

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2020.04.048

纳米黏土改性沥青及其混合料性能研究

熊辉¹, 刘洪辉² 编译

(1. 柳州铁道职业技术学院, 广西 柳州 545616; 2. 西安公路研究院)

摘要:该文采用纳米黏土改性沥青的方法,针对纳米黏土改性沥青及其混合料的各项路用性能进行研究。结果表明:单掺纳米黏土改性剂对沥青性能的改善效果不明显,但当纳米黏土和 SBS 改性剂复掺时,复合改性沥青的各项性能都得到显著的提升,纳米黏土改性剂可明显提高 SBS 改性沥青的物理力学性能,同时复合改性沥青具有良好的高温抗永久变形以及低温抗开裂性能;沥青混合料路用性能测试表明,纳米黏土改性沥青可显著改善改性沥青混合料的高温性能、水稳定性和回弹模量。

关键词:道路工程; 沥青混合料; 蒙脱土; 路用性能

随着中国公路建设的不断发展,沥青路面的应用越来越多。但是,由于受到车辆荷载、环境等外界因素的作用,导致沥青路面发生车辙、开裂等病害。为改善沥青混合料的各项性能,常采用聚合物改性沥青的方式,从而提高沥青路面的路用性能。常见的聚合物改性剂包括 SBS、SBR 等,其中 SBS 由于具有良好的改性效果,是改性沥青中最常用的沥青改性剂之一,SBS 改性剂可显著提升沥青路面的高低温、抗疲劳以及耐老化性能。但是,由于 SBS 与沥青的相容性较差,导致 SBS 改性沥青在使用过程中容易发生离析。为了改善 SBS 改性沥青的高温储存稳定性问题,近年来,随着纳米材料的应用,研究人员逐渐采用纳米改性技术来改善沥青与聚合物改性剂间的相容性,其中蒙脱土(MMT)因其产量大、性能好等优点,逐渐得到广泛的应用与研究。

MMT 是 2:1 型纳米层状硅酸盐,MMT 晶格层的厚度一般为 1 nm 左右。MMT 晶格层间的这种相互作用力较弱,使得 MMT 较容易被小分子插层。为了改善其对沥青或聚合物的改性效果,可对 MMT 进行有机化。表面活性剂可以将 MMT 层间距撑大,并降低其亲水性和表面自由能,聚合物类大分子可较容易地插入有机化后的 MMT,制得聚合物/纳米蒙脱土复合材料。聚合物纳米蒙脱土复合材料具有很好的力学性能,且其稳定性也较好,应用广泛。

基于此,该文对纳米黏土改性沥青混合料的性能进行研究,分别制备 SBS 改性沥青、OMMT 改性沥青

以及两者复合改性沥青,并对沥青结合料主要物理力学性能进行测试和分析,在此基础上,针对不同沥青混合料的各项性能进行研究,包括高温性能、回弹模量和水稳定性。以期为纳米黏土在沥青混合料中的应用提供借鉴和指导。

1 原材料及试验方案

1.1 原材料

(1) 沥青。采用 PG 58-10 基质沥青作为对比样(CA),聚合物改性剂为线性 SBS 材料,其掺量为 6%;纳米黏土采用 Closite 15A 型有机蒙脱土(OMMT),其掺量为 1.5%;在制备纳米黏土/SBS 复合改性沥青时,SBS/OMMT 按 100/25(质量比)进行掺配,且改性剂的总掺量为 6%。

(2) 集料。粗、细集料都选用性能优良的石灰岩集料,各集料的主要物理性能如表 1 所示。针对沥青混合料的矿料级配进行设计,所采用的矿料级配如图 1 所示。

表 1 集料的主要技术指标

材料	毛体积密度/ (g·cm ⁻³)	表观密度/ (g·cm ⁻³)	吸水率/ %	磨耗值/ %
粗集料	2.698	2.714	0.33	28.7
细集料	2.683	2.735	0.62	—
填料	—	2.743	—	—

