

文章编号:1671-1637(2013)02-0017-08

不同类型电气石改性沥青路用性能分析

石鑫¹,王朝辉¹,李彦伟²,赵娟娟¹,王选仓¹

(1. 长安大学 道路结构与材料交通行业重点实验室,陕西 西安 710064;

2. 石家庄市交通运输局,河北 石家庄 050051)

摘要:选取2种电气石粉和4种电气石负离子粉,采用熔融共混法制备电气石改性沥青,进行了针入度、软化点和延度性能测试,研究了电气石类型及掺量对沥青感温性能、高温性能、低温性能与粘附性等路用性能的影响规律。采用改进弯曲流变试验研究了电气石对沥青低温性能的影响效果,采用水煮法对电气石改性沥青与集料的粘附性能进行评价,借助扫描电镜试验、差示扫描热试验、压电性试验和热电性试验分析了电气石对沥青路用性能的改善机理。试验结果表明:电气石粉改性沥青感温性能随掺量增加先改善后变差,电气石负离子粉改性沥青感温性能呈现相反的变化规律;各电气石改性沥青高温性能随掺量增加均不断提高;电气石粉目数越大,对沥青路用性能改善效果越好;电气石负离子粉改性沥青的路用性能随负离子释放量的增大而不断降低;在相同目数条件下,电气石负离子粉对沥青性能的改善效果优于电气石粉;电气石能有效改善沥青的低温性能,而且能够均匀稳定地分散在沥青中,与沥青形成稳定整体;电气石加入到沥青后其电性能仍能正常发挥。可见,电气石能够显著改善沥青的路用性能。

关键词:道路材料;电气石改性沥青;路用性能;扫描电镜试验;差示扫描热试验

中图分类号:U414.75

文献标志码:A

Pavement performance analysis of asphalts modified by different types of tourmalines

SHI Xin¹, WANG Chao-hui¹, LI Yan-wei², ZHAO Juan-juan¹, WANG Xuan-cang¹

(1. Key Laboratory of Road Structure and Materials of Transportation Industry, Chang'an University,

Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Transportation Bureau of Shijiazhuang, Shijiazhuang 050051, Hebei, China)

Abstract: Two kinds of tourmaline powders and four kinds of tourmaline anion powders were selected to modify asphalt, and the tourmaline modified asphalt was prepared by using a melting-blending method. The penetration, softening point and ductility were tested, and the effect laws of tourmaline types and mixing amount on asphalt temperature sensitivity, high-temperature and low-temperature properties, adhesion property were studied. The effect of tourmaline on asphalt low-temperature property was studied by using improved bending beam rheometer (BBR) test, and the adhesion property between tourmaline modified asphalt and aggregate was evaluated by using water-boiling method. The improved mechanism of tourmaline on asphalt pavement performance was analyzed by using scanning electron microscope (SEM) test, differential scanning calorimetry (DSC) test, piezoelectric test and thermoelectric test. Analysis result shows

收稿日期:2012-11-22

基金项目:国家自然科学基金项目(51208045);高等学校博士学科点专项科研基金项目(20110205120007);中央高校基本科研业务费专项资金项目(CHD2010JC065)

作者简介:石鑫(1975-),女,河北石家庄人,长安大学工学博士研究生,从事道路工程研究。

导师简介:王选仓(1956-),男,陕西西安人,长安大学教授。

that the temperature sensitivity of tourmaline powder modified asphalt improves firstly and then reduces with the increase of mixing amount, and that of tourmaline anion powder modified asphalt shows an opposite law. The high-temperature performances of all tourmaline modified asphalts improve with the increase of mixing amount. The pavement performance of tourmaline powder modified asphalt improves significantly with the increase of tourmaline powder mesh, that of tourmaline anion powder modified asphalt reduces unceasingly with the increase of anion release amount. In the same mesh, the effect of tourmaline anion powder on asphalt pavement performance is better than that of tourmaline powder. Tourmaline can well improve the low-temperature property of tourmaline modified asphalt. Tourmaline can disperse in asphalt uniformly and stably, and can form a stable whole. The electric property of tourmaline can be played fully when tourmaline is added into asphalt. So tourmaline can improve the road performance of asphalt significantly. 4 tabs, 8 figs, 18 refs.

Key words: road material; tourmaline modified asphalt; pavement performance; SEM test; DSC test

Author resumes: SHI Xin(1975-), female, doctoral student, +86-29-82334836, pubaby001@163.com; WANG Xuan-cang(1956-), male, professor, +86-29-82334836, wxc2005@163.com.

