

铁尾矿沥青混凝土性能研究和红外光谱分析

王丽¹, 王有涛^{2,3}, 程和平⁴

(1. 内江职业技术学院土木工程系, 四川 内江 641000; 2. 贵州省遵义公路管理局, 贵州 遵义 563000; 3. 辽宁工程技术大学土木工程学院, 辽宁 阜新 123000; 4. 常州工程职业技术学院建筑工程学院, 江苏 常州 213164)

摘要: 这是一篇陶瓷及复合材料领域的论文。本文分析了不同铁尾矿掺量的沥青混合料的性能, 并对沥青混合料的抵抗车辙性能、水稳定性、抗裂性能进行分析, 进而验证铁尾矿应用于低等级道路中面层的可行性。结果表明: 弯拉强度在掺量从 20% 到 40% 时下降幅度较大; 浸水残留稳定度在掺量为 20% 后增长幅度开始下降。随着铁尾矿掺量不断增大, 铁尾矿沥青混凝土 FT-IR 图谱在局部出现了较小的、新的吸收峰且对原有吸收峰也出现了增强, 这说明了掺入铁尾矿后, 沥青混凝土与其发生了化学反应, 且改变了原有沥青内部结构, 进而会产生新的官能团。随着铁尾矿掺量不断增大, 铁尾矿沥青混凝土沥青环烷烃和烷烃 C-H 官能团面积占比却呈现出先增大后减小的趋势, 且铁尾矿掺量为 20% 时, 沥青环烷烃和烷烃 C-H 官能团面积占比达到较大。

关键词: 陶瓷及复合材料; 铁尾矿; 抗车辙性能; 水稳定性; 抗裂性能; 吸收峰

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2024.03.022

中图分类号: TD926; TU31 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532 (2024) 03-0143-07

引用格式: 王丽, 王有涛, 程和平. 铁尾矿沥青混凝土性能研究和红外光谱分析[J]. 矿产综合利用, 2024, 45(3): 143-149.

WANG Li, WANG Youtao, CHENG Heping. Performance research and infrared spectroscopy analysis of asphalt concrete with iron tailings[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2024, 45(3): 143-149.

随着我国城市化不断推进与经济的快速发展, 城市内一些道路已经不能满足通行要求和路面材料已经出现无法修补的病害, 故需要对原有道路进行修补、拓宽和新建, 而城市内的新建道路、修补路面都需要用到沥青混凝土, 在制备沥青混凝土路面时不仅需要沥青材料, 也需要用到一定级配组成的碎石等材料^[1]。但碎石材料都采用天然的石料, 不仅不符合现有绿色发展的战略方针, 且过度开采天然石料也会破坏生态环境, 甚至在局部地区会导致水土流失等自然灾害。因此, 急需寻找一种新的矿物材料来代替天然石料作为沥青混凝土的集料, 这样也符合我国现在也提倡固废利用、走绿色材料发展道路^[2]。

作为开采矿物资源附属矿产废料的尾矿, 一般处理方式都是采取集中堆积、填埋等, 这样的

处理方式不仅会占据大量的土地资源, 而且铁尾矿长期存放也会对当地的生态环境带来严重的影响以及存在一定的安全隐患^[3-4]。其中, 将尾矿进行处理后运用到低等级公路沥青混合料中也越来越广泛, 这样不仅提升了尾矿的利用范围, 也符合绿色交通的发展方针^[5]。

学者在尾矿运用在沥青混合料中的研究取得较为丰硕的成果。胡超等^[6]通过将高岭土黏土矿物研磨成纳米级别的颗粒材料, 制备了改性高岭土的沥青混合料, 并对其路用性能进行了分析。张铁志等^[7]分析了掺加铁尾矿对两种不同沥青集料路用性能的影响, 发现适当掺加铁尾矿沥青混凝土的路面可以有效地提升沥青混凝土的路用性质。李军等^[8]采用铁尾矿制备的沥青混凝土作为路基层面底面结构材料, 发现该材料可以较好地

