DOI:10.14048/j.issn.1671－2579.2019.03.053

膨润土改性沥青混合料力学特性研究

周立波

（长沙交通投资控股集团有限公司，湖南 长沙 410000）

摘要：为了探究膨润土对热拌沥青混合料（HMA）疲劳性能的影响，选用6种沥青重量百分比（0%、10%、15%、20%、25%和30%）为膨润土掺量，制备了膨润土改性沥青混合料，进而对不同膨润土掺量的沥青混合料开展了马歇尔稳定度、间接拉伸强度、回弹模量和四点弯曲疲劳试验。试验结果表明：膨润土的掺入使沥青混合料的疲劳寿命得到明显的提高，并根据试验结果拟合得到了膨润土改性沥青混合料的疲劳方程；此外，膨润土作为改性剂提升了沥青混合料的间接拉伸强度和回弹模量，改善了沥青混合料的抗变形能力；建议膨润土掺量控制为10%～15%。

关键词：膨润土；疲劳寿命；四点弯曲疲劳试验；间接拉伸强度；回弹模量

1 引言

沥青路面疲劳开裂是由于交通荷载和环境因素反复作用下产生的开裂，是沥青路面最主要的病害之一，严重影响沥青路面的疲劳寿命。

为抑制疲劳裂缝的产生，国内外道路工作者采用各种外加剂改善沥青混合料的力学性能，通过预防或减缓路面裂缝而延长路面的使用寿命。祝伟探究了SBS改性沥青混合料的疲劳性能，通过SBS改性沥青提高了热拌沥青混合物的抗永久变形、疲劳和水损害能力；卢剑涛研究发现CRM沥青通过增加路面对永久变形和热疲劳开裂的抵抗性来提高沥青混合料的性能。虽然各种添加剂如聚合物和橡胶粉可以提高沥青的性能，但是其普遍存在经济问题以及改性剂生产和环境的相容性问题。因此研究探索新的经济且环境友好型的添加剂具有重要意义。

黏土类材料率先成为最知名、最盈利的新一代环境友好型沥青添加剂。近几十年来，膨润土和有机改性膨润土作为改性剂以其低成本和较好的改性效果被广泛用作增强材料。目前已有大量研究揭示了沥青软化点、黏度和延展性随黏土含量和黏土类型的变化而变化；通过RTFO和PAV对老化试件进行弯曲梁流变仪测试，研究了膨润土和OMBT改性沥青将改善沥青的低温性能和抗裂性。但关于膨润土改性沥青混合料强度、刚度及疲劳性能与膨润土掺量的关系尚待进一步研究。

基于此，该文在前期已取得的膨润土改性沥青相关性能试验研究成果的基础上，选用6种沥青重量百分比（0%、10%、15%、20%、25%和30%）为膨润土掺量，制备膨润土改性沥青混合料，进而对不同膨润土掺量的沥青混合料开展马歇尔稳定度、间接拉伸强度、回弹模量和四点弯曲疲劳试验，以探讨膨润土对热拌沥青混合料力学特性的影响。

2 材料及试件

2.1 骨料和沥青

集料为石灰岩，矿粉为石灰岩质矿粉，级配采用AC－16C型。沥青为70#基质沥青，性能指标测试结果及沥青混合料级配分别如表1、2所示。

表1 70#基质沥青性能指标

技术指标	单位	检验结果	技术要求
针入度（25 ℃，100 g，5 s）	0.1 mm	74.8	60～80
延度（5 cm/min，15 ℃）	cm	＞100	≥100
软化点（环球法）	℃	54	≥46
密度（15 ℃）	g/cm^3	1.027	－

2.2 添加剂

用Dorinkashan Co.制造的膨润土对沥青改性。使用5种膨润土掺量，即按重量计为沥青的10%、

收稿日期：2018－09－13

作者简介：周立波，男，硕士，工程师.E－mail:154043505@qq.com

表 2　AC－16C 沥青混合料级配

筛孔尺寸/mm	通过率/%	筛孔尺寸/mm	通过率/%
19	100	1.18	16.0
16	90.4	0.6	11.4
13.2	79.5	0.3	7.7
9.5	63.5	0.15	6.1
4.75	37.0	0.075	4.3
2.36	24.2		

15%、20%、25%和 30%。改性沥青通过使用高速剪切仪来制备。将沥青加热至 140 ℃后保持 30 min，然后在 140 ℃和 4 000 r/min 剪切速率下与膨润土混合 15 min。

2.3　试件制备

沥青混合料的配合比设计通过使用标准马歇尔混合设计程序进行。在圆柱形试件（直径 10.16 cm 和 6.35 cm 厚）的每侧进行 75 次冲击压实。马歇尔样品通过以下标准程序压实和测试：体积比重（ASTM D2726）、稳定性和流动性测试（ASTM D1559）。根据马歇尔试验确定最佳油石比为 5.2%。

