

文章编号:1007-9629(2021)03-0624-06

基于真实沥青膜厚的沥青与集料黏结性能评价与验证

王端宜, 郭秀林, 唐成

(华南理工大学 土木与交通学院, 广东 广州 510641)

摘要: 为定量评价真实沥青膜厚的沥青与集料黏结性能,基于表面能理论分析了沥青、集料与不锈钢夹具三相体系的潜在破坏模式,采用动态剪切流变仪(DSR)测试了5种沥青与2种集料在无水、有水及不同温度下的黏结性能。结果表明:无水条件下,沥青趋向于发生内聚性失效,而在有水条件下,其趋向于发生沥青与集料界面的黏附性失效;残留拉拔强度比(RSR)与残留拉拔功比(RWR)指标能较好地地区分不同沥青与集料的黏结性能,推荐采用30℃下的RWR评价沥青与集料的黏结性能。

关键词: 黏附性; 水损害; 接触角; 表面能

中图分类号:U414

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2021.03.024

Bonding Performance Evaluation and Verification between Asphalt and Aggregate Based on True Asphalt Film Thickness

WANG Duanyi, GUO Xiuling, TANG Cheng

(Institute of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

Abstract: In order to quantitatively evaluate the bonding performance between aggregate and asphalt under the true asphalt film thickness, the potential failure mode of the three-phase system of asphalt, aggregate and stainless steel fixture was analyzed by surface energy theory. The bonding performance between five asphalts and two aggregates were tested in dry and wet condition under different temperature by dynamic shear rheometer(DSR). The results show that the asphalt tends to fail with cohesion mode in dry condition, the adhesion failure occurs at the interface between the asphalt and aggregate in wet condition, respectively. Residual strength ratio (RSR) and residual work ratio(RWR) can distinguish the bonding performance between different asphalts and aggregates, RWR at 30℃ is suggested to evaluate the bonding performance between asphalt and aggregate.

Key words: adhesion; water damage; contact degree; surface energy

为准确评价沥青与集料的黏结性能,国内外开发了大量定量评价方法,如基于表面能理论的试验^[1]、沥青黏结强度试验(BBS)试验^[2]、剥离试验^[3]、压缩拉拔测试(CPOT)^[4]等,这些测试方法克服了传统水煮法不能进行定量评价的缺陷。其中,揭示了沥青与集料黏附机理的表面能理论与BBS试验得到了较为广泛的关注^[5-6]。采用表面能理论评价沥青与集料黏附性的关键是,在测试沥

青与集料表面能分量的基础上,计算相应的配伍性参数。沥青表面能分量的测试方法相对简单,可采用接触角法、插板法等,而集料由于表面能较大,在平衡扩展压的作用下,采用接触角法或灯芯柱法并不能准确测试集料的表面能分量,特别是集料的碱性分量^[7]。为准确测试集料的表面能分量,需要采用测试过程较为复杂的蒸汽吸附法^[8],而其存在不便工程应用的缺陷。BBS试验具有测试

收稿日期:2019-12-22; 修订日期:2020-02-28

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51278203);广东省自然科学基金资助项目(2019A1515011965)

第一作者:王端宜(1960—),男,吉林四平人,华南理工大学教授,博士生导师,博士。E-mail:tedywang@scut.edu.cn

流程相对简单及方便工程应用的特点,目前已被正式纳入 AASHTO 标准^[2]. BBS 试验通过在拉拔头底部设置环形凸起及缺口可使沥青膜厚固定在 $800\text{ }\mu\text{m}$,但其与沥青混合料中真实沥青膜厚尚存在较大差异.已有研究表明沥青膜厚对沥青的黏结性能有重要影响^[9].基于上述不足,本研究提出了考虑真实沥青膜厚的沥青与集料黏结性能评价方法,以期作为沥青混合料原材料的选择提供借鉴.

