

掺加葵花籽油胶囊沥青混合料力学性能及自愈性能研究

李宁博, 郝培文 编译

(长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064)

摘要:该文评估了葵花籽油胶囊用于沥青混合料力学性能上的效果以及自愈合性。研究将不同比例的胶囊(占沥青混合料重量分比别为0.5%、0.75%和1.00%)掺入到密级配沥青混合料中,分析胶囊对沥青混合料密度、间接抗拉强度、飞散损失、疲劳寿命等性能的影响。通过CT扫描,观测并评估胶囊的分布及完整性。结果证明了胶囊能在混合料拌和压实过程中保持完好,并且不会降低沥青混合料的力学性能,在高压缩荷载下,胶囊破裂并释放葵花籽油。葵花籽油的释放比率随着胶囊含量的增加而增加。除此之外,胶囊释放的油会显著增加混合料的自愈性能。

关键词:密级配沥青混合料;胶囊活性剂;力学性能;自愈性能

1 前言

沥青路面因具有良好的平整性和经济性,常用于高速公路和市政道路建设中。由于温度变化、湿度以及重复车辆荷载的原因造成的裂缝可能会严重缩短沥青路面的服务寿命^[1]。沥青混合料是一种自愈性材料,且能流入到路面裂缝中^[2],从而自动地修复内部裂

缝^[3-4]。此外,在拌和、压实以及服务期限内,沥青路面老化会增加。这种性质会减小沥青混合料的自愈能力并且减小其使用寿命^[5]。

为了提高沥青道路的自愈能力并且延长其服务寿命,研究人员研发了两种技术使沥青扩散到裂缝里。第一种是把混有金属的添加剂加到沥青混合料中并通过电磁感应或微波辐射等方法加热沥青混合料^[6]。这种技术的目的是加热沥青并使其流动到裂缝中^[7];第

参考文献:

- [1] 韩占波,石家志.复杂环境下地铁修筑技术[J].隧道建设,2009,29(1):82-87.
- [2] 张卫星.杭州艮山西路人行地道工程中的降水施工技术[J].隧道建设,2008,28(5):605-608.
- [3] 邵明利,陈秀荣.石崖坞隧道水害治理方案研究[J].中外公路,2018,38(2):173-176.
- [4] 刘厚朴.北京地铁矿山法施工区间隧道层间滞水处理方法[J].建筑·建材·装饰,2016(10).
- [5] 翁敦理,陈明辉.深孔注浆技术在地铁暗挖隧道施工中的应用[J].现代隧道技术,2012,49(2):137-141.
- [6] 杨建新.北京地铁下穿小月河深孔注浆施工技术[J].铁道标准设计,2007(2):57-60.
- [7] 张金夫,汶文钊.大瑞铁路大柱山隧道高压富水断层处理技术[J].现代隧道技术,2018,55(3):160-166.
- [8] 阳云,李广跃.厦门过海隧道超前帷幕注浆方案优化研究

[J].隧道建设(中英文),2018,38(11):1 888-1 894.

- [9] 侯景岩,王守慧.上层滞水的概念及隧道降水工程中的处理原则[C].中国土木工程学会第11届、隧道及地下工程分会第13届年会论文集,2004.
- [10] 曹坎嵩,王吉华,孟有军.沈阳地铁暗挖隧道穿越特殊杂填土层超前深孔注浆方案探讨[C].2014中国隧道与地下工程大会(CTUC)暨中国土木工程学会隧道及地下工程分会第十八届年会论文集,2014.
- [11] 王吉华.沈阳地铁暗挖区间竖井及横通道穿越建筑及生活垃圾填埋层综合施工技术[J].隧道建设,2016,36(5):606-613.
- [12] 梁寒山.WSS无收缩注浆工法及其控制要点[C].2015年度江苏省城市轨道交通建设学术年会论文集,2016.
- [13] 刘招伟,张顶立,张民庆.圆梁山隧道毛坝向斜高水压富水区注浆施工技术[J].岩石力学与工程学报,2005,24(10):1 728-1 734.

二种技术是把葵花籽油胶囊掺加到混合料中^[8]。当胶囊在交通荷载下破裂时,油会释放出来并且散布到混合料中。因此,当油的浓度很高时,沥青胶囊周围的黏性减小,沥青更容易流入裂缝中^[9]。该文重点研究用于提高沥青道路自愈性能的胶囊。

目前,已经研发了3种不同类型的胶囊。具有代表性的有:由 Su et al. 研究的微米级的核壳结构^[10]; Garcia et al. 研究出的毫米级的内部多孔结构^[11]。研究已经证实了胶囊能在沥青混合料的拌和及压实下保持完好并且能够提高混合料的自愈能力^[12]。除此之外,Tabakovic' et al. ^[13] 已经研究出了包含自愈性化学剂的空纤维并且用此取代胶囊,尽管此研究处于不成熟阶段。