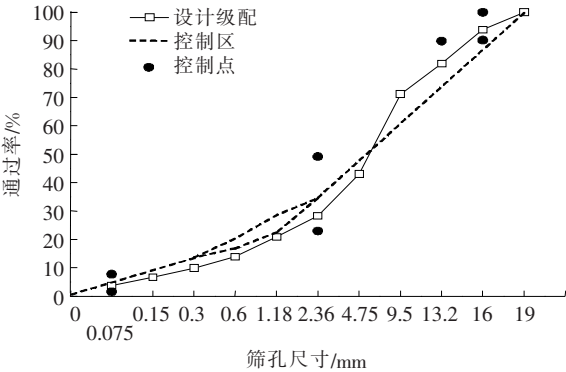


图 1 矿料级配曲线

1.2 改性沥青及沥青混合料制备

(1) 改性沥青的制备流程

首先将基质沥青加热至 $(180\pm5)^{\circ}\text{C}$,然后向沥青中缓慢加入 OMMT 或 SBS 改性剂,采用高速剪切的方法,在 4 500 r/min 转速下剪切 2 h,从而制得纳米黏土改性沥青(NMA)、SBS 改性沥青(PMA); SBS/OMMT 复合改性沥青的主要制备流程为:待 SBS 改性沥青在剪切完成后,再向改性沥青中加入定量的 OMMT 进行搅拌,其中剪切速率为 4 000 r/min,剪切时间为 45 min,从而制得 SBS/OMMT 改性沥青(NCMA)。

(2) 沥青混合料的制备流程

利用旋转压实仪制备沥青混合料试件,在试件成型过程中,基质沥青的拌和温度为 $(150\pm5)^{\circ}\text{C}$,因纳米黏土和 SBS 改性剂的加入,致使改性沥青的黏度都增大,因此,改性沥青的拌和温度选择为 $(170\sim175)^{\circ}\text{C}$ 。

采用 Superpave 混合料配合比设计方法针对不同沥青混合料的配合比进行设计,最终确定 CA、NMA、PMA、NCMA 沥青混合料的空隙率分别为 4%、4%、3.97%和 3.95%,在沥青混合料性能测试时,采用直径为 102 mm 的试件进行拉伸强度和回弹模量测试,每组试验测试 3 组平行试件。

1.3 主要试验方法

(1) 水稳定性试验

室内制备 8 个马歇尔试件,并分成两组(每组 4 个试件),其中一组混合料试件在 25°C 恒温水槽中保温 30 min 进行测试;另外一组首先在真空条件下饱水 30 min,然后在恒温水浴箱中放置 24 h,水浴箱温度为 60°C ,取出后放置在 25°C 水浴箱中进行保温 1 h 后测试。完成后对两组试件进行劈裂强度试验,采用应变控制方式,应变速率为 50 mm/min,试验温度为 25°C ,为了进行对比分析,对第一组试件分别设置了 5°C

和 40°C 两种温度,以研究保温温度对混合料试件的影响。其中水稳定指标用劈裂强度来表征。

(2) 回弹模量试验

沥青混合料回弹模量试验依据 ASTM D4123 进行,采用间接拉伸控制模式,测试温度分别为 5°C 、 25°C 和 40°C ,荷载大小为 1 500 N、频率为 1 Hz,测试时荷载作用时间为 0.1 s,卸荷时间为 0.9 s。

(3) 高温性能测试

采用车辙试验对多孔沥青的高温抗永久变形能力进行测试,测试时室内成型 $30\text{ cm}\times30\text{ cm}\times5\text{ cm}$ 沥青混合料试件板,测试温度 60°C ,测试时间 45 min,测试前将试件保温至少 5 h,其中高温性能用平均车辙深度(RD)进行表征。

