

伊朗岩沥青制备防腐涂料的试验研究

赵 苏¹, 穆翔宇¹, 张洪波²

(1. 沈阳建筑大学材料科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110168;

2. 沈阳师范大学实验中心, 辽宁 沈阳 110034)

[摘 要] 为了提高防腐涂料的耐腐蚀等性能并扩大伊朗岩沥青的应用范围,以基质沥青、伊朗岩沥青和环氧树脂作为成膜物质,辅以填料和各类助剂等其他成分,采用双组分工艺制备无溶剂型伊朗岩改性沥青防腐涂料,并采用交流阻抗测试、耐酸碱盐腐蚀性测试等对涂料的防腐性能进行了研究。结果表明:伊朗岩沥青在改性沥青中掺量为 15%时,改性沥青的综合性能较为优异;与石油沥青防腐涂料相比,制得的伊朗岩改性沥青防腐涂料的耐腐蚀性能有显著提升,其耐酸、碱、盐浸泡腐蚀时间延长 10 d 以上。伊朗岩沥青防腐涂料在常温下黏度较大,涂覆温度为 60 ℃左右时具有较好的涂覆效果。

[关键词] 伊朗岩沥青; 防腐涂料; 防腐性能

[中图分类号] TQ630.7 **[文献标识码]** A **doi:** 10.16577/j.issn.1001-1560.2022.0132

[文章编号] 1001-1560(2022)05-0106-07

Experimental Study on Anti-Corrosion Coating of Iranian Rock Asphalt

ZHAO Su¹, MU Xiang-yu¹, ZHANG Hong-bo²

(1.School of Materials Science and Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China;

2. Experimental Center of Shenyang Normal University, Shenyang 110034, China)

Abstract: In order to improve the corrosion resistance of anticorrosive coatings and expand the application scope of Iranian rock asphalt, solventless Iranian rock asphalt anticorrosive coatings were prepared through a two-component process using the matrix asphalt, Iranian rock asphalt and epoxy resin as film-forming materials with the addition of fillers, various additives and other components. The anti-corrosion properties of such coatings were studied through AC impedance test and acid, alkali and salt corrosion resistance test. Results showed that when the content of Iranian rock asphalt was 15%, the comprehensive properties of modified asphalt were best. The corrosion resistance of the prepared Iranian rock asphalt anticorrosive coating was much better than that of the petroleum asphalt anticorrosive coating. The corrosion resistance time to acid, alkali and salt immersion was prolonged by more than 10 days. The viscosity of Iranian rock asphalt anticorrosive coating was large at room temperature, and good coating effect was achieved when the coating temperature was about 60 ℃.

Key words: Iranian rock asphalt; anticorrosive coating; anticorrosion performance

0 前 言

伊朗岩沥青是一种天然岩石沥青,其沥青质含量相较于其他岩沥青处于较高水平。伊朗岩沥青的耐水损、耐候性好,附着力强,软化点高,无蜡,耐微生物腐蚀性强,可以作为石油沥青的改性剂使用^[1]。伊朗岩沥青的形貌和性质和美国 Gilsonite 较为接近,相比于布顿岩沥青和各类国产岩沥青,其灰分含量较少,软化点较高^[2]。伊朗岩沥青化学性质稳定,同大多数酸和碱都不发生反应,较高温度时性能稳定,耐腐蚀性强。

由于伊朗岩沥青价格相对较低,实际应用中以其替代部分基质沥青可以节约资源和成本。

目前市场上各类防腐涂料都存在不同的缺点,兼具环保、经济和耐腐蚀性的防腐涂料品种并不多。常见的防腐涂料包括环氧树脂类防腐涂料、聚氨酯类防腐涂料、沥青类防腐涂料等。其中沥青类的防腐涂料是市面上比较常见的一种防腐涂料,其主要是利用各类沥青组分制备涂料。我国的输油、输气等钢质埋地管线大部分采用环氧重防腐涂料作外防腐蚀材料^[3,4],包括环氧煤焦沥青、环氧石油沥青等涂料^[5]。例如王

[收稿日期] 2021-12-25

[通信作者] 赵 苏(1965-),博士,教授,主要研究方向为节能建筑材料,电话:13322433218,E-mail:zhaosu2005@126.com

广存^[6]制备的水性丙烯酸改性沥青铸管防腐涂料;刘小平等^[7]制备的无溶剂环氧煤焦沥青防腐涂料。但目前利用伊朗岩沥青制备防腐涂料的研究还未见报道;为了克服防腐涂料可能存在因溶剂滞留而产生的施工或涂层质量问题,以及煤焦沥青挥发气体具有毒性等问题,本工作以伊朗岩沥青和基质沥青制备无溶剂型防腐涂料,不但能极大程度地提高涂覆效率^[8],而且无毒环保,可以降低石油沥青用量,提高涂料防腐性能,从而降低制备成本并开发利用伊朗岩沥青资源,符合未来涂料的发展方向。

