

集料化学组成对沥青—集料体系黏附性能的影响

易昭^{1,2}, 李波^{1*}, 张建军², 李钰², 周家宁^{1,2} 编译

(1. 兰州交通大学 道桥工程灾害防治技术国家地方联合工程实验室, 甘肃 兰州 730070;

2. 甘肃省公路交通建设集团有限公司 甘肃省公路路网监测重点实验室, 甘肃 兰州 730070)

摘要:为探究集料化学组成对沥青—集料体系黏附性能的影响,通过改良千分尺设计一种新的制样方法,选取3种不同岩性的集料制备沥青—集料试样,分别在干燥和浸水条件下进行拉拔试验;通过试验得出试样破坏时的最大荷载和断裂功,结合ImageJ软件计算破坏界面的脱胶面积;基于单因素方差分析,研究岩石化学组成与水敏感性的相关度。结果表明:新的制样方法能有效控制拉拔试样中沥青薄膜的厚度,促进集料与沥青界面发生的黏附破坏;对于不同岩性的集料,镁铁质类岩石比长英质类岩石具有更好的抗水损害能力;分析岩石化学组成发现,沥青—集料体系中 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 MnO 、 MgO 等氧化物能抑制水损害的发生,而 SiO_2 可促进水损害发生。

关键词:沥青—集料体系;集料化学组成;黏附性;水损害;拉拔试验

中图分类号: U414

文献标志码: A

水损害是沥青路面早期病害的主要诱因之一,在动水压力下水浸入沥青混合料导致其黏结性能下降,通常表现为路面整体结构的松散和强度的降低^[1-2],而沥青在集料表面剥落为热力学自发过程^[3-4],只能延缓发生而不能抑止。在沥青—集料体系中,Curtis和Prithri^[5-6]发现集料的化学组分特征是混合料水敏感性的重要影响因素,因此研究集料化学组成对评价集料沥青之间黏结性能具有重要的意义。

目前传统水煮法^[7]对沥青—集料体系的黏结性能已有定性研究,但主观性较强。为进一步对沥青与集料的黏结性能进行定量研究,国内外学者从不同角度进行了大量研究,大致可分为4类^[8]:表面能测试^[9]、沥青剥落评价^[10]、黏附疲劳评价^[11]和力学拉伸试验评价^[12]等,其中力学拉脱试验因能够直观且真实反映沥青与集料之间的黏结性能而被广泛运用。甘新立^[13]采用全自动附着力测试仪对沥青与5种集料进行附着力的测定,对比水煮法试验结果发现,附着力试验能够更加准确量化体系的黏附性;Nguyen等^[14]通过气动附着拉伸试验仪(PATTI)研究有水条件下沥青与集料体系的黏结性能;Canestrati等^[15]进一步改进气动附着拉伸试验仪进行BBS试验,该试验操作相对简单且便于工程应用,现已成为直接测量沥青—集

料界面黏结质量的常用方法,已正式纳入AASHTO标准^[16]中,但该方法沥青膜厚度较大(800 μm),易发生黏聚破坏,不利于理解黏结机理。对于集料化学组成对沥青集料体系黏附性能影响研究方面,发现碱性集料相较于酸性集料有更好的黏结性能^[17],但由于目前集料酸碱性多用 SiO_2 含量进行评定,而部分岩石中可同时存在 SiO_2 与 CaCO_3 ,所以只使用 SiO_2 评价的酸碱性并不能充分表述集料的化学特性。因此对集料全面的化学组成分析有助于更好地研究沥青—集料体系的黏附性能^[18]。

为解决上述不足,该文改良千分尺设备制备沥青—集料体系试样,选用3类代表性岩石(石英岩、花岗闪长岩和蛇纹岩),在干燥和浸水1 d、3 d、7 d的条件下将试样进行拉拔试验。测试试样破坏时的最大荷载、断裂功和脱胶面积,分析集料化学组成与水敏感性的相关性。以期为研究集料与沥青体系的黏附性能和水敏感性能提供一种新思路。

1 原材料及试验方法

1.1 原材料特性

已有研究表明^[17],石料的酸碱性对沥青与集料的

收稿日期:2020-07-26

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:51668038,51868042);甘肃省高等学校产业支撑引导项目(编号:2020C-13);甘肃省自然科学基金杰出青年基金资助项目(编号:1606RJDA318);甘肃省自然科学基金资助项目(编号:1506RJZA064)