2 测试结果及分析

2.1 沥青结合料测试结果

(1) 常规性能分析

针对不同沥青的常规性能进行测试,结果见表 2。从表 2 可以看出:OMMT 和 SBS 改性剂的加入使改性沥青的针入度降低、软化点升高,其原因可能是由于纳米黏土和 SBS 改性剂在沥青中的强化效应。相对于基质沥青,各改性沥青的温度敏感性指标——针入度指数都显著升高,表明随着改性剂的加入,沥青的温度敏感性得到改善;相对于基质沥青,OMMT 可显著改善沥青的高温性能,但对低温性能影响较大(5°C 黏度值迅速降低);此外,相对于 OMMT 和 SBS 单掺改性沥青,复合改性沥青(NCMA)的 PI 值进一步提高,表明其温度敏感性越好,且其低温性能(5°C 延度值)明显优于其他改性沥青,这主要是由于黏土颗粒的纳米效应,增加了纳米黏土改性沥青的低温脆性,使得 NMA 沥青的 5°C 黏度迅速降低,但复合改性沥青中,纳米黏土改性剂明显增加了聚合物改性剂在沥青中的分散性,提升了改性沥青的均匀性,使得 NCMA 沥青的延度较单掺条件下提高。因此,采用复合改性沥青可显著改善沥青的各项力学性能。

基于布氏黏度对不同沥青的黏度进行测试,结果见表 2。由表 2 可知:SBS 改性剂可显著提高沥青的黏度,并且随着 OMMT 的加入,复合改性沥青的黏度进一步增加,NCMA 沥青的黏度达 $1.549\text{ Pa}\cdot\text{s}$,虽然较高的黏度意味着在施工期间需要较高的拌和温度和压实温度,但测得的黏度值均满足 Superpave 规范(即小于 $3\text{ Pa}\cdot\text{s}$)规定的要求。

表 2 基质沥青及改性沥青的物理性能测试结果

沥青种类	针入度 (25 ℃)/ (0.1 mm)	软化点/ ℃	PI	延度/cm		弹性恢复 (25 ℃)/ %	旋转黏度 (135 ℃)/ (Pa·s)
				25 ℃	5 ℃		
CA	98	47.0	-0.233	150.0	46.0	—	0.233
NMA	87	54.0	1.270	150.0	9.8	—	0.487
PMA	61	85.0	5.530	61.0	25.5	100	1.347
NCMA	56	89.5	5.820	56.2	28.0	100	1.549

(2) 流变性能分析

采用 DSR 测定不同改性沥青在高温下的流变特性,用来评价其高温性能。通过在沥青试件上施加正弦应力,可测得沥青的复数剪切模量(G^*)和相位角(δ)。当温度高于 30 ℃时,动态剪切试验均采用直径 25 mm、厚度 1 mm 的试样,当温度低于 30 ℃时采用直径 8 mm、厚度 2 mm 的试样,测试频率 10 rad/s。不同沥青的复数剪切模量(G^*)和相位角(δ)测试结果如图 2 所示。

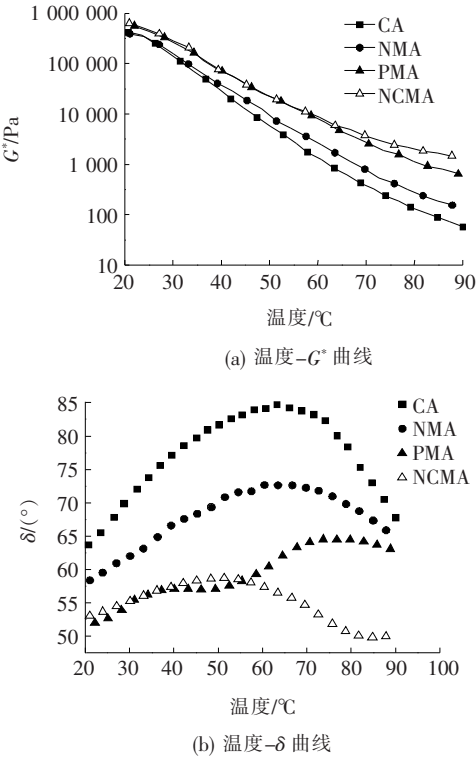


图 2 不同沥青的复数剪切模量(G^*)和相位角(δ)测试结果

从图 2 可以看出:① 沥青中 SBS 改性剂和纳米黏土的加入,提高了改性沥青的 G^* 值、降低了改性沥青的相位角。温度较低时,不同沥青的 G^* 变化不大,而随着温度的逐渐升高,不同改性沥青的 G^* 变化明显,表明高温条件下,改性沥青的高温抗永久变形能力增

