

微胶囊橡胶改性沥青混合料自修复性能研究

杨祥¹, 乔智健², 苗永哲², 田稳苓², 卿龙邦², 姜磊³

(1. 河北雄安荣乌高速公路有限公司, 河北保定 071700;

2. 河北工业大学土木与交通学院, 天津 300401; 3. 山东科技大学土木工程与建筑学院, 山东青岛 266590)

摘要:为促进微胶囊沥青混合料的路面工程应用,研究了微胶囊对橡胶改性沥青及橡胶改性沥青混合料基本性能和自修复性能的影响。通过对比微胶囊橡胶改性沥青基本参数及动态剪切流变(DSR)两阶段疲劳加载试验结果,分析了微胶囊对橡胶改性沥青基本性能及自修复性能的影响;通过车辙试验、低温弯曲试验、浸水马歇尔试验、冻融劈裂试验、四点弯曲疲劳试验研究了微胶囊对橡胶改性沥青混合料路用性能及自修复性能的影响。结果表明,橡胶改性沥青掺加微胶囊后,针入度及延度略有降低、软化点略有提高;不同微胶囊掺量的橡胶改性沥青自修复指数提升了1.9~2.7倍,试验条件下微胶囊掺量为0.55%时橡胶改性沥青的自修复能力最强;橡胶改性沥青混合料掺加微胶囊后,其高温性能、低温性能和水稳定性略有降低,但四点弯曲疲劳试验结果显示,掺加微胶囊的橡胶改性沥青混合料经过两次自修复后,其弯曲劲度模量恢复率分别提升了11%和8%,疲劳寿命恢复率分别提升了6%和2%。合理应用微胶囊,能够有效提高橡胶改性沥青混合料的自修复能力,延长路面服役期限。

关键词:微胶囊;自修复;橡胶改性沥青;路用性能;混合料

中图分类号:U416.2

文献标志码:A

Self-healing performance of rubber modified asphalt mixtures with microcapsules

YANG Xiang¹, QIAO Zhijian², MIAO Yongzhe², TIAN Wenling², QING Longbang², JIANG Lei³

(1. Hebei Xiong'an Rongwu Expressway Co. Ltd, Baoding 071700, China;

2. School of Civil and Transportation Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China;

3. College of Civil Engineering and Architecture, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China)

Abstract: To promote the engineering application of asphalt pavement with self-healing microcapsules, the effect of microcapsules on the basic properties and self-healing performance of rubber modified asphalt and rubber modified asphalt mixtures were investigated experimentally. By comparing the basic parameters of rubber modified asphalt containing microcapsules and the test results of dynamic shear rheological (DSR) two-stage fatigue loading, the effects of microcapsules on the basic properties and self-healing performance of rubber modified asphalt were analyzed. Then, the effects of microcapsules on the road performance and self-healing performance of rubber modified asphalt mixtures were studied by rutting test, low temperature bending test, immersion Marshall test, freeze-thaw splitting test and four-point bending fatigue test. The results show that the penetration and ductility of the rubber modified asphalt decrease slightly whereas the softening point increases slightly after the addition of microcapsules. The self-healing index of rubber modified asphalt with different content of microcapsules increases by 1.9 ~ 2.7 times, and the self-healing ability of rubber modified asphalt is the strongest when the content of microcapsules is 0.55%. With the addition of microcapsules, the high-temperature performance, low-temperature performance,

收稿日期:2022-03-11

基金项目:国家自然科学基金项目(52022027);河北省交通运输厅项目(RW-202003)

作者简介:杨祥(1969—),男,四川绵阳人,会计师本科,主要从事土木工程施工与研究工作。

姜磊(1982—),男,山东青岛人,讲师,博士,主要从事结构设计理论、建筑物可靠性检测与加固工作,本文通信作者。E-mail:engineer100@126.com

and the water stability of rubber modified asphalt mixtures are slightly reduced. However, the results of the four-point bending fatigue test show that the recovery rate of the flexural stiffness modulus of the rubber modified asphalt mixtures with microcapsules increases by 11% and 8% after two times of self-healing, and the fatigue life recovery rate increases by 6% and 2% respectively. The reasonable application of microcapsules can effectively improve the self-healing ability of rubber modified asphalt mixtures and prolong the service life of pavement engineering.

