

DOI: 10.11918/j.issn.0367-6234.2017.03.020

钨酸锆填料与沥青的粘附与水损害特性

易军艳¹, 曹一翔², 王东升¹, 冯德成¹, 吴 波³

(1. 哈尔滨工业大学 交通科学与工程学院, 哈尔滨 150090; 2. 广东省建筑科学研究院集团股份有限公司, 广州 510500;
3. 辽宁省交通工程质量与安全监督局, 沈阳 110005)

摘 要: 为分析亲水性钨酸锆材料作为沥青混合料填料的合理性, 基于表面能和粘附功理论, 对不同填料和沥青的表面能参数及粘附功进行测试和计算, 通过设计水侵蚀试验, 研究不同填料组成的沥青胶浆在水损害条件下的自由能和拉拔强度变化规律. 试验结果表明: 钨酸锆填料具有更大的 Lewis 碱和范德华表面能分量, 基质沥青则具备比 SBS 改性沥青更大的 Lewis 酸碱和范德华表面能分量; 在干燥状态下, 钨酸锆替代矿粉作为填料, 可提高其与沥青的粘附功, 进而提高沥青胶浆拉拔强度; 在水侵蚀下, 钨酸锆沥青胶浆具有更大的表面自由能变化, 水更倾向于取代基质沥青与钨酸锆浸润. 钨酸锆沥青胶浆比矿粉胶浆具有稍差的耐水损害能力.

关键词: 沥青胶浆; 钨酸锆; 表面能; 粘附功; 水损害

中图分类号: U416.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2017)03-0127-05

Adhesive bond and moisture damage mechanism of asphalt mastic made with zirconium tungstate

YI Junyan¹, CAO Yixiang², WANG Dongsheng¹, FENG Decheng¹, WU Bo³

(1. School of Transportation Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China;
2. Guangdong Provincial Academy of Building Research Group Company Limited, Guangzhou 510500, China;
3. Liaoning Provincial Communications Engineering Quality and Safety Supervision Bureau, Shenyang 110005, China)

Abstract: To investigate the rationality of zirconium tungstate (ZT) with hydrophilia property as the filler of asphalt mixture, the surface energy parameters and work of adhesion for different fillers and binders were investigated based on the surface energy and adhesive work theory. A moisture conditioning test method applied to asphalt mastic was proposed, and then the variations of surface energy and pull-off strength of asphalt mastics were studied. Test results indicate that ZT has larger Lewis basic component and Lifshitz van der Waals component, and 70# asphalt has larger Lewis basic and acid component and Lifshitz van der Waals component when compares to SBS asphalt. ZT presents stronger adhesive bond to asphalt at dry condition than mineral filler. However, water may be easier to enter into the interface between ZT and asphalt, and replace the asphalt film on the surface of filler. Asphalt mastic made with ZT shows the worse moisture damage resistance when compares with asphalt mastic made with normal mineral filler.

Keywords: asphalt mastic; zirconium tungstate; surface energy; adhesive work; moisture damage

低温开裂是沥青路面的典型病害之一, 其产生原因主要包括一次极端降温或温度疲劳作用^[1]. 裂缝出现后, 在水分作用下铺装材料将会产生更严重的早期损坏^[2-4]. 由于材料的热胀冷缩特性, 降温导致沥青混凝土收缩进而产生温度应力, 一旦温度应力超过沥青混凝土的断裂强度, 裂缝就会出现并随着温度的作用进一步发展. 相较于集料, 沥青和沥青胶浆具有更大的热收缩系数. 据已有研究显示沥青的热收缩系数可以达到集料的数十倍^[5-6]. 因此,