该文重点研究 Micaelo et al. ^[14] 和 Al-Mansoori et al. ^[15-17] 的沥青混合料自愈性胶囊(海藻酸钙)。该胶囊由葵花籽油和包含葵花籽油的海藻酸钙胶囊膜组成。这种胶囊膜能保护葵花籽油免受外界环境的影响;Norambuena-Contreras et al. ^[18] 和 Xu et al^[19] 也同样制成了用于沥青玛蹄脂、密级配沥青混合料和沥青玛蹄脂碎石自愈性的胶囊^[20]。并且已经证实了胶囊在压实、飞散损失、混合料的自愈合特性等方面具有积极的作用。但是,当胶囊的含量持续增加的时候,胶囊在混合料的劲度模量上产生负面的影响^[16-19]。这种现象产生可能的原因是胶囊的低强度。如果胶囊的含量过低,其对沥青混合料的自愈性能影响将会受限,但加入过量的胶囊,亦会减小沥青混合料的刚度和抗车辙性^[15]。

该文的目的是重新评估和总结由 Ref^[15] 研制的胶囊的效果。评价含胶囊的密级配沥青混合料疲劳性能和自愈能力。该文将3种比例的胶囊(0.5%、0.75%、1.00%),添加到密级配沥青混合料中。评估沥青混合料的间接抗拉强度、飞散损失和疲劳寿命。此外,还会检验不同比例的胶囊对沥青混合料自愈性能的影响。最后,采用CT扫描评估混合料中胶囊的分布和完整性。试验设计见图1。

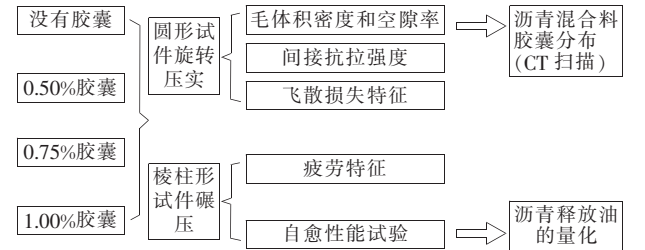


图1 试验设计

2 原材料及试验方法

2.1 原材料

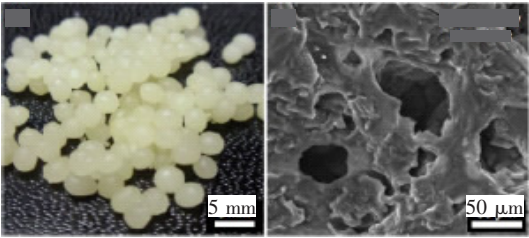
研究使用 AC-13 混合料,级配如表 1 所示。具体材料包括:玄武岩(密度 2.976 g/cm³),石灰岩填料(密度 2.669 g/cm³),沥青[针入度 77.5(0.1 mm)],软化点(49.1 ℃)。此外,海藻酸钙密度为 1.116 g/cm³。使用的活性剂密度为 0.92 g/cm³,烟点 227 ℃,闪点 315 ℃^[14]。采用颗粒纯度为 93%海藻酸(C₆H₇O₆Na)和氯化钙(CaCl₂)制成胶囊的聚合结构。试验过程中应考虑所用海藻酸钙胶囊的热能和力学性能的影响^[18]。

2.2 海藻酸钙胶囊的制备

在 20 ℃ 下,用离子凝胶法制备海藻酸钙胶囊^[14-16]。具体步骤为:① 制备海藻酸钠乳液;② 制备氯化钙溶液和合成胶囊;③ 干燥和储存胶囊,以再生剂和海藻酸钙聚合物比为 1:3(vol)的比例制备胶囊。图 2(a)显示了 2.5 mm 胶囊的光学图像。图 2(b)显示了具有多空结构的单个胶囊的 SEM 剖面图。

表 1 沥青混合料的级配组成

粒径/mm	通过率/%	粒径/mm	通过率/%
16	100.0	1.18	23.9
13.2	96.2	0.6	16.6
9.5	75.2	0.3	12.3
4.75	47.7	0.015	9.1
2.36	30.8	0.075	6.9



(a) 海藻酸钙的光学照片 (b) 单个胶囊的 SEM 剖面

图 2 海藻酸钙光学照片及 SEM 照片

2.3 沥青混合料试件的制备

采用含量 4.7%的黏合剂制备包含海藻酸钙和不包含海藻酸钙的沥青混合料试件。在这些胶囊混合料中,采用了3种不同胶囊比例:0.5%、0.75%和1.00%。并根据油和胶囊在沥青中的含量,在胶囊破

裂,油释放到沥青混合料后,理论上提出了一个油占混合料的比例为:6.97%、10.46%、13.95%。由于胶囊的低比率(不超过 1.00%),胶囊可以直接加入到沥青混合料中而且不影响集料级配。

