

文章编号:1671-8879(2014)02-0001-08

电气石改性沥青混合料路用性能

王朝辉¹,李彦伟²,孙晓龙¹,赵永祯²,王 鹏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:为深入研究电气石类型、掺量对改性沥青混合料路用性能的影响,将经过表面改性的电气石加入到基础沥青中,采用高速剪切法制备电气石改性沥青,借助扫描电镜试验(SEM)分析电气石与沥青的相容性;将电气石改性沥青应用到 GAC 沥青混合料中,通过高温车辙试验、低温小梁弯曲试验、浸水马歇尔试验、冻融劈裂试验以及疲劳试验等,系统研究电气石类型与掺量对沥青混合料高温性、低温抗裂性、水稳定性以及抗疲劳性等路用性能的影响规律,并应用疲劳方程对疲劳试验结果进行回归分析。研究表明:电气石与沥青相容性良好;电气石能改善沥青混合料的高温、低温、水稳定性及抗疲劳性等路用性能;对于不同类型电气石,325 目电气石改性沥青混合料的高温性能和水稳定性性能优于 5 000 目电气石改性沥青混合料,而 5 000 目电气石改性沥青混合料的低温性能和抗疲劳性能较好。

关键词:道路工程;电气石;沥青混合料;路用性能

中图分类号:U414.75

文献标志码:A

Pavement performance of tourmaline modified asphalt mixture

WANG Chao-hui¹, LI Yan-wei², SUN Xiao-long¹, ZHAO Yong-zhen², WANG Peng¹

(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: In order to deeply study the effects of tourmaline type and dosage on pavement performance of modified asphalt mixture, tourmaline modified asphalt was prepared with high-speed shearing method when the surface modified tourmaline was added to the base asphalt. SEM test was adopted to analyze the compatibility between tourmaline and asphalt. High temperature rutting test, low-temperature beam bending test, immersion Marshall test freeze thaw splitting test and fatigue test were used on tourmaline modified asphalt mixture of GAC to study the effect of tourmaline on pavement performance. And the results of fatigue test were performed regression analysis with fatigue equation. The results show that tourmaline disperses evenly in the asphalt and has good compatibility with asphalt. The adding of tourmaline is good for improving the high temperature performance, low temperature performance, water stability and fatigue resistance of asphalt mixture. For different types of tourmalines, high temperature performance and water stability performance of modified asphalt mixture with tourmaline of 325 meshes is better, however,

收稿日期:2013-03-15

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);

交通运输部建设科技项目(201331849A270)

作者简介:王朝辉(1980-),男,河南滑县人,副教授,工学博士,E-mail:wchh0205@163.com。

low temperature performance and fatigue resistance of modified asphalt mixture with tourmaline of 5 000 ions is better, 10 tabs, 8 figs, 12 refs.

Key words: road engineering; tourmaline; asphalt mixture; pavement performance

0 引 言

近年来,无机微粉改性沥青混合料越来越受到道路研究者的青睐。以硅藻土、蒙脱土、碳黑、玻璃纤维、石棉以及木质纤维等为代表的无机类改性沥青路面材料在国内外已有一定研究^[1-3]。无机材料改性剂不仅可以改善沥青与矿料的界面作用,满足沥青路用性能的要求,同时具有生产工艺简单、价格低廉、性能优良、储量丰富等特点^[4]。然而,大多数无机类改性沥青存在需要更高的操作温度、缺乏环境功效、不便于在环保型道路应用推广的缺点^[4]。本课题组通过调查及试验研究发现,无机材料电气石不仅能改善沥青的综合性能,还具有多重环境功效^[5-6]。电气石是一种以含硼为特征的铝、钠、铁、镁、锂的环状结构硅酸盐矿物,自身具有压电及热释电性能,目前已被广泛应用于环保、医疗保健、声电功能、水的活化改性、电磁屏蔽等领域^[7-8]。程源将电气石用于重金属离子废水处理,得出电气石对重金属的吸附率达到 90% 以上,净化效果良好^[9];高如琴等将电气石作为基内墙砖的功能材料用于室内空气净化,得出电气石对甲醛具有很好的吸附和降解能力^[10];康文杰等调查研究了电气石在上述各

个领域的应用状况,得出电气石因释放负离子、热释电性等具备的环境特性均得到良好利用^[11]。但是,目前关于电气石在道路方面的应用国内外鲜有报道,为使其良好的环境功效能够在道路领域充分发挥,课题组前期已将电气石用于沥青的改性处理,并取得了良好效果^[12]。