1 试 验

1.1 涂料的制备配方

采用双组分工艺制备无溶剂型伊朗岩改性沥青防腐涂料,其中成膜物质为伊朗岩改性沥青和环氧树脂,其中伊朗岩改性沥青是以基质沥青和伊朗岩沥青粉经适当改性后得到的,其它成分包括填料和各类辅助助剂等。

无溶剂型伊朗岩沥青防腐蚀涂料的基础配方(质量分数)^[8,9]如下:伊朗岩改性沥青 60.0%,环氧树脂 20.0%,环氧丙烷丁基醚 2.0%,润湿分散剂 0.5%~1.0%,马来酸二辛酯 2.0%~3.0%,有机硅消泡剂 0.5%~1.0%,滑石粉 5.0%,固化剂 10.0%。除固化剂外其余组分为甲组分,固化剂(改性胺 T31)为乙组分。基质沥青和伊朗岩沥青性能指标见表 1、表 2。

表 1 基质沥青(辽河 A-90 沥青)性能指标

Table 1 Property performance index of substrate asphalt (Liaohe A-90 asphalt)

项目	针入度/0.1 mm	软化点/℃	延度/cm
技术要求	80~100	≥44	≥100
试验结果	82.8	45.0	105.8
试验方法	T0604-2011	T0606-2011	T0605-2011

注:针入度在 25 ℃ 条件下测试,延度在 15 ℃ 条件下测试。

表 2 伊朗岩沥青性能指标

Table 2 Property performance of Iranian rock asphalt

组分	占比/%	组分	占比/%
灰分	4.90	氢	6.90
固定碳	29.80	硫	3.50
碳	79.20	氮	0.81

1.2 涂料的制备步骤

(1)将基质沥青加热到 120~140 ℃ 至熔融态,缓慢加入占伊朗岩改性沥青 15%(质量分数)伊朗岩沥青

粉,在 130~150 ℃ 条件下持续搅拌 40~60 min,使二者均匀混合制得伊朗岩改性沥青。

(2)取环氧丙烷丁基醚加入环氧树脂中,加热至 65 ℃,持续搅拌至体系均匀,制得环氧树脂混合液;将制得的环氧树脂混合液加入伊朗岩改性沥青中,90~110 ℃ 下持续搅拌 30 min;再按比例依次加入马来酸二辛酯和滑石粉,继续搅拌 30 min;最后加入润湿分散剂等助剂,继续搅拌均匀后停止加热制得甲组分。

(3)在一定温度下以 10:1(质量比)的比例混合甲乙组分,即完成了伊朗岩改性沥青防腐涂料的制备。

将制得的涂料涂覆在经过处理的马口铁上,尺寸为 100 mm×60 mm×3 mm,常温下干燥 7 d 以上,确保涂料完全干燥,再进行相关性能测试。

1.3 涂料的性能测试

(1)交流阻抗测试 使用 Autolab PGSTAT30 型电化学工作站进行交流阻抗测试。检测条件为:3.5%(质量分数,下同)NaCl 溶液作为电解质溶液,涂层试片为工作电极,铂电极为辅助电极,饱和甘汞电极为参比电极。测试频率为 $1.0\times(10^{-1}\sim10^6)$ Hz、交流正弦振幅为 5 mV。

(2)耐化学腐蚀性测试 按 GB/T 1763-1979 的规定,在温度为(25±2) ℃ 的条件下,先用 1:1(质量比)的松香和石蜡混合物对涂有涂料的试样封边,将试样分别放入 3%NaCl 溶液/10%H₂SO₄ 溶液/10%NaOH 溶液中,使得溶液中试样长度的三分之二浸泡其内,观察涂料试样是否有变色、失光、起泡、发白、脱落、生锈、软化等现象以及恢复原状态的程度,并记录试样发生的变化(如起泡、鼓泡等)的时间。

2 结果与讨论

2.1 伊朗岩沥青掺量的确定

伊朗岩沥青用于沥青防腐涂料与石油沥青共混,可起到改性剂的作用,使基质沥青的耐候性、耐腐蚀性以及高温性能得到显著改善;同时改性沥青的抗紫外线辐射和耐候性较好,抵抗微生物侵蚀作用变强,沥青老化时间延长^[10]。根据文献报道^[11,12],利用伊朗岩沥青对基质沥青进行改性制备伊朗岩改性沥青时,伊朗岩沥青在伊朗岩改性沥青中的添加范围通常在 10%~20%,因此,试验将伊朗岩沥青在伊朗岩改性沥青中的掺量范围设定为 0~20%。与基质沥青共混,对伊朗岩沥青掺量进行单因素实验。