收稿日期: 2022-08-29

作者简介: 王丽 (1986-), 女, 讲师, 从事建筑工程技术, 建筑工程管理, 道路与桥梁工程专业的教学研究。

提升路基的刚度以及路面的抗拉强度。上述研究成果说明将铁尾矿沥青混合料用于公路工程中合适可行。

以往研究只是采用铁尾矿作为沥青混凝土的骨料,研究铁尾矿掺量对沥青混凝土性能的影响,对不同铁尾矿掺量作用下沥青混凝土官能团面积占比与红外光谱的变化规律研究较少。本文将通过沥青混合料的马歇尔稳定度、流值、空隙率、饱和度等指标,来确定较佳铁尾矿掺量,并对沥青混合料的抵抗车辙性能、水稳定性、抗裂性能进行分析,进而验证铁尾矿骨料沥青混凝土应用于低等级道路中面层的可行性。

1 原材料基本性质

对于铁尾矿取自鞍山市内某铁矿区,采用不同粒径的筛子对该铁尾矿进行级配实验。该铁尾矿的级配曲线见图1。

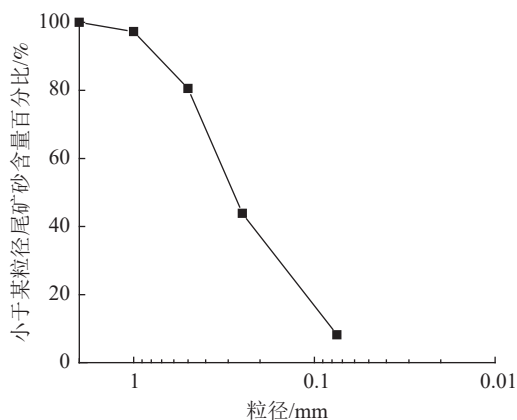


图1 该铁尾矿的集配曲线
Fig.1 Distribution curve of the iron tailings

细骨料选取当地砂场的中砂,其技术指标如下:表观密度为 2570 kg/m^3 ,最大粒径为 4.54 mm ,细度模数为 2.70 ,吸水率为 1.02% 。矿粉选用 S95 级,该矿粉的碳酸钙质量分数为 98% 。沥青为 90# 国标沥青,其技术指标见表1。

铁尾矿沥青混凝土制备方法:国内外在研究沥青混合料性能时根据实验方法不同,选用的试件制备方式各不相同。本研究仍采用马歇尔法成型标准马歇尔试件,该试件制备可按《公路工程沥青及沥青混合料规程》的要求,试件直径为 101.6 mm ,高度为 $(63.5 \pm 1.3) \text{ mm}$,采用重型击实和轻型击实两种,即双面击实各 75 次和 50 次。马歇尔实验和残留稳定度实验采用双面击

表1 90# 国标沥青的技术指标
Table 1 Technical indicators of 90# national standard asphalt

检测指标	规范要求	实验结果
针入度 (25 °C, 100 g, 5 s) / (0.1 mm)	60~80	68.0
延度 (5 cm/min, 5 °C) / cm	≥30	38.0
软化点/°C	≥55	74.5
180 °C/135 °C粘度/(Pa·s)	≤3.0	1.55
TFOT 后残留物 (163 °C, 5 h)	质量变化/%	≤±1.0
	针入度比/%	≥60
	延度 (5 °C) / %	≥20

实次,对冻融劈裂实验采用双面击实 50 次。

2 沥青混合料的沥青用量确定

将沥青用量选定为 3%、4%、5%、6% 和 7% 五种,铁尾矿的掺量设定为 0、10%、20%、30% 和 40% 五种,分析不同铁尾矿掺量、不同沥青用量沥青混合料的毛体积密度、稳定度与流值的变化规律。

