doi：10.3969/j.issn.1002－0268.2019.11.001

考虑老化作用的沥青－集料界面黏附性评价

孙吉书[1,2]，于 水[1]，许宁乾[1]，李宁利[1,2]
（1. 河北工业大学 土木与交通学院，天津 300401；2. 河北省土木工程技术研究中心，天津 300401）

摘要：沥青路面水损坏的机理即沥青与集料界面的黏附性丧失，而沥青与集料的黏附性在光、氧等的作用下会有所降低。为探究老化作用对沥青－集料界面黏附性的影响，以70#基质沥青和纳米膨润土改性沥青为试验样品，采用躺滴法在不同老化条件下分别测定了沥青与集料的接触角。基于微观表面能理论计算了沥青的黏聚功、沥青与集料体系的黏附功、剥落功及配伍率。然后分析了RTFOT老化、PAV老化和紫外老化对沥青－集料黏附性的变化规律。最后从宏观水稳定性试验的角度对表面能理论作出了验证。研究结果表明：对于同种老化条件，纳米改性沥青与集料的黏附性要优于基质沥青，纳米改性剂可以降低老化作用对沥青－集料黏附性的影响；对于同种沥青－集料体系，RTFOT老化对黏附性能影响最大，紫外老化影响最小。其中，对于基质沥青RTFOT后，剥落功提高了4%，PAV后提高2.2%，室内紫外光照射15 h后提高了1.4%。对于纳米改性沥青，RTFOT后剥落功提高了2.7%，PAV后提高1.4%，紫外老化后提高0.6%；此外，表面能理论分析的规律与冻融劈裂试验具有较高的契合度，即用剥落功表征的黏附性与TSR表征的水稳定性具有一致性。

关键词：道路工程；黏附性；表面能理论；老化作用；纳米膨润土
中图分类号：U414.7+5 **文献标识码**：A **文章编号**：1002－0268（2019）11－0001－07

Evaluation of Adhesion of Asphalt-aggregate Interface Considering Aging effect

SUN Ji-shu[1,2], YU Shui[1], XU Ning-qian[1], LI Ning-li[1,2]
（1. School of Civil Engineering and Transportation, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China;
2. Civil Engineering Technology Research Center of Hebei Province, Tianjin 300401, China）

Abstract: The mechanism of water damage on asphalt pavement is the loss of adhesion between asphalt and aggregate interface, and the adhesion of asphalt to aggregate will be reduced under the action of light and oxygen. To explore the influence of aging action on the adhesion of asphalt-aggregate interface, taking the matrix asphalt No. 70 and nano-bentonite modified asphalt as the test samples, the contact angles of the asphalt-aggregate interface under different aging conditions are measured by sessile drop method. Based on the microscopic surface energy theory, the cohesive work of asphalt, the adhesion work of asphalt and aggregate system, the peeling work and the compatibility rate are calculated. Then, the variations of asphalt-aggregate adhesion by RTFOT aging, PAV aging and ultraviolet aging are analyzed. Finally, the surface energy theory is verified from the perspective of macroscopic water stability test. The result shows that (1) The adhesion of nano-modified asphalt to aggregate is better than that of matrix asphalt under the same aging condition, and nano-modifier can reduce the influence of aging on asphalt-aggregate adhesion. (2) For the same asphalt-aggregate system, RTFOT aging condition has the most serious influence on the adhesion

收稿日期：2017－12－22
基金项目：天津市交通运输科技发展计划项目（2016A－01，2016A－01－01）
作者简介：孙吉书（1976－），男，河北广宗人，博士，副教授.（sunjishu76@126.com）

performance, but ultraviolet aging condition has the least influence. Among them, the spalling work for the matrix asphalt increases by 4%, 2.2% and 1.4% respectively under the RTFOT, PAV and 15 h of indoor ultraviolet exposure. However, it only increases by 2.7%, 1.4% and 0.6% for the nano-modified asphalt under the same condition. (3) In addition, the rule of theoretical analysis of surface energy has a higher degree of fit with the freeze-thaw split test, i.e., the adhesion characterized by spalling work is consistent with the water stability characterized by TSR.

Key words: road engineering; adhesion; surface energy theory; aging effect; nano-bentonite

0 引言

水稳定性一直是评价我国沥青路面路用性能的重要指标之一，沥青路面水损害的主要原因是水分进入沥青与集料的接触面使沥青从集料表面剥落导致黏附性丧失[1]。评价水稳定性的方法包括定性分析和定量分析。定性分析如水煮试验操作简单易行，但含有较强的主观因素；定量分析如冻融劈裂试验、浸水马歇尔试验等没有充足的理论做支撑，且缺乏水损坏过程机理[2]，故新的试验方法应运而生。