用于力学试验的圆形试样采用下述过程制备:①集料和沥青分别在 160℃下加热 12 h 和 6 h;②在 160℃下,用试验室搅拌机拌和沥青混合料;③把在 20℃养护下的胶囊加到混合料中并搅拌 15 s;④把包含胶囊的沥青混合料倒入到模具中并使用轮辙成型机成型;⑤用路面取芯机从每个模具中钻孔取出圆柱体试件($\phi 100\text{ mm}\times 50\text{ mm}$)。从取出的圆柱形试件内取出圆形芯样($\phi 35\text{ mm}\times 50\text{ mm}$)用于 CT 扫描。使用轮辙成型机制作沥青混合料板,并切取棱柱形试样用于裂缝自愈试验。制作方法如下:用试验室搅拌机制作总量 25 kg 的料并从中取 14 kg 的沥青混合料。在拌和之后,把混合料装到钢模具中压实并按以下方法切割:使用旋转压实机压实 $306\text{ mm}\times 306\text{ mm}\times 60\text{ mm}$ 沥青混合料板使空隙率达到 5%。然后从中切取尺寸为 $150\text{ mm}\times 100\text{ mm}\times 60\text{ mm}$ 的棱柱体试件。为了在裂缝自愈试验中促进表面裂缝发生,在梁的中点切出尺寸为 $5\text{ mm}\times 5\text{ mm}$ 的横向切口。

2.4 毛体积密度和空隙率

毛体积密度和空隙率对沥青混合料的力学性能和疲劳寿命十分重要。采取 BS EN12697-5^[21] 标准测定试验试件的最大密度^[18]。除此之外,用测定表干体积饱和密度的方法,采取 BS EN12697-6 标准^[22]测定含有胶囊和不含胶囊的试件的毛体积密度,并计算 AV_i 。

2.5 间接抗拉强度

用间接抗拉试验评估胶囊含量对混合料力学性能的影响。同时,与不含胶囊的沥青混合料做比较。在试验之前,把圆形试样在 25℃下养护 4 h。试验中以 50 mm/min 的速率施加荷载直至达到峰值荷载。

2.6 飞散损失试验

通过飞散损失试验,评估含有胶囊和不含胶囊沥青混合料的飞散损失抵抗性能。试件在 20℃水中养护 20 h 后放到不带钢球的洛杉矶磨耗试验机。以 30 rpm 的速度旋转 300 转。计算试件的飞散损失:

$$PL\% = \left(\frac{W_{i1} - W_{i2}}{W_{i1}} \right) \times 100 \tag{1}$$

式中:PL 为试件的飞散损失(%); W_{i1} 为初始量(g); W_{i2} 为残余量(g)。

2.7 疲劳特性

采用 Ref^[23] 采用的拉力参数进行间接拉伸疲劳试验,研究不含胶囊及含 3 种比例胶囊的沥青混合料的疲劳特性。使用通用试验机 UTM-25 施加半正弦重复荷载直至累积的荷载总量造成试件破坏。试验频率为 1 Hz。在每个荷载循环中,荷载时间 0.1 s,间歇 0.9 s。在基础试验温度 15℃下进行试验。通过式(2)计算不同压力等级下的疲劳寿命:

$$N_f = K \left(\frac{1}{\sigma_0} \right)^n \tag{2}$$

式中: N_f 为试件破坏时疲劳循环的数值; σ_0 为试件中心的水平拉应力(MPa);K 和 n 为疲劳回归常数。

2.8 自愈性能试验

使用 Al-Mansoori et al^[15-17] 研发的力学疲劳自愈试验,评估胶囊对混合料自愈的影响。用-20℃养护的棱柱形试件进行三点弯曲测试。之后,将梁的两半放到一起装入到钢模具中,并用一块细塑料片放到裂缝之间,目的是避免裂缝两侧接触。将 75 kN 的静压荷载施加在沥青混合料棱柱的表面上,目的是模拟交通荷载并使胶囊破裂。试验中,用于模拟在沥青道路上大尺度加速破坏的压力值和路面加速加载设备用的压力值相同^[24]。胶囊破坏,塑料膜移动破坏,棱柱试件两侧会碰到一起,然后将试件安置在 20℃下养护。在 Norambuena-Contreras et al^[18] 研究中描述了上述步骤。图 3 显示了试验步骤的具体过程。

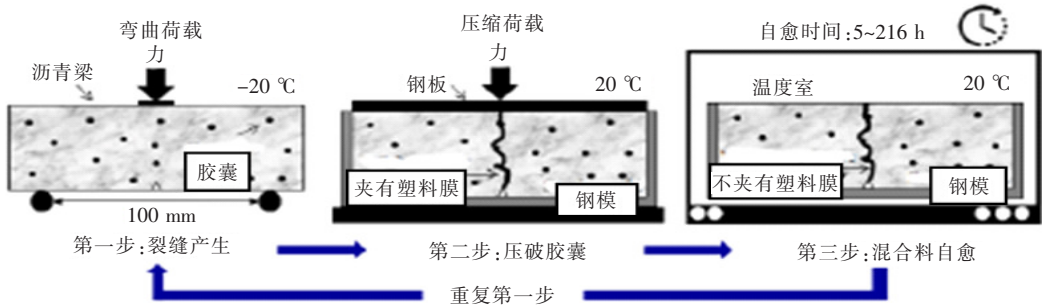


图 3 在沥青混合料厚片上的裂缝自愈试验示意图

含有胶囊和不含有胶囊的沥青混合料梁在裂缝愈合上的性能表现量化为:在三点弯曲试验中,经过一段时间后,能从被测试的裂缝梁的三点弯曲强度中恢复的自愈水平。试验测试了10个不同的时间:5、24、48、72、96、120、144、168、192、216 h。每个梁经过一个特定的时间后达到的自愈水平按式(3)定义:

$$HL(\%) = \frac{(F_{i-healed})}{(F_{i-initial})} \times 100$$

(3)