2.1 沥青混合料的毛体积密度

按照《公路工程集料实验规程》(JTG E42—2005)中的要求,采用网篮法对沥青混合料的毛体积密度进行测定^[9],绘制出不同沥青掺量作用下沥青混合料毛体积密度的变化规律见图2。

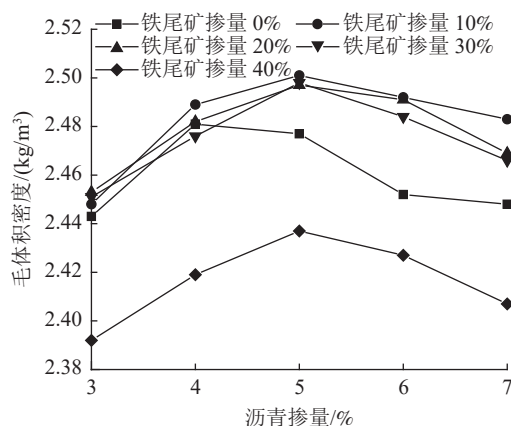


图2 沥青混合料毛体积密度的变化规律
Fig.2 Variation law of asphalt mixture gross bulk density

由图2可知,随着沥青掺量的不断增大,沥青混合料的毛体积密度的变化规律呈现出先增大后减小的趋势,且在沥青掺量为 5% 时达到极大值。

2.2 沥青混合料的稳定度

根据《公路工程沥青及沥青混合料实验规程》(JTG E20—2011),对沥青混合料的稳定度

进行测定，绘制出不同沥青掺量掺量作用下沥青混合料稳定度的变化规律见图3。

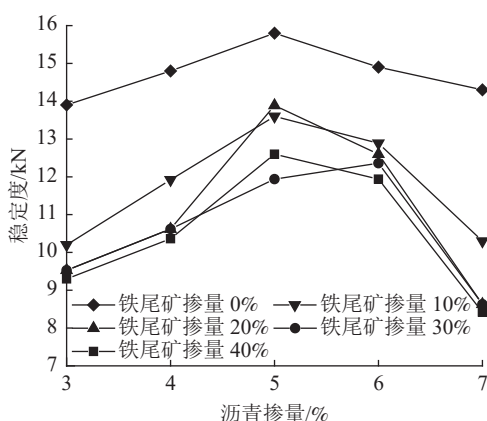


图3 沥青混合料稳定度的变化规律
Fig.3 Variation law of asphalt mixture stability

由图3可知，随着沥青掺量的不断增大，沥青混合料稳定度的变化规律呈现出先增大后减小的趋势，且在沥青掺量为5%时达到了极大值，这说明了随着沥青用量的增大，沥青混合料表面的沥青膜厚度也不断增大，使得混合料的内部粘结力不断增大以及混合料的高温稳定性也增大；但是随着沥青用量的持续增多，沥青混合料表面的沥青膜厚度也持续增厚，而混合料中自由沥青的含量增大，这会导致沥青混合料的润滑能力增强且颗粒之间更容易发生错动滑移，最终沥青混合料稳定度的下降。

2.3 沥青混合料的流值

根据《公路工程沥青及沥青混合料实验规程》（JTGE20-2011），对沥青混合料的流值进行测定，绘制出不同沥青掺量掺量作用下沥青混合料流值的变化规律见图4。

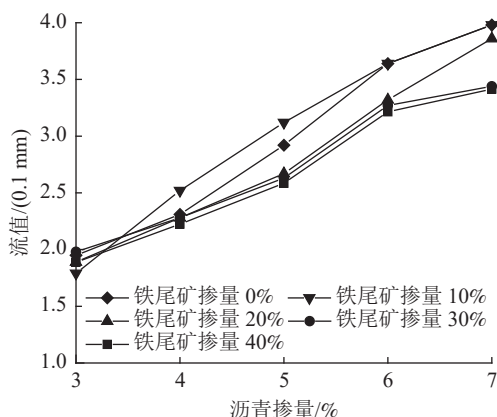


图4 沥青混合料流值的变化规律
Fig.4 Variation law of asphalt mixture flow value

由图4可知，随着沥青掺量不断增大，沥青混合料流值的变化规律呈现出逐渐增大的趋势，这是由于随着沥青用量的增多，混合料中增多的自由沥青量使得混合料内部颗粒之间更加容易发生错动滑移。因此，沥青混合料试件在受压时，混合料达到破坏点时的垂直变形量也就越大。