沥青及沥青胶浆的热收缩特性对于控制沥青路面的温度裂缝具有重要的价值. 在已有的低温开裂预估模型中, 也把沥青低温收缩系数作为一个重要的输入变量, 以此预估不同沥青路面的预期开裂率^[7]. 因此, 有效地调控沥青及胶浆的热收缩系数对于减少沥青路面的温度裂缝具有重要意义. 钨酸锆是一种近年来发现的新型材料, 研究报道显示其在 0~1 005 K 的大温度范围内具有与一般材料截然不同的热物特性, 即热缩冷胀^[8]. 因此, 近年来其开始得到研究者的重视, 在多个领域都得到应用, 用以生产低收缩甚至零收缩的复合材料^[9-11]. 在沥青路面领域, 也有研究者开始尝试引入钨酸锆, 以生产出具有低收缩系数的沥青混凝土, 减少降温过程中沥青混凝土产生的温度收缩应力, 从而降低沥青路面的开

收稿日期: 2016-03-16

基金项目: 国家自然科学基金(51408154);
辽宁省交通运输厅交通科技项目(201601);
中国博士后科学基金特别资助(2015T80357)

作者简介: 易军艳(1983—), 男, 博士, 讲师;
冯德成(1968—), 男, 教授, 博士生导师

通信作者: 易军艳, yijunyan@hit.edu.cn

裂率^[12]. 可见, 钨酸锆的引入将为沥青路面的温度裂缝控制提供一种新的解决方法. 但是前期试验发现, 钨酸锆具有比普通矿粉稍大的亲水系数, 因此钨酸锆沥青胶浆的抗水损害能力仍需要进一步的分析.

本文基于表面能和粘附功理论, 对不同填料和沥青的表面能参数及其粘附功进行了试验分析, 并依据有水情况下沥青胶浆系统自由能和拉拔强度变化规律, 研究了不同沥青胶浆的抗水损害特性.

1 试验原材料性质

试验沥青包括 70 号基质和 SBS 改性沥青. 70 号基质沥青 15 ℃ 下密度为 1.002 g/cm³, 25 ℃ 针入度为 6.8 mm, 10 ℃ 延度为 30 cm, 软化点为 52 ℃, 溶解度为 99.5%, 闪点为 276 ℃, 短期老化后残留针入度比为 64%, 残留延度(10 ℃) 为 11 cm, 质量变化率为 0.53%. SBS 改性沥青 25 ℃ 针入度为 6.56 mm, 15 ℃ 延度为 >100 cm, 软化点为 59.3 ℃, 溶解度为 99.3%, 闪点为 245 ℃, 短期老化后残留针入度比为 64%, 残留延度(5 ℃) 为 23 cm, 质量变化率为 0.48%. 填料是辽阳小屯出产的石灰石矿粉和大于 99% 纯度的钨酸锆粉末, 其中石灰石矿粉表观密度为 2.61 g/cm³, 颗粒平均粒径为 15.76 μm, 比表面积为 1.73 m²/g, 填料总的微孔体积为 0.014 mL/g, 填料微孔的平均孔径为 3.381 nm. 对于钨酸锆, 其表观密度为 5.75 g/cm³, 颗粒平均粒径为 4.52 μm, 比表面积为 4.35 m²/g, 填料总的微孔体积为 0.043 mL/g, 填料微孔的平均孔径为 29.818 nm.

钨酸锆具有更大的表观密度和比表面积, 以及更多且大的微孔. 国际纯粹与应用化学联合会(IUPAC) 将孔径分为 3 类: 具有 ≤2 nm 孔径的为微孔; 具有 2~50 nm 孔径的为介孔; 具有 >50 nm 孔径的为大孔. 因此, 两种填料的平均孔径均介于微孔和介孔之间. 这些微孔将有助于吸附沥青, 形成更好的粘附作用.