Key words: microcapsules; self-healing; rubber modified asphalt; road performance; mixtures

沥青路面在环境因素和交通荷载长时间作用下的老化导致性能下降,甚至造成沥青路面开裂并影响正常使用。近年来,我国交通运输业快速发展,道路里程增速难以满足日益增长的交通运输量,进一步加速路面性能劣化,降低沥青路面的使用寿命。及时有效地对沥青路面进行修复并延长其使用寿命是当前急需解决的问题。21世纪初期,Garcia等^[1]将封装再生剂的微胶囊自修复技术引入到沥青材料中,当沥青内部出现微裂纹时,微胶囊会破裂释放修复剂,软化老化沥青的边界促进裂缝愈合^[2]。相较于灌缝法、局部修补法、喷洒再生剂等延长路面使用寿命的传统方法,该方法不仅可以对沥青路面进行有效修复^[3],且无需人工成本,综合成本低、低碳节能,具有良好的应用前景。虽然在基质沥青中掺加微胶囊可以有效提升其自修复性能^[4-6],但是微胶囊的掺入可能会对沥青的基本性能及沥青混合料的路用性能产生不利影响^[7-9]。另外,微胶囊沥青材料投入工程使用,其基本指标应当满足实际工程对沥青的基本性能指标及沥青混合料的路用性能指标的相应要求。目前,橡胶改性沥青路面因其优越的低温抗裂性能^[10],在高等级路面工程中得到广泛应用。将微胶囊自修复技术运用到橡胶改性沥青路面当中,对实现智能修复、提升路面的服役性能有重要实际价值。

因此,开展微胶囊橡胶改性沥青及微胶囊橡胶改性沥青混合料基本性能及自修复性能的相关研究,分析微胶囊的掺入对二者基本性能和自修复性能的影响,可为微胶囊在橡胶改性沥青路面的工程应用提供技术依据。

1 试验

1.1 试验材料

试验所用微胶囊为原位聚合法制备,平均粒径 10 μm 。微胶囊壁材为甲基化三聚氰胺甲醛树脂,芯材为沥青再生剂;再生剂的主要成分为饱和分和芳香分,可以充分溶解和分散老化沥青中的沥青质,恢复老化沥青性能。橡胶改性沥青由 70#

基质沥青和粒径 0.25 mm 的胶粉经高温剪切分散后,在 160 $^{\circ}\text{C}$ 下静置溶胀 1 h 制备,胶粉掺量为 18%。橡胶改性沥青制备完成后,依照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)所

述 T0604、T0605、T0606、T0625 试验方法分别测试其针入度、延度、软化点及布氏黏度,测试结果见表 1。

根据《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)及《橡胶沥青及混合料设计施工技术指南》,沥青混合料采用 ARHM-13 密级配沥青混合料,沥青混合料的油石比(沥青混合料中沥青结合料质量与沥青混合料总质量的比值)通过马歇尔试验确定,试验所得最佳油石比为 5.4%,最佳油石比下 ARHM-13 各项技术指标见表 2。

表 1 橡胶改性沥青基本参数

Table 1 Basic parameters of rubber modified asphalt

试验项目	实测指标	技术要求	试验方法
针入度 (25 $^{\circ}\text{C}$, 100 g, 5 s)/(0.1 mm)	55.6	50~70	T0604
延度 (5 $^{\circ}\text{C}$, 5 cm/min)/cm	22.1	>15	T0605
软化点/ $^{\circ}\text{C}$	84.6	>75	T0606
布氏黏度 (180 $^{\circ}\text{C}$)/(Pa·s)	3.48	1.5~3.5	T0625

表 2 最佳油石比下 ARHM-13 技术指标

Table 2 ARHM-13 technical indicators of the best asphalt aggregate ratio

混合料类型	最佳油石比/%	空隙率/%	矿料间隙率/%	饱和度/%	稳定度/kN	流值/mm
ARHM-13	5.4	3.6	14.2	74.8	8.29	2.7

1.2 试验方法

以橡胶改性沥青的质量为基准,制备不同微胶囊掺量的橡胶改性沥青并测试其基本性能,以确定橡胶改性沥青混合料中微胶囊的掺量;试验按照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)进行。

1) 微胶囊橡胶改性沥青基本性能试验。测试各微胶囊橡胶改性沥青的针入度、延度和软化点,掌握微胶囊的掺入对橡胶改性沥青基本性能的影响。

2) 微胶囊橡胶改性沥青两阶段疲劳加载自修复性能试验。对微胶囊橡胶改性沥青试件进行 DSR 两阶段疲劳加载试验,分析微胶囊的掺入对橡胶改性沥青自修复性能的影响,所用试验仪器为奥地利 Anton Paar GmbH 公司生产的 MCR-102 型动态剪切流变仪,如图 1 所示。

3) 微胶囊橡胶改性沥青混合料路用性能试验。对掺加微胶囊的橡胶改性沥青混合料进行车辙试验、低温弯曲试验、浸水马歇尔试验和冻融劈裂试验,掌握微胶囊的掺入对橡胶改性沥青混合料高、低温性能和水稳定性等路用性能的影响。