式中:HL为自愈水平,定义为在梁初始测试时的最大力 $F_{i-initial}$ 和同一沥青混合料梁在自愈过程后测得的最大力 $F_{i-healed}$ 之间的比值。

2.9 胶囊油释放水平的量化

采用傅立叶红外线光谱分析仪(FTIR)在化学上分析沥青混合料中的海藻酸钙胶囊释放出的油的水平。

FTIR试验的两个试件按如下过程制备:①将带有同等数量活化剂的原始沥青混合料的试验试件{包含3个胶囊比例[模拟从加到混合料中的胶囊(0.5%、0.75%、1.00%)中释放出100%的油]}作为参考组;②从前述含有和不含有胶囊的梁上使用热刀随机提取试件,然后进行自愈合试验。为了确定胶囊中油的比例,试验结果同参考组做对比。

用光谱仪进行FTIR分析时,仪器设置成吸收模式并且波数范围设置为400~4 000 cm^{-1} ,分辨率为4 cm^{-1} ,采集光谱的吸收谱^[25]。图4显示一个含有0.5%的海藻酸钙胶囊的沥青混合料试件的光谱实例。从波数1 700~1 800 cm^{-1} ^[17]吸收峰值的变化评估沥青混合料中油的释放效果。使用沥青混合料梁中胶囊试验前和试验后的吸收谱的结果,评估油释放水平(ORL)。其计算如下:

$$ORL(\%) = \frac{(A_{1\,745-Si})}{(A_{1\,745-Ref})} \times 100$$

(4)

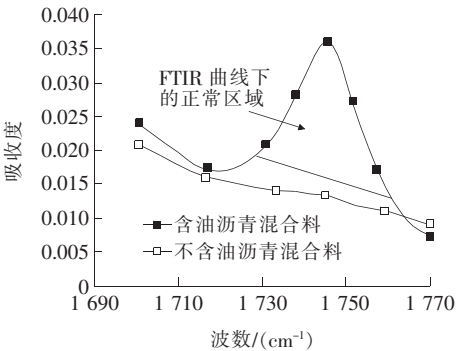


图4 含有0.5%胶囊和不含有胶囊的沥青混合料的FTIR曲线的样本

式中: $A_{1\,745-Si}$ 为含有不同比例的海藻酸钙胶囊(0.5%、0.75%、1.00%)特定试件在峰值1 745 cm^{-1} 下的吸收谱; $A_{1\,745-Ref}$ 为基于加到混合料中胶囊的比例,沥青油释放100%时的沥青混合料试件在峰值1 745 cm^{-1} 下的吸收谱。

2.10 胶囊试件的CT扫描特征

通过CT扫描分析评估沥青混合料中胶囊的分布和结构的完整性^[18]的过程如下:①使用GE Sensing设备和Inspection Technologies GMBH Phoenix VTomeX M技术并以200 kV和180 μA 的参数,对沥青混合料和试件进行CT扫描试验;②使用Phoenix Datos X2 Reconstruction软件进行扫描结果的重构和校正;③把结果重构到3D模型,2D影像沿着XY轴导出为TIFF格式。

3 结果和结论

3.1 胶囊对密级配沥青混合料的密度和空隙率的影响

表2显示了包含和不包含胶囊的沥青混合料的平均毛体积密度和空隙率。从每种含量胶囊的样本中抽取5个试件,测试混合料胶囊含量的平均值。由表2可知:掺加胶囊沥青混合料的密度明显减小。减小的原因是胶囊的密度(20 $^{\circ}\text{C}$ 下密度为1.116 g/cm^3 ^[18])比混合料中的集料和玛蹄脂的密度更低。正如Al-Mansoori et al之前得出:增加0.5%胶囊含量也许会减小集料空隙率^[14]。

表2 含有胶囊和不含有胶囊的沥青混合料的密度和空隙率

混合料种类	毛体积密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	理论最大密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	空隙率/ %
不含胶囊	2.559	2.679	4.5
0.5%含量胶囊	2.557	2.669	4.2
0.75%含量胶囊	2.529	2.668	5.2
1.00%含量胶囊	2.499	2.664	6.21

3.2 胶囊在混合料中的分布

图5为胶囊沥青混合料体层摄影X射线结果。表5(a)显示:在混合料的制作过程中,0.5%含量胶囊的试件有较小比例的胶囊破坏并且呈现一个良好的空间分布。与此同时,含有更高含量胶囊的混合料呈现了一些胶囊的聚集,如图5(b)所示。这种聚集现象的原因目前不明确,可能被认为是在拌和前已经发