0 引 言

近年来,采用无机物对沥青改性已成为路面材料研究的热点,无机物不仅可改善沥青性能,且具有材料来源广泛、生产设备简单、成本低廉等特点,越来越受到研究者的青睐^[1-3],已经被广泛研究的无机改性剂有纳米碳酸钙、炭黑、纤维、硅藻土、蒙脱土、粉煤灰、水泥、石灰、矿质填料等^[4-8]。但是上述众多无机改性剂多数存在着只能对沥青的某一方面起到改善效果而对沥青其他使用性能尤其是低温性能有一定负面影响的问题,导致其改性沥青不能满足较高的使用要求,因此,开发一种既能满足某种特定需要又能改善沥青路用性能的无机改性剂具有十分重要的意义。电气石是一种具有压电性、热电性、永久性自发极化效应,发射远红外线,释放负离子等功能的硅酸盐矿物,已被应用于无线电工业、水处理、保健、涂料、红外探测、制冷等领域^[9-11],但采用电气石对沥青进行无机改性国内外却鲜有报道。经过大量试验研究发现,电气石可显著改善沥青的使用性能,可作为一种新型无机改性材料,一种新型材料的研发最主要的意义体现在实际工程中的应用^[12-16],因此,有必要对电气石改性沥青的路用性能进行系统研究。电气石种类繁多,根据成分不同可分为电气石粉和电气石负离子粉两大类,依据目数大小或负离子释放量的不同还可再分类,不同类型电气石对沥青性能的影响规律存在较大差异^[17-18],因此,在应用电气石改性剂之前,必须系统研究不同类型电气石对沥青路用性能的影响规律。本文选取 2 种电气

石粉和 4 种电气石负离子粉共 6 种典型电气石对沥青改性,进行针入度、软化点和延度等性能测试,首先从感温性能、高温性能和低温性能 3 个方面对不同类型电气石改性沥青的路用性能进行研究,接着采用改进的低温弯曲流变试验(BBR)深入研究电气石对沥青低温性能的改善效果,采用水煮法对电气石与集料的粘附性进行评定,在此基础上借助 SEM 试验、DSC 试验和压、热电性能试验分析电气石对沥青路用性能的改善机理。

1 试验原材料与方法

1.1 原材料

基质沥青为韩国 SK70[#],其基本性能见表 1。

表 1 沥青基本性能

Tab. 1 Physical properties of asphalt

性能指标	针入度(25 ℃)/ 0.1 mm	延度(15 ℃)/ cm	软化点/ ℃	密度/ (g · cm ⁻³)
韩国 SK70 [#]	71	>150	47.7	1.025

试验采用电气石粉 325 目、电气石粉 1 000 目、电气石负离子粉 325 目、负离子释放量分别为 5 000、10 000、20 000 ions 的电气石负离子粉等共 6 种类型,均满足各自的规范要求。电气石掺量指电气石质量与基质沥青质量的比值,试验采用 8%、11%、14%、17%和 20%等 5 个掺量。

1.2 电气石改性沥青制备

首先,将基质沥青加热到(150±5)℃,并将干燥的电气石缓慢、分批加入到基质沥青中,再加入适量的分散剂,采用高速剪切仪,先以 1 000 r · min⁻¹的

转速搅拌 10 min,再以 $4\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 的转速搅拌 40 min,最后在转速为 $1\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 下缓慢搅拌 10 min,以排除高速搅拌时产生的气泡。

1.3 试验方法

(1)采用《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTGE20—2011)中试验方法分别进行电气石改性沥青针入度、软化点和延度试验。

(2)按照 ASTM D6648-01 试验方法,采用 Cannon公司的 9728-V30 型低温弯曲梁流变仪进行 BBR 试验,试验温度为 $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$,测试电气石改性沥青在 60 s 时的蠕变劲度 S 和蠕变速率 m 。

(3)采用《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTGE20—2011)中规定的水煮法对电气石改性沥青与集料的粘附性进行评价。

(4)采用日本电子株式会社生产的 JSM-6390A 型扫描电子显微镜,在不同放大倍数下观测电气石改性沥青的界面形貌。

(5)采用美国 TA 公司生产的 2910 型差示扫描量热仪进行差示扫描热试验(DSC),升温速率为 $10\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$,试验温度为 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 160\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

(6)采用中国科学院声学研究所生产的 ZJ-3A 型准静态 d33 测量仪进行压电性试验,测量频率为 110 Hz,直流电场为 $10\text{ kV}\cdot\text{mm}^{-1}$ 左右。

(7)采用常州同惠电子有限公司生产的 TH2816 阻抗分析仪和武汉理工大学开发的智能温控仪组成的测试系统进行热电性试验,测量温度范围为 $100\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 180\text{ }^{\circ}\text{C}$,升温速率为 $5\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$,测试频率为 100 Hz。

2 电气石改性沥青路用性能分析

2.1 感温性能分析

本文采用针入度指数 P_I 作为评价电气石改性沥青感温性能的指标。针入度指数 P_I 越大,说明温度敏感性越小,则沥青感温性能越好。

2.1.1 电气石粉目数与掺量对沥青感温性能影响

测试电气石粉 325 目和 1 000 目的 P_I 值,分析电气石粉类型与掺量对改性沥青感温性能的影响规律,试验结果见图 1,由图 1 可得如下结论。

(1)不同类型电气石粉改性沥青感温性能随掺量的变化规律基本相同,随掺量增加, P_I 值均先增大后减小,当掺量为 17% 时, P_I 值最大,表明随电气石粉掺量增大,改性沥青的温度敏感性先降低后升高。