黏附性能有重要影响,因此选取 3 种酸碱性不同且具有代表性的石料:石英岩(Qtz)、花岗闪长岩(Grt)和蛇纹岩(Spt),岩石表面形貌如图1所示,其X荧光射线



图 1 三类岩样表面形貌(图像直径为 25 mm)

表 1 所选岩石的化学组成(以氧化物的重量百分比表示)

岩石	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	SO ₃	Cr ₂ O ₃	NiO	LOI
Qtz	98.18	1.09	0.09	0	0.01	0.06	0	0.03	0.07	0	0	0	0.65
Grt	65.75	15.26	4.09	0.08	2.45	3.77	3.60	2.68	0.53	0.01	0.01	0	1.38
Spt	28.49	23.08	7.37	0.48	28.15	0.03	0.03	0	0.05	0.02	0.39	0.07	12.10

注:LOI 为烧失量,即 110 °C 烘干的石料燃烧之后的质量损失比。

1.2 岩样制备

试验前将采集的岩石切割成 25 mm 高的圆柱体,在高精度切割研磨床上使用 40 μm 的金刚石砂轮进行切割并抛光,确保岩样表面完全光滑且抛光程度相同,以减少人为误差对沥青—集料界面的影响;最后将样品置于 60 °C 的超声波水浴中浸泡 10 min,清除切割和抛光过程中可能留下的杂质。

1.3 沥青/集料界面拉拔试样(AAS)的制备

为精确控制 AAS 体系中沥青薄膜厚度,保证膜的均匀性,自主改进千分尺(精度±1 μm)用于制作样品,如图 2 所示。在该千分尺中,一端放置直径为 25 mm 的金属拉头,该拉头具有可控制粗糙度促进其与沥青黏附的优点,另一端放置相同直径的岩石样品。

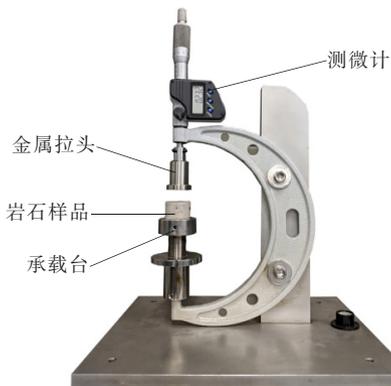


图 2 用于 AAS 样品制备的改进型千分尺

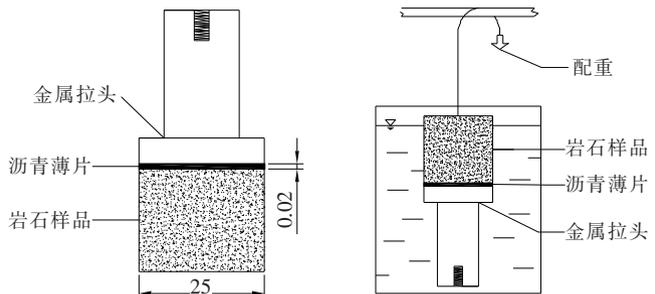
具体操作步骤如下:① 将洁净的金属拉头与岩样

(XRF)化学组分分析结果见表 1。

其中石英岩具有相对均匀的矿物组成,几乎全是石英矿物构成,属于长英质岩,其 SiO₂ 含量为 98.18%,为强酸性石料;花岗闪长岩主要由石英(50%)、长石(35%)和角闪石(15%)组成,属于长英质岩,其 SiO₂ 含量为 65.75%,为中性石料;蛇纹岩是由富镁铁质火成岩通过变质作用后得到的产物,主要由橄榄岩和辉石岩组成,属于富镁铁质岩,其 SiO₂ 含量为 28.49%,为碱性石料。

选择 70# 基质沥青制备沥青—集料试样。

置于 150 °C 的烘箱中干燥至少 30 min 以上,同时称取 1.5 g 沥青加热至流动状态;② 在千分尺上安装金属拉头与岩样,调整金属拉头至与岩样刚好接触时归零千分尺;③ 将沥青倾倒在岩样顶部,如图 3(a)所示,调整金属拉头高度至千分尺刻度盘显示为 20 μm,待整个 AAS 样品冷却 45 min 后从千分尺上拆下。由于多余的沥青可能会流淌至侧面而影响试验结果,故试样冷却后应立即剥去包裹岩样的铝箔。水处理时将试样倒置放置水中,并在试样底部连接与岩样相同质量的配重[图 3(b)],以避免因沥青蠕变而导致的沥青膜厚度变化。