1 试验

1.1 沥青

沥青采用普通基质沥青、物理改性沥青、化学改性沥青及复合改性沥青,分别为 Esso70[#] 基质沥青(BA)、多聚磷酸改性沥青(PMA)、苯乙烯-丁二烯-苯乙烯嵌段共聚物(SBS)改性沥青(SBSMA3、SBSMA4)以及 SBS-多聚磷酸复合改性沥青(SPMA).其中,PMA 由掺量¹⁾为 1%的多聚磷酸(P_2O_5 含量 $\geq 85\%$)与 BA 在 $165\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $1\,000\text{ r/min}$ 搅拌速度下搅拌 60 min 制得;SBSA3、SBSA4 分别由掺量为 3%、4%的 SBS 与 BA 在 $180\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $5\,000\text{ r/min}$ 下高速剪切 60 min 制得;SPMA 由掺量分别为 3%、1%的 SBS、多聚磷酸与 BA 在 $180\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $5\,000\text{ r/min}$ 下高速剪切 60 min 制得.沥青的基本性能指标如表 1 所示.

表 1 沥青的基本性能指标
Table 1 Basic performance indexes of asphalts

Index	BA	PMA	SBSMA3	SBSMA4	SPMA
Penetration($25\text{ }^\circ\text{C}$, 5 s , 100 g)/(0.1 mm)	67.3	57.2	53.4	51.9	52.5
Ductility($10\text{ }^\circ\text{C}$, $5\text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$)/cm	36.2	24.0	>100	>100	>100
Softening point/ $^\circ\text{C}$	46.3	54.1	60.2	66.8	63.4

1.2 集料

选用石灰岩与花岗岩 2 种集料进行黏结性能试验.2 种集料的技术指标满足 JTG F40—2004《公路沥青路面施工技术规范》的相关要求.用于黏结性能试验的集料需加工成圆片状,其几何尺寸为 $\phi 20\text{ mm}\times 10\text{ mm}$.圆片状集料试件通过使用双面锯切割块石及钻芯机钻芯得到,为使集料测试面具有相同的粗糙度和平整度,统一使用 250、75 μm 砂纸进行打磨处理,打磨完成后用蒸馏水清洗,并在 $100\text{ }^\circ\text{C}$ 烘箱中放置 1 h,然后将其放置于干燥器中冷却至室温备用.

1.3 黏结性能试验

1995 年,Nottingham 大学 Scholz 博士提出了基于动态剪切流变仪(DSR)的沥青与集料相互作用“单侧”测试方法^[10],其后类似“三明治”的双侧测试方法被国内外科研院所广泛用于沥青与集料的黏附性能及界面特性研究.但“三明治”式双侧测试方法由于无法提供基准水平面,存在沥青膜厚不易控制的缺陷.本文在已有研究成果的基础上采用类似 BBS 试验的“单侧”试验,可实现精确控制沥青膜厚.

采用 TA 公司生产的 AR—2000 型 DSR 及 8 mm 不锈钢平行板夹具,并自行设计了配套夹具,包括试样夹持头与水浴槽 2 个部分(见图 1).试件夹持头通过螺丝与 DSR 固定,水浴槽与夹持头通过螺纹连接,因此该装置可以进行无水及有水条件下的黏结性能测试. Schram 等^[11]通过对 458 段沥青路面进行长达 9 a 的研究,发现沥青膜厚对路面的长期性能存在重要影响,建议采用 $9\sim 12\text{ }\mu\text{m}$ 的沥青膜厚,以确保沥青路面的耐久性能及抗剥落性能.为使真实沥青混合料综合性能最优及便于无水、有水条件下的黏结性能测试,本文采用的沥青膜厚为 $10\text{ }\mu\text{m}$.无水条件下的测试步骤为:间隙归零;设置上、下平板的初始温度为 $60\text{ }^\circ\text{C}$,待温度平衡后,将沥青试样置于集料试件上,设置目标间隙为 $10\text{ }\mu\text{m}$;待达到目标间隙后,使用热刮刀刮掉挤出平板边缘的沥青,设置目标测试温度;达到目标测试温度后,按照目标加载模式进行加载.有水条件下的测试流程与无水条件下的类似,区别在于有水条件下需将试件在 $60\text{ }^\circ\text{C}$ 水浴中浸泡 4 h,然后在目标测试温度下进行测试.采用拉拔加载模式,拉拔过程为:上平行板以 $10\text{ }\mu\text{m/s}$ 的速率进行拉拔,设定间隙达 $5\,000\text{ }\mu\text{m}$ 时停止拉拔,采集加载过程中的拉拔力.