2 基本理论

本文基于表面能理论对沥青和填料的表面能参数进行测试. 材料表面能可分为 Lifshitz-范德华分量 γ^{LW} 和 Lewis 酸-碱分量 γ^{AB} , 其中 γ^{AB} 又分为 Lewis 酸分量 γ^+ 和 Lewis 碱分量 γ^- . 本文试验采用柱状灯芯法测定填料的表面能, 采用躺滴法测定并计算沥青表面能. 柱状灯芯法的测试理论依据是 Van Oss-Chaudhury-Good 组合理论和 Washburn 浸渍方程, 可分别表示为

$$X^2/t = (\gamma_L R \cos \theta) / 2\eta, \tag{1}$$

$$\gamma_L (1 + \cos \theta) / 2 = (\gamma_S^{LW} \gamma_L^{LW})^{1/2} + (\gamma_S^+ \gamma_L^-)^{1/2} +$$

$$(\gamma_S^- \gamma_L^+)^{1/2}. \tag{2}$$

式中: X 为液体浸渍填料的距离, mm; t 为浸渍时间, s; γ_L 为液体表面能, mJ/m²; R 为填料在玻璃管中的有效半径, mm; θ 为液体和填料的接触角, (°); η 为液体粘度, mPa · s; 下标 S、L 分别指固体和液体; γ_S^{LW} 、 γ_L^{LW} 为填料、液体表面能 Lifshitz-范德华分量; γ_S^+ 、 γ_L^+ 为填料、液体表面能 Lewis 酸分量, γ_S^- 、 γ_L^- 为填料、液体表面能 Lewis 碱分量; 表面能 Lewis 酸碱分量 $\gamma_S^{AB} = 2\sqrt{\gamma_S^+ \gamma_S^-}$.

躺滴法的测试原理基于式(2), 典型的躺滴法测试沥青接触角如图 1. 如果使用已知表面能参数的液体材料对填料和沥青进行浸渍和滴定, 即可求得沥青与填料的各个表面能参数.

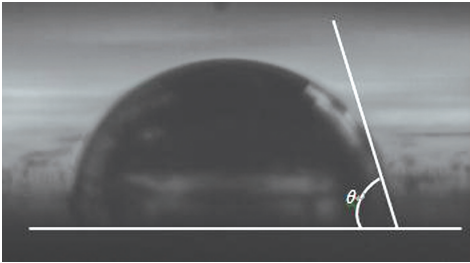


图 1 躺滴法测沥青接触角

Fig.1 Measurement of asphalt's contact angle with sessile drop method

3 试验方法及结果分析

3.1 填料表面能参数

采用柱状灯芯法测试矿粉和钨酸锆样品时, 将样品装入玻璃管内, 然后注入已知表面能参数的浸渍液体, 通过记录液体浸渍距离 X 与时间 t , 得到 t 与浸渍距离平方和 X^2 的关系曲线. 采用蒸馏水、正己烷、甲苯和三氯甲烷分别对填料进行浸渍, 其表面能参数见表 1.

表 1 浸渍液体相关参数

Tab.1 Surface parameters of immersed liquids

浸渍液体	γ_L	γ_L^{LW}	γ_L^{AB}	γ_L^+	γ_L^-	η
蒸馏水	72.8	21.8	51.0	25.5	25.5	0.89
正己烷	18.4	18.4	0	0	0	0.30
甲苯	28.3	28.3	0	0	2.7	0.56
三氯甲烷	27.3	27.3	0	3.8	0	0.50

典型浸渍曲线如图 2、3 所示, 其他液体类似. 由图可知, t 与 X^2 具有较好的线性关系, 试验中试样的平行性也较好. 由此可得不同填料的各项比表面能分量, 如表 2 所示. 按照 Lewis 酸碱定义, 凡是能够接受外来电子对的分子、离子或原子团称为 Lewis 酸, 凡是能够给出电子对的分子、离子或原子团称为 Lewis 碱. Lewis 酸-碱反应是物质间产生化学作用的主要组成部分. 研究证明, 沥青中 Lewis 酸与集料中 Lewis 碱的相互作用, 是构成沥青与集料粘附强度的重要因

素^[13-14]. 尽管普通矿粉具有稍大的 Lewis 酸-碱分量, 但钨酸锆显示出更大的 Lewis 碱分量. 因此, 可以推断钨酸锆与沥青之间将具有更大的粘附强度. 此外, 钨酸锆也具有更强的总表面能和 Lifshitz-范德华分量, 这也有利于钨酸锆与沥青间的粘结.