本文选取表面改性的电气石作为沥青改性剂,添加适量的助剂,采用高速剪切法制备电气石改性沥青,借助扫描电镜试验(SEM)分析电气石与沥青的相容性;通过高温车辙试验、低温弯曲试验、浸水马歇尔试验、冻融劈裂试验以及疲劳试验等,系统研究电气石的添加对沥青混合料路用性能的影响。采用疲劳方程对沥青混合料的疲劳性能进行对比分析,评价改性沥青的抗疲劳性能,为电气石改性沥青混合料的推广及应用奠定坚实的基础。

1 电气石改性沥青制备及配合比设计

1.1 试验原材料

试验用沥青为韩国 SK70# 基质沥青和 SBS I-D 改性沥青,经测定各项指标均符合《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)中相关要求,二者主要技术指标见表 1。

表 1 SK70# 基质沥青及 SBS 改性沥青的技术性能

Tab. 1 Technological performances of SK70# base asphalt and SBS modified asphalt

性能指标	SK70# 沥青	技术指标	SBS I-D	技术指标
针入度(25 ℃, 100 g, 5 s)/0.1 mm	69	60~80	45	40~60
延度(5 cm/min, 15 ℃)/cm	145	≥100	33	≥20
软化点(环球法)/℃	66	≥46	87	≥60

电气石分为普通电气石粉(本文称电气石粉)和电气石负离子粉 2 种,本文主要选用细度为 325 目的电气石粉和负离子释放量为 5 000 ions(表示 5 000 个

离子)的电气石负离子粉 2 种典型电气石粉料进行研究。电气石原材料的价格为 3 000~10 000 元/t,性价比较高,其相关技术指标见表 2。

表 2 电气石粉料基本物理指标

Tab. 2 Basic physical indexes of tourmaline

材料	颜色	外观	细度/目	莫氏硬度	负离子释放量/(个·(s·cm ³) ⁻¹)	密度/(g·cm ⁻³)	红外波长/μm	发射率	调节 pH 值
电气石粉	黑 色	细粉体	325	7.0~7.5	400~500	3.05	4~14	84~90	7.0~7.2
电气石负离子粉	乳白色	细粉体	1 000	7.0~7.2	5 000~6 000	3.06	4~14	>90	7.0~7.3

1.2 电气石 X 射线荧光光谱分析

采用飞利浦 PW2404 X 射线荧光光谱仪对 2 种电气石粉体进行 X 射线荧光光谱试验,分析 2 种电气石粉

体的主要化学成分,试验结果见下页表 3。由表 3 可以看出,电气石粉料中 SiO₂、Al₂O₃ 和 Fe₂O₃ 的含量较高,其中 Fe₂O₃ 含量在 20% 以上,判定为铁电气石粉;电气石

负离子粉中 CaO、MgO 和 SiO₂ 的含量较高,其中 MgO 含量在 38%以上,还含有少量的 Al₂O₃,属镁电气石粉。

表 3 不同类型电气石粉料化学成分分析

Tab. 3 Chemical composition analysis of different types of tourmalines

化学成分	SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	CeO ₂	其他	共计
电气石粉	40.500 4	0.389 0	0.590 0	34.120 2	20.422 3	2.132 2		1.845 9	100
电气石负离子粉	21.461 4	27.219 1	38.770 3	2.567 4	0.973 9	0.291 9	2.85 1	5.865 0	100

1.3 电气石改性沥青制备

首先,将电气石加热到(90±5)℃,并采用表面改性剂对电气石进行表面改性处理;基质沥青加热并维持到(140±5)℃(基础沥青为 SBS 改性沥青时,加热温度为(160±5)℃),将干燥的表面处理过的电气石缓慢、分批添加到基质沥青中,加入后匀速搅拌 5 min,在此过程中加入适量助剂和分散剂;采用高速剪切仪,先以 1 000 r/min 的转速搅拌 10 min,再以 4 000 r/min 的转速搅拌 30 min,手动搅拌 5 min,以排

除高速搅拌时产生的气泡,从而制得电气石改性沥青。制备完成后,对电气石改性沥青进行储存稳定性评价,发现电气石粉末无沉淀现象,但作为无机类改性沥青,建议不宜长时间储存。

1.4 混合料配合比设计

沥青混合料级配统一采用已被成功应用于河北省多条道路的混合料级配 GAC-13,该级配沥青混合料表现出良好的路用性能。混合料级配 GAC-13 如表 4 所示。

表 4 GAC-13 混合料矿料级配范围要求与合成级配

Tab. 4 GAC-13 mixture aggregate gradation scope requirements and synthetic grading

筛孔尺寸/mm	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
推荐范围/%	100	98~100	70~74	33~37	24~30	20~22	16~18	11~13	8~10	7~8
合成级配/%	100	98.0	72.0	35.0	27.0	21.0	17.0	12.0	9.0	7.5