通过击实成型法制备圆柱形试件，对于每种试验（马歇尔稳定度和流值、间接拉伸强度、回弹模量测试）使用 3 个平行试件。梁形试件采用静压成型法制备梁形疲劳试件，试件最终尺寸为 380 mm×63.5 mm×50 mm，使用 3 个平行试件。疲劳试验控制模式主要有应力控制模式和应变控制模式。对于受应力控制的测试来说，疲劳破坏的定义为试件断裂；在受应变控制模式下，沥青刚度达到其初始值的 50%时，定义为疲劳破坏点。该研究采用应变控制试验评价沥青混合料的疲劳性能，应变幅值分别取 600、800 和 1 000 με 的恒定应变下以正弦模式加载进行测试。所有测试都在温度为（20±0.5）℃的环境控制箱内进行。

3　测试方法

3.1　马歇尔稳定度、流值、马歇尔模数

测定马歇尔稳定度和流值（ASTM D1559），以比较和评价膨润土改性混合物的开裂性能。稳定度与流值之比称为马歇尔模数（MQ）。MQ 可以用来衡量材料在使用中对永久变形的抵抗能力。MQ 的值越高，表示混合物越坚硬，抵抗力越强。

3.2　间接拉伸强度测试

在间接拉伸强度测试中，圆柱形样品在两个加载带之间受到压缩载荷，沿竖直平面产生相对均匀的拉伸应力。它通常用于评估沥青混合料的剥离和断裂性能的潜力。破坏通常沿着这个加载的平面分裂而发生。以 50.8 mm/min 的恒定速率进行。试件的间接拉伸强度计算公式为：

$$R=(2P_{max})/(\pi Dt) \tag{1}$$

式中：R 为试样的抗拉强度（kPa）；P_{max} 为施加的破坏载荷（kN）；D 为试件直径（mm）；t 为试件厚度（mm）。

3.3　间接拉伸回弹模量测试

试验是在 20 ℃下，通过使用万能试验仪（UTM－5P）采用半正弦荷载脉冲在 1 Hz 和 0.9 s 静止期条件下对圆柱形样品进行测试。连续记录载荷和变形，用式（2）计算弹性模量。假设的泊松比 υ 取 0.35。

$$S_{ct}=\frac{P}{dl_x}(0.27+\upsilon) \tag{2}$$

式中：S_{ct} 为间接拉伸回弹模量；P 为施加的载荷；d 为试件直径；l_x 为对应的变形。

3.4　四点弯曲疲劳试验

根据 AASHTO T321－07 在四点弯曲梁疲劳试验中评估梁的抗疲劳性能。这些测试的目的是获得在不同应变水平下梁的疲劳寿命。四点弯曲疲劳试验的示意图和设置如图 1 所示。试验在 20 ℃、频率为 10 Hz 的条件下进行。初始弯曲刚度由第 50 次循环后的测量力和位移（$n=50$）根据式（3）计算：