2.1.1 伊朗岩沥青掺量对改性沥青针入度的影响

针入度作为评价沥青物理性能的 3 大指标之一^[13],表征了沥青的软硬程度和抵抗剪切变形的能力,其值越大表示沥青黏性越小,高温性能越差;反之则表示沥青黏性越大,高温性能越好^[14]。利用 DF-4 型智能数显沥青针入度仪测定沥青的针入度,图 1 为改性沥青在不同温度条件下的针入度。

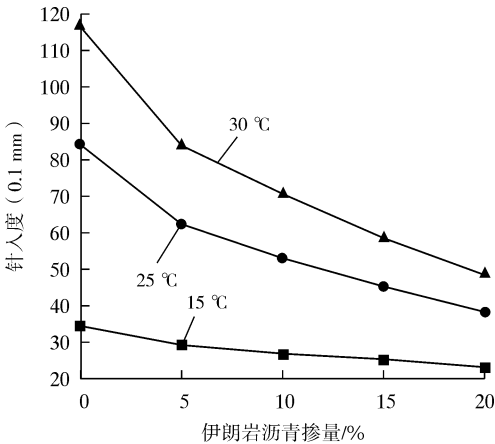


图 1 伊朗岩沥青掺量对改性沥青针入度的影响
Fig. 1 Effect of Iranian rock asphalt content on the penetration of modified asphalt

由图 1 可以看出,相同温度条件下,伊朗岩沥青掺量越多,伊朗岩改性沥青的针入度越小,高温抗变形能力随之增强。

根据线性公式式(1):

lgP=A×T+K (1)

其中 T 为针入度实验温度(15 °C、25 °C、30 °C),P 为伊朗岩改性沥青在实验温度条件下的针入度,K 为回归参数,A 为回归直线斜率,即感温系数。

将 A 值代入式(2):

PI = (20 - 500A) / (1 + 50A) (2)

可得到针入度指数 PI。在一定范围内,A 值越大,PI 值越小,沥青对温度的敏感程度就变大,沥青性能就会随之降低。分别对 5 种不同伊朗岩沥青掺量的改性沥青进行线性回归计算,得出沥青的针入度指数 PI,结果见表 3。由表 3 可知,对比基质沥青,伊朗岩沥青掺量从 0~20%按照 5%依次增加时,其针入度指数相应增加了 0.55、0.82、1.46 和 1.91(与掺量为 0 时相比)。由于伊朗岩沥青的沥青质占比较高,随着其掺量的增加,改性沥青中的沥青质含量不断增加,导致改性沥青中沥青质胶质比例增加,破坏了体系中胶质分子化学位的平衡,造成胶质分子从沥青质的表面脱附^[15],当其在沥青质上的吸附量下降到不足以覆盖沥青质的表面时,沥

青质分子表面上的活性位置就相互吸引而聚集成为更大的颗粒,增加了其极性,从而提高了沥青的抗高温变形能力。

表 3 改性沥青线性回归结果分析

Table 3 Results analysis of modified asphalt linear regression

伊朗岩沥青掺量/%	A	K	R ²	PI
0	0.044 3	0.761 4	0.990 8	-0.67
5	0.040 7	0.705 4	0.993 0	-0.12
10	0.039 1	0.659 9	0.993 9	0.15
15	0.035 6	0.663 0	0.995 5	0.79
20	0.033 4	0.624 1	0.998 1	1.24

2.1.2 伊朗岩沥青掺量对改性沥青软化点的影响

沥青的软化点实际上是一个人为选定的沥青在由固态到液态转变的条件黏度下的温度范围,用于表征沥青对温度的敏感性。沥青软化点越高,其高温稳定性越好。利用 DF-5 型电脑全自动沥青软化点仪测定沥青的软化点,见图 2。

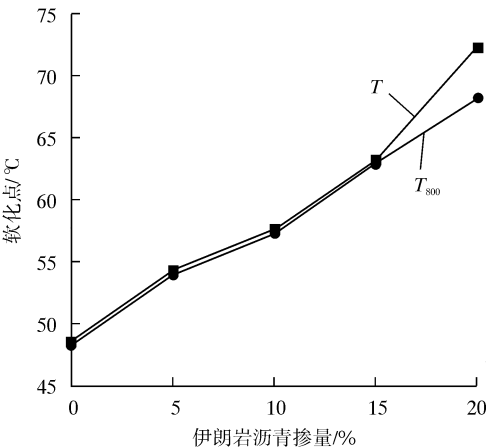


图 2 沥青软化点试验结果
Fig. 2 Test results of asphalt softening point

由图 2 可知,伊朗岩沥青掺量为 0、5%、10%、15% 和 20%时,其软化点分别为 48.7、54.4、57.7、63.3、72.3 °C。根据式(3):