根据中国《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40—2004)规定,参照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011),采用马歇尔试验方法确定的最佳沥青用量为:普通 SBS 改性沥青为 4.66%,掺量为 14%、17%和 20% 的 325 目电气石+SBS 改性沥青混合料的最佳沥青用量分别为 5.45%、5.53%和 5.60%。相同掺量下电气石负离子粉+SBS 改性沥青混合料的最佳沥青用量分别为 5.50%、5.58%和 5.67%。

2 电气石改性沥青 SEM 分析

电气石粉料能否与沥青很好的粘附、混合是影响电气石改性沥青混合料路用性能的关键因素。采用负离子释放量为 5 000 ions 的电气石负离子粉及其改性沥青进行 SEM 试验,分析电气石与沥青的相容性。SEM 试验所采用设备为日本电子株式会社生产的 JSM-6390 A 型扫描电子显微镜(其技术参数为:点分辨率 0.45 nm;晶格分辨率 0.2 nm;放大倍数 100~330 000)。

SEM 放大 5 000 倍的试验结果如图 1、图 2 所示。图 1 显示电气石负离子粉的外层壳壁上呈片层状结构,壳面周缘还有形状、大小不一的空隙。图 2 可以直观看出电气石粉料均匀的分散在沥青中,表明电气石加入到沥青中后,电气石不会出现团聚现象,电气石粉料与沥青具有很好的相容性。

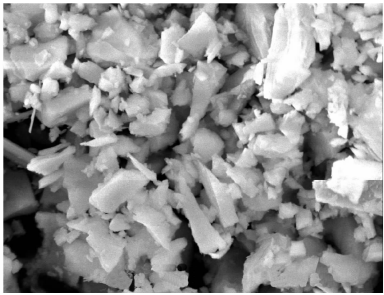


图 1 电气石粉料 SEM 照片
Fig. 1 SEM of tourmaline powder

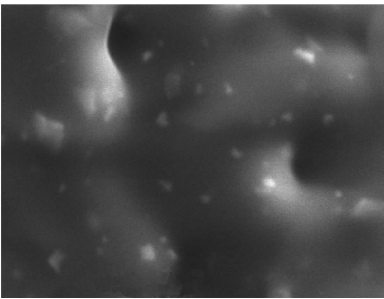


图 2 电气石改性沥青 SEM 照片
Fig. 2 SEM of tourmaline modified asphalt

3 电气石改性沥青混合料高温性能

参照中国《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011),采用 60℃车辙试验的动稳定度评价电气石改性沥青混合料的高温稳定性,具

体试验结果见表 5。

表 5 不同沥青混合料的车辙试验结果

Tab. 5 Rutting test results of different asphalt mixtures

沥青混合料类型	电气石掺量/%	动稳定度/(次·mm ⁻¹)
基质沥青混合料		1 445
基质沥青+325 目电气石粉	17	2 324
SBS 改性沥青混合料		8 290
325 目电气石粉+SBS 改性沥青混合料	14	10 625
	17	9 075
	20	12 708
5 000 ions 电气石负离子粉+SBS 改性沥青混合料	14	10 526
	17	8 985
	20	12 039

由表 5 可以得出以下结论。

(1)向基质沥青中添加 325 目电气石粉后,改性沥青混合料动稳定度与普通基质沥青混合料相比提高了 60.8%;向 SBS 改性沥青中添加 325 目电气石粉和 5 000 ions 电气石负离子粉后,沥青混合料的动稳定度均明显高于普通 SBS 改性沥青混合料,相

对提高 8.4%~53%,表明添加电气石能有效改善 SBS 改性沥青混合料的高温稳定性能。

(2)2 种复合改性沥青混合料的动稳定度随电气石掺量变化规律一致,均随掺量的增加先减小后增大,当掺量为 20%时,沥青混合料高温性能的改善效果非常明显,动稳定度分别比 SBS 改性沥青混合料高 53.3%和 45.2%。

(3)在相同电气石掺量下,325 目电气石粉料+SBS 改性沥青混合料的高温性能高于 5 000 ions 电气石负离子粉+SBS 改性沥青混合料,但整体相差不大,表明电气石类型对沥青混合料的高温稳定性的改善效果影响较小。

4 电气石改性沥青混合料低温性能

参照中国《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20-2011),采用-10℃的低温小梁弯曲试验方法来评价电气石改性沥青混合料的低温抗裂性能,具体试验结果见表 6。