(a) 干燥条件下 AAS 样品(单位:mm) (b) 浸水条件下的 AAS 样品

图 3 AAS 样品制备

1.4 拉拔试验

拉拔试验使用液压机在加载速率 10 mm/min 控制位移条件下对 AAS 试样施加拉力直至拉伸破坏。为获取加载数据,需在液压机上装一组附件,如图 4 所示,使用 Omega LC201—300 测压元件,记录每 0.1 s

采集一次的载荷 N 与时间 t 数据,以得到破坏时的最大荷载 F_{max} 和断裂功 W_f (即受力面积/时间曲线)。

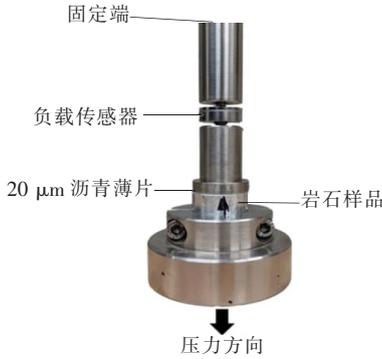


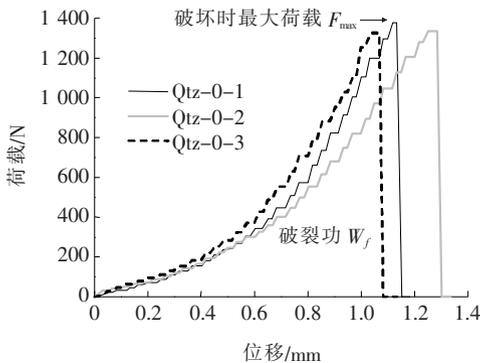
图 4 试验测试附件

黏结破坏可分为以下两种情况:① 在沥青—集料界面处发生的黏附破坏,破坏时在岩样表面未观察到沥青残留;② 发生在沥青内部的黏聚破坏,破坏时沥青依旧覆盖在岩样表面上。而实际上黏结破坏形式较为复杂,既不是完全黏附破坏也不是完全黏聚破坏,因此该研究借助 ImageJ 软件采集并计算了岩石试样表面的脱胶面积(A)。

2 结果和讨论

2.1 AAS 样品的力学性能

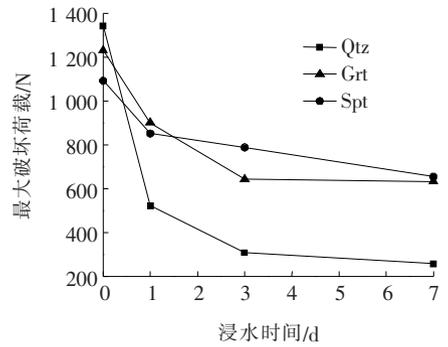
荷载与位移的关系如图 5 所示。由图 5 可以看出:曲线最高点即为 AAS 试样破坏时的最大荷载 F_{max} ,荷载位移曲线下方面积即为断裂功 W_f 。将 3 类 AAS 试样的拉拔试验结果统计并处理之后绘制成图,如图 6 所示。



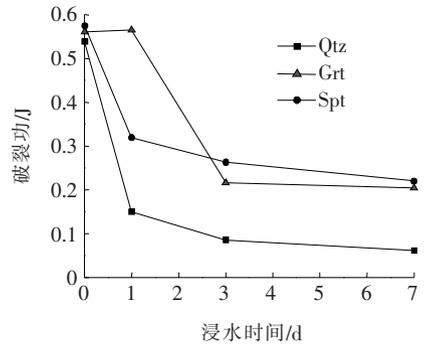
注:Qtz-0-1、Qtz-0-2、Qtz-0-3 表示 Qtz 试样浸水 0 d (干燥条件)的 3 组重复试验。