(2)在相同掺量下,电气石粉 1 000 目改性沥青的 P_I 值高于电气石粉 325 目,表明随着电气石粉目

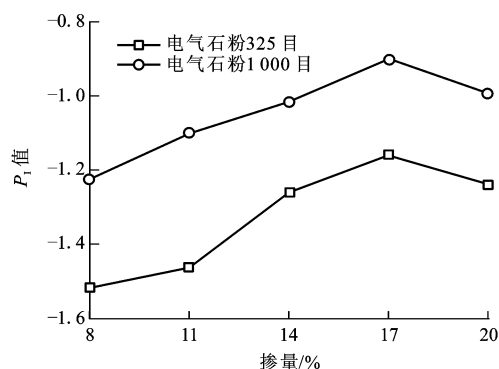


图1 不同类型电气石粉改性沥青的 P_I 值

Fig. 1 P_I values of asphalts modified by different types of tourmaline powders

数增大,改性沥青的感温性能变好,这是由于电气石粉目数越大,电气石粉比表面积越大,对沥青油分的吸附能力越强,使得沥青温度敏感性降低。

2.1.2 电气石负离子粉的负离子释放量与掺量对沥青感温性能影响

图2为负离子释放量分别为 5 000、10 000、20 000 ions 的 3 种电气石负离子粉改性沥青的试验结果,由图 2 可得如下结论。

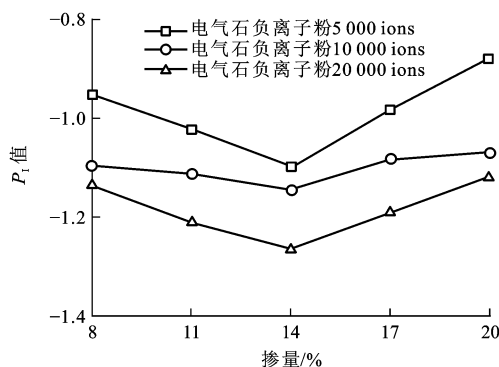


图2 不同类型电气石负离子粉改性沥青的 P_I 值

Fig. 2 P_I values of asphalts modified by different types of tourmaline anion powders

(1)对于不同类型电气石负离子粉改性沥青,随着掺量增加, P_I 值均先减小后增大,当掺量为 20% 时, P_I 值最大,感温性能最好;随掺量的变化, P_I 值变化幅度很小,表明电气石负离子粉掺量对沥青感温性能影响不明显。

(2)在相同掺量下,不同类型电气石负离子粉改性沥青的 P_I 值从大到小顺序是负离子粉 5 000 ions、负离子粉 10 000 ions、负离子粉 20 000 ions,可以看出,随负离子释放量的增大,沥青的感温性能变差。

2.1.3 相同目数电气石粉与电气石负离子粉感温性能分析

分别对电气石粉 325 目和电气石负离子粉 325 目

进行针入度试验,试验结果见图 3。

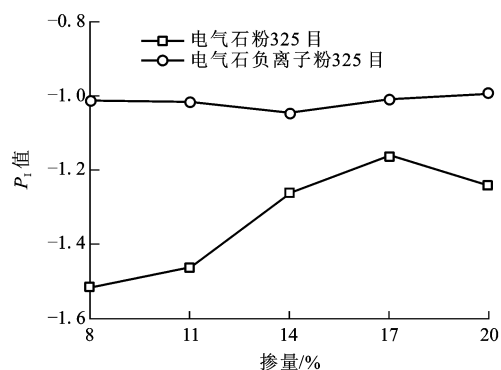


图3 电气石粉与负离子粉 325 目改性沥青的 P_1 值
Fig. 3 P_1 values of asphalts modified by tourmaline powder and tourmaline anion powder 325 meshes

通过试验得到基质沥青的 P_1 值为 -1.892, 由图 3 可知, 电气石粉和负离子粉改性沥青的针入度指数均明显大于基质沥青, 表明电气石的掺入使得沥青感温性能变好, 这是由于电气石的加入吸收了沥青中的部分油分, 使得沥青温度敏感性降低, 感温性能变好; 在相同目数与掺量条件下, 电气石负离子粉改性沥青的 P_1 值高于电气石粉, 表明在同一目数下电气石负离子粉改性沥青的感温性能更优。

2.2 高温性能分析

本文采用软化点作为评价沥青高温性能的指标, 软化点越高, 则沥青的高温稳定性就越好。

2.2.1 电气石粉目数与掺量对沥青高温性能影响

对参加电气石粉 325 目和 1 000 目的改性沥青进行软化点试验, 分析电气石粉类型与掺量对沥青高温性能的影响规律, 试验结果见图 4, 由图 4 可得如下结论。