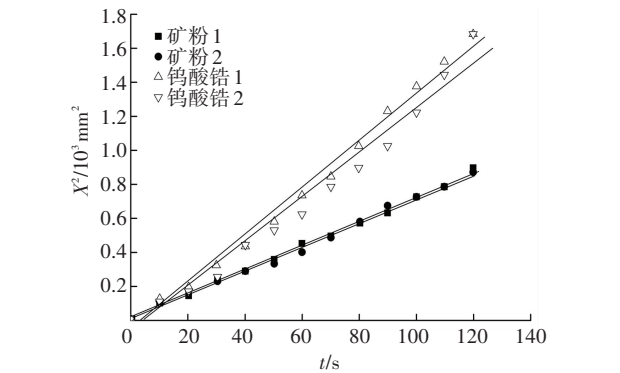


图2 正己烷浸渍填料的 t 与 X^2 关系

Fig.2 Relationships between t and X^2 for fillers immersing in n-hexane

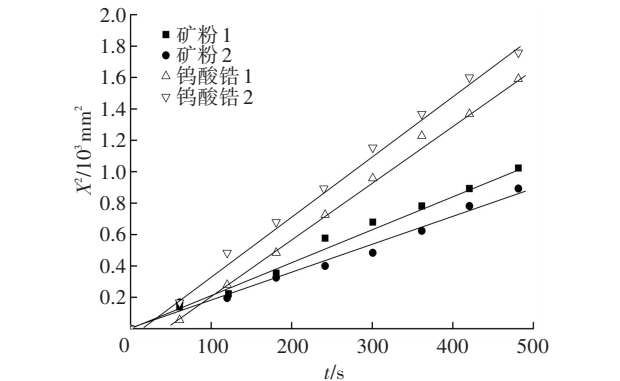


图3 甲苯浸渍填料的 t 与 X^2 关系

Fig.3 Relationships between t and X^2 for fillers immersing in toluene

表2 填料比表面能及各项分量

填料类型	γ_s	γ_s^{LW}	γ_s^{AB}	γ_s^+	γ_s^-
矿粉	19.62	6.89	12.73	7.79	5.88
钨酸锆	23.32	12.77	10.56	2.06	13.52

3.2 沥青表面能参数

同理,选择3种已知表面能参数的液体(蒸馏水、甲酰胺、丙三醇),采用躺滴法测定其与沥青试样的接触角,即可求得沥青的表面能参数. 滴定液体和最终计算得到沥青表面能参数见表3、4. 可以看到,基质70号沥青具有比SBS改性沥青更大的Lewis酸分量 γ_L^+ . 这表明在沥青与集料的化学吸附中,基质沥青具有比SBS改性沥青更强的接受外来电子对的趋势. 在与填料交互作用时,具有更大Lewis酸分量的基质沥青与较大Lewis碱分量的钨酸锆,将形成更强的Lewis酸-碱作用,提高两者之间的粘附性能. 同时可以看到,基质沥青也具有更

强的总表面能和 Lifshitz-范德华表面能分量,有助于基质70号沥青与填料间的相互粘附作用.

表3 滴定液体表面能参数

滴定液体	γ_L	γ_L^{LW}	γ_L^{AB}	γ_L^+	γ_L^-
蒸馏水	72.8	21.8	51.0	25.5	25.5
甲酰胺	58.0	39.0	18.9	3.5	25.5
丙三醇	64.0	34.0	30.0	3.9	57.4

表4 沥青表面能参数测试结果

沥青种类	γ_L	γ_L^{LW}	γ_L^{AB}	γ_L^+	γ_L^-
基质70号沥青	41.3	38.6	2.7	1.1	1.6
SBS改性沥青	30.5	29.8	0.7	0.1	1.3

3.3 干燥状态下填料与沥青的粘附功

填料与沥青间的粘附功可表示为

$$W_{as} = W_{as}^{LW} + W_{as}^{AB} \tag{3}$$

式中: W_{as} 为沥青与填料比表面界面的粘附功; W_{as}^{LW} 为沥青与填料比表面界面 Lifshitz-范德华力产生的粘附功; W_{as}^{AB} 为沥青与填料比表面界面 Lewis 酸碱力产生的粘附功.