表 6 不同沥青混合料的低温小梁弯曲试验结果

Tab. 6 Low temperature beam bending test results of different asphalt mixtures

沥青混合料类型	电气石掺量/%	抗弯拉强度 R _B /MPa	破坏应变	劲度模量 S _B /MPa	劈裂应变能/(kJ·m ⁻³)
SBS 改性沥青混合料		11.98	2 631.8	4 551.97	31 529.20
325 目电气石粉+SBS 改性沥青混合料	14	12.42	2 605.9	4 766.11	32 365.28
	17	12.56	2 626.8	4 793.34	32 992.61
	20	13.29	2 764.9	4 909.08	36 745.52
5 000 ions 电气石负离子粉+SBS 改性沥青混合料	14	13.41	2 936.0	4 567.40	39 372.03
	17	12.66	2 767.1	4 825.75	35 031.49
	20	12.48	2 767.8	4 508.99	34 542.14

传统研究中,往往采用抗弯拉强度和破坏应变来评价沥青混合料的低温抗裂性能,但二者有时会出现相互矛盾的结果。沥青混合料的应变能密度临界值(劈裂应变能)指标是混合料抗弯拉强度和破坏应变这 2 个指标的综合,用来评价沥青混合料的低温抗裂性能更加科学。因此,本文主要采用抗弯拉强度和劈裂应变能 2 个指标来评价沥青混合料的低温性能。

4.1 电气石掺量对沥青混合料低温性能的影响规律

不同电气石掺量的电气石改性沥青混合料的极限抗弯拉强度和劈裂应变能,如图 3、下页图 4 所示。

由图 3 可看出,对于 325 目电气石改性沥青混合料,其极限抗弯拉强度随电气石掺量增加不断增大,尤其是当掺量达到 17%后,极限抗弯拉强度的增加非常明显;与 SBS 改性沥青混合料相比,掺加 20%电气石的 SBS 改性沥青混合料极限抗弯拉强度增大了 7.8%;5 000 ions 电气石负离子粉改性沥青混合料

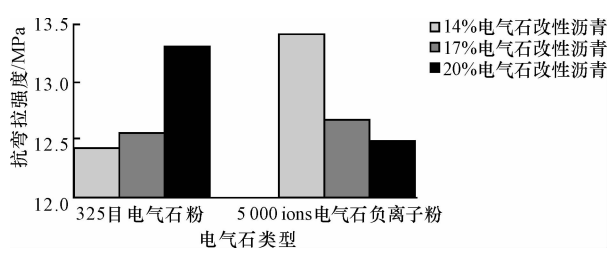


图 3 抗弯拉强度随电气石掺量的变化

Fig. 3 Change of bending tensile strength with tourmaline dosage

的极限抗弯拉强度则是随着掺量增加而不断减小,当电气石掺量超过 17%后,电气石负离子粉掺量对极限抗弯拉强度的影响幅度较小。

由下页图 4 可以看出,电气石掺量对沥青混合料劈裂应变能的影响与对抗弯拉强度的影响规律一致。325 目电气石改性沥青混合料的劈裂应变能随其掺量的增加不断增大,表明电气石掺量较大的沥青混合料破坏需要较大的能量,低温性能较好;电气石负离

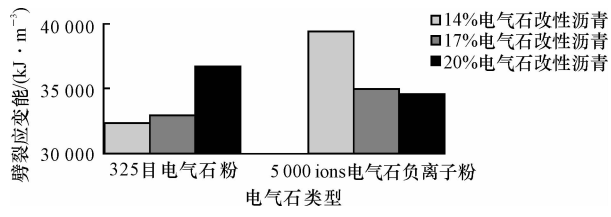


图 4 劈裂应变能随电气石掺量的变化
Fig. 4 Change of fracture strain energy
with tourmaline dosage

子粉改性沥青混合料,劈裂应变能随掺量增加不断减小,表明随着掺量的增加,电气石负离子粉对沥青混合料的改善效果有所降低,但电气石负离子粉的劈裂应变能仍高于普通 SBS 改性沥青混合料。

4.2 电气石类型对沥青混合料低温性能的影响规律

不同类型电气石+SBS 改性沥青混合料抗弯拉强度和劈裂应变能,如图 5、图 6 所示。

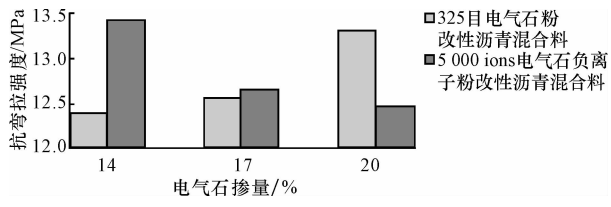


图 5 电气石改性沥青混合料抗弯拉强度对比
Fig. 5 Bending tensile strengths of different types
of tourmaline modified asphalt mixtures