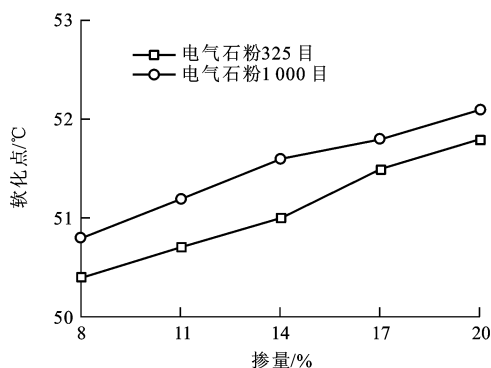


图4 电气石粉改性沥青的软化点
Fig. 4 Softening points of asphalts modified by tourmaline powders

(1) 不同类型电气石粉改性沥青的高温性能随掺量的变化规律相同, 软化点均随掺量的增大不断升高。

(2) 在相同掺量条件下, 电气石粉 1 000 目改性沥青的软化点值高于电气石粉 325 目, 表明电气石粉 1 000 目改性沥青的高温稳定性优于电气石粉 325 目, 电气石粉改性沥青的高温稳定性随目数增大而升高, 这是由于电气石粉能够吸收沥青中的软组分, 增大沥青的粘稠度, 使得软化点升高, 电气石掺量越大或目数越大, 对沥青组分的影响越明显, 沥青的粘稠度越大, 高温稳定性越好。

2.2.2 电气石负离子粉的负离子释放量与掺量对沥青高温性能影响

电气石负离子粉 5 000、10 000、20 000 ions 等 3 种类型改性沥青的试验结果见图 5, 由图 5 可得如下结论。

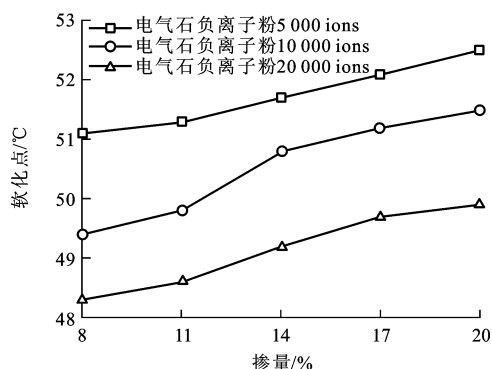


图5 电气石负离子粉改性沥青的软化点
Fig. 5 Softening points of asphalts modified by tourmaline anion powders

(1) 对于不同类型电气石负离子粉改性沥青, 随掺量的增大, 软化点不断升高, 电气石改性沥青的粘稠度增大, 沥青的高温稳定性提高。

(2) 在相同掺量条件下, 比较各类型电气石负离子粉改性沥青的软化点, 可以看出, 软化点随负离子释放量的增大逐渐降低, 表明对于电气石负离子粉改性沥青, 负离子释放量越大, 改性沥青的高温稳定性越差, 这是由于电气石具有热电性能, 温度变化时释放电荷形成静电场, 静电场在高温下十分不稳定, 进而影响沥青的高温稳定性。

2.2.3 相同目数电气石粉与电气石负离子粉高温性能分析

对比分析电气石粉 325 目与电气石负离子粉 325 目的软化点, 确定在相同目数条件下, 2 种类型电气石对沥青高温性能的影响规律, 试验结果见图 6, 由图 6 可得如下结论。

(1) 试验测得基质沥青的软化点为 47.7 °C, 可见各种类型电气石改性沥青的软化点均高于基质沥青, 表明电气石的掺加显著改善了沥青的高

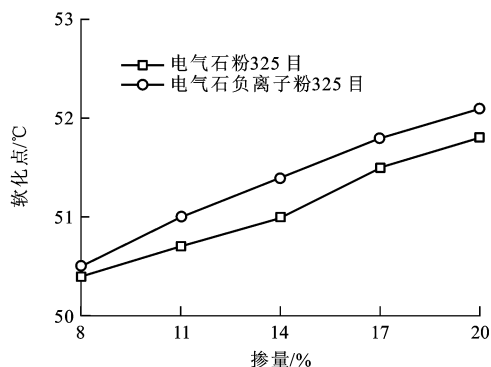


图 6 电气石粉与负离子粉 325 目改性沥青的软化点

Fig. 6 Softening points of asphalts modified by tourmaline power and tourmaline anion powder 325 meshes

温稳定性。

(2)在相同掺量条件下,电气石负离子粉改性沥青的软化点要高于电气石粉,可见电气石负离子粉对沥青高温性能的改善效果更好。

2.3 低温性能分析

2.3.1 延度试验分析

对各种类型电气石改性沥青进行延度试验,评价改性沥青的低温性能。研究发现,延度试验不适合用来评价电气石改性沥青的低温性能,因为电气石具有压电性能,在外力作用下释放电荷,形成静电场,静电场的作用有助于提高沥青的低温性能,而在电气石改性沥青延度试验拉伸过程中,电气石粉体受力不明显,不能体现出电气石的压电特性。在实际道路应用中,在行车荷载作用下,道路沥青中存在的电气石能够充分发挥其压电性能释放电荷,从而改善沥青的低温性能;在延度试验过程中,由于沥青中电气石粉体的存在,易造成应力集中,导致试验结果离散性较大,因此,本文采用改进 BBR 试验来评价沥青的低温性能。