T = (lg800 - K) / A = (2.903 1 - K) / A (3)

带入表 3 中数据,计算得到当量软化点 T₈₀₀(当量软化点 T₈₀₀是相对于沥青针入度为 800 时的温度,用来对比沥青中蜡对软化点测试结果的影响),与计算所得的当量软化点 T₈₀₀对比,二者结果基本一致,这证明了沥青中的蜡含量极少,基本未对软化点的试验值造成影响。由图 2 中曲线变化趋势可知,随着伊朗岩沥青的掺入,改性沥青的软化点逐渐增加,说明伊朗岩沥青提高了

基质沥青的抗高温变形能力,这与其针入度试验结果一致。这主要是因为伊朗岩沥青长年暴露在自然环境条件下,经过了漫长的日照和风化等一系列复杂的转变,其沥青质与胶质之比大于基质沥青,伊朗岩沥青加入到基质沥青中后,基质沥青中的一些轻质油分和饱和分被伊朗岩沥青吸收,从而改变基质沥青原有成分的比例,提升沥青黏度,增强改性沥青的热稳定性^[16]。

2.1.3 伊朗岩沥青掺量对改性沥青延度的影响

通常用延度试验来测试沥青的低温延展性^[13],延度是评价沥青低温性能的一项重要技术指标。利用 SY-1.5 型数显恒温沥青延度仪测定沥青的延度,得到图 3。由图 3 可知,改性沥青的 5℃延度与伊朗岩沥青掺量成反比,其中伊朗岩沥青掺量从 0 增加到 5%时,改性沥青的延度急剧下降,这主要是因为其改变了基质沥青的黏、弹比例,致使沥青组分的相态转变加快,玻璃化转变组分增加,从而使沥青分子链之间更容易发生断裂,沥青的脆性增加。当伊朗岩沥青掺量继续增加时,由于沥青玻璃化转变组分含量基本达到峰值,改性沥青的延度已经到达较低值,所以延度的变化幅度相对较小。

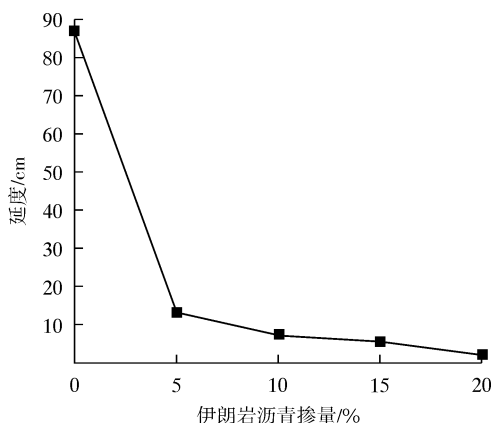


图3 5℃下沥青延度试验结果

Fig. 3 Test results of asphalt ductility at 5℃

根据改性沥青的针入度、软化点测试结果可知,伊朗岩沥青掺量越高,改性沥青的高温性能越好,综合延度测试结果,确定伊朗岩沥青的较优掺量为 15%。同时为解决改性沥青延度较低、脆性大、低温性能较差的问题,在后续涂料制备过程中,采用添加增韧剂的方式来改善其低温性能,以达到防腐涂料所需的性能要求。

2.2 伊朗岩沥青及改性沥青的红外光谱

采用 NEXUS470 型傅里叶变换红外光谱仪测试伊朗岩沥青、基质沥青及改性沥青的红外光谱,采用溴化钾压片法制样,伊朗岩沥青粉末与溴化钾粉末质量之

比为 1 : 200,测试范围为 500~4 000 cm^{-1} 。伊朗岩沥青的红外光谱见图 4。图 4 中 677~890 cm^{-1} 之间主要是 C-H 的弯曲振动吸收峰,属于芳香环的振动,说明伊朗岩沥青与石油沥青一样具有芳香类成分;1 028 cm^{-1} 处为环丙烷环的振动吸收峰;1 100~1 300 cm^{-1} 之间为芳香环中的 C-O 的振动;1 456 cm^{-1} 附近为 CO_3^{2-} 中 C=O 的伸缩振动吸收峰;1 629 cm^{-1} 处为芳香环中 C=C 苯环骨架的振动吸收峰;2 846~2 928 cm^{-1} 处为 CH_2 基团的碳氢键的拉伸振动;由 OH 拉伸振动引起的宽吸收带主要集中在 3 442 cm^{-1} 处。以上分析说明,伊朗岩沥青主要由羰基、不饱和碳链、碳酸盐等组成。此外,伊朗岩沥青中沥青质杂原子基团含量高、芳香性强、极性大,可以有效提高沥青的吸附能力,从而可提高沥青的抗水剥离能力^[11]。