4) 微胶囊橡胶改性沥青混合料四点弯曲自修复性能试验。采用 IPC UTM-30 液压伺服试验系统(图 2(a))和独立式伺服气动四点疲劳试验机(图 2(b)),利用四点弯曲疲劳试验对掺加微胶囊的橡胶改性沥青混合料进行“疲劳-修复-再疲劳”,分析微胶囊的掺入对橡胶改性沥青混合料疲劳性能及自修复性能的影响。

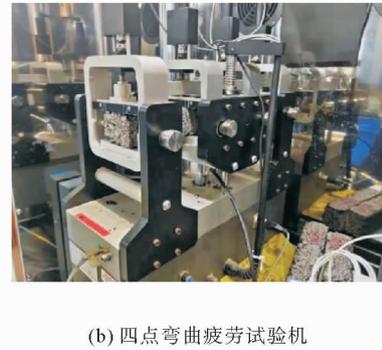


图 1 动态剪切流变仪

Fig. 1 Dynamic shear rheometer



(a) UTM-30



(b) 四点弯曲疲劳试验机

图 2 四点弯曲疲劳试验装置

Fig. 2 Four-point bending fatigue test device

2 结果与分析

2.1 微胶囊掺量对橡胶改性沥青基本性能的影响

不同微胶囊掺量的橡胶改性沥青基本性能测试结果如表 3 所示。

表 3 微胶囊橡胶改性沥青基本参数

Table 3 Basic parameters of rubber modified asphalt containing microcapsules

性能指标	微胶囊掺量/%					技术要求
	0	0.15	0.35	0.55	1.0	
针入度(25 °C, 100 g, 5 s)/(0.1 mm)	55.6	53.6	52.1	50.8	49.5	50~70
延度(5 °C, 5 cm/min)/ cm	22.1	21.9	21.7	20.6	19.8	>15
软化点 / °C	84.6	85.5	85.7	85.0	85.2	>75

为更直观地分析微胶囊的掺入对橡胶改性沥青基本性能的影响,将表 3 结果绘制于图 3 中。由图 3 可知,橡胶改性沥青的针入度、延度随微胶囊掺量的增加不断下降,软化点略有升高。其中,微胶囊掺量为沥青的 1.0% 时,沥青的针入度已不满足技术要求,这主要是因为微胶囊具有较大的表面积,掺入橡胶改性沥青后会造成其内部油分的相对比例下降,导致沥青黏滞性增大,宏观上表现为沥青的针入度下降。同时,由于沥青中轻质油分的相对比例减少,沥青胶体结构从溶凝胶型结构向凝胶型结构转变,此时沥青的分子链结构运动受阻,宏观上表现为沥青的软化点升高。因此,微胶囊在沥青中的掺量不宜过高,应控制在 1.0% 以内。

2.2 微胶囊掺量对橡胶改性沥青自修复性能的影响

DSR 两阶段疲劳加载试验温度为 25 °C,采用应力控制模式,应力水平 0.15 MPa、加载频率 10 Hz,采用 8 mm 平行板,板间距 2 mm。在 DSR 对沥青进行疲劳剪切的过程中,沥青内部会在剪切作用下出现微裂缝,微胶囊会被微裂缝“刺破”并释放修复剂。此时中止加载,静置试件,微胶囊释放的修复剂通过毛细作用流出并扩散,逐渐与裂缝周围的沥青融合,溶解和分散沥青质,软化沥青,从而促进了裂缝的愈合。试验过程中,当沥青的复合剪切模量下降到初始复合剪切模量的 40% 时中止剪切,并将试件静置在试验台 0.5 h,使修复剂充分释放并发挥修复作用,然后进行再次疲劳剪切,微胶囊橡胶改性沥青疲劳剪切过程中的模量变化如图 4 所示。沥青自修复前后的复合剪切模量变化反映了其自修复性能^[11-12],为分析微胶囊的掺入对橡胶改性沥青自修复性能的影响,引入自修复指数评价其自修复性能,将自修复指数 H_1 定义为自修复后复合剪切模量的增量与沥青自修复前的复合剪切模量变化量的比值,

$$H_1 = \frac{G_2 - G_1}{G_0 - G_1} \quad (1)$$

式中: G_0 —初始复合剪切模量; G_1 —初始疲劳加载停止时的复合剪切模量; G_2 —自修复后的复合剪切模量。

从图 4 可以看出,相较于未掺加微胶囊的橡胶改性沥青,微胶囊橡胶改性沥青的复合剪切模量略有增加,这是因为微胶囊的掺入降低了沥青内部油分的相对比例,导致沥青的黏度增加,增加了沥青的抗变形能力,宏观上表现为沥青的复合剪切模量增大;微胶囊橡胶改性沥青的初次疲劳加载和再次疲劳加载需要更长的疲劳时间,这表明微胶囊的掺入提高了橡胶改性沥青的抗疲劳能力;同时微胶囊橡胶改性沥青经过自修复后,模量恢复程度较高,与未添加微胶囊的橡胶改性沥青相比具有更好的自修复能力。