2.3.2 改进 BBR 试验分析

针对电气石具有压电性能这一特殊性质,改进 BBR 试验方法。在对电气石改性沥青进行低温弯曲流变试验前,在低温流变仪水浴中对试样分别施加 100 g 和 200 g 砝码的荷载作用,持续 10 min,然后进行低温弯曲流变试验,分析在受到外力作用后,电气石由于其压电性能而对沥青低温性能的改善效果。

由于在低温弯曲流变仪水浴中对低温弯曲流变试件放置砝码施加应力时,砝码会受到浮力作用,对试件实际所施加荷载压力需去掉砝码承受的浮力。经计算得出当添加 100 g 砝码时,对试件实际施加荷载为 0.923 N,添加 200 g 砝码时,试件承受荷载

为 1.846 N。低温弯曲流变试验结果见表 2。

表 2 低温弯曲流变试验结果

Tab. 2 Test results of BBR at low temperature

施加荷载/N	S/MPa	m
0.000	164	0.433
0.923	152	0.437
1.846	189	0.394

由表 2 可得,将外部施加荷载 0.923 N 的 BBR 试验结果与不施加荷载的结果比较,发现蠕变劲度 S 值减小,蠕变速率 m 值增大,表明对电气石改性沥青施加适当荷载时,低温性能变好,这是因为对电气石改性沥青施加适当荷载,电气石由于压电性能释放电荷,电荷之间的吸引作用增强了沥青内部结构的稳定性。但当施加荷载为 1.846 N 时, S 值显著减小, m 值增大,这是由于当施加荷载过大时,对沥青结构造成破坏,反而导致沥青低温性能下降。

2.4 电气石改性沥青与集料粘附性能分析

沥青与集料的粘附性直接影响到沥青混合料的强度、温度稳定性、水稳定性和耐久性,因此,有必要对沥青与集料的粘附性进行研究。《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)规定,采用水煮法对沥青与集料进行粘附性测试,并将沥青与集料的粘附性以剥离面积的百分率为标准划分为 5 个等级。本文参照上述规范,选定掺量为 8%、11%、14%、17% 和 20% 对不同电气石改性沥青与集料(花岗岩)的粘附性进行研究,评定的粘附性等级见表 3。

表 3 沥青与集料的粘附性等级

Tab. 3 Adhesion levels between asphalt and aggregate

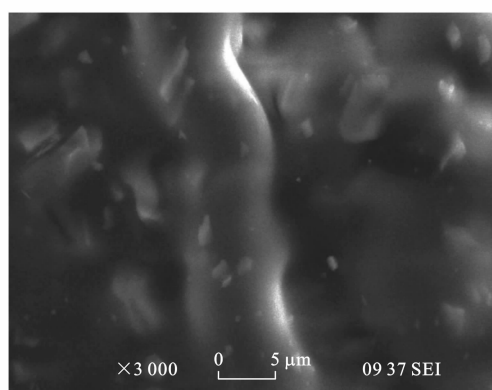
沥青类型	粘附性等级
基质沥青	3
电气石改性沥青(8%,11%)	4
电气石改性沥青(14%)	5
电气石改性沥青(17%)	5
电气石改性沥青(20%)	5

由表 3 可知:电气石改性沥青与集料的粘附性等级均高于基质沥青与集料的粘附性等级,表明电气石的掺加能够改善沥青与集料的粘附性;随着电气石掺量的增大,电气石改性沥青与集料的粘附性等级不断提高,表明电气石掺量越大,电气石改性沥青与集料的粘附性越好;在电气石掺量为 14% 时,电气石改性沥青与集料的粘附性等级达到最高,且此后随着电气石的增加,二者的粘附性等级不发生变化。

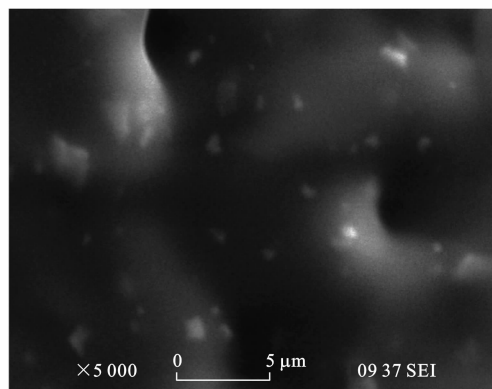
3 电气石对沥青路用性能改善机理

3.1 电气石改性沥青 SEM 分析

图 7 为电气石改性沥青在不同放大倍数下的 SEM 照片,从图 7 可以看出,电气石以形状不规则的微小颗粒均匀稳定地分散在沥青中,被沥青介质裹覆包围着,与沥青形成稳定整体。电气石颗粒粒径细小,比表面积大,内部大量的微孔能吸附沥青中的部分油分;电气石目数越大,粒径越小,比表面积越大,对沥青油分的吸收能力越强,从而对沥青的粘稠度影响更明显,因此,电气石粉目数越大,对沥青路用性能的改善效果越好。