2.4 沥青混合料的空隙率

根据《公路工程沥青及沥青混合料实验规程》（JTGE20-2011），对沥青混合料的空隙率进行测定，绘制出不同沥青掺量和铁尾矿掺量作用下沥青混合料空隙率的变化规律见图5。

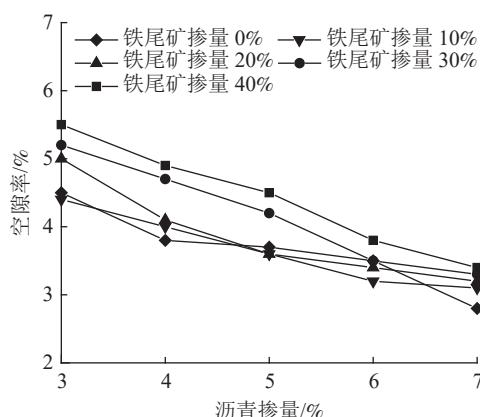


图5 沥青混合料空隙率的变化规律
Fig.5 Variation law of asphalt mixture porosity

由图5可知，随着沥青掺量不断增大，沥青混合料空隙率的变化规律呈现出逐渐减小的趋势，且铁尾矿沥青混凝土空隙率减小的幅度也逐渐平稳。

2.5 沥青混合料的饱和度

沥青饱和度是指压实沥青混合料试件中沥青实体体积占矿料骨架实体以外的空间体积的百分率。根据《公路工程沥青及沥青混合料实验规程》（JTGE20—2011），对沥青混合料的饱和度进行测定，绘制出不同沥青掺量和铁尾矿掺量作用下沥青混合料饱和度的变化规律见图6。

由图6可知，随着沥青掺量不断增大，沥青混合料饱和度的变化规律呈现出逐渐增大的趋势。沥青饱和度是指压实沥青混合料试件中沥青实体体积占矿料骨架实体以外的空间体积的百分率，故随着沥青用量的增多，沥青混合料内部沥青实体体积所占百分比增大，进而使得沥青混合料的饱和度逐渐增大。

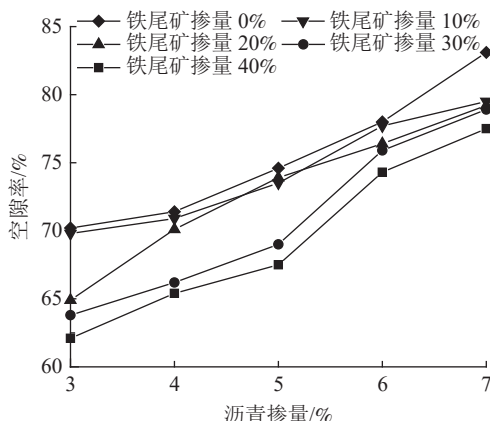


图6 沥青混合料饱和度的变化规律

Fig.6 Variation law of asphalt mixture saturation

3 沥青混合料路用性能

对沥青混合料的高温稳定性、低温抗裂性和水稳定性进行研究,进而确定出达到路用性能较佳状态时的铁尾矿掺量。

3.1 沥青混合料高温稳定性

高温稳定性主要指沥青混合料在高温状态下,在反复车辆动荷载作用下不会发生不可恢复变形,而保持路面平整的特性,一般通过车辙实验测定沥青混合料的动稳定度来描述^[10]。本文将采用 HCX-1 型轮碾成型机进行车辙实验,根据实验数据绘制出不同铁尾矿掺量作用下沥青混合料动稳定度的变化规律见图 7。