图 5 是微胶囊橡胶改性沥青的自修复指数随微胶囊掺量的变化情况,从图中可以看出,掺加微胶囊之后的橡胶改性沥青具有更好的自修复能力,与未掺加微胶囊的橡胶沥青相比, H_1 提高了 1.9~2.7 倍。随着微胶囊掺量的增加,橡胶改性沥青的自修复指数呈先升后降的趋势,当微胶囊掺量为 0.55% 时橡胶改性沥青的自修复指数最大。沥青自身具备一定的自修复能力,在荷载间歇期间,沥青材料中的部分微裂缝可以自修复,但这种能力随着沥青老化程度的增加而不断下降。导致沥青老化的主要原因是沥青中轻质油分(主要为饱和分和芳香分)的挥发。因此,通过给沥青补充轻质油分的方式可以恢复沥青性能,促进沥青材料的自修复。在加载过程中,橡胶改性沥青逐渐出现微裂缝,微胶囊在微裂缝产生的尖端应力作用下破裂,释放修复剂。修复剂分散、溶解了沥青中的沥青质,促使沥青胶体从凝胶型结构向溶凝胶型结构转变,结构软化,沥青的分子链运动加快,促进了沥青的自修复。当微胶囊掺量升至 1.0% 时,自修复指数出现下降,这主要是因为随着微胶囊掺量的增加,微胶囊在剪切过程中释放出过量的修复剂导致沥青过度被软化,降低了沥青的复合剪切模量。因此,橡胶改性沥青中微胶囊的掺量并非越大越好。