图 5 干燥条件下 Qtz 拉拔试验结果分析图

由图 6 可知:Qtz 岩样的 F_{max} 和 W_f 值在浸水 3 d 下降较多,3 d 后无显著变化,说明其 AAS 试样在浸



(a) F_{max} 与浸水时间的关系



(b) W_f 与浸水时间的关系

图 6 3 类岩样的最大破坏荷载 F_{max} 和破裂功 W_f 值随水处理时间的变化

水条件下将迅速产生水损害现象,界面处的黏结力几乎丧失;Grt 岩样的 F_{max} 和 W_f 值在浸水 3 d 的条件下相比于 Qtz 岩样呈现类似趋势,其力学性能衰减较小且速率较为缓慢,表明 Grt 岩样比 Qtz 岩样呈现出更好的抗水损害能力;在整个浸水过程中,Spt 试样力学性能的衰减大部分发生在浸水第 1 天,且下降最小,浸水 7 d 后力学性能下降最少。

对于干燥试样,3 类 AAS 样品破坏时的最大荷载 F_{max} 值由高到低分别是 $Qtz > Grt > Spt$,而经浸水 7 d 的试样最大荷载则相反,由高到低为 $Spt > Grt > Qtz$ 。从沥青集料界面的力学性能来看,Qtz 试样在干燥条件下的黏附性能较好,而 Spt 的抗水损害性能较好。通过 W_f 分析可得到相同的结果,但对于干燥样品, W_f 数据变异性较大。因此,该文采用 F_{max} 来评估沥青—集料体系的黏附性能。

3 类岩样的 F_{max} 百分比损失随浸水时间的关系如图 7 所示,可以发现:经过 7 d 浸水后,Qtz、Grt 和 Spt 样品的 F_{max} 值分别下降了 80.6%、48.7% 和 39.9%。从岩性分析,岩石化学成分由长英质向镁铁质转变,水敏感性随之降低,因此,Qtz 水敏感性最高,Spt 水敏感性最低。

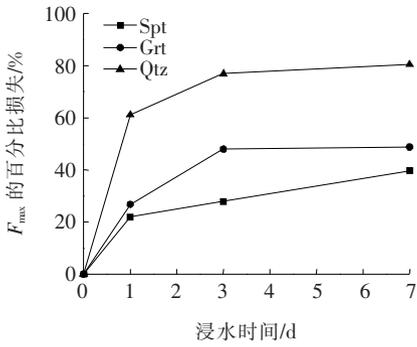


图7 不同岩样的 F_{max} 百分比损失

2.2 脱胶面积 A

借助 ImageJ 软件测量拉拔试验后岩样表面的脱胶面积(A),结果见表 2。其中,参数“增长百分比”指水处理后的试样在破坏后,岩样表面脱胶面积增加的百分比。由于在 AAS 试样中水的浸入降低了沥青与集料体系的黏结力,对界面造成不同程度的破坏,为研究 AAS 试样的水敏感性应对界面破坏的方式进行探究,随着浸水时间变化界面的破坏情况如图 8 所示。

表 2 拉拔试验后不同试样 A 测量结果

样品	A/%	增长百分比/%	标准差/%
Qtz-0	49.35	0	3.43
Qtz-1	82.79	33.44	0.30
Qtz-3	80.88	31.53	5.91
Qtz-7	83.41	34.06	1.93
Grt-0	42.90	0	2.91
Grt-1	56.20	13.30	8.32
Grt-3	67.17	24.26	3.77
Grt-7	66.19	23.29	3.72
Spt-0	0	0	0
Spt-1	1.78	2.00	1.28
Spt-3	0.79	1.00	0.98
Spt-7	1.14	1.00	1.62

由图 8 可以看出:干燥条件下,3 类 AAS 试样中 Spt 是唯一呈现完全黏聚破坏的试样,而在浸水条件下,Qtz 的脱胶面积均在 80% 以上,而 Spt 脱胶面积始终小于 3%。从化学组成上分析,由长英质矿物组成的 Qtz 更易受到水损害的影响,而由富镁铁质矿物组成的 Spt 则相反,浸水后黏附破坏面积很小。

而 Grt 岩样的破坏形式处于 Spt 和 Qtz 二者之间,这主要是与其非均质岩性由长英质和镁铁质矿物共同作用有关,如图 9 所示,岩石表面的残余沥青大部分位于黑色的镁铁质角闪岩矿物上,白色的长英质矿物石英和斜长石矿物上几乎没有,导致这种岩性的 A