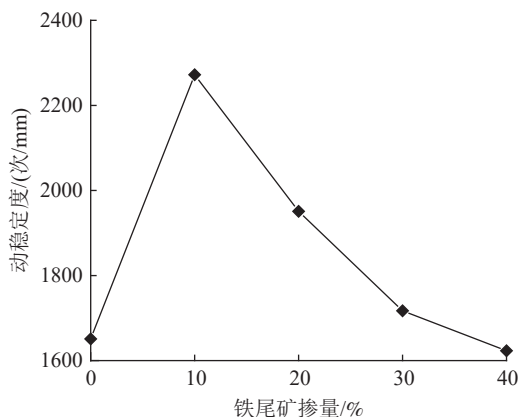


图7 沥青混合料动稳定度的变化规律

Fig.7 Variation law of dynamic stability of asphalt mixture

由图 7 可知,随着铁尾矿掺量的不断增大,沥青混合料动稳定度的变化规律呈现出先增大后减小的趋势,且在混凝土掺量为 20% 时达到了极大值,这是由于铁尾矿内部含有大量低活性的矿

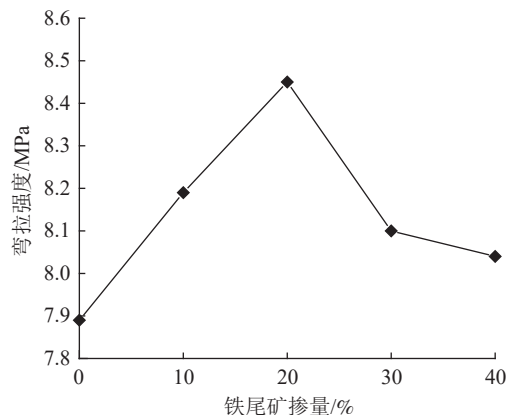
物成分,且在制备沥青混凝土加入了一定量的碱性石灰石矿粉,这会促使矿物成分与沥青形成较为稳定的沥青薄膜;同时,铁尾矿颗粒的形状极其不规则,这使得沥青颗粒、铁尾矿颗粒与其他骨料之间会有较大的摩擦作用,这对提升沥青混合料的高温稳定性具有积极作用。

但是随着铁尾矿持续增大动稳定度会下降,过量铁尾矿对沥青混凝土的整体具有一定影响,增加的铁尾矿越多、沥青混合料的整体强度下降幅度越大,进而导致了沥青混合料动稳定度的下降。

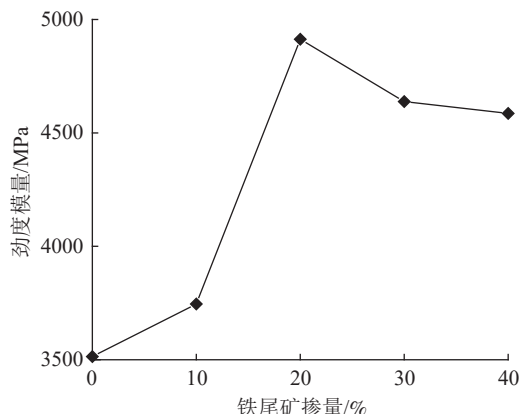
3.2 沥青混合料低温抗裂性

本文将采用低温弯曲实验来分析不同铁尾矿掺量对沥青混合料弯拉强度和劲度模量的影响^[11],绘制出不同铁尾矿掺量作用下沥青混合料弯拉强度和劲度模量的变化规律见图 7。

由图 8 可知,随着铁尾矿掺量的不断增大,沥青混合料弯拉强度的变化规律呈现出先增大后



(a) 弯拉强度



(b) 劲度模量

图8 沥青混合料弯拉强度和劲度模量的变化规律

Fig.8 Variation law of flexural tensile strength and stiffness modulus of asphalt mixture

