

# 沥青 - 集料黏附测试方法与冻融劈裂试验的相关性研究

姚 望<sup>1\*</sup>, 王晓然<sup>1</sup>, 李永振<sup>2#</sup>, 樊 亮<sup>2</sup>, 胡家波<sup>2</sup>

<sup>1</sup>山东高速股份有限公司, 山东 济南

<sup>2</sup>山东省交通科学研究院, 山东 济南

Email: 791433632@qq.com, <sup>#</sup>502020154@qq.com

收稿日期: 2021年7月26日; 录用日期: 2021年8月10日; 发布日期: 2021年8月26日

## 摘 要

本文利用传统水浸法、水浸法 + 图像处理法及接触角法开展不同沥青与集料之间的黏附性研究, 测定黏附等级、剥落率、接触角及黏附功等指标, 并进行与沥青混合料冻融劈裂试验之间的相关性分析, 探索黏附性与沥青、集料指标的影响关系, 结果表明: 传统水浸法采用目测判断的方法, 不能很好地对比出同种集料与不同沥青的粘附性差别, 在实际工程应用只能作为一种简单的参考, 对实际工程应用指导不足; 水浸法 + 图像处理法得到的剥落率, 接触角法得到的黏附功测定黏附功, 均能够准确定量的表征不同沥青与集料的黏附性优劣; 对于基质沥青, 水浸法 + 图像处理法、接触角法与沥青混合料水稳定性具有良好的相关性, 对工程实际应用具有很好的指导作用; 三种试验方法评价改性沥青与集料黏附性均存在一定的弊端, 还需开发准确度更高、适用性更广的黏附性评价方法。

## 关键词

黏附性, 接触角, 水浸法, 冻融劈裂试验, 表面能, 黏附功

## Study on the Correlation between Asphalt-Aggregate Adhesion Test Method and Freeze-Thaw Splitting Test

Wang Yao<sup>1\*</sup>, Xiaoran Wang<sup>1</sup>, Yongzhen Li<sup>2#</sup>, Liang Fan<sup>2</sup>, Jiabo Hu<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Shandong Hi-Speed Company Limited, Jinan Shandong

\*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 姚望, 王晓然, 李永振, 樊亮, 胡家波. 沥青 - 集料黏附测试方法与冻融劈裂试验的相关性研究[J]. 土木工程, 2021, 10(8): 797-804. DOI: 10.12677/hjce.2021.108090

<sup>2</sup>Shandong Transportation Institute, Jinan Shandong  
Email: 791433632@qq.com, #502020154@qq.com

Received: Jul. 26<sup>th</sup>, 2021; accepted: Aug. 10<sup>th</sup>, 2021; published: Aug. 26<sup>th</sup>, 2021

## Abstract

In this paper, the traditional water immersion method, water immersion method + image processing method and contact angle method are used to study the adhesion between different asphalt and stone. The adhesion grade, spalling rate, contact angle and adhesion work are measured, and the correlation between them and the freeze-thaw splitting test of asphalt mixture is analyzed to explore the influence relationship between the adhesion and the indexes of asphalt and stone. The results show that: the traditional water immersion method uses visual judgment method, which cannot well compare the difference of adhesion between the same aggregate and different asphalt, and can only be used as a simple reference in practical engineering application, which is insufficient for practical engineering application guidance. The results show that the spalling rate obtained by water immersion method + image processing method, the adhesion work obtained by contact angle method and the adhesion work measured by measurement can accurately and quantitatively characterize the adhesion between different asphalt and stone. For the base asphalt, the water immersion method + image processing method and contact angle method have good correlation with the water stability of asphalt mixture, which has a good guiding role for the practical application of engineering; there are some disadvantages in the three test methods to evaluate the adhesion between modified asphalt and stone, so it is necessary to develop a more accurate and applicable adhesion evaluation method.