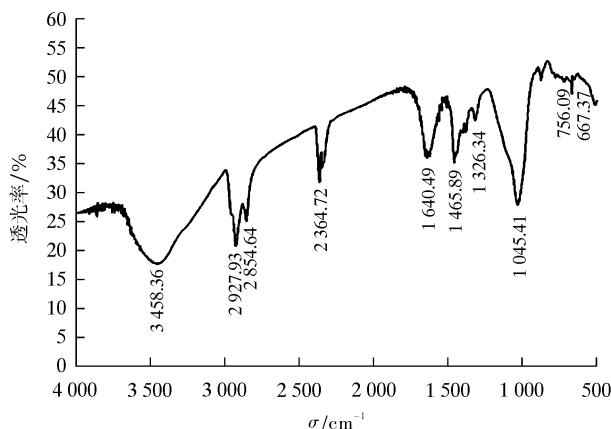


图4 伊朗岩沥青的红外光谱

Fig. 4 IR spectrum of Iranian rock asphalt

再将伊朗岩沥青掺量为 15% 的伊朗岩改性沥青和基质沥青分别用三氯乙烯溶解,涂于溴化钾压片上,做红外光谱测试,并与图 4 对比,结果如图 5 所示。

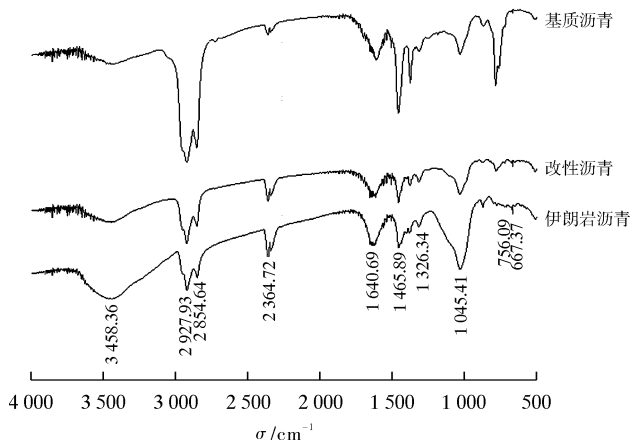


图5 红外光谱叠加图

Fig. 5 Infrared spectra overlay chart

由图 5 分析可知,改性前后伊朗岩沥青的化学键

没有出现消失和明显的减弱,且峰位也没有出现较大的位移,说明伊朗岩沥青对基质沥青的改性过程没有新的官能团生产,仅为物理共混。

2.3 伊朗岩改性沥青防腐涂料的性能

2.3.1 伊朗岩改性沥青防腐涂料的涂覆温度

由于制备的伊朗岩改性沥青防腐涂料为无溶剂涂料,常温时黏度较大,因此应在合适的温度条件下进行固化和涂覆。图 6 为甲组分的黏度随温度变化的曲线,在温度从 30 ℃ 升至 45 ℃ 的过程中,甲组分黏度下降较快,50 ℃ 之后,黏度下降幅度较小,从便于施工及节约能源角度,涂覆温度为 60 ℃ 左右较好,能达到较好的涂覆效果。

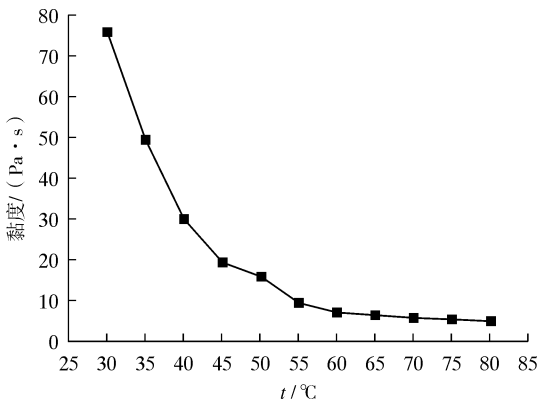


图 6 甲组分黏度试验结果
Fig. 6 Viscosity test results of component A

2.3.2 伊朗岩改性沥青防腐涂料的耐酸、碱、盐性能

按照相同配方及实验方法,控制单因素变量,与不添加伊朗岩沥青制备普通石油沥青防腐涂料进行对比实验。伊朗岩沥青防腐涂料与石油沥青防腐涂料的耐酸、碱、盐性能测试结果见表 4 所示。