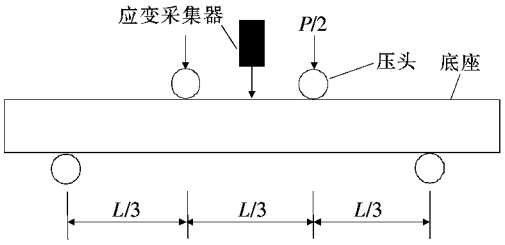

图 1　四点弯曲疲劳试验示意图

$$S_f=\frac{23PL^3}{108Wbh^2} \tag{3}$$

式中：S_f 为弯曲模量；L 为跨度；W 为弯沉；b 为试件宽度；h 为试件厚度。

疲劳试验一直持续到弯曲刚度下降到其初始值的 50%。在 600、800 和 1 000 με 下用正弦载荷对梁进行疲劳试验后，混合物的疲劳寿命用式（4）确定：

$$N_f=a\varepsilon^{-b} \tag{4}$$

式中：N_f 为循环疲劳次数；ε 为疲劳试验应变振幅；a 和 b 为疲劳常数。

4 结果和讨论

4.1 马歇尔稳定度和流值

图 2 为不同膨润土掺量的改性沥青混合料的马歇尔试验结果平均值，包括马歇尔稳定度、流值和马歇尔模数。

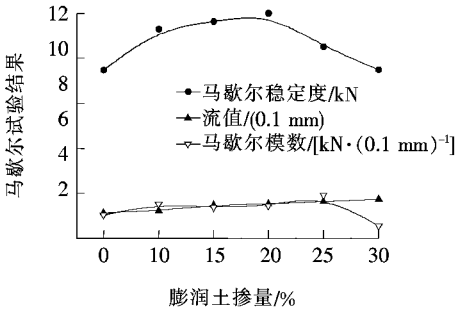

图 2 马歇尔试验结果

由图 2 可见：① 膨润土的加入，提高了马歇尔稳定度，在掺量为 20%左右时马歇尔稳定度出现峰值，当掺量继续增加马歇尔稳定度随着膨润土含量的增加而减少；② 膨润土的加入，也提高了流值，且流值随着膨润土掺量的增加而增加；③ 研究认为马歇尔模数与车辙深度有一定的相关性，能评价沥青混凝土抗车辙的能力，由图 2 可知：适量的膨润土掺量能够提高马歇尔模数，当掺量为 20%～25%时，马歇尔模数提高了 11%～13%，但是当掺量超过 25%时，马歇尔模数会骤降。

综上所述，一定掺量的膨润土能够改善沥青混合料的高温稳定性，提高沥青混合料的抗车辙能力。根据马歇尔试验结果建议掺量控制为 20%～25%。

4.2 间接拉伸强度试验

不同掺量的膨润土改性沥青混合料试件的平均拉伸强度如图 3 所示。

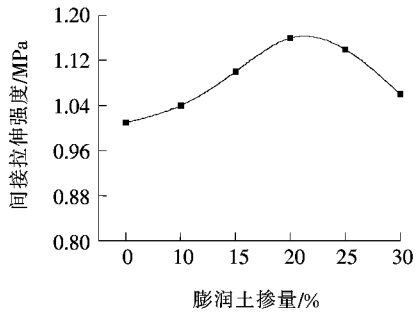

图 3 不同掺量膨润土改性沥青混合料间接拉伸强度

由图 3 可知：添加膨润土增加了混合物的间接拉伸强度。在掺量为 20%左右时间接拉伸强度出现峰值，比基质沥青混合料的间接拉伸强度增加约 15%，当掺量继续增加强度随着膨润土含量的增加而逐渐减小。根据间接拉伸强度试验结果建议膨润土掺量控制在 20%左右。

4.3 回弹模量测试

不同掺量的膨润土改性沥青混合料试件的间接拉伸回弹模量如图 4 所示。

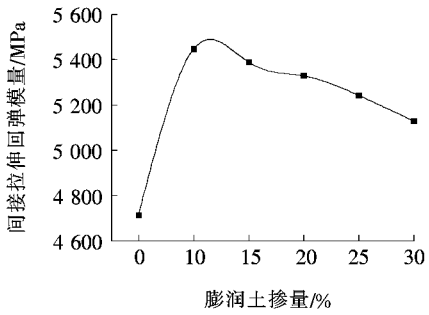

图 4 不同掺量膨润土改性沥青混合料间接拉伸回弹模量

已有研究表明：低温下的回弹模量与热裂解有某种关系，在较低温度下较硬的混合物更容易热裂化。试验结果表明：在混合物中使用改性膨润土沥青最初增加了混合料的回弹模量，当掺入 10%的膨润土时，混合料的回弹模量是基质沥青混合料的 1.15 倍。继续提高掺量，膨润土改性沥青的回弹模量逐渐降低，但掺量达到 30%时，回弹模量仅为基质沥青的 1.09 倍。根据间接拉伸强度试验结果建议掺量控制为 10%～20%。

4.4 疲劳寿命分析

与重复性交通荷载相关的疲劳开裂被认为是路面中最主要的破坏模式之一。该文采用 3 种应变幅值(600、800、1 000 με)，各掺量膨润土改性沥青在不同应变幅值条件下的弯曲初始回弹模量如图 5 所示。