加。相对于基质沥青,改性沥青的复数模量都变大、相位角减小,纳米黏土对改性沥青的复数模量影响较小,PMA 的复数模量显著增加,表明聚合物对沥青具有明显的增强效果;② NCMA 的复数模量较 PMA 进一步增大,尤其在高温区段,复合改性沥青的相位角显著降低,表明复合改性沥青进一步增加了改性沥青的高温抗变形能力。

分析原因主要是由于 OMMT 片层的剥离,在 SBS 改性沥青中形成交联的网络结构(图 3)。

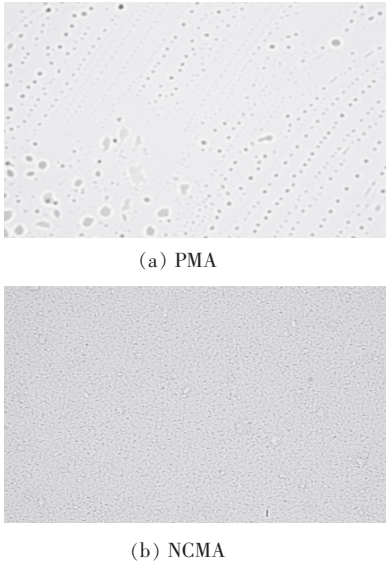


图 3 不同改性沥青的微观特性

从图 3 可以看出:PMA 中存在明显的聚合物颗粒团聚,而 NCMA 微观形貌更加均匀,表明纳米黏土增加了 SBS 改性剂与沥青的相容性,改善了其分散性,致使复合改性沥青的 G^* 值明显高于其他沥青,表明其抗变形能力也最好。

2.2 沥青混合料测试结果

(1) 沥青混合料水稳定性试验结果及分析

干燥和浸水条件下不同沥青混合料的劈裂强度试验结果如图 4 所示。从图 4 可以看出,采用 NMA、PMA 和 NCMA 改性沥青可使沥青混合料的劈裂强

度增加,并且 SBS 改性剂对混合料的劈裂强度值改善效果明显,PMA 和 NCMA 沥青混合料的劈裂强度值明显高于基质沥青和纳米黏土改性沥青;此外,在低温条件下,改性剂对沥青混合料劈裂强度值的影响较小,其增幅变化不大,而随着温度的逐渐升高,这种改善效果较为明显。40 ℃时,相对于基质沥青,NMA、PMA 和 NCMA 沥青混合料的劈裂强度分别增加了 4.5%、17.2%和 23.2%,其主要原因可能是沥青中纳米黏土的剥落微观结构和 OMMT 层的亲油性导致试样更好地抵抗水分的损伤,导致拉伸强度比增加。

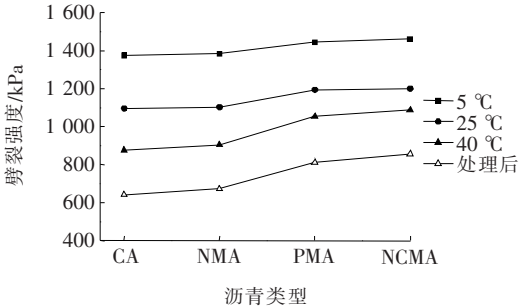


图 4 沥青混合料的劈裂强度试验结果

为进一步研究试验因素(沥青种类、测试温度)对劈裂强度的影响,选择沥青种类、测试温度两个因素水平,其中沥青种类按 CA、NMA、PMA、NCMA 分别编号为 1、2、3、4,测试温度分别为 5、25 和 40 ℃。为了研究两个不同因素对劈裂强度的作用程度,绘制不同因素水平下劈裂强度的主要影响曲线(图 5)。从图 5 可以明显看出:温度是影响劈裂强度的主要因素,其影响程度达 63%,而沥青类型总体对劈裂强度的影响较小,其影响范围在 12%以内。