表 4 伊朗岩改性沥青防腐涂料耐腐蚀性对比

Table 4 Comparison of corrosion resistance of Iranian rock modified asphalt anti-corrosive coating				
天数/d	涂料	耐 3%NaCl	耐 10%NaOH	耐 10%H ₂ SO ₄
7	A	完好	完好	完好
	B	完好	完好	完好
15	A	完好	完好	完好
	B	完好	起泡	完好
20	A	完好	完好	完好
	B	起泡	鼓泡	起泡
30	A	起泡	起泡	完好
	B	鼓泡	-	鼓泡

注:A 为伊朗岩改性沥青防腐涂料,B 为未添加伊朗岩沥青的石油沥青防腐涂料。

由表 4 可知,伊朗岩改性沥青防腐涂料相较于未添加伊朗岩沥青的石油防腐涂料,其在耐酸、碱、盐各方面都有明显的性能提升。这是由于伊朗岩沥青的添加使涂料形成的膜层更为致密,从而减缓和阻止侵蚀离子的进入。

2.3.3 伊朗岩改性沥青防腐涂料的交流阻抗测试

图 7 与图 8 为石油沥青防腐涂料与伊朗岩改性沥青防腐涂料的交流阻抗测试谱。在图 7 和图 8 交流阻抗谱中,首个圆弧半径为电荷传递电阻,可以作为判断涂层防腐性能的指标^[17]。由图 7 和图 8 可知伊朗岩改性沥青防腐涂料的阻抗值大于石油沥青防腐涂料的阻抗值,说明在相同测试条件下,伊朗岩沥青的加入显著提高了涂料的防腐性能,这也验证了 2 种涂料的酸、碱、盐浸泡试验结果的可靠性。

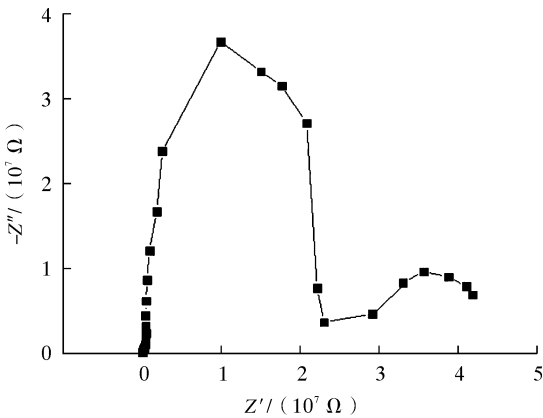


图 7 石油沥青防腐涂料的交流阻抗谱
Fig. 7 AC impedance spectrum of petroleum asphalt anti-corrosive coating

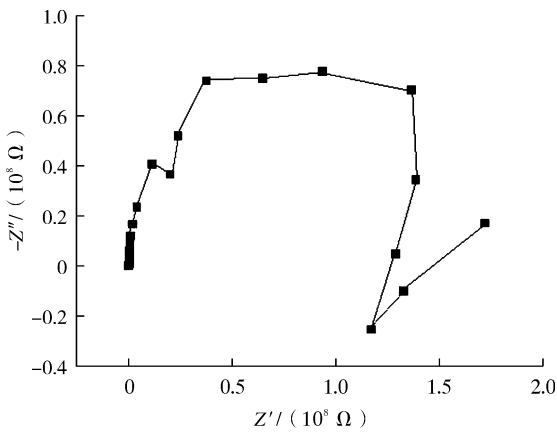


图 8 伊朗岩改性沥青防腐涂料的交流阻抗谱
Fig. 8 AC impedance spectrum of Iranian rock modified asphalt anti-corrosive coating

3.3.4 涂料技术指标及测试结果

伊朗岩改性沥青防腐涂料综合性能测试结果如表 5 所示。

表 5 涂料技术指标及测试结果

Table 5 Technical indexes and test results of coatings			
测试项目	测试结果	标准要求	测试方法
涂膜外观	黑色,有光泽	-	GB 1729-2011
干燥时间/h	表干	≤ 0.5	GB/T 1728-1979
	实干	≤4	
硬度	H	≥H	GB/T 6739-2006
抗冲击性/cm	52	≥ 50	GB/T 1732-93
柔韧性能/mm	0.5	≤1	GB/T 6742-2007
附着力/级	1	≤1	GB/T 1720-1989
黏度/(Pa·s)	228	200~300	T0621(JTG E200)
固体分/%	99	≥90	GB/T 1725-1979
耐水性(30 d)	涂膜无变化	涂膜无变化	GB/T 1733-1993
耐酸性(浸泡 10% H ₂ SO ₄ 溶液 7 d)	涂膜无变化	涂膜无变化	GB/T 1763-1979
耐碱性(浸泡 10% NaOH 溶液 7 d)	涂膜无变化	涂膜无变化	GB/T 1763-1979
耐盐水性(浸泡 3% NaCl 溶液 7 d)	涂膜无变化	涂膜无变化	GB/T 1763-1979
针入度/0.1 mm	41.2	≤60	JTGE 20-2011
软化点/℃	68.4	≥ 45	JTGE 20-2011
延度/cm	14.5	-	JTGE 20-2011