近年来，国内外不少学者运用微观表面能理论评价沥青路面水稳定性取得了不错的效果。Lottman和Bhaisin[3-4]研究发现沥青和集料的黏附性减弱是沥青路面水损害的关键因素。Little[5]采用Wilhelmy吊片法测量沥青与集料的接触角，从而计算得出表面能，实现了测试的软件化。Khodaii等[6]运用表面能理论验证了不同类型抗剥落剂对沥青－集料黏附性的影响。Kong等[7]基于表面能理论计算了沥青的接触角与软化点及车辙因子的关系。Azarhoosh等[8]通过表面自由能的方法分析了TiO_2改性沥青与骨料的黏合性，发现TiO_2可改善沥青的内聚能。Arabani等[9]基于表面能理论证明了抗剥落剂（LAA）可提高沥青混合料的水稳定性。Hamedi等[10]以纳米黏土材料作为改性剂，利用表面能理论分析了新材料改性沥青的黏聚性，并证明了纳米黏土材料可提高沥青混合料的抗水毁能力。我国学者肖庆一等[11]提出了沥青与集料黏附性的测定方法，认为黏附功可以作为沥青与矿料的黏附性表征指标。魏建明[12]证明了利用躺滴法可准确地测定沥青表面的接触角。罗蓉等[13]分析了剥落剂掺量对黏附功和剥落功的影响，用水煮法试验对表面能理论做出了验证，并采用表面能匹配性指标评价了沥青与集料之间的配伍性。曾哲等[14]探究了水溶液的pH值对沥青－集料黏附性的影响，发现沥青混合料的黏附性随水溶液pH值的增大会变得越来越好。赵士雄等[15]运用表面能理论研究了微/纳米颗粒表面能测定方法，得出了采用柱毛细法和板毛细法均可准确地测量微/纳米颗粒的接触角。

当前，对于沥青与集料黏附性的研究，大多数学者都是从沥青与集料的固有属性出发，运用表面能理论分析不同沥青种类和常见集料的黏附性，而很少考虑外界条件的变化对黏附性的影响。本研究通过表面能理论及试验方法，测试老化前后的基质沥青、纳米膨润土改性沥青与石灰岩的表面能参数，并研究其变化规律，从而分析沥青老化对沥青－集料体系黏附性的影响。

1 表面能理论

1.1 表面能基本理论

表面自由能是指材料在某温度压力下生成单位面积新界面所需做的功，全称表面吉布斯自由能，简称表面能。由Good等[16]的分析可知，一种材料的表面能主要由分子间的作用力分量组成，包括伦敦力引起的色散分量和非伦敦力引起的极性分量，其关系式如下：

$$\gamma = \gamma^{d} + \gamma^{p}, \tag{1}$$

式中，γ为表面能；γ^{d}为表面能的色散分量；γ^{p}为极性分量。

1.2 黏聚功

在沥青混合料中，沥青的黏聚性是指沥青材料在外力作用下自身产生相对位移时抵抗变形的能力。有研究表明[1]，沥青的黏度越大，其黏聚力越大，黏聚性能就越好，抗水损坏能力就越高。根据界面化学基础，将均质沥青分离成2个新界面，外界所做的功被定义为黏聚功ΔG，其表达式如下：

$$\Delta G = 2\gamma_{a}, \tag{2}$$

式中γ_{a}为沥青表面能。

1.3 黏附模型

由表面能理论，沥青与集料的黏附功是指沥青与集料黏附引起的整个系统界面自由能的减少量。沥青与矿料结合后，由分散的两相体系转为混合料体系，此过程中向外释放的能量就是沥青－集料体系的黏附功，黏附功越大，则释放的能量越多，混合料的状态

越稳定，黏附性能就越好，用公式表示为[5]：

$$W_{as} = \gamma_a + \gamma_s - \gamma_{as}, \tag{3}$$

式中，W_{as}为沥青与集料的黏附功；γ_a 为沥青表面能；γ_s 为集料表面能；γ_{as}为沥青－集料界面自由能，其表达式为：

$$\gamma_{as} = \gamma_a + \gamma_s - 2\sqrt{\gamma_a^d\gamma_s^d} - 2\sqrt{\gamma_a^p\gamma_s^p}, \tag{4}$$

式中，γ_a^d 和 γ_s^d 分别为沥青和集料表面的色散分量；γ_a^p 和 γ_s^p 分别为沥青和集料表面的极性分量。

由 Young 方程[5]：

$$\gamma_s = \gamma_{as} + \gamma_a\cos\theta, \tag{5}$$

结合式（1）~式（5）可得到 Young－Dupre 公式：

$$W_{as} = \gamma_a(1 + \cos\theta) = 2\sqrt{\gamma_a^d\gamma_s^d} + 2\sqrt{\gamma_a^p\gamma_s^p}。\tag{6}$$

式中 θ 为沥青在集料表面的接触角。

1.4　表面能的计算

由式（6）可知，为计算出沥青与集料的黏附功 W_{as}，要先求得沥青表面能分量 γ_a^d，γ_a^p 和集料的表面能分量 γ_s^d，γ_s^p。常温下沥青为固态，若选择两种试剂，由物理学常用数表查出其表面能 γ_l 及其参数 γ_l^d，γ_l^p，并测出该两种试剂分别在固态沥青表面的接触角 θ'，就可以计算出固态沥青的表面能参数 γ_a^p 和 γ_a^d，故（6）式可转化为：

$$\gamma_l(1 + \cos\theta') = 2\sqrt{\gamma_l^d\gamma_a^d} + 2\sqrt{\gamma_l^p\gamma_a^p}, \tag{7}$$