(a) 放大倍数为 3 000 倍



(b) 放大倍数为 5 000 倍

图 7 电气石改性沥青的 SEM 照片

Fig. 7 SEM images of tourmaline modified asphalt

3.2 电气石改性沥青 DSC 分析

为进一步研究电气石对沥青路用性能的改善机理,采用差示扫描热法,对基质沥青和掺量为 20% 的不同电气石改性沥青进行试验,利用聚集态的观点对电气石沥青路用性能进行解释。图 8 为不同类型电气石改性沥青的 DSC 图谱,由图 8 可得如下结论。

(1)对比不同类型电气石改性沥青与基质沥青可以发现,在从玻璃态到粘弹态转变和粘弹态到粘流态转变的温度范围内,电气石改性沥青的吸热峰均变小,表明电气石改性沥青在聚集态转变过程中,性质较为稳定,有利于改善沥青的路用性能。

(2)电气石负离子粉 5 000 ions 和电气石粉 325 目改性沥青从玻璃态到高弹态所需的能量较小,表明电气石负离子粉 5 000 ions 和电气石粉 325 目对沥青的低温性能有利,但改性沥青在高弹态转换为粘流态过程中吸收能量较少,表明其对沥青高温稳定性不利;电气石负离子粉 325 目对沥青的影响作用正好相反,对沥青的低温性能不利,而对沥青高温稳定性有利,因此,其改性沥青高温稳定性较好。

3.3 电气石改性沥青电性能分析

为进一步研究电气石对沥青路用性能的改善机理,本文对电气石及其改性沥青进行电性能对比试验,从电气石压电性与热电性两个方面对电气石改性沥青的路用性能进行进一步解释,试验结果见表 4。

由表 4 可以看出,电气石改性沥青各压电性和热电性指标与电气石相差均不大,表明将电气石添加到沥青后,其压电性和热电性未受到不利影响,电性能可正常发挥;由于具备压电性、热电性、释放负离子等功能,在温度变化和承受外在压力的作用时,电气石晶体结构发生变化而导致正、负电荷重心分离,形成电偶极距,致使晶体表面产生电荷,形变越严重,表面电荷越强,形成的静电场越强,外界温度越高,静电场越不稳定,对沥青与电气石结构稳定性的影响越大,导致沥青的温度敏感性增大,高温稳定性变差,因此,随负离子粉释放量的增大,沥青的感

表 4 压电性能与热电性能试验结果

Tab. 4 Test results of piezoelectric properties and thermoelectric properties

试样类型	压电性能		热电性能		
	压电常数/ ($\text{pC} \cdot \text{N}^{-1}$)	介电常数/ ($10^{-12} \text{F} \cdot \text{m}^{-1}$)	电导率/ ($\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$)	Seebeck 系数/ ($\mu\text{V} \cdot \text{K}^{-1}$)	功率因子/ ($10^{-3} \text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-2}$)
电气石	3.95	3.52	4.9	172.3	0.15
电气石改性沥青	3.28	3.29	4.5	174.1	0.14

