18] 贾永杰. 基于表面能理论的沥青-集料界面粘附性研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古工业大学, 2016.
- [19] BHASIN A, LITTLE D N. Characterization of aggregate surface energy using the universal sorption device[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2007, 19(8): 634-641.
- [20] 张 苛, 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.
- [21] 孙吉书, 于 水, 许宁乾, 等. 考虑老化作用的沥青-集料界面黏附性评价[J]. 公路交通科技, 2019, 36(11): 1-7+16.