生了海藻酸钠的固化并造成的胶囊聚集。Ref^[14]之前已经研究并量化了同等胶囊的分布但是没有得出任何相似的结果。图 5(c)中,CT 扫描的影像显示了胶囊能在拌和与压实过程中保持完好,并且由于集料间的作用而破坏。在之前的研究中^[18-20],通过扫描电子显微镜观察到胶囊的微观结构,得出胶囊结构是一个多孔结构,如图 2(b)。现在尚不清楚胶囊中的油是如何释放,但是,该文认为胶囊破坏的原因是环绕在它们周围集料的挤压。并且,多空隙沥青混合料的胶囊也许会比密级配沥青的胶囊更快地释放油。因为胶囊是一个多核结构,所以当胶囊中的一部分在由沥青混合料循环荷载导致的集中压力下破坏时,剩下的胶囊会依然保持完好。

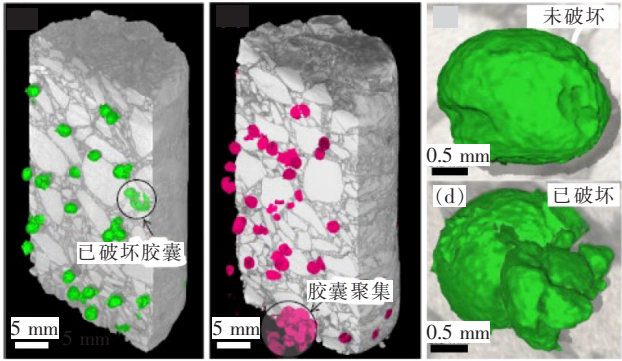


图 5 0.5%和 0.75%胶囊含量的沥青混合料的 CT—扫描
重构以及 2 个 0.5%胶囊含量沥青混合料的单独
试件(1 个未破坏,1 个已破坏)

3.3 胶囊对沥青混合料间接抗拉强度(*ITS*)的影响

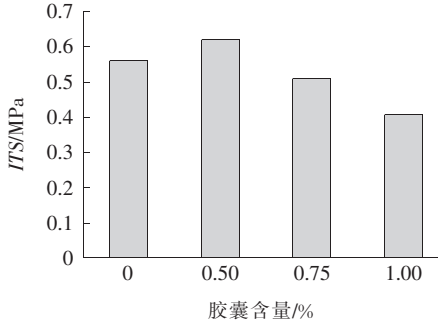
图 6 显示了含有胶囊和不含有胶囊的沥青混合料 *ITS* 结果。从 3 个混合料的试件中计算出胶囊含量的均值。

图 6(a)显示了 0.5%胶囊的沥青混合料的稠度比不含胶囊、含有 0.75%和 1.00%胶囊含量的沥青混合料的稠度更大。图 6(b)显示了位移为 3.05 mm 的 *ITS* 数值平均最大值。结果显示出 0.5%胶囊含量的沥青混合料比不含胶囊或者 0.75%含量胶囊、1.00%含量胶囊的沥青混合料有更高的 *ITS* 均值。原因在于 0.5%胶囊含量的沥青混合料有更低的空隙率。当在混合料中加入更多的海藻酸钙胶囊时,混合料的空隙率增加并且更多的油从胶囊中释放,减小了它的稠度和沥青混合料的 *ITS* 数值。

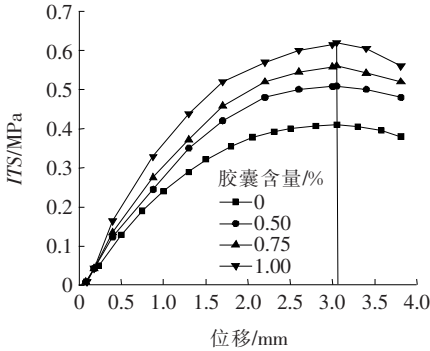
3.4 胶囊对沥青混合料飞散损失性能的影响

图 7 显示了含有胶囊和不含有胶囊沥青混合料的颗粒损失比率。从每种胶囊含量的混合料中抽取 5 个

样本并计算飞散损失率平均值。在图 7 中,得出不含胶囊和含有 0.5%、0.75%和 1.00%胶囊含量的平均飞散损失分别是 4.94%、5.07%、5.76%和 6.06%。证明了参加海藻酸钙胶囊会增加沥青混合料的飞散损失。0.5%胶囊含量的混合料和不含胶囊的混合料的飞散损失均值相近。此外,含有胶囊试验试件的视检结果显示了它们能抵抗飞散试验造成的影响。Al—Mansoori et al. 在 2017 年得出了相似的结果^[15]。



(a) 含有胶囊和不含有胶囊 *ITS* 比较



(b) 平均 *ITS* 曲线

图 6 沥青混合料最大平均 *ITS*

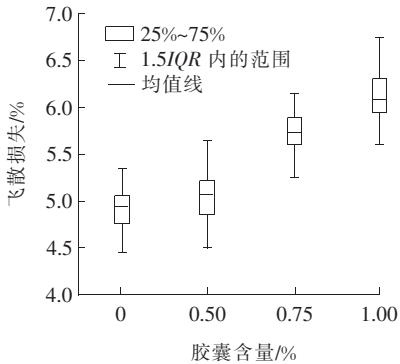


图 7 含有胶囊和不含有胶囊的沥青混合料飞散损失结果

3.5 胶囊对沥青混合料耐久性的影响

图 8 显示了含有胶囊和不含有胶囊的沥青混合料试件的疲劳特性。从每种胶囊含量的混合料中抽取 3

个样本并计算其疲劳寿命平均值。在图8中,在混合料中掺加0.5%胶囊提高了所有压力水平上的疲劳抵抗能力。这可能是因为0.5%胶囊含量的混合料具有更低的空隙率和更高的强度。更多胶囊(0.75%和1.00%胶囊含量)减小了沥青混合料的疲劳抵抗能力,其原因是大量胶囊增加了混合料的空隙率。