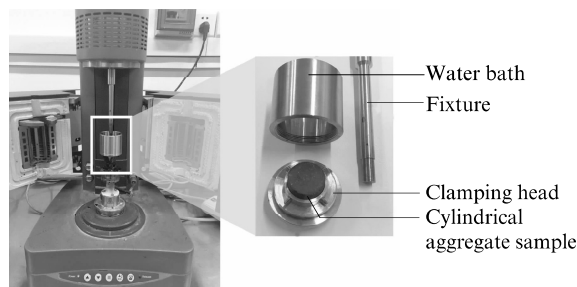


图 1 动态剪切流变仪与夹具

Fig. 1 Dynamic shear rheometer and fixture

1.4 表面能分量的获取

采用德国 Dataphysics OCA40 Micro 接触角测

1)文中涉及的掺量、含量等均为质量分数.

量仪,对5种沥青与蒸馏水、甘油及甲酰胺3种测试液体进行接触角测试,并进行相应表面能分量的计算.试样的制备及测试过程为:将沥青加热至流体状态,使用刮刀将沥青均匀涂抹在载玻片上,将制好的沥青试样置于干燥箱中12 h后进行接触角测试,每组试样重复测试8次,结果取平均值.不锈钢夹具、石灰岩、玄武岩、砂岩及花岗岩的表面能分量参考文献[1,12]的测试结果.

2 可行性分析

2.1 表面能参数的计算

表面能为真空环境中增加单位表面积所需做的功,可使用二元理论或酸碱理论进行描述.本文使用酸碱理论进行表面能的相关计算,通过测试3种已知表面能参数的液体与沥青的接触角后,使用Young-Dupré方程求解其表面能分量,并计算无水条件下沥青的内聚功 W_{BB} 、沥青与集料的黏附功 W_{AB} 以及有水条件下沥青与集料的剥落功 W_{ABW} ,见式(1)~(3).

$$W_{BB} = 2\gamma_B = 2(\gamma_B^{LW} + 2\sqrt{\gamma_B^+ \gamma_B^-}) \quad (1)$$

$$W_{AB} = 2\sqrt{\gamma_A^{LW} \gamma_B^{LW}} + 2\sqrt{\gamma_A^+ \gamma_B^-} + 2\sqrt{\gamma_A^- \gamma_B^+} \quad (2)$$

$$W_{ABW} = 2\sqrt{\gamma_A^{LW} \gamma_B^{LW}} + 2\sqrt{\gamma_A^+ \gamma_B^-} + 2\sqrt{\gamma_A^- \gamma_B^+} - 2\sqrt{\gamma_A^{LW} \gamma_W^{LW}} - 2\sqrt{\gamma_A^+ \gamma_W^-} - 2\sqrt{\gamma_A^- \gamma_W^+} - 2\sqrt{\gamma_W^{LW} \gamma_B^{LW}} - 2\sqrt{\gamma_W^+ \gamma_B^-} - 2\sqrt{\gamma_W^- \gamma_B^+} + 2\gamma_W^{LW} + 4\sqrt{\gamma_W^+ \gamma_W^-} \quad (3)$$

式中: γ_B 、 γ_B^{LW} 、 γ_B^+ 、 γ_B^- 分别为沥青的表面能、表面能色散分量、表面能酸性分量、表面能碱性分量; γ_A^{LW} 、 γ_A^+ 、 γ_A^- 分别为集料的表面能色散分量、表面能酸性分量、表面能碱性分量; γ_W^{LW} 、 γ_W^+ 、 γ_W^- 分别为水的表面能色散分量、表面能酸性分量、表面能碱性分量.