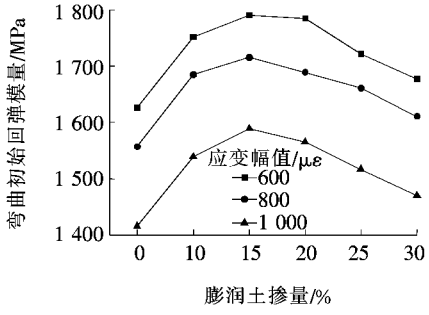

图 5 不同应变幅值条件下的弯曲初始回弹模量

由图 5 可知：弯拉回弹模量随膨润土掺量的变化规律与间接拉伸回弹模量相似，当膨润土掺量为 10%

～20％时，模量提升幅度最大，且不同应力幅值下得到的变化规律几乎一致。

当沥青混合料试件回弹模量衰减至初始模量的50％时，不同掺量膨润土改性沥青混合料试件所经历的荷载循环数如图 6 所示。

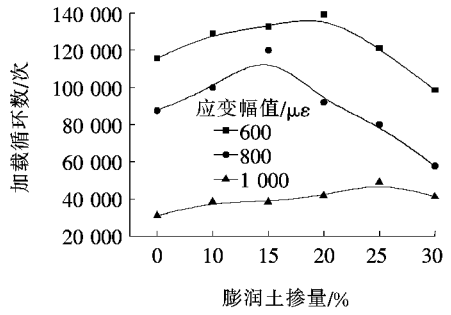

图 6　不同膨润土掺量沥青混合料在不同应变幅值条件下的疲劳寿命

由图 6 可知：① 膨润土的加入延长了沥青混合料的疲劳寿命，改善了沥青混合料的抗疲劳性能；② 在 600 με 和 800 με 的应变水平下，沥青混合料疲劳寿命随膨润土掺量的增加呈现出类似的变化趋势：当膨润土的掺量为 0％～20％时，膨润土改性沥青混合料的疲劳寿命随着掺量的增加而延长。但是掺量继续增加时，膨润土改性沥青混合料的疲劳寿命开始减小，即膨润土过量地掺入沥青中会给沥青的疲劳性能带来不利影响。在含有 10％、15％和 20％膨润土改性沥青的混合料中，膨润土对沥青聚集的黏聚性没有负面影响。然而，在 1 000 με 应变水平下，沥青混合料疲劳寿命随着膨润土掺量增加而增加的范围扩大至 0％～25％，再增加掺量也会导致疲劳寿命下降。

4.5　膨润土改性沥青混合料疲劳演变模型

根据该试验研究得到的试验结果，采用方程(5)所示的函数对不同掺量膨润土改性沥青混合料的疲劳性能进行拟合。

$$N_f = a\varepsilon^{-b} \tag{5}$$

表 3 为不同掺量膨润土改性沥青混合料疲劳试验结果基于方程(5)拟合得到的疲劳参数。

表 3　不同掺量膨润土改性沥青混合料疲劳试验结果拟合参数

膨润土掺量/％	疲劳参数		R^2
	a	b	
0	1×10^{14}	2.232	0.825
10	7×10^{13}	3.105	0.814
15	1×10^{13}	2.817	0.742
20	5×10^{12}	2.714	0.897
25	2×10^{12}	2.565	0.928
30	2×10^{11}	2.271	0.934

5　结论

该研究的目的是揭示膨润土改性沥青混合料强度、刚度及疲劳性能等力学性能与膨润土掺量的关系。进行了各种室内试验测试，以通过改变基质沥青中膨润土的掺量来评估沥青混合料力学性能。根据该研究取得的有限试验结果，得出以下结论：

(1) 含有膨润土的改性沥青混合料的马歇尔稳定性、流值和马歇尔模数均高于基质沥青，但当掺量超过20％时，马歇尔试验结果会出现下降趋势。

(2) 含有膨润土的改性沥青混合料的间接拉伸强度及回弹模量较基质沥青混合料明显提高。不同应变幅值条件下的疲劳寿命随膨润土掺量的增加呈现出先增后减的趋势。

(3) 结合沥青混合料各种力学性能指标随膨润土掺量的变化规律，推荐在采用膨润土改性基质沥青时的掺量为 20％左右。

参考文献：

[1] 郑健龙，吕松涛.沥青混合料非线性疲劳损伤模型[J].中国公路学报，2009(5).

[2] 祝伟.SBS 掺量对改性沥青混合料路用性能的影响[D].长安大学硕士学位论文，2012.

[3] 卢剑涛，王钊.橡胶粉改性沥青混合料性质研究[J].中外公路，2003(6).

[4] 王岚，常春清，邢永明.聚合物改性沥青细观结构和重复蠕变特性研究[J]. 建筑材料学报，2014(4).

[5] 宋莉芳，陈华鑫，夏慧芸，等.线性 SBS 与蒙脱石粘土复合改性常规沥青的性能[J].中外公路，2014(4).

[6] Xiao F, Amirkhanian SN, Shen JN. Effects of Long－Term Aging on Laboratory Prepared Rubberized Asphalt Binders[J].J Test Eval(ASTM)，2009，37(4)：329－336.

[7] 柳力，刘朝晖，李盛.基于抗裂层材料的马歇尔试验评价方法研究[J].材料导报，2014(24).

[8] 仰建岗，王秉纲，陈拴发.沥青混合料应变－寿命疲劳方程研究[J].郑州大学学报：工学版，2007(1).

[9] 赵延庆，薛成，黄荣华.沥青混合料抗压回弹模量与动态模量比较分析[J].武汉理工大学学报，2007(12).