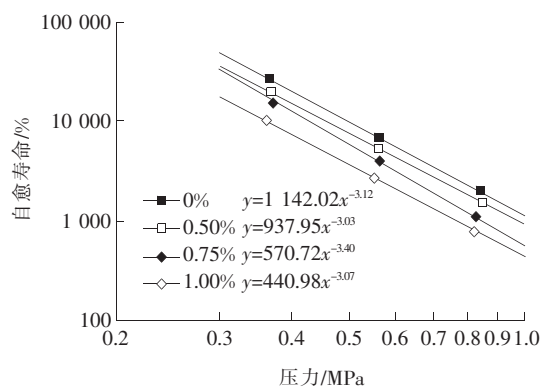


图8 含有胶囊和不含有胶囊的沥青混合料试件的平均疲劳试验的结果

3.6 胶囊对沥青混合料自愈性能的影响

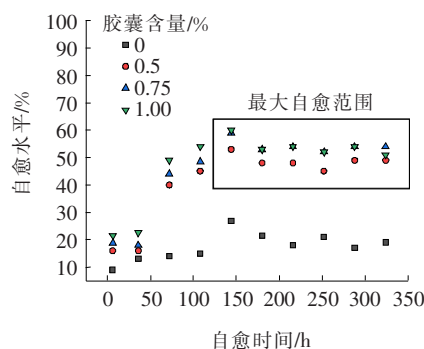
图9(a)显示了在不同的自愈时间下,含有胶囊和不含有胶囊的沥青混合料试件达到的自愈水平。图中每一个点代表一个试件的胶囊含量的自愈时间和自愈水平之间的关系。大量的试验和数据的良好相关性证明了试验数据的高可信度。从图9(a)可以看出:①含有胶囊的沥青混合料试件比不含有胶囊的沥青混合料试件能达到更高的自愈水平;②含有胶囊和不含有胶囊的沥青混合料试件的自愈水平随着自愈时间增加逐渐增加,并且在96 h的自愈时间上达到了自愈水平的最大值,大多数持续到了216 h。图9(a)可以看出自愈范围。因此,试件在96~216 h自愈水平可以看做混合料的最大自愈水平。

不含胶囊、含有0.5%、0.75%、1.00%胶囊的沥青混合料的平均最大自愈水平分别为20.44%、49.04%、54.32%和54.86%。图9(a)证明了混合料中更高的胶囊含量能达到混合料更高的自愈水平。因为高胶囊含量增加了胶囊破坏的可能性,并且试验中施加了压缩荷载。这种荷载也会潜在地增加沥青混合料内部释放的油^[18]。

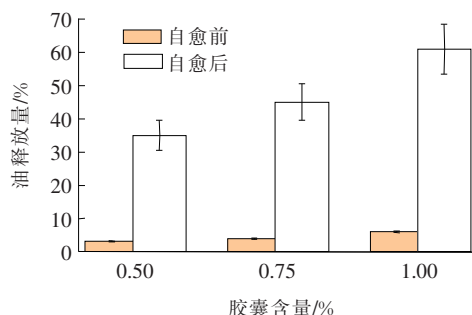
如图9(b)所示,根据FTIR试验,沥青混合料中释放出的油水平分别为35.45%、45.05%和60.93%,对应含量的0.5%、0.75%和1.00%的胶囊。但是,沥青混合料中释放的油水平不仅跟外部施加的荷载有

关,而且跟混合料的制作过程有关。制作过程中胶囊也会被破坏。在混合料制成后,不同胶囊比例(0.5%、0.75%和1.00%)释放出的油的水平量化为:3.22%、4.09%和5.54%。

从图9(a)中的0.75%和1.00%胶囊在最大自愈范围上可以看出:高于0.5%胶囊含量没有在最大自愈水平上有明显增加。其原因可能是沥青混合料中含有大量的活化剂(油-沥青)。在此研究中,沥青混合料中油-沥青比含量为6.97%、10.46%和13.95%,分别对应为0.5%、0.75%和1.00%胶囊含量。先前用蔬菜油活化的老化沥青黏合剂研究^[26]证明了超过7.0%沥青含量对混合料的性能有不利的影响。这种现象影响着沥青混合料的流变性质。因此,总结出0.5%胶囊含量是提升沥青混合料自愈性能最佳的比率,而且不影响密级配沥青混合料的流变性能。