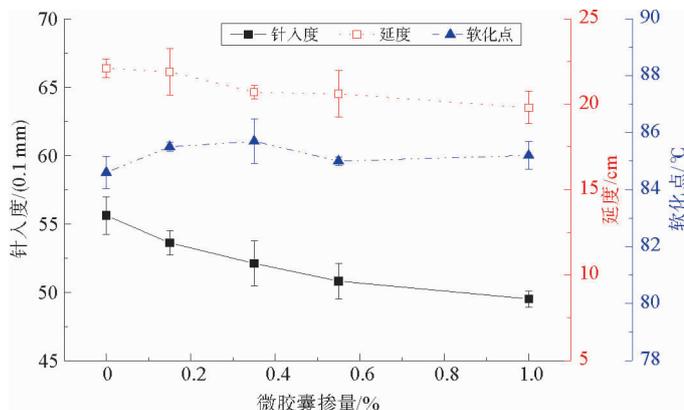


图 3 微胶囊橡胶改性沥青基本参数

Fig. 3 Basic parameters of rubber modified asphalt containing microcapsules

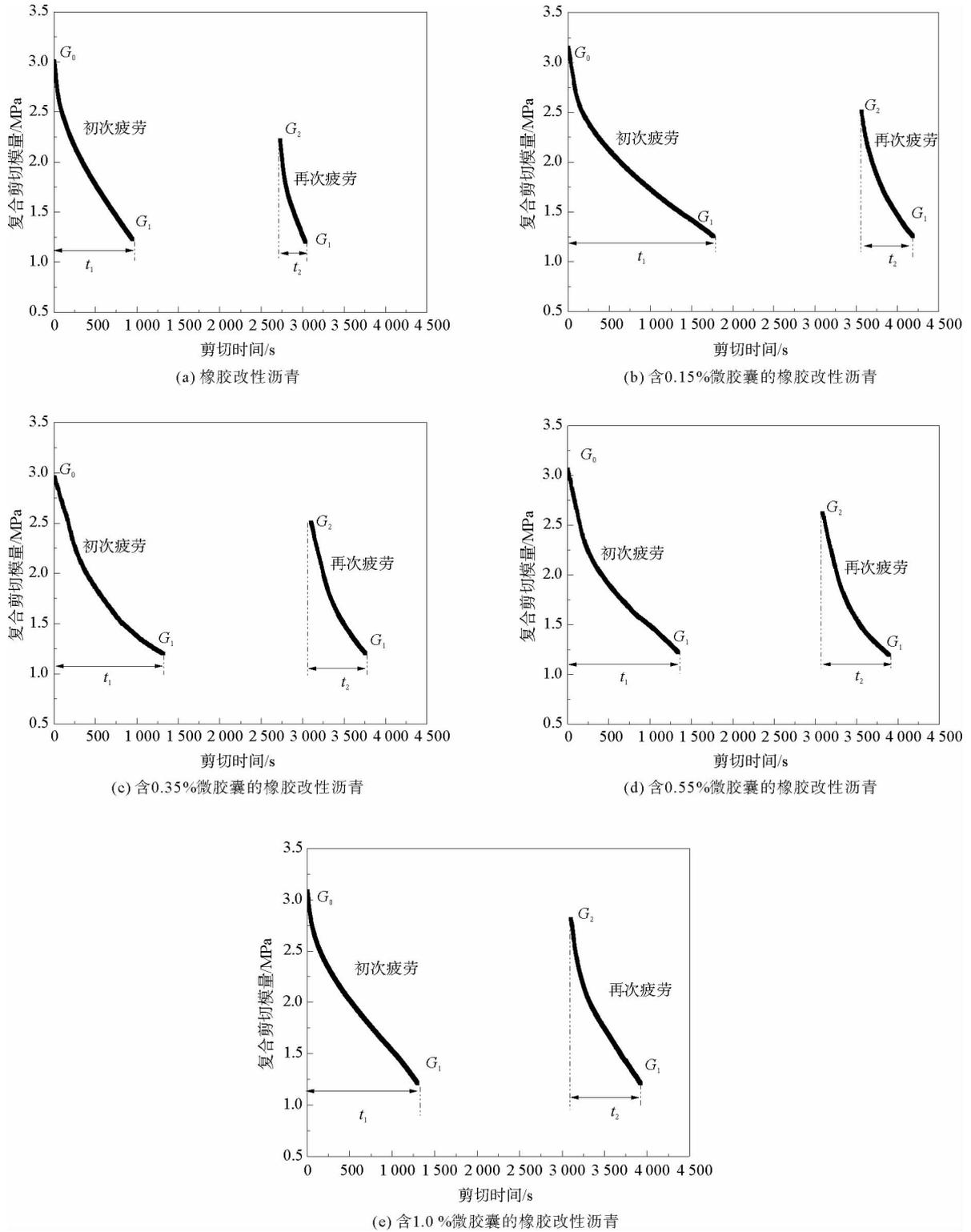


图4 不同掺量微胶囊橡胶改性沥青疲劳过程

Fig. 4 Fatigue process of rubber modified asphalt with different contents of microcapsules

2.3 微胶囊橡胶改性沥青混合料中微胶囊掺量及级配确定

实际工程一般对橡胶改性沥青基本性能指标有具体要求,为确保橡胶改性沥青掺加微胶囊后的基本性能指标能够满足技术要求,需控制微胶囊的掺量不会影响过大。微胶囊对橡胶改性沥青基本性能和自修复性能的试验结果表明,当微胶囊掺量为橡胶改性沥青质量的 0.55% 时,橡胶改性沥青的基本性能指标能够满足技术要求,同时自修复性能有较为明显的提升,因此选取微胶囊掺量为沥青质量 0.55% 的橡胶改性沥青制备微胶囊橡胶改性沥青混合料。

沥青混合料的油石比反映了混合料中沥青与集料质量的比例,在设计微胶囊橡胶改性沥青混合料级配时,考虑到制备沥青混合料所用微胶囊橡胶改性沥青的基本性能指标已满足技术要求,同时微胶囊的掺加量占沥青混合料总质量的比例很小,不足以对沥青和集料的掺加比例产生影响,因此微胶囊对橡胶改性沥青混合料油石比的影响忽略不计。

2.4 微胶囊对 ARHM-13 路用性能的影响

为研究微胶囊对 ARHM-13 路用性能的影响,对掺加微胶囊后的 ARHM-13 进行车辙试验、低温弯曲试验、浸水马歇尔试验和冻融劈裂试验,对比两种沥青混合料的试验结果以分析微胶囊的掺入对 ARHM-13 的高温性能、低温性能和水稳定性能的影响,试验结果汇总于图 6 中。

根据图 6 试验结果,橡胶改性沥青混合料掺加微胶囊后的动稳定度、最大弯曲应变、残留稳定度及劈裂强度比均出现下降,但仍然满足工程技术要求。这可能是因为微胶囊的掺入影响了橡胶改性沥青与集料间的黏结从而导致微胶囊橡胶改性沥青混合料的弯拉强度、稳定度以及劈裂强度出现下降。因此在实际工程中,为了降低微胶囊对沥青混合料路用性能的影响,应合理控制沥青混合料中微胶囊的掺量。在拌合过程中可能有部分微胶囊破裂影响其路用性能。沥青混合料的拌合温度由 135 °C 提升至 165 °C,微胶囊的存活率由 73% 降低至 63%,拌合温度的升高降低了微胶囊的存活率^[13]。因此,可在满足施工要求的前提下选择较低的拌合温度,以减少微胶囊破裂。研究中所用微胶囊平均粒径 10 μm,粒径极小,且囊壁具有较高的强度,相较于粒径较大的微胶囊,粒径较小微胶囊可以更好地“藏匿”于沥青混合料内集料间的沥青覆膜中,存活率较高。