3 结 论

(1)改性沥青的针入度、软化点测试结果显示,伊朗岩沥青掺量越高,改性沥青的高温性能越好,综合延度测试结果,确定伊朗岩沥青的较优掺量为 15%。红外光谱测试结果表明伊朗岩沥青对基质沥青的掺入仅为简单的物理共混,不存在化学变化。

(2)制备的伊朗岩改性沥青防腐涂料为无溶剂涂料,在常温下黏度较大,涂覆温度为 60 ℃左右时具有较好的涂覆效果。

(3)相对于石油沥青防腐涂料,伊朗岩改性沥青防腐涂料的耐腐蚀性更加优异,伊朗岩沥青的添加显著提高了涂料的耐酸、碱、盐腐蚀性,使涂料耐酸、碱、盐腐蚀时间延长 10 d 以上。

(4)本工作制备的伊朗岩改性沥青防腐涂料减少了石油沥青的使用量,一定程度上节约了资源和成本,涂料的基本性能符合相关标准和规范的要求。

[参 考 文 献]

[1] 申全军,马士杰.天然岩沥青在道路工程中的应用:全国石油沥青技术交流会[C].无锡:第十次全国石油沥青技术交流会论文集,2006:77-88.

SHEN Q J, MA S J. Application of Natural Rock Asphalt in road engineering: National Petroleum Asphalt Technology Exchange Conference [C]. Wuxi: Proceedings of the 10th National Petroleum Asphalt Technology Exchange Conference, 2006: 77-88.

[2] 孙秋健,车淳万.伊朗天然岩沥青的共混性与其化学组成的关系[J].石油沥青,2012,26(5):64-67.

SUN Q J, CHE C W. Relationship of Iranian rockasphalt's applicability of pre - mixing with its chemical composition [J]. Petroleum Asphalt, 2012, 26(5): 64-67.

[3] LEGGHE E, ARAGON E, Bélec L, et al. Correlation between water diffusion and adhesion loss: Study of an epoxy primer on steel[J]. Progress in Organic Coatings, 2009, 66(3): 276-280.

[4] 张剑飞,李博文,陈玉滨.新型管道重防腐环氧粉末涂料的研制与应用[J].现代涂料与涂装,2013,16(2):22-24.

ZHANG J F, LI B W, CHEN Y B. Development and application of a new type of heavy-duty anti-corrosion epoxy powder coating for pipelines [J]. Modern Paint and Finishing, 2013, 16(2): 22-24.

[5] 李瑞超,梁成浩,黄乃宝,等.土壤中氯离子对无溶剂环氧石油沥青涂层的腐蚀行为[J].大连海事大学学报,2016,42(2):124-128.

LI R C, DONG C H, HUANG N B, et al. Corrosion behavior of solvent-free epoxidized petroleum asphalt coatings by chloride ions in soil[J]. Journal of Dalian Maritime University, 2016, 42(2): 124-128.

[6] 王广存.水性丙烯酸改性沥青铸管防腐涂料的研发[J].中国石油和化工标准与质量,2020,40(4):98-99.

WANG G C. Research and development of water-based acrylic modified bitumen anti-corrosion coating for cast pipes [J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2020, 40(4): 98-99.

[7] 刘小平,李泉明,杨雪梅.无溶剂环氧煤焦沥青防腐涂料[J].涂料工业,1998(5):33-36.

LIU X P, LI Q M, YANG X M. Solvent-free epoxy coal tar pitch anticorrosive coating[J]. Paint Coatings Industry, 1998(5): 33-36.

[8] 陈群尧,李杰,李红旗,等.无溶剂双组分热喷快固化防腐涂料的研制与应用[J].涂料工业,1998(8):3-5.

CHEN Q Y, LI J, LI H Q, et al. Development and application of solvent-free two-component thermal spray fast-curing anti-corrosion coating [J]. Paint Coatings Industry, 1998(8): 3-5.

[9] 赵苏,涂旭,魏巍,等.布敦岩沥青防腐蚀涂料的制备与性能[J].材料保护,2016,49(6):54-59.