(a) 自愈水平



(b) 自愈前后释放油的比例

图9 自愈试验结果

3.7 总结及结果讨论

(1) 表3为了一个掺加海藻酸钙胶囊的密级配沥青混合料的密度、空隙率、间接抗拉强度、平均损失抵抗能力、疲劳表现和自愈性能影响上的总结。

由表3可以看出:由于加入到混合料中的胶囊比率(0.5%、0.75%或1.00%),不同胶囊对性能的影响是不同的。由于胶囊的密度比集料更低,减小了混合

表 3 含有胶囊的混合料比不含有胶囊的
沥青混合料性能提高比例

胶囊 含量/ %	提高比例/%					
	平均毛 体积密 度	平均空 隙率	最大间 接抗拉 强度	平均飞 散损失	平均疲 劳寿命	最大自 愈水平 (96 h)
0.50	-0.1	-6.7	11.0	-2.5	29.3	100.9
0.75	-1.2	15.6	-7.3	-16.5	-23.0	121.3
1.00	-2.3	37.8	-25.4	-22.7	-51.3	126.8

料的平均毛体积密度。与含有更高含量的混合料相比,掺加 0.5%胶囊对密度的影响非常低是一个合适的沥青拌和剂量;在文献[15-16]中,已经证明了海藻酸钙胶囊调整自身的形状并适应集料结构。因为它们的材料和圆形的形状使其在制成过程中更容易流动[图 6(c)]。0.75%和 1.00%的胶囊含量增加了混合料的空隙率,但是与不含胶囊的混合料相比,0.5%胶囊含量减小了混合料的空隙率,其值为 6.7%。

(2) 0.75%和 1.00%胶囊含量对最大间接抗拉强度和抗飞散能力有不利的影响。与不含胶囊的混合料相比,0.5%的胶囊含量使 ITS 值增加了 11%。与高胶囊含量的混合料相比,增加 0.5%胶囊在飞散损失抵抗能力的影响非常低(如表 3 所示为-2.5%)。其原因可归结为胶囊调整它们的形状适应周边的集料并进入到沥青基质中。同时调整了材料的密度,因此增加了混合料的空隙率。

(3) 观察到 0.75%和 1.00%胶囊含量对平均疲劳寿命有不利的影响。但是与不含胶囊的沥青混合料相比,0.5%胶囊含量增加了疲劳寿命 29.3%。基于之前的研究^[15-18],掺加 0.75%和 1.00%胶囊在沥青混合料的力学性能上的不利影响能通过胶囊的尺寸被扩大。因为其构成了固体骨架的一部分,并且也是细集料的一部分。

(4) 在混合料最大自愈试验中,进行到 96 h 时,所有含量的胶囊都会对沥青混合料的自愈能力有积极的影响,之后保持最大自愈水平。相比初始自愈水平,0.5%、0.75%和 1.00%胶囊含量在 96 h 时的最大自愈水平分别增加了 100.9%、121.3%和 126.8%。如表 3 所示,更高沥青含量的增加不会必然地意味着力学性能的提升。

4 结论

(1) 海藻酸钙胶囊会影响沥青混合料的毛体积密

度和空隙率。

(2) 与不含胶囊的沥青混合料相比,0.5%胶囊的混合料增加了间接抗拉强度、疲劳寿命并且维持同等抗飞散损失性。

(3) 掺入 0.75%和 1.00%胶囊,对沥青混合料间接抗拉强度、疲劳和抗飞散损失性有不利的影

响。(4) CT 扫描结果证明海藻酸钙胶囊能在沥青混合料拌和和压实过程中保持完好,并且它们在外

部压缩荷载作用下在沥青混合料内部释放油。沥青混合料中更高胶囊数量造成了更高的油释放比率;此外,胶囊能在沥青混合料结构中自我修复。通过和集料的紧密结合,显示出胶囊对沥青玛蹄脂具有强烈的黏性。

(5) 海藻酸钙胶囊释放出的油明显地增加了密级配沥青混合料的自愈性能,并且增加了所有胶囊含量的自愈水平直至达到经过自愈时间 96 h 后的自愈水平数值。

(6) 加入到沥青混合料的胶囊数量越多,其自愈水平越高。但是,对于沥青混合料自愈性而言,0.5%含量的胶囊被认为是不影响混合料流变性的最佳胶囊比例。

参考文献:

[1] Wu Shaopeng,Zhao Zhijie,Xiao Yue,et al. Evaluation of Mechanical Properties and Aging Index of 10-Year Field Aged Asphalt Materials[J]. Construction and Building Materials,2017,155:1 158-1 167.

[2] Liu Quantao,Garcia A,Schlangen E,et al. Induction Healing of Asphalt Mastic and Porous Asphalt Concrete [J]. Construction and Building Materials, 2011, 25 (9): 3 746-3 752.

[3] Garcia A'. Self-Healing of Open Cracks in Asphalt Mastic[J]. Fuel,2012,93(1):264-272.

[4] Liu Quantao,Schlangen E,Ven MVD,et al. Evaluation of the Induction Healing Effect of Porous Asphalt Concrete through Four Point Bending Fatigue Test[J]. Construction and Building Materials,2012,29(4):403-409.

[5] Su Junfeng,Wang Yingyuan,Yang Peng,et al. Evaluating and Modeling the Internal Diffusion Behaviors of Micro-encapsulated Rejuvenator in Aged Bitumen by FTIRATR Tests[J]. Materials,2016,9(11):932.