2.5 微胶囊对 ARHM-13 疲劳寿命及自修复性能的影响

为研究微胶囊对 ARHM-13 自修复性能的影响,对微胶囊沥青混合料进行四点弯曲疲劳试验。根据《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011),制备尺寸为 380 mm×63 mm×50 mm 的沥青混合料小梁试件,设置试验温度为 15 °C,采用正弦波加载,加载频率为 10 Hz,加载应变为 800 με,以第 50 个循环得到的弯曲劲度模量为试件的初始弯曲劲度模量,当沥青混合料的弯曲劲度模量下降至初始弯曲劲度模量的 50% 时终止试验。微胶囊会在沥青混合料疲劳加载的过程中产生微裂缝,微胶囊会在微裂缝的尖端应力作用下破裂,释放修复剂。修复剂将逐渐软化裂缝周围沥青,促进微裂缝自修复。将疲劳过后的微胶囊沥青混合料放置于 25 °C 环境中进行 20 h 的自修复,自修复结束后重复上述步骤进行再次疲劳试验。根据试验结果,计算自修复结束后橡胶改性沥青混合料的劲度模量恢复率,以 H_2 表示,

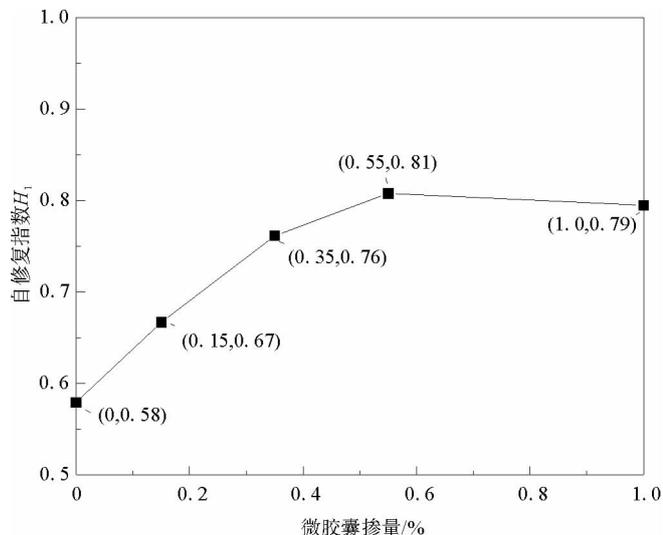


图 5 微胶囊橡胶改性沥青自修复指数 H_1

Fig. 5 Self-healing index H_1 of rubber modified asphalt containing microcapsules