有水条件下沥青的内聚功 W_{BBW} 为:

$$W_{BBW} = 2(\gamma_B + \gamma_W - 2\sqrt{\gamma_W^{LW} \gamma_B^{LW}} - 2\sqrt{\gamma_W^+ \gamma_B^-} - 2\sqrt{\gamma_W^- \gamma_B^+}) \quad (4)$$

式中: γ_W 为水的表面能.

沥青与夹具的黏附功 W_{FB} 、有水条件下沥青与夹具的剥落功 W_{FBW} 和沥青与集料的黏附功形式类似,将式(1)~(3)中集料的表面能参数替换成夹具的表面能参数即可.

2.2 潜在破坏模式分析

2.2.1 无水条件下潜在破坏模式分析

无水条件下5种沥青的内聚功 W_{BB} 、沥青与夹具及不同集料的黏附功 W_D 的计算结果见表2.由表2可见:沥青的内聚功远小于沥青与夹具及沥青与不同集料的黏附功.由此可见,夹具、沥青及集料

组成的三相体系在无水条件下,沥青更趋向于发生内聚性失效,即破裂面出现在沥青内部.

表2 无水条件下沥青的内聚功、沥青与夹具及不同集料的黏附功
Table 2 Cohesion work of asphalt, adhesion work between clamp and different aggregates with asphalt in dry condition
mJ/m²

Material	W_{BB}	W_D				
		Steel	Limestone	Basalt	Sandstone	Granite
BA	29.87	50.78	64.86	64.77	88.09	65.22
PMA	34.04	53.58	67.59	67.55	91.71	65.94
SBSMA3	37.16	56.04	69.96	70.21	94.27	68.43
SBSMA4	46.38	62.51	79.07	78.94	107.51	77.05
SPMA	41.61	59.19	74.72	74.64	101.49	72.71

2.2.2 有水条件下潜在破坏模式分析

有水条件下5种沥青的内聚功 W_{BBW} 、沥青与夹具及不同集料剥落功 W_W 的计算结果如表3所示.由表3可见:有水条件下不同沥青的内聚功、沥青与不锈钢夹具的剥落功均为正值,表明水分在沥青中的扩散、有水条件下沥青从不锈钢夹具上的脱离并非热力学自发过程;结合沥青与集料的剥落功为负数的特点,可知有水条件下沥青在不锈钢夹具、沥青及集料组成的三相体系中更趋向于发生沥青与集料界面的黏附性失效.

表3 有水条件下沥青的内聚功、沥青与夹具及不同集料的剥落功
Table 3 Cohesion work of asphalt, debonding work between clamp and different aggregates with asphalt in wet condition
mJ/m²

Material	W_{BBW}	W_W				
		Steel	Limestone	Basalt	Sandstone	Granite
BA	66.97	38.37	-83.89	-48.83	-225.77	-113.66
PMA	57.35	34.27	-88.06	-52.94	-229.04	-119.84
SBSMA3	57.18	35.08	-87.33	-51.93	-228.13	-118.99
SBSMA4	48.41	32.57	-87.21	-52.19	-223.88	-119.37
SPMA	51.13	32.99	-87.82	-52.75	-226.15	-119.96

综上,无水及有水条件下沥青的失效趋向于出现在沥青内部或沥青与集料界面处,因此本文提出的测试方法是可行的,不需要采取额外技术手段增加不锈钢夹具表面的粗糙度来防止沥青从夹具表面脱离,有利于精确控制沥青膜厚.