[6] Norambuena-Contreras J,Garcia A. Self-Healing of Asphalt Mixture by Microwave and Induction Heating [J]. Materials & Design,2016,106:404-414.

[7] Grossegguer D,Garcia A. Influence of the Thermal Expansion of Bitumen on Asphalt Self-Healing[J]. Applied

- Thermal Engineering, 2019, 156: 23—33.
- [8] Su Junfeng, Schlangen E, Wang Yingyuan. Investigation the Selfhealing Mechanism of Aged Bitumen Using Microcapsules Containing Rejuvenator[J]. Construction and Building Materials, 2015, 85: 49—56.
- [9] Garcia A, Austin CJ, Jelfs J. Mechanical Properties of Asphalt Mixture Containing Sunflower Oil Capsules [J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 118: 124—132.
- [10] Su Junfeng, Schlangen Erik. Synthesis and Physicochemical Properties of High Compact Microcapsules Containing Rejuvenator Applied in Asphalt[J]. Chemical Engineering Journal, 2012, 198—199: 289—300.
- [11] Garcia Alvaro, Schlangen Erik, De Ven Martin Van. Properties of Capsules Containing Rejuvenators for their Use in Asphalt Concrete[J]. Fuel, 2011, 90 (2): 583—591.
- [12] Su Junfeng, Wang Yingyuan, Han Ningxu, et al. Experimental Investigation and Mechanism Analysis of Novel Multi—Self—Healing Behaviors of Bitumen Using Microcapsules Containing Rejuvenator[J]. Construction and Building Materials, 2016, 106: 317—329.
- [13] Tabakovic A, Post W, Cantero D, et al. The Reinforcement and Healing of Asphalt Mastic Mixtures by Rejuvenator Encapsulation in Alginate Compartmented Fibres[J]. Smart Materials and Structures, 2016, 25 (8): 084003.
- [14] Micaelo Rui, Al—Mansoori Tariq, Garcia Alvaro. Study of the Mechanical Properties and Self—Healing Ability of Asphalt Mixture Containing Calcium—Alginate Capsules[J]. Construction and Building Materials, 2016, 123: 734—744.
- [15] Al—Mansoori Tariq, Micaelo Rui, Artamendi Ignacio, et al. Microcapsules for Self—Healing of Asphalt Mixture without Compromising Mechanical Performance [J]. Construction and Building Materials, 2017, 155: 1 091—1 100.
- [16] Al—Mansoori Tariq, Norambuena—Contreras Jose, Micaelo Rui, et al. Self—Healing of Asphalt Mastic by the Action of Polymeric Capsules Containing Rejuvenators [J]. Construction and Building Materials, 2018, 161 (17): 330—339.
- [17] Al—Mansoori Tariq, Norambuena—Contreras Jose, Garcia Alvaro. Effect of Capsule Addition and Healing Temperature on the Self—Healing Potential of Asphalt Mixtures[J]. Materials and Structures, 2018, 51(2): 33.
- [18] Norambuena—Contreras Jose, Yalcin Erkut, Garcia Alvaro, et al. Effect of Mixing and Ageing on the Mechanical and Self—Healing Properties of Asphalt Mixtures Containing Polymetric Capsules [J]. Construction and Building Materials, 2018, 175: 254—266.
- [19] Xu Shi, Tabakovic Amir, Liu Xueyan, et al. Calcium Alginate Capsules Encapsulating Rejuvenator as Healing System for Asphalt Mastic[J]. Construction and Building Materials, 2018, 169: 379—387.
- [20] Norambuena—Contreras Jose, Yalcin Erkut, Hudson—Griffiths Robin, et al. Mechanical and Self—Healing Properties of Stone Mastic Asphalt Containing Encapsulated Rejuvenators[J]. Journal of Materials Civil Engineering, 2019, 31(5): 1—10.
- [21] British Standard Institute. BS EN 12697—5—2012. Bituminous Mixtures, Test Methods for Hot Mix Asphalt: Determination of the Maximum Density[S].
- [22] British Standard Institute. BS EN 12697—5—2012. Bituminous Mixtures, Test Methods for Bulk Density of Bituminous Specimens[S].
- [23] Liu Quantao, Li Bin, Schlangen Erik, et al. Research on the Mechanical, Thermal, Induction Heating and Healing Properties of Slag/Steel Fibers Composite Asphalt Mixture[J]. Applied Sciences, 2017, 7(10): 1 088.
- [24] Xu Shi, Garcia Alvaro, Su JunFeng, et al. Self—Healing Asphalt Review: From Idea to Practice[J]. Advanced Materials Interfaces, 2018, 5(17): 1.
- [25] Liang Pengjuan, Wang Hao, Chen Chaoyin, et al. The Use of Fourier Transform Infrared Spectroscopy for Quantification of Adulteration in Virgin Walnut Oil[J]. Journal of Spectroscopy, 2012, 1(1).
- [26] Ji Jie, Yao Hui, Suo Zhi, et al. Effectiveness of Vegetable Oils as Aejuners for Aged Asphalt Binders[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2017, 29 (3): D4016003.
- [27] 王春燕. 自修复微胶囊在沥青混合料中的应用 [J]. 中外公路, 2019, 39(3): 260—264.