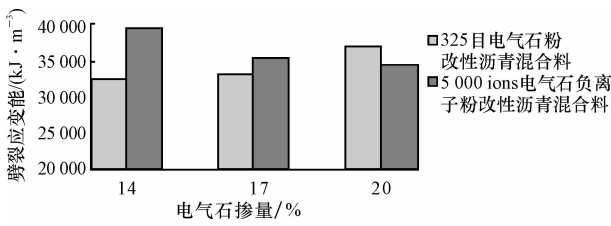


图 6 电气石改性沥青混合料的劈裂应变能
Fig. 6 Fracture strain energy of different types
of tourmaline modified asphalt mixtures

由图 5 可知,在电气石掺量为 14%和 17%时,5 000 ions 电气石负离子粉对沥青混合料低温性能的改善效果优于 325 目电气石粉;但当掺量增大到 20%时,325 目电气石粉改性沥青混合料的低温性能优于 5 000 ions 电气石负离子粉改性沥青混合料。

从图 6 中可以看出,电气石改性沥青混合料的劈裂应变能与抗弯拉强度呈现出一致的规律,表明当掺量在 14%和 17%之间时,电气石负离子粉改性沥青混合料的低温性能高于电气石粉改性沥青混合料;当掺量为 20%时,325 目电气石粉改性沥青混合料的低温性能较好。

5 电气石改性沥青混合料水稳定性能

按照中国现行《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40—2004)的规定,采用浸水马歇尔试验的残留稳定性和冻融劈裂试验的残留强度比双指标,对比分析各沥青混合料的水稳定性能,研究电气石对各沥青混合料水稳定性的影响规律。

5.1 浸水马歇尔试验

不同沥青混合料的浸水马歇尔试验结果见表 7。表中 M_{S1} 为试件的稳定度, M_{S2} 为试件浸水 48 h 后的稳定度, M_S 为残留稳定度。

表 7 不同沥青混合料的浸水马歇尔试验结果

Tab. 7 Immersion Marshall test results of different asphalt mixtures

沥青混合料类型	电气石掺量/%	M_{S1} / kN	M_{S2} / kN	M_S / %
基质沥青		8.72	7.73	88.65
325 目电气石改性沥青混合料	17	9.85	9.14	93.10
SBS 改性沥青混合料		10.52	9.58	91.07
325 目电气石粉+SBS 改性沥青混合料	14	12.98	12.18	93.84
	17	13.09	12.85	98.17
	20	13.15	12.99	98.78
5 0 00 ions 电气石负离子粉+SBS 改性沥青混合料	14	12.95	12.30	94.98
	17	12.98	12.56	96.76
	20	13.14	12.93	98.40

由表 7 可得以下结论。

(1)与普通基质沥青混合料相比,325 目电气石粉改性沥青混合料的残留稳定度增大了 4.45%;与普通 SBS 改性沥青混合料相比,325 目电气石和 5 000 ions 电气石负离子粉+SBS 改性沥青混合料的残留稳定度分别提高 2.77%~7.71%和 3.91%~7.33%,表明电气石的加入对沥青混合料的水稳定性具有显著的改善作用。

(2)电气石粉改性沥青混合料的残留稳定度均随电气石掺量的增加而不断增大,表明电气石对沥青混合料水稳定性的改善作用随着掺量的增加而不断提高。

(3)在相同掺量下,325 目电气石粉+SBS 改性沥青混合料和 5 000 ions 负离子粉+SBS 改性沥青混合料的残留稳定度相差非常小,表明电气石类型对混合料的水稳定性影响较小。

5.2 冻融劈裂试验

不同沥青混合料的冻融劈裂试验结果见下页表 8。表中 R_{T1} 为未进行冻融循环试件的劈裂抗拉强度, R_{T2} 为经受冻融循环试件的劈裂抗拉强度, T_{SR} 为冻融劈裂试验强度比。

表 8 沥青混合料的冻融劈裂试验结果

Tab. 8 Freeze-thaw splitting test results of different asphalt mixtures

沥青混合料类型	电气石 掺量/%	$R_{T1}/$ MPa	$R_{T2}/$ MPa	$T_{SR}/\%$
基质沥青		0.884	0.775	87.72
325 目电气石改性沥青混合料	17	0.901	0.845	93.75
SBS 改性沥青混合料		0.913	0.813	90.95
325 目电气石粉 + SBS 改性 沥青混合料	14	0.994	0.948	95.37
	17	1.000	0.968	96.80
	20	1.088	1.056	97.06
5 000 ions 电气石负离子粉 + SBS 改性沥青混合料	14	0.976	0.917	93.96
	17	0.982	0.936	95.32
	20	1.090	1.062	97.43