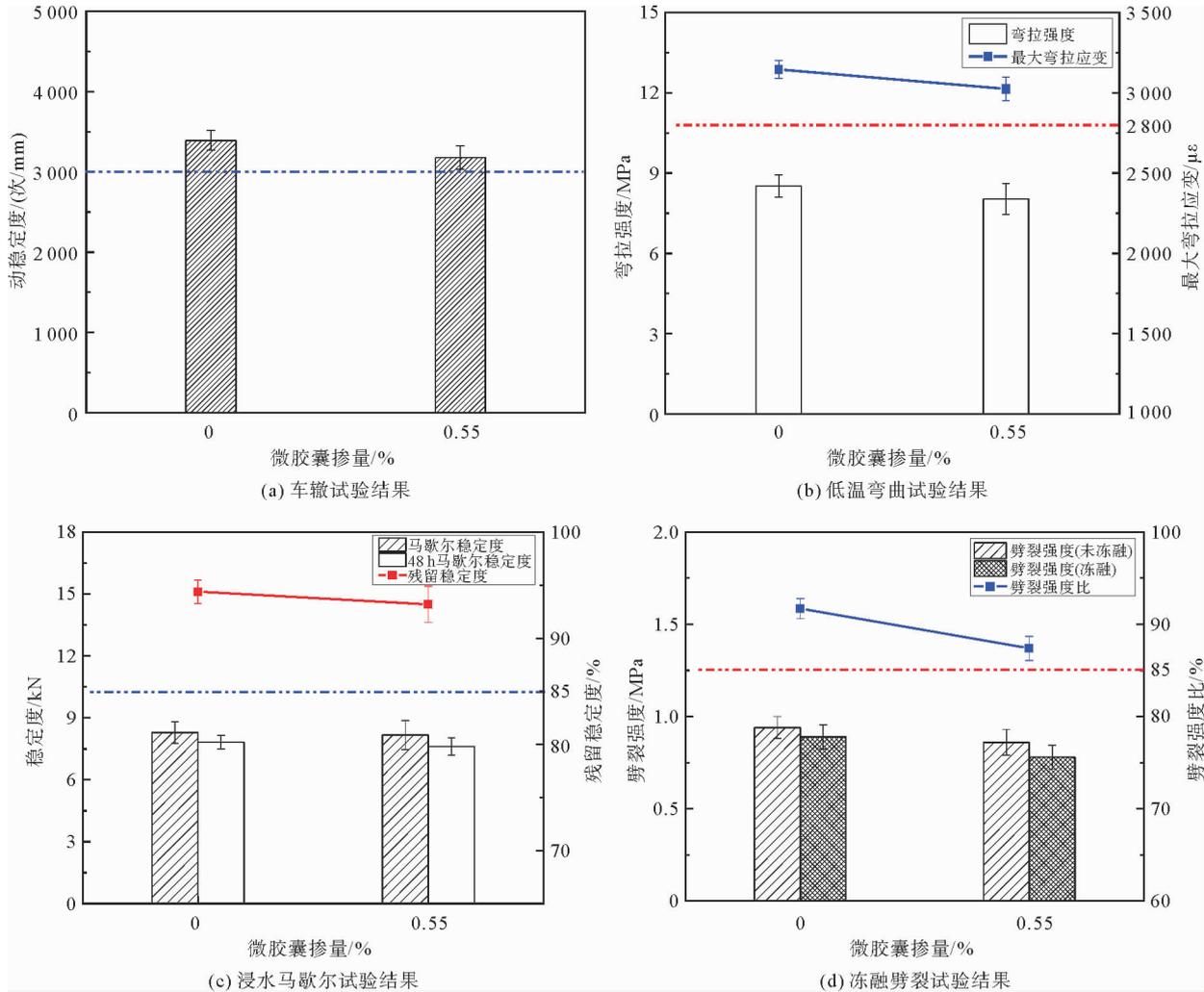


图 6 ARHM-13 路用性能试验结果

Fig. 6 ARHM-13 road performance test results

$$H_2 = \frac{S_a - S_c}{S_b} \times 100\% \quad (2)$$

式中： S_a —沥青混合料的自修复后弯曲劲度模量； S_b —沥青混合料的初始弯曲劲度模量； S_c —疲劳试验终止时沥青混合料的弯曲劲度模量。

计算自修复后橡胶改性沥青混合料的疲劳寿命恢复率，以 H_3 表示，

$$H_3 = \frac{N_i}{N_0} \times 100\% \quad (3)$$

式中： N_0 —沥青混合料初次疲劳过程的疲劳寿命； N_i —沥青混合料第 i 次修复后的疲劳寿命， i 可取 1, 2。

将 ARHM-13 四点弯曲疲劳试验结果汇总于表 4 中。 S_0 、 S_1 、 S_2 分别表示初次疲劳过程、第 1 次修复和第 2 次修复后的初始弯曲劲度模量， N_0 、 N_1 、 N_2 分别表示初次疲劳过程、第 1 次修复后和第 2 次修复后的疲劳寿命。根据表 4 可知，在初次疲劳过程中，掺加微胶囊的 ARHM-13 弯曲劲度模量下降了 4%，疲劳寿命延长了 15%；经过初次自修复后，弯曲劲度模量恢复率提高了 11%，疲劳寿命恢复率提高了 6%；第 2 次自修复后，沥青混合料的弯曲劲度模量恢复率提高了 8%，疲劳寿命恢复率提高了 2%；微胶囊的掺入提高了橡胶改性沥青混合料的疲劳性能和自修复性能。

掺加微胶囊的橡胶改性沥青混合料初始弯曲劲度模量略有下降，表明微胶囊对橡胶改性沥青混合料的

抗裂性能具有不利影响,原因是微胶囊影响了沥青与集料间的黏结,导致混合料的塑性下降;同时,在微胶囊橡胶沥青混合料的加热搅拌过程中,部分微胶囊出现了破裂情况,微胶囊所释放的修复剂软化了沥青,使 ARHM-13 的初始劲度模量下降。相比未掺加微胶囊的橡胶改性沥青混合料,微胶囊橡胶改性沥青混合料的疲劳寿命明显增加,这是由于在试验的疲劳加载过程中产生微裂缝,微胶囊在微裂缝尖端应力的作用下破裂,释放修复剂,修复剂软化了沥青,从而增强了橡胶沥青混合料的抗疲劳能力与自修复能力。

表 4 四点弯曲疲劳试验结果

Table 4 Four-point bending fatigue test results

微胶囊掺量 /%	疲劳寿命/次			弯曲劲度模量/GPa			性能恢复率/%			
							第 1 次修复		第 2 次修复	
	N_0	N_1	N_2	S_0	S_1	S_2	H_2	H_3	H_2	H_3
0	90 370	23 630	9 290	8.55	6.27	4.47	47	26	18	10
0.55	104 210	32 940	12 410	8.22	6.49	4.78	58	32	26	12