3 沥青与集料黏结性能测试与验证

3.1 沥青与集料黏结性能评价指标

选择拉拔试验对沥青与集料界面的黏附性能进行评价,同时考虑水对沥青失效模式的影响,选用拉拔强度(P)、拉拔功(W)、残留拉拔强度比(RSR)、

残留拉拔功比(RWR)考察沥青与集料界面黏结特性,其计算式见式(5)~(8)。

$$P = \frac{F_{\text{peak}}}{S} \quad (5)$$

$$W = \frac{S_{\text{int}} \times V}{D} \quad (6)$$

$$\text{RSR} = \frac{P_{\text{wet}}}{P_{\text{dry}}} \quad (7)$$

$$\text{RWR} = \frac{W_{\text{wet}}}{W_{\text{dry}}} \quad (8)$$

式中: F_{peak} 为拉拔力峰值; S 为沥青截面面积; S_{int} 为加载曲线积分面积; V 为加载速率; D 为沥青膜初始厚度; P_{wet} 、 W_{wet} 、 P_{dry} 、 W_{dry} 分别为浸水处理后有水、无水条件下沥青与集料之间的拉拔强度与拉拔功。

3.2 拉拔试验结果及讨论

在无水、有水及不同温度(10、15、20、25、30℃)下对5种沥青和2种集料进行了拉拔试验。无水条件下沥青的失效模式见图2。由图2可见,无水条件下,失效界面出现在沥青内部,说明沥青出现内聚性失效,与上述理论分析得出的潜在破坏模式相一致,即无水状态下沥青的黏结强度由沥青的内聚力决定,而与沥青集料两者界面的黏附特性无关,即与集料类型无关。Lachance-Tremblay等^[13]的研究也表

明在干燥情况下,不同的基底对拉拔强度没有显著性影响。此外,已有的研究表明,沥青的劲度对拉拔试验结果有重要影响,劲度越大,拉拔强度越大^[14-15]。因此,无水条件下的拉拔试验仅能区分不同沥青与同种集料黏结性能的差异,不能区分同种沥青与不同集料的黏结性能。与拉拔强度、拉拔功相比,残留强度比(RSR)与残留拉拔功比(RWR)由于进行了无量纲处理,消除了内聚功、沥青劲度或模量的差异对黏结性能评价的影响,可用于比较不同沥青与不同集料组合下沥青的黏结性能。

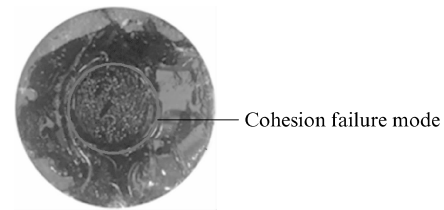
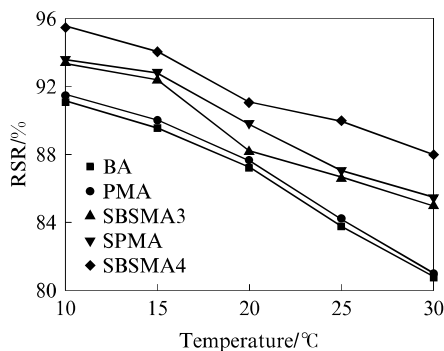
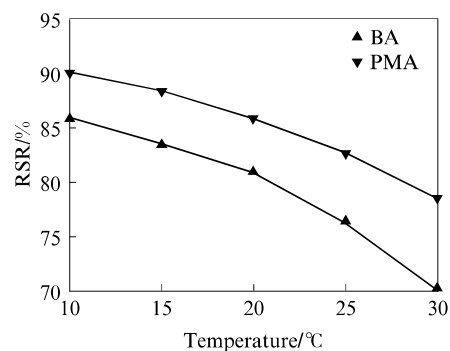