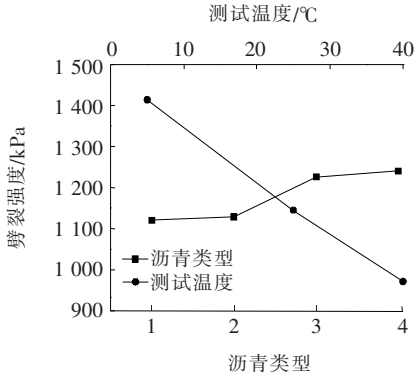


图 5 不同因素对沥青混合料劈裂强度的影响

(2) 改性剂对回弹模量的影响

图 6 为不同温度条件下沥青混合料的回弹模量测试结果。由图 6 可知:相对于基质沥青,改性沥青混合料的回弹模量都明显增大,且 PMA 和 NCMA 沥青混

合料的回弹模量显著提高。低温条件下,纳米黏土和 SBS 改性剂对混合料回弹模量的影响较小,而在高温条件下(40 ℃),改性沥青混合料的回弹模量都显著增加,表明纳米黏土和 SBS 改性剂对沥青混合料的高温性能影响更为显著。与基质沥青相比,改性沥青的回弹模量都明显增加,且复合改性沥青的动态模量最大,这与前述沥青结合料测试结果一致,表明 SBS 和 OM-MT 具有明显的复合改性效果,可显著改善沥青混合料性能。

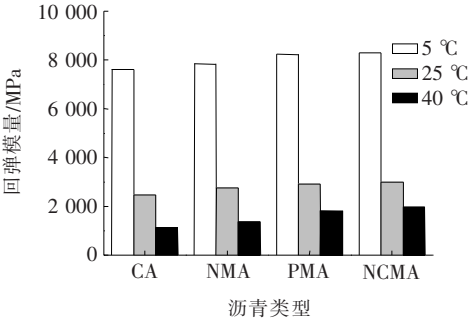


图 6 不同沥青混合料回弹模量测试结果

(3) 不同沥青混合料的高温性能分析

图 7 为不同改性沥青混合料试件的高温车辙试验结果。

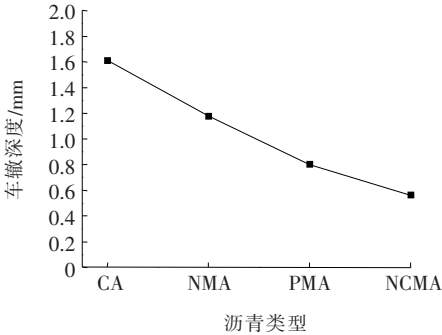


图 7 不同沥青混合料车辙深度测试结果

从图 7 可以看出:随着纳米黏土、SBS 以及两者复合改性剂的加入,可明显改善沥青混合料的高温性能,所测的车辙深度显著降低,与基质沥青相比,NMA、PMA 和 NCMA 沥青混合料车辙深度的降低率分别为 26%、50%和 64%,PMA 沥青混合料的高温性能明显优于 CA 和 NMA 沥青混合料,但较 NCMA 沥青混合料差,这与前述沥青结合料复数剪切模量(G^*)和相位角(δ)测试结果一致。

3 结论

(1) 纳米黏土改性剂可显著改善沥青的物理力学

公路地基砾砂冻土在融冻过程中的抗剪强度试验研究

于洪江, 段鹏

(重庆建筑工程职业学院 交通与市政工程系, 重庆市 400072)