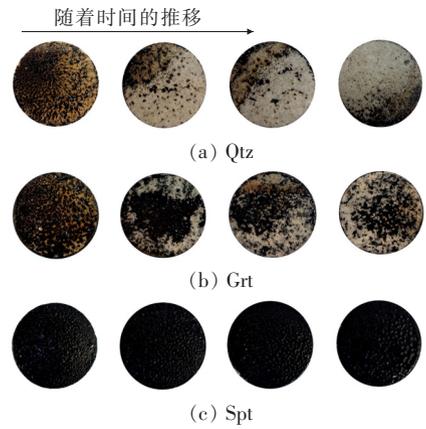


图 8 3 类岩样随浸水时间增加的破坏图

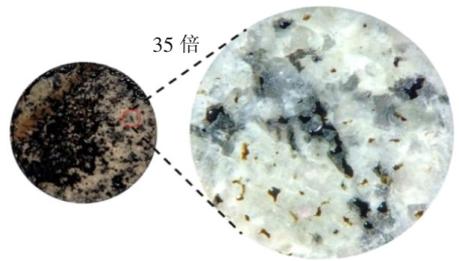


图 9 经过 3 d 的浸水后放大 35 倍的 Grt 样品

变异性比其他岩性高。

3 类岩石随水处理时间变化,脱胶面积变化情况如图 10 所示。浸水条件下,3 类岩石相对于干燥时的脱胶面积 A 变化情况如图 11 所示。

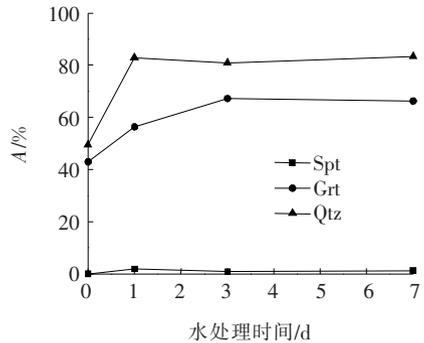


图 10 3 类岩石水处理时间与脱胶面积关系

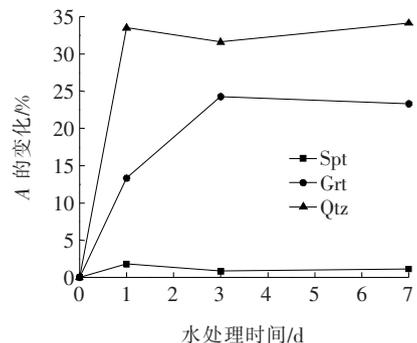


图 11 浸水条件下 3 类岩石相对于干燥时的 A 变化

结合图 6 与图 11 可以发现:在干燥条件下,Qtz 试样和 Grt 试样相较于 Spt 试样在更高的荷载下发生了破坏,随着浸水时间的增加,3 类试样的 F_{\max} 都有降低的趋势,最终表现为相反的状态(即 Spt 试样浸水 7 d 后的 F_{\max} 最大),这说明了水的存在劣化了 AAS 试样内的黏附键^[19-20]。在这趋势下,3 类试样的 A 一致增加,而其中 Spt 试样的 A 却几乎保持为零(即为黏聚破坏),与另外两类不同,究其原因,这是由于沥青与各个岩石发生化学交互作用导致凝聚强度变化。且有研究表明矿粉类型的不同及填料间的交互作用都会影响沥青胶浆的劲度^[21-22]。

2.3 结果的统计分析

为了验证所得结果,该文采用单因素方差分析检验,取显著水平 α 为 0.05,提出 4 个不同的假设是:① 浸水 7 d 的 F_{\max} ;② 干燥条件下的 F_{\max} ;③ 浸水 7 d 的 A ;④ 浸水 7 d 的 F_{\max} 与干燥条件下的平均 F_{\max} 的差值,以上条件都与岩性相关,

这 4 个假设的方差分析结果如表 3 所示,概率值 (P -value) 远低于 0.05,说明所有的测试假设都与岩性相关。这有助于进一步验证所提出的沥青-集料体系水损害评价试验装置以及岩性对沥青-集料体系水敏感性的影响结果。