式中，γ_l 为试剂表面能；γ_l^d 和 γ_l^p 分别为试剂表面能的色散分量和极性分量；θ'为试剂在固态沥青表面的接触角。为方便计算，将式（7）写成 $y = mx + b$ 的形式，即：

$$\frac{1 + \cos\theta'}{2}\frac{\gamma_l}{\sqrt{\gamma_l^d}} = \sqrt{\gamma_a^p}\sqrt{\frac{\gamma_l^p}{\gamma_l^d}} + \sqrt{\gamma_a^d}。\tag{8}$$

将$\frac{1+\cos\theta'}{2}\frac{\gamma_l}{\sqrt{\gamma_l^d}}$视为 y，$\sqrt{\frac{\gamma_l^p}{\gamma_l^d}}$视为 x，作 x 关于 y 的散点图并线性拟合，则 γ_a^p 为斜率的平方，γ_a^d 为截距的平方[16]。为提高散点图的准确性，选取 3 个点即选择 3 种已知表面能及其参数的试剂，若得到的曲线不成线性关系，说明试剂与固态沥青接触角不准确，需重新测量，集料表面能分量的计算方法与此相同。

1.5　剥落模型

沥青混合料的剥落过程是在有水条件下，水分从裂缝渗入沥青混合料内部，在重力作用或路面有荷载作用时使水分产生冲击力，对混合料造成冲刷，从而水分容易取代沥青膜包裹在集料表面造成水损害[17]。剥落过程可看作为黏附过程的逆过程，剥落功越大，表明混合料体系释放的能量越多，越容易造成水损害，用公式表示为[4]：

$$W_{asw} = W_{aw} + W_{sw} - W_{as}, \tag{9}$$

式中，W_{asw}为剥落功；W_{aw}为沥青与水之间的黏附功；W_{sw}为集料与水之间的黏附功。

由式（6）和式（9）得到：

$$W_{asw} = 2(\sqrt{\gamma_a^d\gamma_w^d} + \sqrt{\gamma_a^p\gamma_w^p} + \sqrt{\gamma_s^d\gamma_w^d} + \sqrt{\gamma_s^p\gamma_w^p} - \sqrt{\gamma_a^d\gamma_s^d} - \sqrt{\gamma_a^p\gamma_s^p}), \tag{10}$$

式中 γ_w^d 和 γ_w^p 分别为水的表面能色散分量和极性分量。

1.6　配伍率

由上述黏附和剥落模型可知，黏附功和剥落功与沥青－集料的表面能参数有关。基于此，由 Bhasin[4]提出了配伍率 CR 与黏附功、剥落功的关系，表达式为：

$$CR = W_{as}/W_{asw}。\tag{11}$$

2　试验原材料与方案

2.1　试验原材料

2.1.1　集料及试剂

集料的岩性为石灰岩。沥青测试试剂为蒸馏水、甘油、甲酰胺，矿料测试试剂为蒸馏水、乙二醇、甲酰胺，其表面能及其分量从物理学常用数表中查得，见表 1。

表 1　测试试剂的表面能及其分量（单位：mJ/m^2）

Tab. 1　Surface energy and its components of test reagents (unit: mJ/m^2)

测试试剂	γ_l	γ_l^d	γ_l^p
蒸馏水	72.8	21.8	51.0
甘油	64.0	34.0	30.0
甲酰胺	57.9	38.9	19.0
乙二醇	48.3	29.3	19.0

2.1.2　纳米改性沥青的制备

沥青选择 70# 基质沥青和纳米膨润土改性沥青（以下简称纳米改性沥青），膨润土的技术指标见表 2。纳米改性沥青的制作方法为：首先取适量的 70# 基质沥青放入金属盆中，然后在电炉加热沥青至170 ℃时，均匀加入一定掺量的纳米膨润土，并用高速剪切机剪切约 1 h，剪切速率为 3 000 ~ 5 000 r/min，剪切温度为（170 ± 10）℃，冷却后即得纳米改性沥青[18]。