3 结论

1) 橡胶改性沥青的针入度、延度、软化点试验表明,适量添加微胶囊对橡胶改性沥青的自修复性能具有改善作用,对低温抗裂性能具有不利影响。

2) DSR 两阶段疲劳加载试验表明,微胶囊可以明显提高橡胶改性沥青的自修复性能,但微胶囊的掺量并不是越大越好,过多微胶囊破裂释放的修复剂会使沥青被过度软化。微胶囊掺量应控制在合理范围。

3) 橡胶改性沥青混合料的车辙试验、低温弯曲试验、浸水马歇尔试验以及冻融劈裂试验表明,微胶囊的掺入对其高低温性能及水稳定性具有不利影响,但影响程度有限,合理控制微胶囊掺量可使 3 种性能符合规范要求。

4) 橡胶改性沥青混合料四点弯曲自修复试验表明,微胶囊可有效提升橡胶沥青混合料的抗疲劳性能与自修复性能。

参考文献:

- [1] GARCIA A, SCHLANGEN E, VEN M. Two ways of closing cracks on asphalt concrete pavements: Microcapsules and induction heating[J]. Key Engineering Materials, 2009, 417(2): 573-576.
- [2] 何亮, 蔡卓, 冯畅, 等. 沥青混合料微胶囊自修复技术的研究综述[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2018, 38(2): 9-18.
HE Liang, CAI Zhuo, FENG Chang, et al. Research review of asphalt mixture microcapsules self-healing technology[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2018, 38(2): 9-18.
- [3] 何亮, 黄胡端, WIM Van den bergh, 等. 沥青自修复微胶囊研究进展[J]. 材料导报, 2020, 34(15): 90-99.
HE Liang, HUANG Huduan, WIM Van den bergh, et al. A state-of-the-art on microcapsules for asphalt self-healing[J]. Materials Reports, 2020, 34(15): 90-99.
- [4] CHUNG K, LEE S, PARK M, et al. Preparation and characterization of microcapsule-containing self-healing asphalt[J]. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2015, 39(1): 330-337.
- [5] LIU Z. Preparation of microcapsule and its influence on self-healing property of asphalt[J]. Petroleum Science and Technology, 2019, 18(5): 1-8.
- [6] 包士文. 凹凸棒土/海藻酸钙复合壁材沥青自愈合胶囊的制备与性能研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2020.
BAO Shiwen. Preparation and properties of attapulgite/calcium alginate composite capsules for asphalt self-healing[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2020.
- [7] 李彬, 孙大权, 凌森林, 等. 微胶囊对沥青混合料疲劳与自愈性能影响研究[J]. 石油沥青, 2021, 35(1): 28-34.

- LI Bin, SUN Daquan, LING Senlin, et al. Effect of microcapsules on the fatigue and self-healing performance of asphalt mixture[J]. Petroleum Asphalt, 2021, 35(1): 28-34.
- [8] 蔡卓. 内掺微胶囊的橡胶沥青混合料自愈合特性研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2018.
CAI Zhuo. Study on self-healing properties of rubber asphalt mixture with microcapsules[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2018.
- [9] 肖艺成. 路用自修复材料的制备及性能研究[D]. 西安: 长安大学, 2014.
XIAO Yicheng. The preparation and properties of self-healing materials of road[D]. Xi'an: Chang'an University, 2014.
- [10] 张鹏, 尹振羽. 废旧轮胎再生橡胶粉对沥青物理性能及流变性能的影响[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2019, 38(2): 57-64.
ZHANG Peng, YIN Zhenyu. Effect of waste tyre recycled rubber powder on physical and rheology properties of asphalt [J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2019, 38(2): 57-64.
- [11] 罗蓉, 石晨光, 冯光乐. 沥青自愈合性能评价指标修正及应用[J]. 中国公路学报, 2019, 32(11): 6-12.
LUO Rong, SHI Chenguang, FENG Guangle. Correction and application of self-healing performance index of asphalt binder[J]. China Journal of Highway and Transport, 2019, 32(11): 6-12.
- [12] 罗蓉, 许苑, 刘涵奇, 等. 沥青自愈合指标修正及影响因素分析[J]. 建筑材料学报, 2018, 21(2): 5-12.
LUO Rong, XU Yuan, LIU Hanqi, et al. Correction on self-healing index of asphalt binder and influence factors analysis [J]. Journal of Building Materials, 2018, 21(2): 5-12.
- [13] LI B, SUN G, SUN D, et al. Survival and activation behavior of microcapsules in self-healing asphalt mixture[J]. Construction and Building Materials, 2020, 260(2): 1-11.

(责任编辑: 吕海亮)