## Keywords

Adhesion, Contact Angle, Water Immersion Method, Freeze-Thaw Splitting Test, Surface Energy, Adhesion Work Adhesion

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

沥青路面以其均衡的高低温性能及良好的驾驶体验感,已成为我国目前最常用的路面形式。沥青混合料的各项技术指标与沥青、集料性能及两者之间的黏附优劣息息相关,现行规范[1]中均有明确的沥青、集料技术指标试验检测方法及评价标准,虽有沥青-集料之间的黏附性试验检测方法,但是是一种半定量方法,与实际沥青混合料性能之间缺乏相关性研究。自20世纪20年代开始,国内外路面工程学者就开始研究沥青与集料间的黏附性,主要有五种理论[2]: 1) 力学理论; 2) 化学反应理论; 3) 表面能理论; 4) 分子定向理论; 5) 静电理论。伴随五种理论产生众多试验评价方法,主要有水煮水浸法、光电比色法、溶剂洗脱法、SHRP净吸附法、图像处理法、超声波法、原子力显微镜法、接触角法、动态力学分析法、动态剪切流变仪法等[3][4][5][6]。经试验证明上述试验方法均能表征沥青与集料的黏附性,但至今仍无学术界及工程应用界公认的标准评价方法。

我国规范中规定表征沥青与集料之间的黏附性方法主要为水煮水浸法、浸水马歇尔试验及沥青混合

料冻融劈裂试验等[7]。水煮水浸法为半定量试验方法, 采用人眼观察判断黏附性等级, 定量不准确。在实际工程应用中, 水煮水浸法与实际工程相关性较差[8], 与沥青混合料实际受力情况相差太多, 各类人员均是将水煮水浸法作为一种简单参考, 并不将其作为预判沥青混合料性能的关键指标。因此, 为更好地表征沥青-集料的黏附特性, 为更好地结合并指导实际工程, 利用高科技实验评价手段, 开展沥青-集料之间黏附特性的快速评价方法, 对工程质量的保证具有很重要的意义。

本文利用传统水浸法、水浸法+图像处理法及接触角法开展不同沥青与集料之间的黏附性研究, 测定黏附等级、剥落率、接触角及黏附功等指标, 并进行与沥青混合料冻融劈裂试验之间的相关性分析, 以期在实际工程应用提供能够定量、快速并准确预判沥青混合料水稳定性能的黏附性测试方法, 并为以后的沥青与集料黏附性试验评价方法的发展提供指导及建议。

## 2. 原材料及试验方法

### 2.1. 原材料

选用四种沥青, 分别为 50 号沥青、70 号沥青、90 号沥青和 SBS 改性沥青。四种沥青的技术指标见表 1。

**Table 1.** Technical indexes of asphalt  
**表 1.** 沥青技术指标

试验项目	50 号沥青	70 号沥青	90 号沥青	SBS 改性沥青
针入度 25℃, 5 s, 100 g (0.1 mm)	51	69	84	57
软化点(R&B) (℃)	49.0	48.0	45.0	88.0
135℃黏度(Pa·s)	0.45	0.40	0.38	1.6
延度(cm)	39 (10℃)	37 (10℃)	>100 (10℃)	36 (5℃)

化学反应理论认为, 沥青呈酸性, 与碱性集料的黏附性最优, 根据规范主要采用 SiO<sub>2</sub> 含量判断集料的酸碱性, 将 SiO<sub>2</sub> 的含量小于 52% 的集料称为碱性集料, SiO<sub>2</sub> 的含量在 52% 和 65% 之间的集料称为中性集料, SiO<sub>2</sub> 的含量大于 65% 的集料称为酸性集料。因此选用三种化学性质不同的集料, 分别为石灰岩、玄武岩和花岗岩, 三种集料中的 SiO<sub>2</sub> 含量见表 2。采用接触角法时采用切割机切割成规整的形状, 然后用 1000 目砂纸打磨光滑。