表 2　膨润土技术指标

Tab. 2　Technical indicators of bentonite

项目	组成	外观	粒度/目	径/厚比	晶片厚度/nm	含湿量/%
有机膨润土	蒙脱石	米白色粉末	>200	200	≤25	≤3

2.1.3 纳米膨润土掺量的确定

为分析纳米膨润土在沥青中的最优掺量，进行纳米改性沥青的常规指标测试，具体包括针入度、软化点和延度，其试验结果见图1。

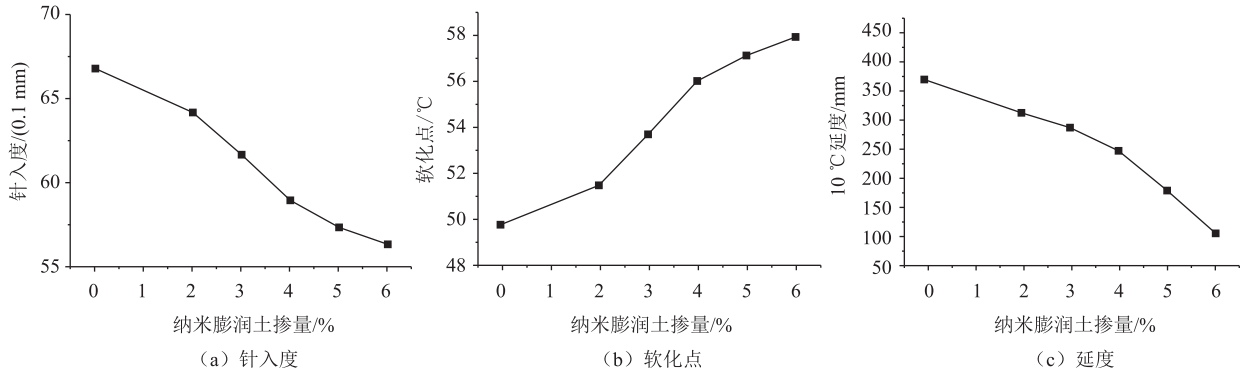

图1 沥青常规性能随纳米膨润土掺量变化

Fig. 1 Conventional performance of asphalt varying with amount of nano-bentonite

由图1可知，纳米膨润土随掺量的提高，针入度下降，软化点提高，延度下降，表明纳米膨润土对沥青的高温性能有所改善，对低温性能有负面影响。其中，当膨润土掺量达到4%时，针入度下降幅度变缓，软化点升高幅度变缓，延度下降幅度加大，可见在保证膨润土成本不予过高的情况下，最优掺量为4%。

2.2 试验方案

2.2.1 老化试验

在短期老化试验中，采用旋转薄膜烘箱试验（RTFOT）方法来模拟基质沥青和纳米改性沥青的短期老化，RTFOT时间为85 min，温度设定为163 ℃。用压力老化仪模拟沥青的长期老化，将短期老化85 min的沥青样品放入压力老化箱内，时间为24 h，温度设定为100 ℃，空气压力为2.1 MPa。

用室内加速紫外光老化试验箱模拟紫外老化，将短期老化后的沥青样品放入老化箱内进行加速紫外光老化，箱内设定恒温60 ℃。在紫外老化时间选择上需做简单计算：天津地区年均太阳辐照度约110 W/m^2，紫外线占太阳光总量的5%，日均紫外线辐照度为$110\times5\% = 5.5$ W/m^2，测得紫外老化箱内辐照度约180 W/m^2，是室外的32倍。假设室外日均有效照射时间为8 h，则室外两个月有效照射时间为480 h，室内照射时间为480/32 = 15 h，即选择紫外老化时间为15 h，相当于室外照射两个月。

2.2.2 接触角测量试验

利用接触角测定仪在常温下测定测试试剂分别与老化前后的基质沥青、纳米改性沥青和集料的接触角，由躺滴法的测量原理通过光学影像分析来计算接触角。

特别注意，在测量集料接触角时，要提前把石灰岩表面打磨光滑并放到干燥器做干燥处理。测试温度为室温，做5次平行测试，剔除不在范围的个别数据，最终取合理数据的平均值。测试结果见表3、表4。

表3 测试试剂与集料的接触角

Tab. 3 Contact angle between test reagent and aggregate

蒸馏水		甲酰胺		乙二醇	
接触角/(°)	变异系数	接触角/(°)	变异系数	接触角/(°)	变异系数
71.6	0.22	51.4	0.31	33.5	0.19

表4 老化前后测试试剂与沥青的接触角

Tab. 4 Contact angles of test reagent and asphalt before and after aging

沥青种类	老化类型	蒸馏水		甘油		甲酰胺	
		接触角/(°)	变异系数	接触角/(°)	变异系数	接触角/(°)	变异系数
基质沥青	无	102.5	0.17	93.0	0.41	86.1	0.30
	RTFOT	102.9	0.28	94.1	0.13	89.7	0.19
	PAV	103.0	0.18	94.8	0.33	91.5	0.46
	紫外老化	103.8	0.11	94.3	0.29	91.5	0.38
纳米改性沥青	无	101.7	0.34	90.8	0.15	81.2	0.25
	RTFOT	101.5	0.24	91.4	0.28	83.6	0.24
	PAV	101.2	0.25	91.8	0.10	84.5	0.13
	紫外老化	101.3	0.41	92.3	0.39	83.5	0.32

2.2.3 接触角有效性验证

为检验接触角试验结果的有效性，在测得不同老化条件下基质沥青、纳米改性沥青试样与3种测试试剂的接触角后，对不同测试试剂的表面能γ_l和$\gamma_l\cos\theta$做出散点图并曲线拟合，结果如图2所示。