图2 无水条件下沥青的失效模式
Fig. 2 Failure mode of asphalt in dry condition

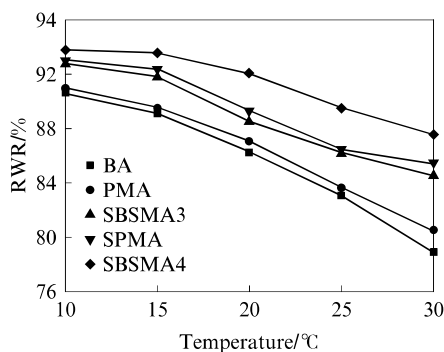
在无水拉拔试验的基础上,将沥青、集料组合进行浸水处理后进行同样的拉拔试验,结果见图3。由图3可见:RSR和RWR均小于100%,表明浸水处理降低了沥青与集料的黏结性能;不同温度下集料



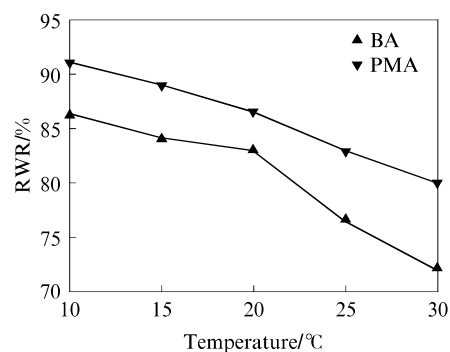
(a) RSR results of limestone with asphalt



(b) RSR results of granite with BA and PMA



(c) RWR results of limestone with asphalt



(d) RWR results of granite with BA and PMA

图3 不同测试温度下沥青与集料的残留强度比与残留拉拔功比
Fig. 3 Residual strength and work ratio of asphalt with aggregate at different temperatures

与不同沥青组合时的 RSR、RWR 排序为 SBSMA4 > SPMA > SBSMA3 > PMA > BA, 表明沥青改性后水稳定性提高; 多聚磷酸虽然提高了沥青与集料之间的水稳定性, 但是其对沥青水稳定性的改善效果弱于 SBS 改性剂; 在基质沥青中添加 1% 掺量的 PPA 能显著提高其与花岗岩的黏结性能, 但是并未显著改善其与石灰岩的黏结性能, 已有的研究也表明 PPA 能改善沥青与酸性集料的黏附性能^[16], 这表明多聚磷酸对黏附性能的影响与具体的集料类型有关; 随着温度的升高, RSR、RWR 逐渐降低, 这是因为提高温度能加速沥青与集料黏附性失效的热力学过程; 同时, 随着温度的升高, 不同沥青与集料之间 RSR、RWR 的差异越明显, 即区分度越大, 因此建议采用 30 °C 作为拉拔试验的温度。

3.3 黏结性能评价指标验证

为验证 RSR 与 RWR 指标的合理性, 采用 Bhasin 基于表面能理论所提出的配伍性参数 ER_1 进行比较, ER_1 指标为沥青与集料的黏附功与有水条件下沥青与集料的剥落功比值的绝对值^[1]。不同沥青与集料组合下, ER_1 的计算结果见图 4。由图 4 可见, 除 BA、PMA 这 2 种沥青外, 其余沥青与集料 ER_1 的排序与其 RSR、RWR 的排序基本一致。这主要是因为 Bhasin 所提出的 ER_1 指标仅仅考虑到了剥落功与黏附功, 而并未考虑沥青的内聚功。由 2.2 可知, 沥青与集料之间出现黏附性失效或沥青本身出现内聚性失效时, 应由两者之间的薄弱环节确定。因此, 用配伍性参数 ER_0 指标(其计算式见式(9))来评价沥青与集料的配伍性。