由于粘附功的大小与比表面自由能的变化相等,方向相反,将填料比表面积乘以比表面自由能,可求得表面自由能的变化为

$$\Delta G_{as} = - W_{as} \times s_s \tag{4}$$

式中: ΔG_{as} 为表面自由能变化,mJ/g; s_s 为填料比表面积,m²/g.

由此干燥状态下填料与沥青粘附功以及表面自由能变化值如表5所示. 从表5可以看出,钨酸锆基质沥青胶浆的粘附功明显大于其他胶浆. 结合前面的研究结论,这是由于钨酸锆具有较大的 Lewis 碱分量,同时基质沥青具有较大的 Lewis 酸分量,形成酸碱吸附作用,这说明填料与沥青的配伍性对粘附功影响较大. 又因为钨酸锆的比表面积大于矿粉,使得钨酸锆基质沥青胶浆的自由能变化值显著大于其他胶浆,因此填料比表面积对粘结效果有决定性影响. 表面自由能变化绝对值越大,说明该系统越稳定,越容易自发进行. 这说明钨酸锆与基质沥青的粘结是自发进行且稳定存在.

表5 干燥状态沥青胶浆粘附功与表面自由能计算结果

胶浆类型	$W_{as}/(mJ \cdot m^{-2})$	$s_s/(m^2 \cdot g^{-1})$	$\Delta G_{as}/(mJ \cdot g^{-1})$
矿粉+基质沥青	44.76	1.73	-77.44
钨酸锆+基质沥青	55.39	4.35	-240.94
矿粉+SBS 沥青	36.56	1.73	-63.24
钨酸锆+SBS 沥青	44.61	4.35	-194.07

3.4 有水作用下沥青胶浆的粘附功

有水作用时,水会逐渐取代集料表面的沥青膜,

进而形成水-沥青界面和集料-水界面. 水损害过程中比表面自由能变化表达式^[15-16]为

$$\Delta \bar{G}_{\text{asw}} = \Delta \bar{G}_{\text{asw}}^{\text{LW}} + \Delta \bar{G}_{\text{asw}}^{\text{AB}} \quad (5)$$

式中 $\Delta \bar{G}_{\text{asw}}$ 为水损害过程中系统比表面自由能变化.

根据已经测得的沥青和填料比表面能分量,和已知水的表面能分量,则可计算出不同类型沥青胶浆在水损害过程中的表面自由能变化见表 6.

表 6 水损害过程中沥青胶浆表面自由能的变化

Tab.6 Variations of surface free energies of asphalt mastics during moisture damage process

胶浆类型	$\Delta \bar{G}_{\text{asw}} / (\text{mJ} \cdot \text{m}^{-2})$	$s_s / (\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1})$	$\Delta G_{\text{asw}} / (\text{mJ} \cdot \text{g}^{-1})$
矿粉+基质沥青	-113.81	1.73	-196.89
钨酸锆+基质沥青	-110.64	4.35	-481.27
矿粉+SBS 沥青	-106.32	1.73	-183.93
钨酸锆+SBS 沥青	-106.07	4.35	-461.41

从表 6 可知,不同类型胶浆在水损害过程中比表面能变化值均为负值,并且绝对值大于沥青与填料粘附过程的比表面能变化值,说明水损害过程是自发进行且不可避免,并且沥青-水的系统稳定性要好于沥青-填料. 钨酸锆基质沥青胶浆的表面能变化值最大,说明水更倾向于取代基质沥青与钨酸锆浸润. 如前所述,主要原因在于钨酸锆亲水系数大,容易与水结合,所以发生水损害的趋势更大. 但钨酸锆与基质沥青粘附作用更强,需要更大的动水压力和更长时间的水侵蚀才能使沥青膜脱落. 因此钨酸锆对于胶浆的水稳定性具有双重作用,既能提高粘附作用,但也更容易与水结合.