温性能和高温稳定性变差。在低温条件下,电气石由于其压电性能,受到外力时释放电荷,形成静电

场,静电场在低温条件下较稳定,能够增强沥青内部结构的稳定性,因此,对电气石改性沥青施加适当荷

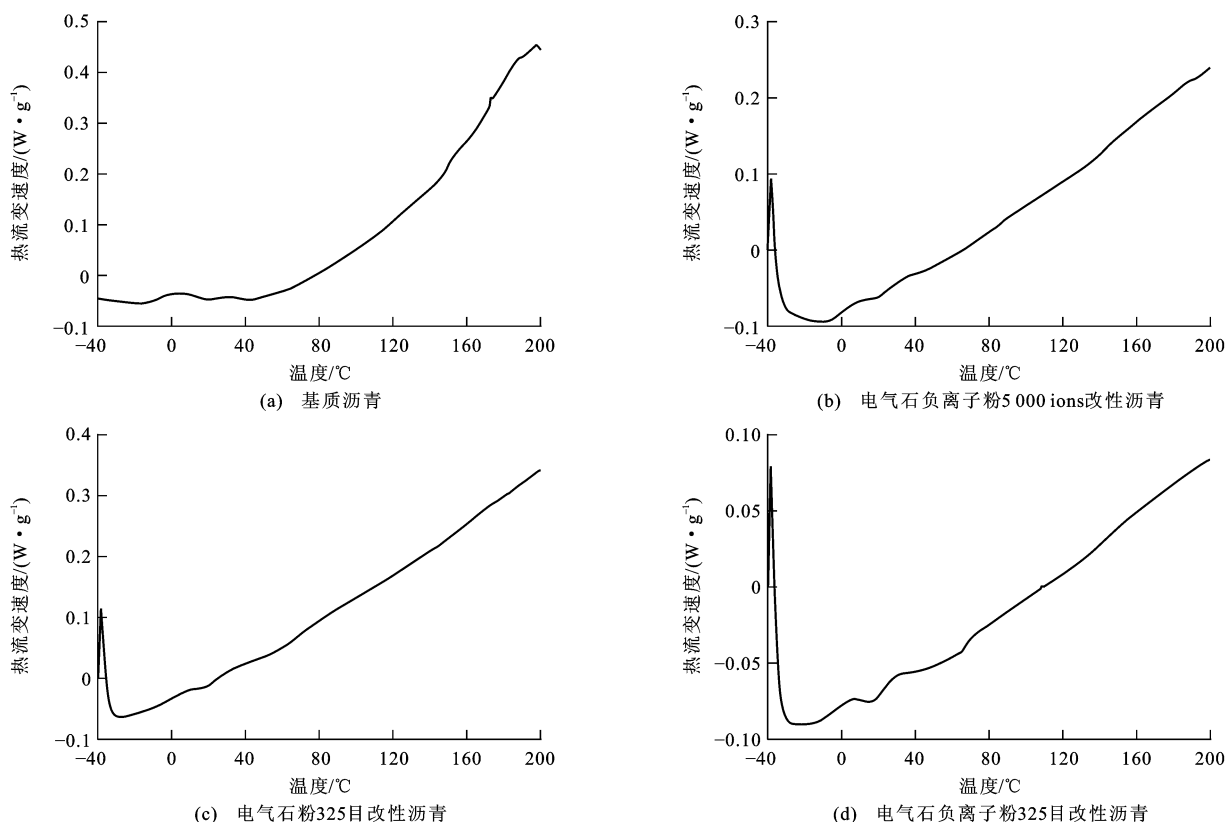


图8 不同类型电气石改性沥青 DSC 图谱

Fig.8 DSC images of different types of tourmaline modified asphalts

载有利于提高沥青的低温性能。

4 结 语

(1)对于感温性能,电气石粉改性沥青随掺量增加先改善后变差,电气石负离子粉改性沥青呈现相反的变化规律;各类型电气石改性沥青的高温性能随掺量的变化规律相同,均随掺量增加不断提高。

(2)电气石粉的目数越大,对沥青路用性能改善效果越好;对于电气石负离子粉,其改性沥青的路用性能随负离子释放量的增大而降低,电气石负离子粉 5 000 ions 的路用性能最佳;在相同目数条件下,电气石负离子粉对沥青性能的改善效果优于电气石粉。

(3)改进 BBR 试验表明,对电气石改性沥青施加适当荷载,电气石由于压电性能释放电荷,形成静电场,能够增强沥青与电气石结构的稳定性,有效改善沥青的低温性能。

(4)结合 SEM 试验观测的电气石改性沥青的界面形貌与电气石的特殊性质,表明电气石能够以形状不规则的微小颗粒均匀稳定地分散在沥青中,与沥青形成稳定整体。

(5)借助 DSC 试验,利用沥青聚集态的观点全

面分析了电气石对沥青路用性能的改善机理,结果表明,电气石改性沥青在聚集态转变过程中性质较为稳定,有利于改善沥青的路用性能。

(6)压、热电性能试验表明,电气石改性沥青电性能良好,将电气石加入到沥青后其压电性能和热电性能未受到不利影响。

参考文献:

References:

- [1] 刘丽,李剑,郝培文,等.硅藻土改性沥青胶浆技术性能的评价方法[J].长安大学学报:自然科学版,2005,25(3):23-27.
LIU Li, LI Jian, HAO Pei-wen, et al. Evaluation method for property of modified asphalt mortar with diatomite[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2005, 25(3): 23-27. (in Chinese)
- [2] 张争奇,李平,王秉纲.纤维和矿粉对沥青胶浆性能的影响[J].长安大学学报:自然科学版,2005,25(5):15-18.
ZHANG Zheng-qi, LI Ping, WANG Bing-gang. Effect of fiber and mineral filler on asphalt mortar performance[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2005, 25(5): 15-18. (in Chinese)
- [3] 张超,韩伟华,马琳.纤维沥青混合料中纤维最佳用量的确定方法[J].长安大学学报:自然科学版,2009,29(2):9-12.
ZHANG Chao, HAN Wei-hua, MA Lin. Optimum volume determination method of fiber in asphalt mixture[J]. Journal