**Table 2.** SiO<sub>2</sub> content of three aggregates  
**表 2.** 三种集料 SiO<sub>2</sub> 含量

集料类型	SiO <sub>2</sub> 含量/%
石灰岩	15.50
玄武岩	53.99
花岗岩	72.77

### 2.2. 试验方法

#### (1) 水浸法

水浸法试验采用文献[7]中的方法。

### (2) 水浸法 + 图像处理法

在试验方法(1)的基础上, 采用图像处理法对试验结果进行处理, 得到沥青在集料上的剥落率, 具体的图像采集处理方法借鉴樊亮学者[9]的研究方法。

### (3) 接触角测试

接触角法采用躺滴法, 采用德国 KRUSS 公司的 DSA 100 接触角测量仪, 测试方法参考魏建明[10]学者的试验方法, 采用已知表面自由能的三种液体, 分别测定三种液体与沥青、集料的接触角, 通过表面能理论公式计算得到沥青、集料的表面自由能。具体的计算公式如下:

沥青在高温条件下呈现流动液体状态[11], 沥青在集料表面的润湿过程遵循吉布斯函数:

$$\Delta G = \gamma_{sl} - \gamma_l - \gamma_s \quad (1)$$

粘附功定义为:

$$W_{sl} = -\Delta G \quad (2)$$

即:

$$W_{sl} = \gamma_s + \gamma_l - \gamma_{sl} \quad (3)$$

结合 Young 方程:

$$\gamma_l \cos \theta = \gamma_s - \gamma_{sl} \quad (4)$$

可得黏附功为:

$$W_{sl} = \gamma_l (1 + \cos \theta) \quad (5)$$

式中:

$\Delta G$ ——吉布斯自由能,  $\text{mJ}/\text{m}^2$ ;

$\gamma_l$ ——液体表面自由能,  $\text{mJ}/\text{m}^2$ ;

$\gamma_s$ ——固体表面自由能,  $\text{mJ}/\text{m}^2$ ;

$\gamma_{sl}$ ——固液界面自由能,  $\text{mJ}/\text{m}^2$ ;

$W_{sl}$ ——固液粘附功,  $\text{mJ}/\text{m}^2$ ;

$\theta$ ——固液接触角, ( $^\circ$ )。

### (3) 冻融劈裂试验

冻融劈裂试验参考文献[7]中的方法。

## 3. 黏附性试验结果与讨论

### 3.1. 水浸法评价沥青 - 集料黏附性

利用水浸法, 采用目测法判断四种沥青与三种集料的黏附等级, 所得结果如表 3 所示。

**Table 3.** Adhesion of asphalt to different aggregates

**表 3.** 沥青与不同集料的黏附性

项目	目测判断黏附等级		
	石灰岩	玄武岩	花岗岩
50 号	4	3	3
70 号	4	3	3
90 号	5	4	2
SBS	5	4	4

由表 3 可知, 对于沥青与石灰岩、玄武岩的黏附性是 SBS 和 90 号沥青相当, 优于 50 号沥青和 70 号沥青; 与花岗岩的黏附性 SBS 优于 50 号沥青和 70 号沥青, 而 50 号沥青和 70 号沥青相当且优于 90 号沥青; 对于同一标号的沥青与不同集料粘附时粘附性大小为: 石灰岩 > 玄武岩 > 花岗岩。由以上试验结果可知, 石灰岩、玄武岩与 SBS 和 90 号沥青的黏附性优劣无法判断, 50 号和 70 号沥青与三种集料的黏附性优劣无法判断, 这说明采用目测判断的方法并不能很好的对比出同种集料与不同沥青的粘附性差别。

### 3.2. 水浸法 + 图像处理评价沥青 - 集料黏附性

利用在上一节水浸法的基础上, 采用图像处理的方式测得四种沥青在集料表面的剥落率, 所得结果如表 4 所示。

**Table 4.** Adhesion of asphalt to different aggregates  
**表 4.** 沥青与不同集料的黏附性

项目	石灰岩	玄武岩	花岗岩
	剥落率/%	剥落率/%	剥落率/%
50 号	1.70	11.02	22.37
70 号	2.05	25.26	34.15
90 号	0.67	13.97	33.54
SBS	0.21	1.38	5.65