减小的趋势，而沥青混合料劲度模量的变化规律也呈现出先增大后减小的趋势，这是由于铁尾矿内部的矿物成分会与沥青内部的物质产生化学反应，会在沥青表面形成一层具有稳定结构的薄膜；同时，生成的化学物质也会极大地提升了沥青混合料的粘附作用，使得沥青混凝土的弯拉强度和劲度模量都提升。

但是随铁尾矿掺量的不断增大，与沥青发生化学反应剩余的铁尾矿也越来越多，这就造成沥青内部有很多自由的铁尾矿颗粒，且尾矿颗粒之间的粘结性较差，进而使得沥青混凝土的弯拉强度和劲度模量都开始下降。

3.3 沥青混合料水稳定性

本文将采用马歇尔水稳性实验来分析不同铁尾矿掺量对沥青混合料水稳定性的影响，绘制出不同铁尾矿掺量作用下沥青混合料浸水残留稳定度的变化规律见图9。

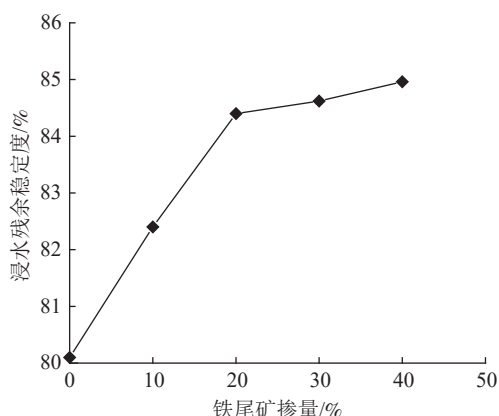


图9 沥青混合料浸水残留稳定度的变化规律

Fig.9 Variation law of the residual stability of asphalt mixture after immersion in water

由图9可知，随着铁尾矿掺量的不断增大，沥青混合料浸水残留稳定度的变化规律呈现出先快速增大后缓慢增大的趋势，这是由于铁尾矿内部的矿物成分会与沥青内部的物质产生化学反应，会在沥青表面形成一层具有稳定结构的薄膜，这会极大地提升了沥青混合料颗粒之间的粘附作用。

4 铁尾矿沥青混凝土的 FT-IR 光谱

采用 Nicolet i S50 型傅里叶红外光谱仪对不同铁尾矿掺量作用下的沥青混凝土进行红外光谱实验分析^[12]，得到不同铁尾矿掺量作用下沥青混

土的 FT-IR 图谱见图10(a)。

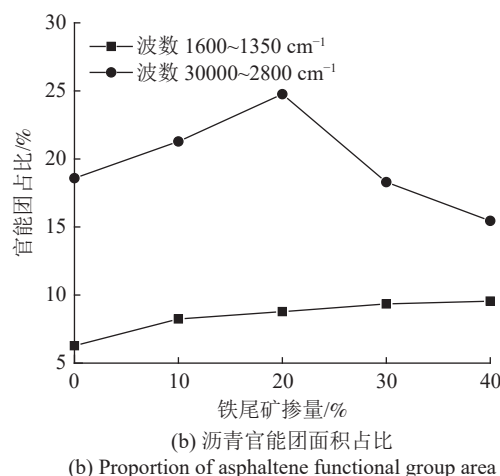
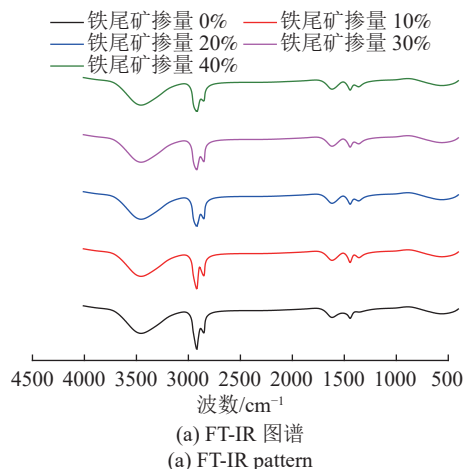