由表 8 可得以下结论。

(1)与普通基质沥青混合料相比,325 目电气石改性沥青混合料的冻融劈裂残留强度比增大了 6.03%,不同掺量、类型的电气石+SBS 改性沥青混合料的冻融劈裂残留强度比均高于普通 SBS 改性沥青混合料,表明电气石的添加有助于改善沥青混合料的水稳定性能。

(2)随着电气石掺量的增加,325 目电气石粉和 5 000 ions 电气石负离子粉+SBS 改性沥青混合料的劈裂强度、冻融循环劈裂强度和冻融劈裂残留强度比均增大。

(3)相同电气石掺量下不同的电气石改性沥青混合料冻融劈裂强度比差异较小,在掺量分别为 14%和 17%时,325 目电气石+SBS 改性沥青混合料的冻融劈裂强度比分别比 5 000 ions 电气石负离子粉+SBS 改性沥青混合料高 1.41%和 1.48%;当掺量为 20%时,5 000 ions 电气石负离子粉+SBS 改性沥青混合料冻融劈裂残留强度比与 325 目电气石+SBS 改性沥青混合料相比仅高 0.37%,表明电气石类型对沥青混合料冻融劈裂试验结果影响不大。

6 电气石改性沥青混合料疲劳性能

参考《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》

表 9 沥青混合料的疲劳回归方程与参数

Tab. 9 Asphalt mixture fatigue regression equations and parameters

沥青混合料类型	掺量/%	回归方程	K	n	R^2
SBS 改性沥青混合料		$N_f=1\,431.470(1/S)^{3.413}$	1 431.470	3.413	0.999 9
325 目电气石粉+SBS 改性 沥青混合料	14	$N_f=1\,996.528(1/S)^{3.363}$	1 996.528	3.363	0.999 9
	17	$N_f=1750.567(1/S)^{3.385}$	1 750.567	3.385	0.999 9
	20	$N_f=1685.535(1/S)^{3.327}$	1 685.535	3.397	1.000 0

(1)不同掺量电气石粉改性沥青混合料的 K 值均大于 SBS 改性沥青混合料,而 n 值均小于 SBS 改性沥青混合料,表明电气石粉的添加显著改善了沥

(JTG E20—2011)沥青混合料四点弯曲疲劳寿命试验方法(T0739—2011),进行电气石改性沥青混合料的疲劳试验,采用控制应力模式的试验结果评价电气石改性沥青混合料的疲劳性能。

6.1 电气石掺量对沥青混合料疲劳性能的影响规律

为分析电气石掺量对沥青混合料疲劳性能的影响规律,对掺量为 14%、17%和 20%的 325 目电气石+SBS 改性沥青混合料进行疲劳试验。图 7 为不同掺量电气石粉改性沥青混合料的疲劳试验结果双对数变化曲线。

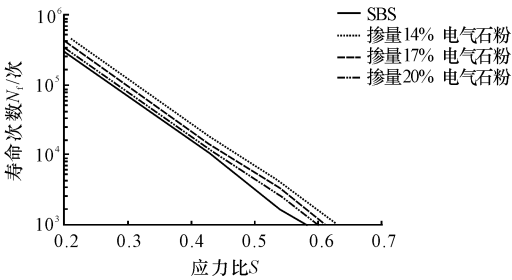


图 7 不同电气石掺量沥青混合料的疲劳变化曲线

Fig. 7 Curves of fatigue of different types of tourmaline modified asphalt mixtures

由图 7 可以看出,在一定的应力比 S 范围内,各类型沥青混合料的 $S-N$ 疲劳曲线在双对数坐标系中均表现为直线关系,随着应力比的增加,沥青混合料疲劳寿命均逐渐减小;电气石粉+SBS 改性沥青混合料的疲劳寿命高于 SBS 改性沥青,在相同应力比下,随着电气石粉掺量的增加,疲劳寿命有所降低。

采用传统 $S-N$ 疲劳方程对疲劳试验结果进行回归分析, $S-N$ 疲劳方程形式为 $\lg(N_f)=\lg(K)-n\lg(S)$,方程中回归系数 K 值越大,表明材料的抗疲劳性能越好;回归系数 n 值越大,表明疲劳寿命对应力比的敏感程度越大,即疲劳耐久性受应力比影响越显著。沥青混合料的疲劳回归方程见表 9。表中 R^2 为判定系数。