- of Chang'an University: Natural Science Edition, 2009, 29(2): 9-12. (in Chinese)
- [4] 袁文豪, 沙爱民, 胡力群, 等. 水泥、乳化沥青及其用量对水泥-乳化沥青混合料性能的影响[J]. 筑路机械与施工机械化, 2005, 22(1): 32-35.
- YUAN Wen-hao, SHA Ai-min, HU Li-qun, et al. Cement, emulsified asphalt and their quantities impact on performance of cement and emulsified asphalt mixture[J]. Road Machinery and Construction Mechanization, 2005, 22(1): 32-35. (in Chinese)
- [5] 蒋玲. 硅藻精土与 SBS 改性沥青混合料路用性能比较试验研究[J]. 筑路机械与施工机械化, 2009, 26(11): 57-60.
- JIANG Ling. Comparative experimental study on diatomite and SBS modified asphalt mixture pavement performance[J]. Road Machinery and Construction Mechanization, 2009, 26(11): 57-60. (in Chinese)
- [6] 姜海涛, 吴少鹏, 况栋梁, 等. 有机化蒙脱土改性沥青老化性能的研究[J]. 武汉理工大学学报, 2007, 29(9): 41-43.
- JINAG Hai-tao, WU Shao-peng, KUANG Dong-liang, et al. Aging properties of organo-modified montmorillonite modified asphalts[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2007, 29(9): 41-43. (in Chinese)
- [7] 张兴友, 谭忆秋, 王哲人. 白炭黑改性沥青及其混合料的路用性能研究[J]. 公路交通科技, 2005, 22(7): 23-25, 40.
- ZHANG Xing-you, TAN Yi-qiu, WANG Zhe-ren. Study on performance of silica modified asphalt and its mixture[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2005, 22(7): 23-25, 40. (in Chinese)
- [8] 王英, 胡兆德, 李鹏, 等. 稀土改性沥青路面低温冷补养护材料探讨[J]. 筑路机械与施工机械化, 2008, 25(12): 23-27.
- WANG Ying, HU Zhao-de, LI Peng, et al. Discussion on low-temperature cold reinforcement maintenance material for rare earth modified asphalt pavement[J]. Road Machinery and Construction Mechanization, 2008, 25(12): 23-27. (in Chinese)
- [9] 李芳芳. 电气石的性质及应用展望[J]. 矿业快报, 2007(3): 10-13.
- LI Fang-fang. Property of tourmaline and application prospect[J]. Express Information of Mining Industry, 2007(3): 10-13. (in Chinese)
- [10] 莫尊理, 孙豫, 郭瑞斌, 等. 电气石的性能及应用研究进展[J]. 硅酸盐通报, 2011, 30(4): 822-826.
- MO Zun-li, SUN Yu, GUO Rui-bin, et al. Research progress in the performance and application of tourmaline[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2011, 30(4): 822-826. (in Chinese)
- [11] HOANG L H, HIEN N T M, CHEN Xiang-bai, et al. Annealing effect in raman scattering of various types of tourmalines[J]. Journal of Applied Spectroscopy, 2013, 79(6): 881-887.
- [12] LI Ke-xin, CHEN Tong, YAN Liu-shui, et al. Synthesis of mesoporous graphene and tourmaline co-doped titania composites and their photocatalytic activity towards organic pollutant degradation and eutrophic water treatment[J]. Catalysis Communications, 2012, 28(5): 196-201.
- [13] 陈华鑫, 李宁利, 张争奇, 等. 沥青材料的感温性分析[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2006, 26(1): 8-11.
- CHEN Hua-xin, LI Ning-li, ZHANG Zheng-qi, et al. Temperature susceptibility analysis of asphalt binders[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2006, 26(1): 8-11. (in Chinese)
- [14] 季节, 罗晓辉, 徐世法. Sasobit 改性沥青的结构与性能研究[J]. 中国公路学报, 2011, 24(5): 18-25.
- JI Jie, LUO Xiao-hui, XU Shi-fa. Study of structure and properties of Sasobit modified asphalt[J]. China Journal of Highway and Transport, 2011, 24(5): 18-25. (in Chinese)
- [15] 王火明, 王林涛, 魏强. BRA 改性沥青及其混合料路用性能[J]. 筑路机械与施工机械化, 2012, 29(2): 27-32.
- WANG Huo-ming, WANG Lin-tao, WEI Qiang. Performance of BRA modified asphalt and mixture[J]. Road Machinery and Construction Mechanization, 2012, 29(2): 27-32. (in Chinese)
- [16] 周新锋, 赵琳娜. 橡胶粉改性沥青在高等级公路中的应用研究[J]. 筑路机械与施工机械化, 2012, 29(1): 57-58, 63.
- ZHOU Xin-feng, ZHAO Lin-na. Research on application of rubber modified asphalt in high-grade highway[J]. Road Machinery and Construction Mechanization, 2012, 29(1): 57-58, 63. (in Chinese)
- [17] 展杰, 郝霄鹏, 刘宏, 等. 天然矿物功能晶体材料电气石的研究进展[J]. 功能材料, 2006, 37(4): 524-527.
- ZHAN Jie, HAO Xiao-peng, LIU Hong, et al. Research progress of natural mineral functional crystals-tourmaline[J]. Journal of Functional Materials, 2006, 37(4): 524-527. (in Chinese)
- [18] 李雯雯, 张晓晖, 吴瑞华, 等. 不同种属电气石的压电效应及磁学性质的研究[J]. 硅酸盐通报, 2007, 26(6): 1116-1121.
- LI Wen-wen, ZHANG Xiao-hui, WU Rui-hua, et al. Piezoelectricity and magnetic properties of diverse tourmalines[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2007, 26(6): 1116-1121. (in Chinese)