4 沥青胶浆的抗水损害性能验证

为验证前述基于表面能和粘附功理论得到的沥青胶浆抗水损害特性,采用拉拔试验对沥青胶浆水损害前后的拉伸强度进行了测试. 采用经过切割和打磨后的石板作为拉拔基底,沥青胶浆在模拟水侵蚀过程中完全置于水中,浸泡试验方法参考文献[17-18]. 试验仪器采用美国 DeFelsko 公司 PosiTest AT-M 数显拉拔式附着力测试仪. 试验前按照粉胶比 1.0 制备沥青胶浆,并加热到 150 ℃,以具有较好的流淌性. 然后在加工好的石板上浇注到内径为 20 mm、高 3 mm 的有机玻璃圆环内,浇注前在石板表面涂抹环氧树脂,并用环氧树脂将测试仪锭子粘结到胶浆顶面. 最后去除有机玻璃圆环得到沥青胶浆的拉拔试件. 由于胶浆试样两端均为环氧树脂,保证拉拔过程中大部分试件的破坏断面为胶浆. 拉拔试验示意图及已制备成型的胶浆试样如图 4 所示.

试样在室温下冷却后分成两组:一组为干燥试件;另一组如图 4 所示,试样浸泡入水中 24 h,作为

水侵蚀下的对比试样. 最后对两组试样进行拉拔试验,得到拉拔强度. 试验中每组试样包含 3、4 个平行试件,试验结果的离散性见图 5,可以看到,拉拔试验的试验结果平行性较好,离散性小. 经过水浸泡 24 h,沥青和胶浆拉拔强度都有不同程度的下降. 填料的加入相当于人为引入大量的填料-沥青界面,在水分侵蚀下,沥青胶浆拉拔强度下降幅度比沥青要大. 不同填料胶浆的强度值和水浸泡前后的差异,与前述表面能试验结论一致,即干燥状态下,相对于普通矿粉,钨酸锆与沥青间具有更强的粘附作用,因此其拉拔强度更大. 当经历水处理后,由于钨酸锆更大的亲水性,其胶浆拉拔强度下降比矿粉胶浆更大. 尽管如此,由于钨酸锆沥青胶浆的初始拉拔强度高,水侵蚀后的拉拔强度仍与矿粉胶浆相当,拉拔强度的下降程度也与矿粉沥青胶浆接近. 因此,钨酸锆沥青胶浆仍具有较好的抗水损害能力.