由表 2 可知, 对于沥青与石灰岩的黏附性是 SBS > 90 号 > 50 号 > 70 号, 与玄武岩的黏附性 SBS > 90 号 > 50 号 > 70 号, 与花岗岩的黏附性 SBS > 90 号 > 50 号 > 70 号; 对于同一标号的沥青与不同集料粘附时粘附性大小为: 石灰岩 > 玄武岩 > 花岗岩。由上述试验结果可知, 采用水浸法 + 图像处理法, 得到沥青在集料表面的剥落率, 能够准确定量的表征不同沥青与集料的黏附性优劣。

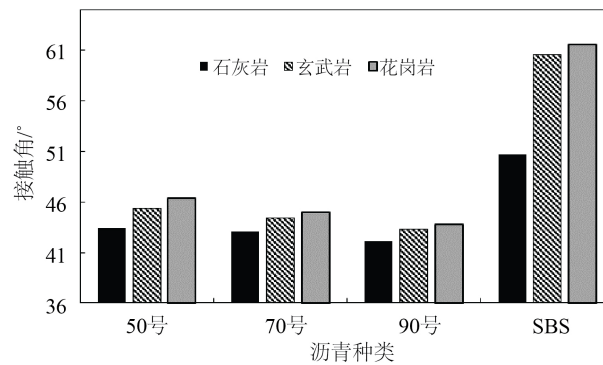
### 3.3. 接触角法评价沥青 - 集料黏附性

接触角反映液体在固体表面润湿的能力, 一般接触角越大, 表明固体越不容易被液体所润湿。黏附功反映将沥青从集料表面分离产生新界面所需要做的功, 一般黏附功越大, 说明两者的黏附性越好[10]。

利用躺滴法, 测量四种沥青与三种集料的接触角计算粘附功定量评价沥青与集料的黏附性, 所得结果如表 5 所示。

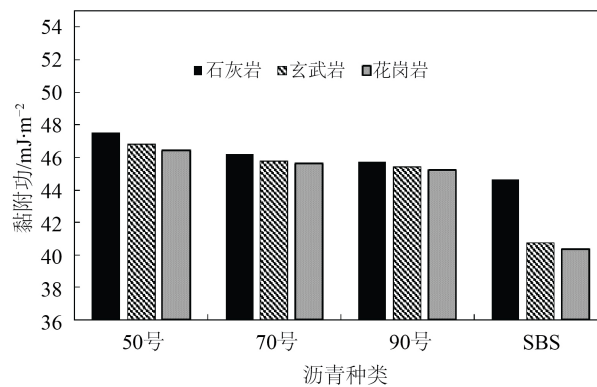
**Table 5.** Contact angle and adhesion work between asphalt and aggregate  
**表 5.** 沥青与集料的接触角及黏附功

沥青与集料类型	石灰岩		玄武岩		花岗岩	
	接触角/°	黏附功/mJ·m <sup>-2</sup>	接触角/°	黏附功/mJ·m <sup>-2</sup>	接触角/°	黏附功/mJ·m <sup>-2</sup>
50 号	43.34	47.47	45.34	46.80	46.34	46.45
70 号	43.12	46.19	44.46	45.76	44.95	45.60
90 号	42.17	45.76	43.32	45.40	43.81	45.24
SBS	50.66	42.62	60.59	40.72	61.54	40.34



**Figure 1.** Contact angle between different asphalt and aggregate

**图 1.** 不同沥青与集料的接触角



**Figure 2.** Adhesion work of different asphalt and aggregate

**图 2.** 不同沥青与集料的黏附功

由表 5、图 1 及图 2 可知, 沥青标号增加, 接触角逐渐减小, 黏附功逐渐减小。在同种沥青条件下, 不同集料的黏附性优劣为石灰岩 > 玄武岩 > 花岗岩。对于基质沥青, 随着沥青标号的增加, 沥青与集料的接触角逐渐减小, 黏附功逐渐减小。沥青标号越高, 沥青在集料表面的润湿性更好, 分离需要做的功越少, 黏附性变差, 通过量化的接触角和黏附功数据能够定量的表征沥青与集料之间的黏附性优劣。