表 3 不同参数的单因素方差分析结果

参数	试验条件	概率值 (P -value)	岩性相 关判断
F_{\max}	浸水 7 d	0.000 13	是
F_{\max}	干燥	0.011 34	是
A	浸水 7 d	$0.001 51 \times 10^{-4}$	是
$F_{\max}(\text{干燥}) - F_{\max}$ 的平均值	浸水 7 d	0.000 02	是

2.4 集料化学组成的关系

根据破坏时最大荷载(F_{\max})和脱胶面积(A)的相对变化,选取了两种不同的水损害指标进行评价:①如式(1)所示,表示沥青-集料界面力学性能降低的程度和速率;②如式(2)所示,表示水处理后黏附键劣化的程度和速率。浸水条件下,由于 F_{\max} 的损失和 A 随着黏附键劣化程度的增加而增加,导致指标随之增加,沥青集料体系就更容易水损害。这些指标不仅充分考虑了水损害的程度,而且还考虑了水损害增加的速度。

$$\text{水损害力学指标} = \int_0^d F_{\max} \text{ 曲线相对损失} \quad (1)$$

$$\text{水损害黏附破坏指标} = \int_0^d A \text{ 曲线变化} \quad (2)$$

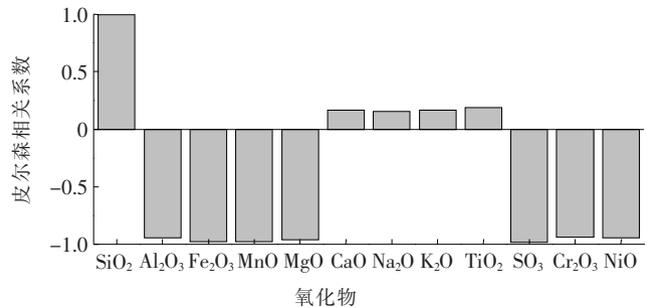
通过结合岩样化学组成与以上两个水损害指标分析,对所有岩样进行皮尔森相关系数构造,用以确定水损害指标与各类氧化物的含量是否存在线性关系,评价各个参数之间的相关性。

$$\text{皮尔森相关系数} = \frac{\text{COV}(x, y)}{\sigma_x \sigma_y} \quad (3)$$

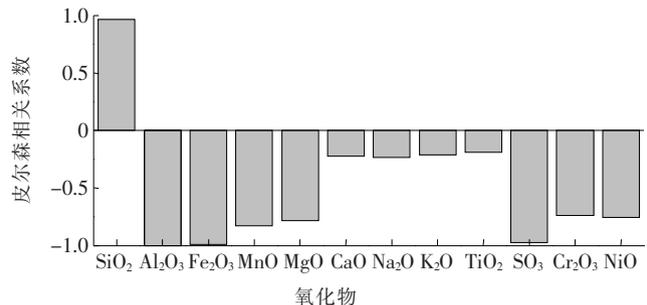
式中:COV(x, y)为数据之间的协方差(x 为其中一个指标, y 为表 1 中具体的氧化物); σ_x 和 σ_y 分别为 x 和 y 数据的标准差。

皮尔森相关系数值 1:正相关;-1:负相关;0:不相关。

皮尔森相关系数结果如图 12 所示,两个指标与 SiO_2 呈强正相关,与 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 MnO 、 MgO 、 SO_3 、 Cr_2O_3 、 NiO 呈强负相关。这说明 SiO_2 的存在促进了水损害,而 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 MnO 、 MgO 、 SO_3 、 Cr_2O_3 和 NiO 的存在抑制该现象发生。其他常见的长英质矿物的氧化物(CaO 和 Na_2O)与所提出的指标不相关。由此可知:岩石的化学组成在水损害现象中起着重要作用,且不只与 SiO_2 有关。



(a) 水损害力学性能的相关系数



(b) 水损害黏附破坏的相关系数

图 12 水损害指标与 3 种岩石所含氧化物的皮尔森相关系数

对于皮尔森系数,力学指标和黏附破坏指标得出几乎相同的结果,这表明了它们之间存在一定的相关性。因此,沥青-集料界面的力学性能的损失通常与沥青-集料界面间黏附键的劣化有关。