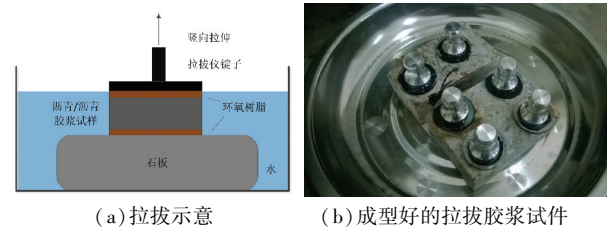


图 4 沥青胶浆的拉拔试验示意及试样

Fig.4 Pull-off test samples of asphalt mastics

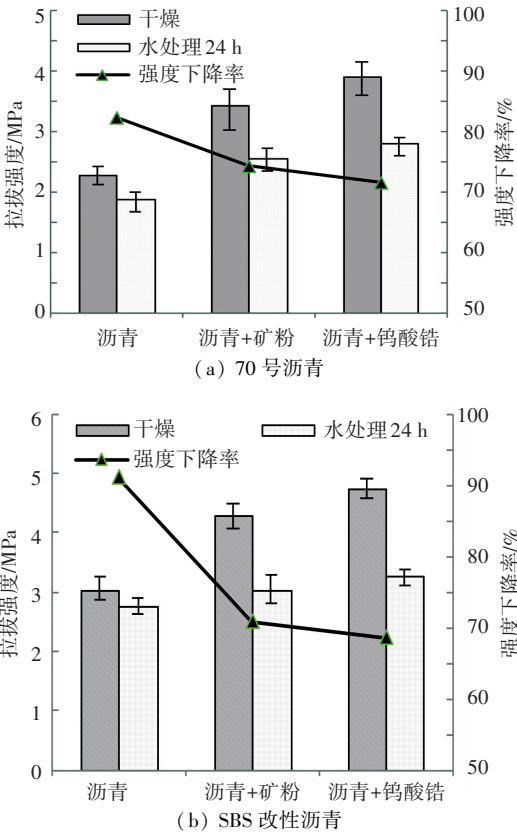


图 5 沥青及沥青胶浆拉拔试验结果

Fig.5 Pull-off test strength for asphalt and asphalt mastic

该结果与表6中钨酸锆-水-集料系统具有大很多的表面自由能变化值有稍许不同。原因主要在于水对于胶浆的侵蚀是由外至内,需要较长的作用时间,且侵蚀越往内水分的侵蚀速度越慢,因此沥青胶浆内部受水分影响不大。总体而言,钨酸锆填料具有与石灰岩矿粉相当的耐水损害性能。

5 结 论

1) 钨酸锆的总表面能、Lewis 碱和 Lifshitz-范德华表面能分量均大于矿粉,这将提高沥青中 Lewis 酸与填料中 Lewis 碱的相互作用,有助于沥青与填料间粘附强度的形成。

2) 基质 70 号沥青具有比 SBS 改性沥青更大的 Lewis 酸碱和 Lifshitz-范德华表面能分量,有助于基质 70 号沥青与填料间的相互粘附作用。

3) 水损害过程中沥青-水-填料系统自由能变化规律表明,沥青胶浆的水损害过程是自发进行且不可避免。在有水作用下,水更倾向于取代基质沥青与钨酸锆浸润,从而导致沥青胶浆的水损害。

4) 拉拔试验结果表明,干燥状态下钨酸锆与沥青具有更强的粘结强度。但由于其亲水性,钨酸锆沥青胶浆相对于石灰石胶浆更易被水侵蚀,导致胶浆强度的下降。但总体而言,钨酸锆沥青胶浆具有与矿粉沥青胶浆相当的抗水损害性能。

参考文献

- [1] MARASTEANU M O, LI X, CLYNE T R, et al. Low temperature cracking of asphalt concrete pavement [R]. Minnesota: Minnesota Department of Transportation, 2004.
- [2] 万晨光, 申爱琴, 王德强. 带裂缝桥面铺装内部动水行为仿真模拟[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2016, 48(9): 60-64. DOI: 10.11918/j.issn.0367-6234.2016.09.011.
WAN Chengguang, SHEN Aiqin, WANG Deqiang. Dynamic water behavior simulation of bridge deck pavement with cracks[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2016, 48(9): 60-64. DOI: 10.11918/j.issn.0367-6234.2016.09.011.
- [3] 谭亿秋, 符永康, 纪伦, 等. 橡胶沥青低温评价指标[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2016, 48(3): 66-70. DOI: 10.11918/j.issn.0367-6234.2016.03.011.
TAN Yiqiu, FU Yongkang, JI Lun, et al. Low-temperature evaluation index of rubber asphalt[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2016, 48(3): 66-70. DOI: 10.11918/j.issn.0367-6234.2016.03.011.
- [4] 任大龙, 万水, 李文虎. 含界面裂纹的 GFRP 沥青混合料巴西盘断裂力学分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2016, 48(3): 95-100. DOI: 10.11918/j.issn.0367-6234.2016.03.016.
REN Dalong, WAN Shui, LI Wenhui. Fracture mechanics analysis of GFRP asphalt mixtures Brazilian disk with interface crack[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2016, 48(3): 95-100. DOI: 10.11918/j.issn.0367-6234.2016.03.016.
- [5] OSTERKAMP T E, BAKER G C. Measurements of the linear thermal expansion coefficients of asphalt pavement at low temperatures [J]. Cold Regions Science and Technology, 1986, 12(3): 299-