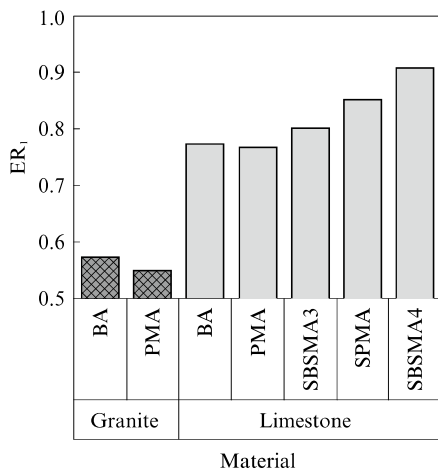


图 4 ER_1 计算结果

Fig. 4 ER_1 calculation results

$$ER_0 = \left| \frac{\min(W_{BB}, W_{AB})}{W_{ABW}} \right| \quad (9)$$

ER_0 数值越大, 沥青与集料的抗水损害能力越强。不同沥青与集料组合下, ER_0 的计算结果见图 5。由图 5 可见: ER_0 指标对不同沥青与集料组合的配伍性评价结果与 RSR、RWR 指标排序完全一致, 这说明综合考虑沥青内聚功、黏附功及剥落功的配伍性参数 ER_0 评价指标能更好地区分不同沥青与集料之间的黏附性能差异。

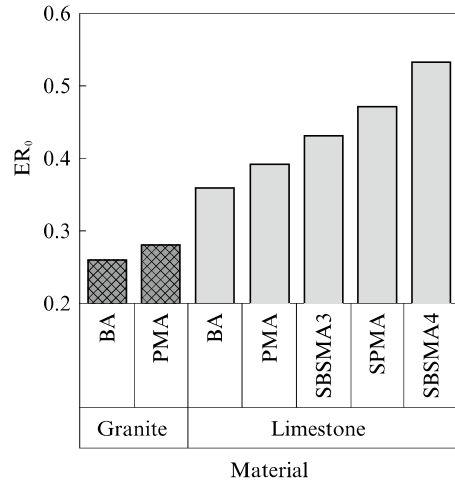


图 5 ER_0 计算结果

Fig. 5 ER_0 calculation results

为直观地分析 RSR、RWR 与 ER_0 的关系, 绘制了其在 30 °C 下的相关关系曲线, 结果见图 6。由图 6 可见: RSR、RWR 与 ER_0 的正相关系数 R^2 均达到了 0.8 以上, 这说明本文提出的测试方法及评价指标符合表面能原理, 能有效地评价沥青与集料的黏结性能; 相较于 RSR, RWR 与 ER_0 的相关系数更高, 推荐优先采用 RWR 指标评价沥青与集料的黏结性能。

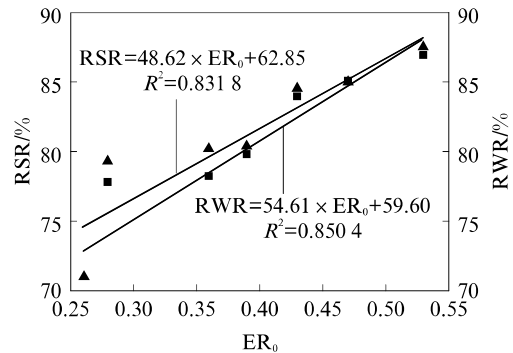


图 6 30 °C 下 RSR 及 RWR 与 ER_0 的相关关系

Fig. 6 Relationship between RSR and RWR with ER_0 at 30 °C

4 结论

(1)提出了基于真实沥青膜厚的沥青与集料黏结性能测试方法,表面能理论表明无水条件下沥青趋向于发生内聚性失效,而有水条件下趋向于发生沥青与集料的黏附性失效,验证了该方法的可行性。

(2)沥青改性对沥青与集料的黏结性能有显著影响,5种沥青与集料黏结性能的排序为SBSMA4>SPMA>SBSMA3>PMA>BA,SBS改性剂对沥青水稳定性的改善效果优于多聚磷酸,相较于碱性集料,多聚磷酸能在一定程度上提高沥青与酸性集料的水稳定性。