摘要:对西藏某拟建公路地基的砾砂冻土开展了4种融冻环境状态下的大型直剪试验,分析了水平位移、竖直位移、体积的变化规律,获取了临界状态和峰值状态下的内摩擦角,探讨了抗剪强度与融冻循环的关系。研究表明:随着法向应力的升高,冻土试样的剪切变形行为逐渐由应变软化向应变硬化转换;总体上该砾砂土的温度越高,抗剪强度越低;对于临界状态内摩擦角,状态排序为: $C1 > C2 > C3 > C4$,而对于峰值状态内摩擦角,状态排序为: $C1 > C3 > C2 > C4$;在冬季对地基进行压实施工后,应及时保温以减小气候变化对地基温度的影响,并尽量避免在夏季高温时进行地基上部路堤填筑。

关键词:公路地基;冻土;大型直剪试验;融冻循环;内摩擦角

中国冻土面积巨大,主要分布在东北的大兴安岭、小兴安岭地区、青藏高原和西藏高山等区域,全国冻土面积有200多万 km^2 ,而公路建设不可避免地需要跨越冻土地区。根据JTG D30-2015《公路路基设计规范》,冻土地地区的路基宜采用路堤形式,而路堤的建设

将不可避免地扰动下部地基的温度场。冻土地基在冻结时具有较强的刚度和强度,但是融化后可压缩性增强、抗剪强度发生衰变,加上路堤填筑产生的附加应力,容易导致冻土地基发生失稳破坏。

对于融冻过程中冻土抗剪强度的变化,国内外学

性能,通过流变学测试表明,纳米黏土可增强沥青的弹性和黏弹性能。

(2)通过对不同沥青混合料的性能测试结果表明,各沥青混合料性能表现出相似的变化规律,纳米黏土和SBS改性剂改善了沥青混合料的高温性能、水稳定性,提高了沥青混合料的回弹模量,且温度越高,其改善效果越明显。

(3)相对于普通沥青混合料,纳米黏土和SBS复合改性沥青表现出更好的抗水损害性能、抗高温车辙性能。

参考文献:

- [1] 白日华. 沥青路面病害检测与养护决策研究[D]. 吉林大学博士学位论文,2013.
- [2] Wardlaw KR, Shuler S. Polymer Modified Asphalt Binders [M]. American Society for Testing and Materials, 2011.
- [3] Golestani B, Nejad FM, Galooyak SS. Performance Evalu-

ation of Linear and Nonlinear Nanocomposite Modified Asphalts[J]. Construction & Building Materials, 2012, 35 (35):197-203.

- [4] Galooyak SS, Dabir B, Nazarbeygi AE, et al. Rheological Properties and Storage Stability of Bitumen/SBS/Montmorillonite Composites[J]. Construction & Building Materials, 2010, 24(3):300-307.
- [5] Paul DR, Robeson LM. Polymer Nanotechnology: Nanocomposites[J]. Polymer, 2008, 49(15):3187-3204.
- [6] 魏龙. 适用于沥青基体的有机化蒙脱土的制备及其改性沥青研究[D]. 长安大学硕士学位论文, 2017.
- [7] 杨泽清, 肖新颜. 纳米蒙脱土改性沥青复合材料研究进展[J]. 现代化工, 2013(3).
- [8] Golestani B, Nam BH, Nejad FM, et al. Nanoclay Application to Asphalt Concrete: Characterization of Polymer and Linear Nanocomposite - Modified Asphalt Binder and Mixture[J]. Construction & Building Materials, 2015, 91: 32-38.

收稿日期:2019-09-12

基金项目:重庆市城乡建设委员会建设科技计划项目(编号:城科字2015第(0-1)号);重庆市自然科学基金资助项目(编号: cstc2019jcyj-msxmX0694);重庆市教委科技项目(编号:KJQN201904302)

作者简介:于洪江,男,硕士,副教授. E-mail: yuhongjiang4321@sohu.com