青混合料的抗疲劳性能,且电气石粉+SBS 改性沥青对所施加应力比的敏感程度小于 SBS 改性沥青。

(2)随着电气石粉掺量的增大,沥青混合料的

K 值不断减小、 n 值呈增大趋势,表明电气石掺量过大并不利于提高混合料的疲劳性能,但电气石添加到 SBS 改性沥青混合料中的抗疲劳性能均优于未添加的普通 SBS 改性沥青混合料。

6.2 电气石类型对沥青混合料疲劳性能影响规律

在相同掺量条件下,分析 325 目电气石粉和 5 000 ions 电气石负离子粉添加到 SBS 改性沥青混合料中的疲劳回归方程,研究不同类型电气石对沥青混合料疲劳性能的影响,图 8 为在相同掺量 14% 和 20% 条件下 2 种类型电气石添加到 SBS 改性沥青混合料中与 SBS 改性沥青混合料的疲劳试验结果双对数变化曲线。由图 8 可以看出,不同类型电

气石改性沥青混合料的疲劳寿命均高于普通 SBS 改性沥青混合料。

对不同类型沥青混合料的疲劳试验结果进行回归分析,回归方程见表 10。由表 10 可以看出,在相同掺量下,5 000 ions 电气石负离子粉改性沥青混合料的疲劳寿命均大于 325 目电气石粉改性沥青混合料。5 000 ions 电气石负离子粉改性沥青混合料的回归方程的 K 值大于 325 目电气石粉改性沥青混合料;然而,5 000 ions 电气石负离子粉改性沥青混合料的回归方程的 n 值小于 325 目电气石粉改性沥青混合料,故 5 000 ions 电气石负离子粉改性沥青混合料的抗疲劳性能优于 325 目电气石粉改性沥青混合料。

表 10 沥青混合料的疲劳回归方程与参数

Tab. 10 Asphalt mixture fatigue regression equations and parameters

电气石掺量/%	沥青混合料类型	回归方程	K	n	R^2
14	325 目电气石粉+SBS 改性沥青混合料	$N_f=1\,996.528(1/S)^{3.363}$	1 996.528	3.363	0.999 9
	5 000 ions 电气石负离子粉+SBS 改性沥青混合料	$N_f=2\,057.243(1/S)^{3.248}$	2 057.243	3.248	0.999 9
20	325 目电气石粉+SBS 改性沥青混合料	$N_f=1\,685.535(1/S)^{3.327}$	1 685.535	3.327	1.000 0
	5 000 ions 电气石负离子粉+SBS 改性沥青混合料	$N_f=1\,722.832(1/S)^{3.251}$	1 722.832	3.251	0.999 9

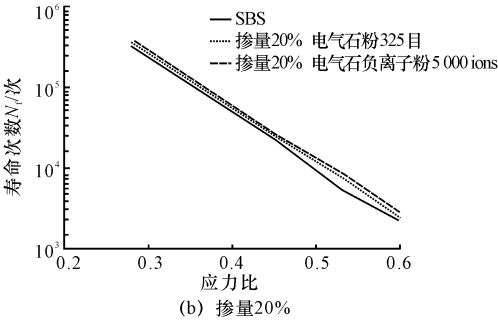
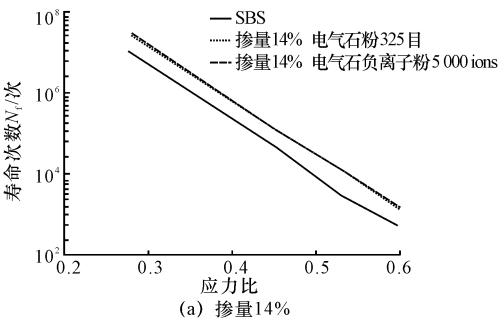


图 8 不同类型电气石改性沥青混合料的疲劳变化曲线
Fig. 8 Curves of fatigue of different types of tourmaline modified asphalt mixtures

7 结 语

(1)通过 X 射线荧光光谱,分析了 2 种电气石

粉料的主要化学成分;采用高速剪切法将经过表面改性的电气石加入到沥青中,并添加适量助剂和分散剂,制备了电气石改性沥青。

(2)SEM 试验表明,将电气石加入到基础沥青后,电气石颗粒均匀地分散在沥青中,没有出现团聚现象。

(3)电气石有效地改善了沥青混合料的高温稳定性能,2 种电气石+SBS 改性沥青混合料的动稳定度均随掺量的增加先减小后增大,且电气石类型对这种改善效果影响不大。

(4)电气石的添加有助于改善沥青混合料的低温性能,325 目电气石改性沥青混合料的低温性能随掺量增加不断提高,而 5 000 ions 电气石负离子粉改性沥青混合料则相反;掺量在 14% 和 17% 之间时,电气石负离子粉改性沥青混合料的低温性能高于电气石粉改性沥青混合料,而当掺量为 20% 时,325 目电气石改性沥青混合料的低温性能则较好。