### 3.4. 冻融劈裂试验

依据交通部试验规程[7]中的标准方法, 对四种沥青和三种集料进行水稳定性试验, 测定冻融劈裂强度比(TSR), 沥青混合料级配为 AC-20, 结果如表 6 所示。

**Table 6.** Freeze-thaw splitting test results of different asphalt and aggregate combinations

**表 6.** 不同沥青与集料组合的冻融劈裂试验结果

沥青与集料类型	冻融劈裂强度比/%		
	石灰岩	玄武岩	花岗岩
50号	87.4	83.8	76.5
70号	95.5	85.4	75.3
90号	89.2	81.9	76.3
SBS	90.8	93.8	86.2



由表 6 可知, 同种沥青不同集料水稳定性由好及坏为石灰岩 > 玄武岩 > 花岗岩; 石灰岩条件下, 不同种类沥青比较抗水损坏能力由好及坏为 70 号 > SBS > 90 号 > 50 号; 玄武岩条件下, 不同种类沥青比较抗水损坏能力由好及坏为 SBS > 70 号 > 50 号 > 90 号; 花岗岩条件下, 不同种类沥青比较抗水损坏能力由好及坏为 SBS > 50 号 > 90 号 > 70 号。

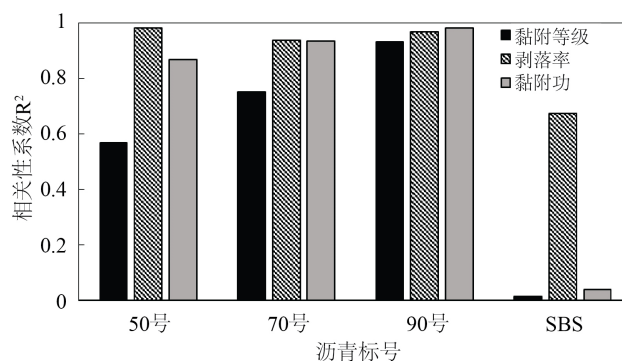
### 3.5. 相关性分析

利用水浸法、水浸法 + 图像处理测定剥落率、接触角法测定沥青与集料黏附功, 分别与冻融劈裂强度比(TSR)进行线性相关性分析, 所得的方程及相关性系数如表 7 及图 3 所示。

**Table 7.** Correlation analysis between three adhesion indexes and freeze-thaw splitting strength ratio (TSR)

**表 7.** 三种黏附性指标与冻融劈裂强度比(TSR)的相关性分析

沥青种类	黏附等级		剥落率		黏附功	
	线性方程	相关性系数 $R^2$	线性方程	相关性系数 $R^2$	线性方程	相关性系数 $R^2$
50 号	$y = 7.25x + 58.4$	0.5681	$y = -0.5315x + 88.783$	0.9814	$y = 9.9795x - 385.54$	0.8674
70 号	$y = 15.15x + 34.9$	0.75	$y = 0.5901x + 97.49$	0.9378	$y = 32.003x - 1381.9$	0.9347
90 号	$y = 4.0857x + 67.486$	0.9309	$y = -0.385x + 88.642$	0.9659	$y = 4.041x - 1010.6$	0.9798
SBS	$y = 0.8x + 86.8$	0.0146	$y = -1.097x + 92.914$	0.6733	$y = 0.323x + 76.736$	0.04



**Figure 3.** Comparison of correlation coefficients of three adhesion indexes of different asphalts

**图 3.** 不同沥青三种黏附指标的相关性系数比较

由表 7 及图 3 可知, 对于基质沥青, 水浸法评定黏附性测得的黏附等级与冻融劈裂强度比的线性相关系数分别为 0.5681、0.75、0.9309; 水浸法 + 图像处理法评定黏附性测得的剥落率与冻融劈裂强度比的线性相关系数分别为 0.9814、0.9378、0.9659; 接触角法评价黏附性测得的黏附功与冻融劈裂强度比的线性相关系数分别为 0.8674、0.9347、0.9798; 水浸法 + 图像处理法和接触角法与冻融劈裂强度比的线性相关系数远大于传统水浸法, 可知传统水浸法不能准确的定量表征不同沥青与集料的黏附特性, 水浸法 + 图像处理法及接触角法均能很好的表征沥青 - 集料的黏附性, 对沥青混合料的水稳定性能具有很高的参考价值。