(3)残留拉拔强度比(RSR)与残留拉拔功比(RWR)指标能较好地地区分不同沥青与集料的黏结性能,推荐采用30℃下的RWR评价沥青与集料的黏结性能。

(4)兼顾沥青内聚力、黏附功与剥落功的沥青与集料配伍性参数ER₀相较于传统指标能更好地地区分不同沥青与集料的黏结性能,且与RSR、RWR指标具有较强的线性相关关系。

参考文献:

- [1] BHASIN A. Development of methods to quantify bitumen-aggregate adhesion and loss of adhesion due to water[D]. Texas: Texas A&M University, 2006.
- [2] AASHTO T 361. Standard method of test for determining asphalt binder bond strength by means of the binder bond strength(BBS) test[S]. Washington D. C.: American Association of State Highway and Transportation Officials, 2016.
- [3] ZHANG J, AIREY G D, GRENFELL J, et al. Development of a composite substrate peel test to assess moisture sensitivity of aggregate-bitumen bonds[J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2016, 68:133-141.
- [4] RAHIM A, THOM N, AIREY G. Development of compression pull-off test(CPOT) to assess bond strength of bitumen[J]. Construction and Building Materials, 2019, 207:412-421.
- [5] 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 Songsong, ZHANG Derun, 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. (in Chinese)
- [6] 王端宜,王鹏.应用拉拔试验评价集料温度对沥青与集料粘附性的影响[J].公路工程,2017,42(6):69-74.
WANG Duanyi, WANG Peng. Evaluation of aggregate temperature on adhesion of asphalt and aggregate by pull-out test[J]. Highway Engineering, 2017, 42(6):69-74. (in Chinese)
- [7] 孔维川.集料特性对沥青-集料界面性能影响研究[D].西安:长安大学,2012.
KONG Weichuan. Impacts of aggregate characteristics on asphalt/aggregate interface properties [D]. Xi'an: Chang'an University, 2012. (in Chinese)
- [8] ZHANG D, LUO R, ZENG Z. Characterization of surface free energy of mineral filler by spreading pressure approach[J]. Construction and Building Materials, 2019, 218:126-134.
- [9] ZHAI H, BAHIA H U, ERICKSON S. Effect of film thickness on rheological behavior of asphalt binders[J]. Transportation Research Record, 2000, 1728(1):7-14.
- [10] SCHOLZ T V. Durability of bituminous paving mixtures[D]. Nottingham: University of Nottingham, 1995.
- [11] SCHRAM S, ABDELRAHMAN M. Effects of asphalt film thickness on field performance[C]//Proceedings of the Transportation Research Board 90th Annual Meeting. Washington D. C.: Transportation Research Board, 2011.
- [12] OMAR E F, MOULAY S, AMAL E A, et al. The stainless steel 304L surface energy properties modification by aqueous extract from salvia officinalis[J]. International Scientific Research Journal, 2015, 7(1):42-47.
- [13] LACHANCE-TREMBLAY É, VAILLANCOURT M, PER-RATON D, et al. Comparison of the moisture damage of bituminous binder coupled with glass and limestone substrate using pull-off test[J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2018, 46(3):188-194.
- [14] MORAES R, VELASQUEZ R, BAHIA H. Using bond strength and surface energy to estimate moisture resistance of asphalt-aggregate systems[J]. Construction and Building Materials, 2017, 130:156-170.
- [15] HUANG W, LÜ Q. Investigation of critical factors determining the accuracy of binder bond strength test to evaluate adhesion properties of asphalt binders[J]. Journal of Testing and Evaluation, 2017, 45(4):1270-1279.
- [16] D'ANGELO J A. Polyphosphoric acid modification of asphalt binders: A workshop[R]. Washington D. C.: Transportation Research Board, 2009.