由图2可知，不同测试试剂的表面能γ_l和$\gamma_l\cos\theta$

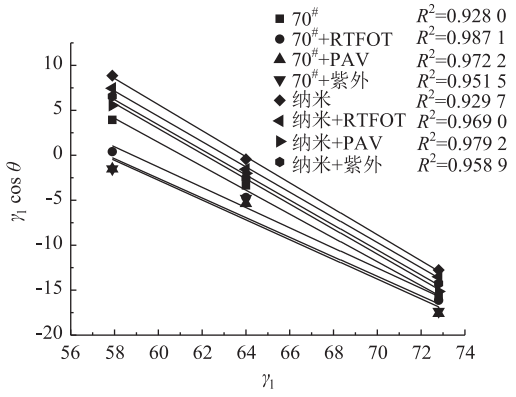

图 2　γ_l 与 $\gamma_l \cos\theta$ 的关系

Fig. 2　Relationship between γ_l and $\gamma_l \cos\theta$

表现出较好的线性相关性，相关系数均在 0.9 ~ 1 之间，说明接触角数据可靠。采用相同方法分析石灰岩的拟合关系，线性相关系数 R^2 为 0.972 4。

3　试验结果及分析

根据 1.4 节中表面能的计算方法，由表 2 接触角数据做出 y 与 x 的散点图并线性拟合，得到的拟合方程中，截距的平方为集料表面能色散分量 γ_s^d，斜率的平方为极性分量 γ_s^p，见表 5。

表 5　石灰岩表面能参数（单位：mJ/m²）

Tab. 5　Surface energy parameterd of limestone（unit：mJ/m²）

表面能	表面能色散分量	表面能极性分量
40.01	30.25	9.76

同样地，由表 3 数据可得到沥青表面能参数 γ_a^d 和 γ_a^p，代入式（1）~（2）得出沥青黏聚功 ΔG。将上述计算结果代入式（6）得到沥青与集料的黏附功 W_{as}，代入式（10）得到剥落功 W_{asw}，代入式（11）得到沥青与集料的配伍率 CR，结果见表 6。

表 6　老化前后沥青表面能及各评价指标计算结果

Tab. 6　Calculation result of asphalt surface energy and its evaluation indexes before and after aging

沥青类型	老化类型	线性拟合方程	R^2	γ_a^d	γ_a^p	ΔG/（mJ·m⁻²）	W_{as}/（mJ·m⁻²）	W_{asw}/（mJ·m⁻²）	CR
70#基质沥青	无	$y=1.416\,7x+3.935\,5$	0.972 9	15.49	2.01	34.99	52.14	100.82	0.52
	RTFOT	$y=1.663\,9x+3.515\,6$	0.999 5	12.36	2.77	30.26	49.07	103.51	0.47
	PAV	$y=1.810\,5x+3.285\,5$	0.997 6	10.79	3.28	28.14	47.45	105.90	0.45
	紫外老化	$y=1.658\,0x+3.427\,1$	0.986 8	11.75	2.75	28.99	48.06	105.07	0.46
纳米改性沥青	无	$y=1.087\,5x+4.524\,0$	0.967 3	20.47	1.18	43.30	56.56	97.20	0.58
	RTFOT	$y=1.340\,9x+4.169\,1$	0.986 7	17.38	1.80	38.36	54.24	99.83	0.54
	PAV	$y=1.475\,9x+4.003\,0$	0.989 3	16.02	2.18	36.41	53.26	101.19	0.53
	紫外老化	$y=1.395\,1x+4.094\,8$	0.959 5	16.77	1.95	37.43	53.76	100.38	0.54

为更形象地反映出老化作用对沥青黏附性的影响，分别作出黏聚功 ΔG、黏附功 W_{as}、剥落功 W_{asw} 和配伍率 CR 随老化程度变化的柱状图，如图 3 所示。

由图 3 可知，黏聚功、黏附功、配伍率的大小随老化状态的不同均呈现出相同的变化规律，而剥落功恰恰相反，这是由于黏聚功、黏附功和配伍率越小，沥青与集料的黏附性越低，而剥落功越小，沥青与集料的抗水毁能力越强，黏附性就越高。这与表面能理论分析的一致，也提高了 4 种指标用来表征黏附性的可靠性。

对比沥青类别，纳米改性沥青与集料的黏附性要优于基质沥青，这是由于纳米膨润土拥有丰富的比表面积，加到基质沥青中后改性沥青与集料的接触面积增大，吸附力增强，导致集料表面的沥青膜变厚，而且能使沥青被吸入集料内部，从而导致黏附性增强。不同老化状态下其黏聚功与基质沥青相比提高了约 23.7% ~ 29.4%，黏附功提高了 8.5% ~ 12.2%，剥落功降低了 3.6% ~ 4.5%，配伍率提高了 11.5% ~ 17.8%。由此可见，纳米膨润土改性剂可以提高沥青的黏附性，且黏附功提高的幅度大于剥落功降低的幅度，说明纳米改性沥青黏附性提高的原因主要是加强了黏附过程。