对于 SBS 改性沥青, 三种试验方法得到的黏附等级、剥落率、黏附功与冻融劈裂强度比的线性相关系数分别为 0.0146、0.6733、0.04, 相关性系数均比较小, 说明三种试验方法在评价改性沥青与集料黏附性均存在一定的弊端, 由于沥青 - 集料的黏附性与沥青、集料的物理化学性质均有关, 故对于 SBS 改性

沥青与集料的黏附性评价, 还需要进行沥青组分、集料化学[12]、界面黏附作用等机理方面的研究, 开发新型的更准确的定量评价方法。

#### 4. 结论

1) 传统水浸法采用目测判断的方法, 不能很好地对比出同种集料与不同沥青的粘附性差别, 在实际工程应用只能作为一种简单的参考, 对实际工程应用指导不足。

2) 水浸法 + 图像处理法得到的剥落率, 接触角法得到的黏附功测定黏附功, 均能够准确定量地表征不同沥青与集料的黏附性优劣。

3) 对于基质沥青, 沥青标号越高, 沥青在集料表面的润湿性更好, 分离需要做的功越少, 黏附性变差。

4) 水浸法 + 图像处理法与冻融劈裂试验相关性系数为 0.9814、0.9378、0.9659, 接触角法与冻融劈裂试验相关性系数为 0.8674、0.9347、0.9798, 两种试验方法与沥青混合料水稳定性具有良好的相关性, 对工程实际应用具有很好的指导作用。

5) 对于 SBS 改性沥青, 三种试验方法得到的黏附等级、剥落率、黏附功与冻融劈裂强度比的线性相关系数分别为 0.0146、0.6733、0.04, 说明传统水浸法、水浸法 + 图像处理法及接触角法在评价改性沥青与集料黏附性均存在一定的弊端, 还需开发准确度更高、适用性更广的黏附性评价方法。

#### 参考文献

- [1] 沈金安, 李福普, 陈景. JTG F40-2004. 公路沥青路面施工技术规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
- [2] 王威娜, 徐青杰, 周圣雄, 秦煜, 闫强. 沥青-集料黏附作用评价方法综述[J]. 材料导报, 2019, 33(13): 2197-2205.
- [3] 刘彦梅. 浅析集料材质特性和加工特征对沥青混凝土的影响因素[J]. 中国建材科技, 2020, 29(6): 79-81.
- [4] 陈搏. 基于胎/路有效接触特性的沥青路面抗滑性能评价方法研究[D]: [博士学位论文]. 广州: 华南理工大学, 2018.
- [5] 张淑文. 基于界面接触特性的多尺度沥青路面抗滑性能评价及应用研究[D]: [博士学位论文]. 广州: 华南理工大学, 2015.
- [6] 王黎明, 董晨. 基于颗粒堆积理论的密级配乳化沥青混合料级配优化[J]. 公路工程, 2021, 46(3): 284-288+294.
- [7] 李福普, 严二虎, 黄颂昌, 秦永春, 王志军, 李健. JTG E20-2011. 公路工程沥青及沥青混合料试验规程[S]. 北京: 人民交通出版社, 2011.
- [8] 王鸽. 沥青-集料界面粘结性能评价及影响因素研究[D]: [硕士学位论文]. 济南: 山东建筑大学, 2018.
- [9] 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.
- [10] 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]: [博士学位论文]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2008.
- [11] 张岩. 基于表面自由能理论对沥青与集料的粘附性能研究[D]: [硕士学位论文]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2017.
- [12] 杨瑞华, 许志鸿. 密级配沥青混合料集料分形分维与路用性能的关系[J]. 土木工程学报, 2007, 40(3): 98-103, 109.