301. DOI: 10.1016/0165-232X(86)90044-3.
- [6] ZENG M, SHIELDS D H. Nonlinear thermal expansion and contraction of asphalt concrete [J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 1999, 26(1): 26-34. DOI: 10.1139/cjee-26-1-26.
- [7] HAAS R, PHANG W A. Relationships between mix characteristics and low temperature pavement cracking[C]//Association of Asphalt Paving Technologists. Minnesota: Association of Asphalt Paving Technologists, 1988, 57: 290-303.
- [8] MARY T A, EVANS J S O, VOGT T, et al. Negative thermal expansion from 0.3 to 1050 Kelvin in ZrW_2O_8 [J]. Science, 1996, 272.5258: 90-92. DOI: 10.1126/science.272.5258.90.
- [9] 徐伟, 徐桂芳, 管艾荣. 负热膨胀填料钨酸锆对环氧封装材料性能影响[J]. 热固性树脂, 2008, 23(1): 22-25. DOI: 10.3969/j.issn.1002-7432.2008.01.007.
XU Wei, XU Guifang, GUAN Airong. Effect of negative thermal expansion filler zirconium tungstate on epoxy electronic packages [J]. Thermosetting Resin, 2008, 23(1): 22-25. DOI: 10.3969/j.issn.1002-7432.2008.01.007.
- [10] 吴伟萍. 钨酸锆对 CFRP 热膨胀性能的影响[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
WU Weiping. Effect of zirconium tungstate on the thermal expansion properties of carbon fiber reinforced polymer [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010.
- [11] KOFTEROS M, RODRIGUEZ S, TANDON V, et al. A preliminary study of thermal expansion compensation in cement by ZrW_2O_8 additions[J]. Scripta materialia, 2001, 45(4): 369-374.
- [12] 曹一翔. 钨酸锆改性沥青胶浆的路用性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
CAO Yixiang. Study on pavement performance of zirconium tungstate modified asphalt mortar [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.
- [13] CARO S, MASAD E, BHASIN A, et al. Moisture susceptibility of asphalt mixtures, part 1: mechanisms[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2008, 9(2): 81-98. DOI: 10.1080/10298430701792128.
- [14] BHASIN A, MASAD E, LITTLE D, et al. Limits on adhesive bond energy for improved resistance of hot mix asphalt to moisture damage [J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2006, 1970: 3-13. DOI: http://dx.doi.org/10.3141/1970-03.
- [15] 肖庆一, 薛航, 徐金枝, 等. 基于表面界面理论的沥青路面水损坏模型研究[J]. 武汉理工大学学报, 2007, 29(5): 71-73. DOI: 10.3321/j.issn:1671-4431.2007.05.021.
XIAO Qingyi, XUE Hang, XU Jinzhi, et al. Moisture damage model of asphalt mixture based on surface and interface theory[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2007, 29(5): 71-73. DOI: 10.3321/j.issn:1671-4431.2007.05.021.
- [16] 郭猛. 沥青胶浆的界面行为与机理分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
GUO Meng. Interfacial behavior of asphalt mastics and its mechanism [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012.
- [17] HESAMI E, BIDEWELL N, BIRGISSON B, et al. Evaluation of environmental susceptibility of bituminous mastic viscosity as a function of mineral and biomass fillers [C]//Transportation Research Board Annual Meeting Compendium of Papers. Washington DC: Transportation Research Board, 2013: 23-31.
- [18] KRINGOS N, SCARPAS A, SELVADURAI A P S. Simulation of mastic erosion from open-graded asphalt mixes using a hybrid lagrangian-eulerian finite element approach [J]. Computer Methods and Engineering Science, 2008, 28(3): 147-159.

(编辑 魏希柱)