对比老化状态，由于黏附功和剥落功能较为完整地代表沥青与集料界面的黏附与剥落过程，故以该两种评价指标来分析：对于黏附功，纳米改性沥青 RTFOT 后降低了 4.1%，PAV 后降低 1.8%，紫外老化降低 0.9%；对于剥落功，纳米改性沥青 RTFOT 后升高 2.7%，PAV 后升高 1.4%，紫外老化后升高 0.6%。可见，3 种老化条件均降低了沥青与集料的黏附功，提高了剥落功，表明沥青的老化降低了沥青－集料界面的黏附性，更容易遭到水损害。

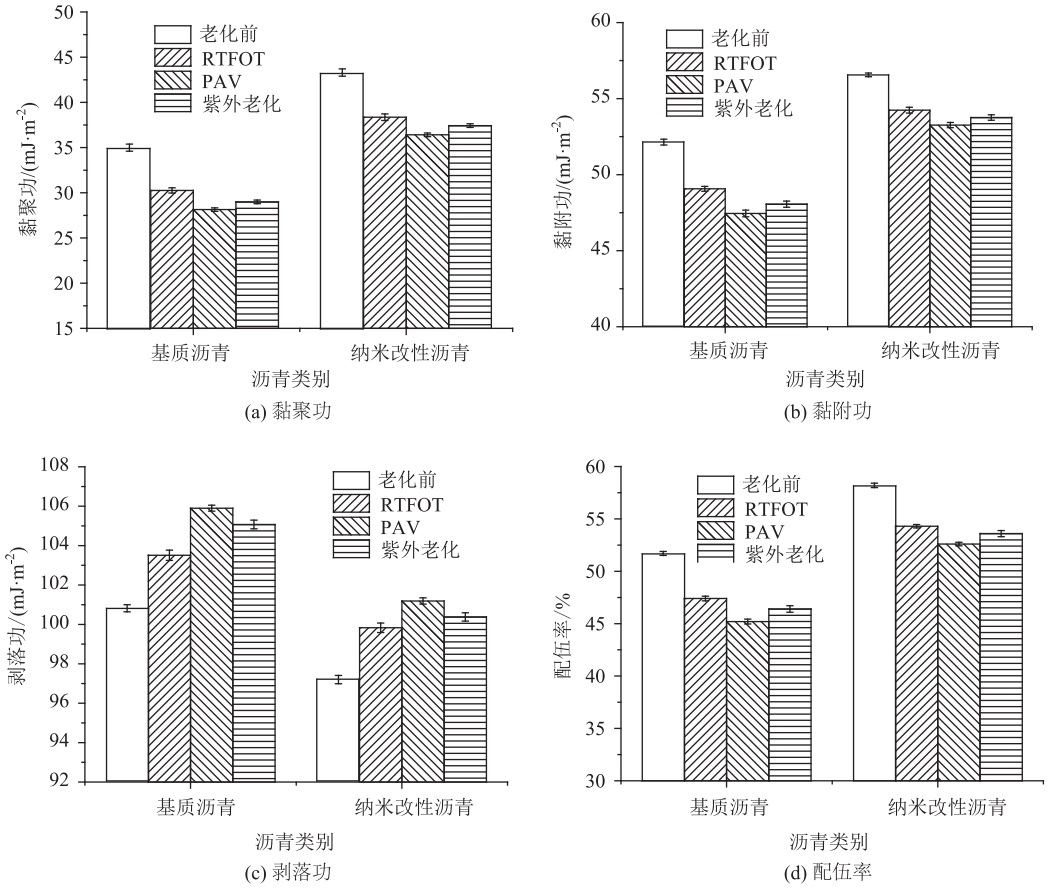

图3 老化状态对黏附性的影响

Fig. 3 Influence of aging state on adhesion

这是由于老化后的沥青4组分中轻质组分向重质组分转变，即饱和分含量相对保持不变，其他组分按照芳香分－胶质－沥青质的方向转变，使沥青质含量增多。众多研究表明[19]，沥青的表面自由能随沥青质含量的提高而增大，从而导致黏附性降低。在老化方式中，RTFOT老化阶段黏附功下降较为严重，PAV老化次之，而RTFOT和PAV分别模拟沥青路面在施工过程中的短期老化及服役过程中的长期老化，为尽可能减小老化对沥青黏附性的影响，应着重控制沥青在施工过程中发生的短期老化[20]。黏附功在紫外老化阶段下降最小，显然这跟紫外老化时长的选择有关，下一步试验有必要延长紫外老化时间，测试其多个时间段的黏附性。此外也可发现纳米改性沥青经老化后黏附功下降程度要小于基质沥青，也能说明纳米改性剂的加入可以降低老化作用对沥青－集料黏附性的影响。

4 宏观试验验证

为验证表面能理论分析的正确性，对上述两种沥青分别进行RTFOT试验和PAV老化试验，测试了上述两种沥青混合料分别在RTFOT和PAV老化前后的冻融劈裂强度比。沥青混合料为AC－13型，集料为石灰岩。冻融劈裂试验平行测试3次，其平均值的试验结果见表7。

表7 冻融劈裂试验结果

Tab. 7 Result of freeze thaw split test

沥青类别	老化条件	*TSR*/%
基质沥青	无	85.1
	RTFOT	82.5
	PAV	80.5
纳米改性沥青	无	88.6
	RTFOT	86.4
	PAV	85.2