3 结论

(1) 从矿物组成上看,镁铁质矿物组成的岩石(即蛇纹岩)比长英类矿物组成的岩石(即石英岩和花岗闪长岩)具有更好的抗水损害能力。

(2) 从化学组成上看, Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 MnO 、 MgO 等氧化物具有抗水损害性能,而 SiO_2 会促进水损害的发生。

(3) 干燥条件下 F_{\max} 值、浸水7 d后的 F_{\max} 值,以及浸水7 d后的A这三类值随着岩石的主要矿物组成从镁铁质转变为长英质而增加。

(4) 通过拉拔试验和图像处理分析得到的力学指标和黏附性指标具有良好的相关性,结合完整的岩石化学组分分析,有助于选择集料的种类和评价集料-沥青体系的抗水损害能力。

参考文献:

[1] 李波,张智豪,刘祥,等.基于表面理论的温拌SBS改性沥青-集料体系的粘附性[J].材料导报,2017,31(4):115-120.

[2] 韩森,刘亚敏,徐鸥明,等.材料特性对沥青-集料界面粘附性的影响[J].长安大学学报(自然科学版),2010,30(3):6-9,70.

[3] 张平,杨倡珍.基于表面能理论的沥青与集料粘附及剥落机理分析[J].公路工程,2013,38(4):187-190.

[4] BHASIN A. Development of Methods to Quantify Bitumen-Aggregate Adhesion and Loss of Adhesion due to Water[D]. Texas A&M University,2006.

[5] CURTIS C W. Investigation of Asphalt-Aggregate Interactions and their Sensitivity to Water[J]. Vti Rapport, 1992;1 292-1 297.

[6] PRITHVI S K. Moisture Susceptibility of HMA Mixes: Identification of Problem and Recommended Solutions[R]. National Center for Asphalt Technology Report,1992.

[7] 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.

[8] 王威娜,徐青杰,周圣雄,等.沥青-集料黏附作用评价方法综述[J].材料导报,2019,33(13):2 197-2 205.

[9] 雷俊安,郑南翔,董善真.长期老化对沥青表面能及其与集料黏附性的影响[J].建筑材料学报,2021,24(2):393-398.

[10] 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,2011,56(12):151-154.

[11] 肖月.沥青混合料中胶浆-集料粘结性及力学性能研究[D].武汉:武汉理工大学,2008.

[12] GUO Meng, TAN Yiqiu, ZHOU Shuiwen. Multiscale Test Research on Interfacial Adhesion Property of Cold Mix Asphalt[J]. Construction and Building Materials, 2014,68:769-776.

[13] 甘新立.集料与沥青的表面特性分析及黏附性评价[D].西安:长安大学,2017.

[14] NGUYEN T, BYRD W E, BENTZ D P. Development of a Method for Measuring Water-Stripping Resistance of Asphalt/Siliceous Aggregate Mixtures[Z]. Transport Research Board, Washington D. C., 1996.

[15] CANESTRARI Francesco, CARDONE Fabrizio, GRAZIANI Andrea, et al. Adhesive and Cohesive Properties of Asphalt-Aggregate Systems Subjected to Moisture Damage[J]. Road Materials and Pavement Design, 2010,11(S1):11-32.

[16] 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.

[17] CHU L, LUO L, FWA T. F. Effects of Aggregate Mineral Surface Anisotropy on Asphalt-Aggregate Interfacial Bonding Using Molecular Dynamics (MD) Simulation[J]. Construction and Building Materials,2019,225:1-12.

[18] GUO M, TAN Y Q, BHASIN A, et al. Using Molecular Dynamics to Investigate Interfacial Adhesion between Asphalt Binder and Mineral Aggregate[C]. Functional Pavement Design,2016:517-527.

[19] 高春妹.集料清洁度对沥青混合料水稳定性的影响研究[D].长春:吉林大学,2007.

[20] 杨文锋.沥青混合料抗水损害能力研究[D].武汉:武汉理工大学,2005.

[21] GUO Meng, BHASIN A, TAN Yiqiu. Effect of Mineral Fillers Adsorption on Rheological and Chemical Properties of Asphalt Binder[J]. Construction and Building Materials,2017,141:152-159.

[22] RICHARDSON C. The Theory of the Perfect Sheet Asphalt Surface[J]. Journal of Industrial Engineering and Chemistry,1915,7(6):463-465.