(5)电气石能有效提高沥青混合料的水稳定性,对于同类型电气石改性沥青混合料,水稳定性均随电气石掺量的增加而不断提高,在相同掺量条件下,电气石类型对沥青混合料水稳定性的影响不大。

(6)四点弯曲疲劳试验结果表明,添加电气石有效改善了 SBS 改性沥青混合料的抗疲劳性能,在相同掺量下,5 000 ions 电气石负离子粉能够更好地改善沥青混合料的抗疲劳性能。

参考文献:

References:

- [1] 张兴友,胡光艳,谭忆秋. 硅藻土改性沥青混合料低温抗裂性能研究[J]. 公路交通科技,2006,23(4):11-13.
ZHANG Xing-you, HU Guang-yan, TAN Yi-qiu. Study of low temperature anticracking performance of diatomite modified asphalt mixture [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2006, 23(4): 11-13. (in Chinese)
- [2] 付玉,余剑英,冯鹏程. 蒙脱土改性沥青的制备与性能研究[J]. 武汉理工大学学报,2007,29(9):51-54.
FU Yu, YU Jian-ying, FENG Peng-cheng. Preparation and properties of montmorillonite modified asphalt [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2007, 29(9): 51-54. (in Chinese)
- [3] 冉龙飞,黄维蓉,朱宝华. 纳米膨润土改性沥青机理研究[J]. 重庆交通大学学报:自然科学版,2008,27(1):73-77.
RAN Long-fei, HUANG Wei-rong, ZHU Bao-hua. Mechanism study on nanometer bentonite modified asphalt [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University: Natural Science, 2008, 27(1): 73-77. (in Chinese)
- [4] 王金刚. 无机微粉改性沥青的制备及其改性机理研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2009.
WANG Jin-gang. Preparation and mechanism of ultra-fine inorganic powders modified asphalt binder[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2009. (in Chinese)
- [5] 穆锐,王猛,邓爱民. 电气石表面改性研究[J]. 沈阳理工大学学报,2013,32(1):1-3.
MU Rui, WANG Meng, DENG Ai-min. Research on the surface modification of tourmaline[J]. Journal of Shenyang Ligong University, 2013, 32(1): 1-3. (in Chinese)
- [6] 王朝辉,李彦伟,李蕊,等. 低碳多功能电气石改性沥青制备及性能研究[J]. 中国公路学报,2013,26(5):12-26.
WANG Chao-hui, LI Yan-wei, LI Rui, et al. Preparation of low-carbon environmental tourmaline modified asphalt and its performance evaluation [J]. China Journal of Highway and Transport, 2013, 26(5): 12-26. (in Chinese)
- [7] 冀志江. 电气石自极化及应用基础研究[D]. 北京:中国建筑材料科学研究院,2003.
JI Zhi-jiang. Studies on the spontaneous polarity of tourmaline and its applied foundation [D]. Beijing: China Building Materials Academy, 2003. (in Chinese)
- [8] 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)
- [9] 程源. 电气石处理重金属离子废水实验研究[J]. 武汉理工大学学报,2012,34(5):91-95.
CHENG Yuan. Experimental research of heavy metal ion wastewater treatment with tourmaline [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2012, 34(5): 91-95. (in Chinese)
- [10] 高如琴,黄豆豆,程萌,等. 电气石/硅藻土基内墙砖的制备及室内甲醛净化[J]. 硅酸盐通报,2012,31(6):1449-1456.
GAO Ru-qin, HUANG Dou-dou, CHENG Meng, et al. Preparation of tourmaline/diatomite inner wall tile and properties to formaldehyde purification [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2012, 31(6): 1449-1456. (in Chinese)
- [11] 康文杰,王秀峰,江红涛. 电气石类负离子释放功能材料研究进展[J]. 硅酸盐通报,2013,32(3):409-413.
KANG Wen-jie, WANG Xiu-feng, JIANG Hong-tao. Research development on anion releasing functional materials of tourmaline [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2013, 32(3): 409-413. (in Chinese)
- [12] 石鑫,王朝辉,李彦伟,等. 不同类型电气石改性沥青路用性能分析[J]. 交通运输工程学报,2013,13(2):1-8.
SHI Xin, WANG Chao-hui, LI Yan-wei, et al. Pavement performance analysis of asphalt modified by different types of tourmalines [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2013, 13(2): 1-8. (in Chinese)