由表7试验结果可看出，*TSR*的变化与表面能理论分析的变化规律相同，验证了评价指标的可靠性。其中，RTFOT前纳米改性沥青的*TSR*比基质沥青高出4.1%，RTFOT后基质沥青的*TSR*降低了3.1%，纳米改性沥青降低了2.5%；PAV后基质沥青的*TSR*降低了2.4%，纳米改性沥青降低了

1.4%。由表6中的试验结果可知，*TSR* 的变化量与剥落功的变化量具有相似性，可认为剥落功与冻融劈裂试验表征的沥青与集料界面的黏附性具有一致性。

5　结论

（1）相同沥青－集料体系条件下，随着老化程度的加深，黏聚功、黏附功、配伍率减小，剥落功增大，黏附性能减弱，RTFOT 老化对黏附性能影响最为严重，紫外老化影响最小。

（2）相同老化程度条件下，纳米改性沥青与集料的黏附性优于基质沥青，且纳米改性剂可以降低老化作用对沥青－集料黏附性的影响。

（3）表面能理论分析和宏观冻融劈裂试验的对比表明，两者的结果保持很好的规律性，验证了表面能理论作为定量评价沥青－集料界面黏附性的可行性。此外用剥落功表征的黏附性与 *TSR* 表征的水稳定性基本一致。

（4）本试验测定集料接触角的前提是矿料表面必须平整光滑，而在实际拌和时矿料参差不齐，故有必要研究更先进的试验方法来测定矿料表面的接触角。

参考文献：

References：

[1] 孙瑜，李立寒. 基于表面能理论的沥青混合料抗剥落性能［J］. 建筑材料学报，2016，19（2）：285－291.
SUN Yu，LI Li-han. Anti-stripping of Asphalt Mixture Based on Surface Energy Theory［J］. Journal of Building Materials，2016，19（2）：285－291.

[2] 王岚，贾永杰，张大伟，等. 基于表面能理论研究盐冻循环对沥青－矿料界面粘附性的影响［J］. 复合材料学报，2016，33（10）：2380－2389.
WANG Lan，JIA Yong-jie，ZHANG Da-wei，et al. Influence of Salt Freezing Cycle on Interfacial Adhesion of Asphalt-aggregate Based on Surface Energy Theory［J］. Acta Materiae Compositae Sinica，2016，33（10）：2380－2389.

[3] LOTTMAN，CHEN R P，KUMAR K S，et al. Laboratory Test System for Prediction of Asphalt Concrete Moisture Damage［J］. Transportation Research Rrcord，1974，515：18－26.

[4] BHASIN A，HOWSON J，MASAD E，et al. Effect of Modification Processes on Bond Energy of Asphalt Binders［J］. Transportation Research Rrcord，2007，1988：29－37.

[5] LITTLE D N，BHASIN A. Using Surface Energy Measurements to Select Materials for Asphalt Pavement［R］. Washington，D. C.：National Cooperative Highway Research Program，2006.

[6] KHODAII A，KHALIFEH V，DEHNAD M H，et al. Evaluating the Effect of Zycosoil on Moisture Damage of Hot-mix Asphalt Using the Surface Energy Method［J］. Journal of Materials in Civil Engineering，2014，26（2）：259－266.

[7] KONG L Y，MO S X，WANG N. High Temperature Performance of Asphalt Mortar Using Surface and Interface Theory［J］. Journal of Materials in Civil Engineering，2015，27（8）：27－35.

[8] AZARHOOSH A R，NEJAD F M，KHODAIL A. Using the Surface Free Energy Method to Evaluate the Effects of Nanomaterial on the Fatigue Life of Hot Mix Asphalt［J］. Journal of Materials in Civil Engineering，2016，28（10）：28－38.

[9] ARABANI M，HAMEDI G H. Using the Surface Free Energy Method to Evaluate the Effects of Liquid Antistrip Additives on Moisture Senstivity in Hot Mix Asphalt［J］. International Journal of Pavement Engineering，2014，15（1）：66－78.

[10] HAMEDI G H，NEJAD F M. Use of Aggregate Nanocoating to Decrease Moisture Damage of Hot Mix Asphalt［J］. Road Materials and Pavement Design，2016，17（1）：32－51.

[11] 肖庆一，郝培文，徐鸥明. 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. New Method for Evaluating Adhesion between Asphalt and Aggregate［J］. Journal of Chang'an University：Natural Science Edition，2007，27（1）：19－22.

[12] 魏建明，张玉贞. 躺滴法表征沥青的表面自由能［J］. 石油学报（石油加工），2009，25（2）：207－215.
WEI Jian-ming，ZHANG Yun-zhen. Determination of the Surface Free Energy of Asphalt Binders by Sessile Drop Method［J］. Acta Petrolei Sinica（Petroleum Processing Section），2009，25（2）：207－215.

[13] 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.
LUO Rong，ZHENG Song-song，ZHANG De-run，et al. Evaluation of Adhesion Property in Asphalt-aggregate Systems Based on Surface Energy Theory［J］. China Journal of Highway and Transport，2017，30（6）：209－214.