ZHAO S, TU X, WEI W, et al. Preparation and properties

- of Buton Rock asphalt anticorrosion coatings[J]. Materials Protection, 2016, 49(6): 54-59.
- [10] WEN T H, GUO Y X. Experimental Study of High Temperature Properties and Rheological Behavior of Iranian Rock Asphalt[J]. Advanced Materials Research, 2013, 671-674 (2): 1 277-1 281.
- [11] 张国庆. 基于经济性能分析的岩沥青合理掺量研究[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2013, 9(4): 56-59.
- ZHANG G Q. Study on reasonable content of rock asphalt based on economic performance analysis [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development (Applied Technology Edition), 2013, 9(4): 56-59.
- [12] 曾梦澜, 陈伟, 朱艳贵, 等. 布敦岩沥青湿法工艺掺量对改性沥青混合料性能的影响[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2018, 45(11): 94-101.
- ZENG M L, CHEN W, ZHU Y G, et al. Effects of Proportion of Buton Rock Asphalt on Performance of Modified Asphalt Mixture with Wet Method[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2018, 45(11): 94-101.
- [13] 交通部公路科学研究所编. 公路工程沥青及沥青混合料试验规程[M]. 北京: 人民交通出版社, 1984.
- Compiled by the Institute of Highway Science, Ministry of Communications. Specification for test of asphalt and asphalt mixture for highway engineering[M]. Beijing: China Communications Press, 1984.
- [14] 万贵稳, 陈美祝, 柳景祥, 等. 废食用油与废润滑油对老化沥青物理与流变特性影响的对比研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2018, 42(1): 7-11.
- WANG G W, CHEN M Z, LIU J X, et al. Comparative study on the effects of waste cooking oil and waste lubricating oil on the physical and rheological properties of aged asphalt [J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2018, 42(1): 7-11.
- [15] 华敏. 天然沥青对基质石油沥青改性机理研究[D]. 西安: 长安大学, 2008.
- HUA M. Study on Modification Mechanism of Natural Asphalt to Matrix Petroleum Asphalt[D]. Xi'an: Chang'an University, 2008.
- [16] 金鑫, 郭乃胜, 孙思威, 等. 伊朗岩沥青改性沥青的微观特性及性能[J]. 建筑材料学报, 2021, 24(6): 1 265-1 270.
- JIN X, GUO N S, SUN S W, et al. Microstructure Characteristic and Properties of Iranian Rock Asphalt Modified Asphalt[J]. Journal of Building Materials, 2021, 24(6): 1 265-1 270.
- [17] 谭晓晶. 石墨烯重度防腐涂料的试验研究[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2019.
- TAN X J. Experimental Study on Graphene Heavy Anticorrosive Coating. [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2019.

[编校: 宋媛]

(上接第 105 页)

- [15] SHENG K, GE H H, HUANG X, et al. Formation and Inhibition of Calcium Carbonate Crystals under Cathodic Polarization Conditions[J]. Crystals, 2020, 10(4): 275-283.
- [16] 胡世平, 李建平, 谢志平, 等. 柠檬酸根对 Ba^{2+} 、 Ca^{2+} 的阻垢性能研究[J]. 石油化工高等学校学报, 2017, 30(2): 29-33.
- HU S P, LI J P, XIE Z P, et al. Research about Scale Inhibition of Citrate on Ba^{2+} and Ca^{2+} [J]. Journal of Petrochemical Universities, 2017, 30(2): 29-33.
- [17] 黎四芳, 李红. N-月桂酰肌氨酸钠及其复配物的缓蚀性能[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2008(4): 289-291.
- LI S F, LI H. Corrosion Inhibition Performances of Sodium-Lauroyl Sarcosinate and its Composites[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2008(4): 289-291.
- [18] 刘金华, 姜峨, 龚宾, 等. 甲基苯骈三氮唑和磷酸钠对铜及不锈钢的缓蚀性能研究[J]. 原子能科学技术, 2013, 47(12): 2 195-2 201.
- LIU J H, JIANG E, GONG B, et al. Corrosion Inhibition Properties of TTA and Phosphate on Copper and Stainless Steel[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2013, 47(12): 2 195-2 201.
- [19] 崔凯. 烷基环氧羧酸盐的合成及羧酸官能团静态阻垢性能的研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2016.
- CUI K. Synthesis of alkyl epoxy carboxylate and Study on static and dynamic scale inhibition performance of carboxylic acid functional groups [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2016.
- [20] CHOI D J, YOU S J, KIM J G. Development of an environmentally safe corrosion, scale, and microorganism inhibitor for open recirculating cooling systems[J]. Materials Science & Engineering A, 2002, 335(1): 228-235.
- [21] ZHANG B R, HE C J, WANG C, et al. Synergistic corrosion inhibition of environment-friendly inhibitors on the corrosion of carbon steel in soft water[J]. Corrosion Science, 2015, 94: 6-20.

[编校: 宋媛]