（下转第 16 页）

2014，31（11）：22－26，40.

[12] 张德育，黄晓明，高英. 沥青混合料三维离散元虚拟单轴蠕变试验［J］. 华南理工大学学报：自然科学版，2012，40（7）：15－20.
ZHANG De-yu，HUANG Xiao-ming，GAO Ying. Three-dimension Virtual Uniaxial Creep Test of Asphalt Mixture by Using Discrete Element Method［J］. Journal of South China University of Technology：Natural Science Edition，2012，40（7）：15－20.

[13] 杨军，张旭，朱浩然. 沥青混合料三轴剪切试验的离散元模拟研究［J］. 建筑材料学报，2012，15（1）：64－68.
YANG Jun，ZHANG Xu，ZHU Hao-ran. Discrete Element Simulation on Tri-axial Shear Test of Asphalt Mixtures［J］. Journal of Building Materials，2012，15（1）：64－68.

[14] 石崇，徐卫亚. 颗粒流数值模拟技巧与实践［M］北京：中国建筑工业出版社，2015.
SHI Chong，XU Wei-ya. Techniques and Practice of Numerical Simulation of Particle Flow［M］. Beijing：China Architecture & Building Press，2015.

[15] 常明丰. 多孔沥青路面微观力学特性与空隙衰变行为研究［D］. 西安：长安大学，2009.
CHANG Ming-feng. Study on Micromechanical Characteristic and Void Reduction Behavior of Porous Asphalt Pavement［D］. Xi'an：Chang'an University，2009.

[16] 裴建中. 沥青路面细观结构特性与衰变行为［M］. 北京：科学出版社，2010.
PEI Jian-zhong. Meso Structure Characteristics and Decay Behavior of Asphalt Pavement［M］. Beijing：Science Press，2010.

[17] 苏娟. 离散元方法在沙波纹研究中的应用［D］. 太原：太原理工大学，2012.
SU Juan. Application of DEM in Sand Ripple Research［D］. Taiyuan：Taiyuan University of Technology，2012.

[18] 周长红. 沥青混合料性能分析的 PFC 实践［M］. 大连：大连理工大学出版社，2015.
ZHOU Chang-hong. PFC Practice of Asphalt Mixture Performance Analysis［M］. Dalian：Dalian University of Technology Press，2015.

[19] 车法，陈拴发，李增宏，等. 荷载作用下沥青路面表面开裂的扩展［J］. 公路交通科技，2010，27（5）：26－29，51.
CHE Fa，CHEN Shuan-fa，LI Zeng-hong，et al. Analysis of Cracks Propagation on Asphalt Pavement Surface under Load［J］. Journal of Highway and Transportation Research and Development，2010，27（5）：26－29，51.

（上接第7页）

[14] 曾哲，罗蓉，张德润，等. 基于表面能理论分析 pH 值对沥青混合料粘附性的影响［J］. 武汉理工大学学报：交通科学与工程版，2017，41（2）：308－311.
ZENG Zhe，LUO Rong，ZHANG De-run，et al. Evaluating the Influence of pH Value on Adhesive Property of Asphalt Mixture Based on Surface Energy Theory［J］. Journal of Wuhan University of Technology：Transportation Science and Engineering Edition，2017，41（2）：308－311.

[15] 赵士雄，王智，王显胜，等. 微/纳米颗粒表面能测定方法适用性研究［J］. 环境科学学报，2018，38（1）：259－266.
ZHAO Shi-xiong，WANG Zhi，WANG Xian-sheng，et al. Applicability of Surface Energy Measurement Methods for Micro/nano-size Particles［J］. Acta Scientiae Circumstantiae，2018，38（1）：259－266.

[16] GOOD R J. Contact Angle，Wetting，and Adhesion：A Critical Review［J］. Journal of Adhesion Science and Technology，1992，6（12）：1269－1302.

[17] 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.
CHEN Yan-juan，GAO Jian-ming，CHEN Hua-xin. Research on Adhesion in Asphalt-aggregate Systems Based on Surface Energy Theory［J］. Journal of Southeast University：Natural Science Edition，2014，44（1）：183－187.

[18] 杨春风，高恒楠，孙吉书. 纳米膨润土改性沥青混合料路用性能试验研究［J］. 中外公路，2016，36（3）：289－292.
YANG Chun-feng，GAO Heng-nan，SUN Ji-shu. Experimental Study on Road Performance of Nano-bentonite Modified Asphalt Mixture［J］. Chinese and Foreign Highway，2016，36（3）：289－292.

[19] 李雪连，周志刚，陈宇亮，等. Sasobit 对 SBS 改性沥青性能的影响研究［J］. 实验力学，2015，30（3）：331－338.
LI Xue-lian，ZHOU Zhi-gang，CHEN Yu-liang，et al. On the Effect of Sasobit on the Performance of SBS Modified Asphalt［J］. Journal of Experimental Mechanics，2015，30（3）：331－338.

[20] 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）：129－133，149.
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）：129－133，149.