图10 FT-IR 图谱与沥青官能团面积占比

Fig.10 FT-IR spectrum and the proportion of asphalt functional group area

随着铁尾矿掺量不断增大，铁尾矿沥青混凝土 FT-IR 图谱在局部出现了较小的、新的吸收峰且对原有吸收峰也出现了增强，这说明了掺入铁尾矿后，沥青混凝土与其发生了化学反应，进而改变了原有沥青内部结构以及产生了新的官能团。在波数为 1500 cm⁻¹ 时，掺加铁尾矿的沥青混凝土出现了新的吸收峰，且此波数处的官能团面积占比随着铁尾矿掺量不断增大而增大，这可能是由于铁尾矿内部含有大量氧化物成分，部分氧化物与沥青发生了化学反应；也有可能是在制备沥青混凝土时沥青材料与外界空气接触后发生了反应造成的。

在波数为 1600~1350 cm⁻¹ 之间，主要由沥青芳环 C=C 振动产生吸收峰，而在波数为 3000~2800 cm⁻¹ 之间，主要由环烷烃和烷烃 C-H 振动产生吸收峰，在此对上述两个波数范围的

沥青官能团面积占比进行计算(见图 10(b)),分析铁尾矿掺量对沥青官能团面积占比的影响。由图 10(b)可知,随着铁尾矿掺量不断增大,铁尾矿沥青混凝土沥青芳环 C=C 官能团面积占比呈现出不断增大的趋势。当铁尾矿掺量为 20% 时,铁尾矿沥青混凝土沥青芳环 C=C 官能团面积占比的增加幅度最大。

但是随着铁尾矿掺量不断增大,铁尾矿沥青混凝土沥青环烷烃和烷烃 C-H 官能团面积占比却呈现出先增大后减小的趋势,且铁尾矿掺量为 20% 时,沥青环烷烃和烷烃 C-H 官能团面积占比达到最大。

5 结 论

(1) 综合分析不同沥青用量作用下沥青混合料的毛体积密度、稳定度与流值的变化规律,在沥青掺量为 5% 时沥青混合料的毛体积密度和稳定度达到极大值;而随着沥青掺量不断增大,沥青混合料流值的变化规律呈现出逐渐增大的趋势。

(2) 综合铁尾矿沥青混凝土动稳定度,弯拉强度,浸水残留稳定度与铁尾矿掺量之间的关系,可以选定铁尾矿的较佳掺量为 20%。

(3) 随着铁尾矿掺量不断增大,铁尾矿沥青混凝土 FT-IR 图谱在局部出现了较小的、新的吸收峰,且对原有吸收峰也出现了增强,这说明了掺入铁尾矿后沥青混凝土与其发生了化学反应,进而改变了原有沥青内部结构以及产生了新的官能团。

(4) 随着铁尾矿掺量不断增大,铁尾矿沥青混凝土沥青芳环 C=C 官能团面积占比呈现出不断增大的趋势,当铁尾矿掺量为 20% 时,铁尾矿沥青混凝土沥青芳环 C=C 官能团面积占比的增加幅度最大。

(5) 随着铁尾矿掺量不断增大,铁尾矿沥青混凝土沥青环烷烃和烷烃 C-H 官能团面积占比却呈现出先增大后减小的趋势,且铁尾矿掺量为 20% 时,沥青环烷烃和烷烃 C-H 官能团面积占比达到最大。

参考文献:

[1] 姚爱玲,王军伟,许敏,等.水泥稳定碎石基层沥青路面隆起开裂数值分析[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2021,

40(6):105-111.

YAO A L, WANG J W, XU M, et al. Numerical analysis of asphalt pavement rumble cracking on cement stabilized aggregates base[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science Edition), 2021, 40(6):105-111.

[2] 刘竞怡,孙志华,温久然,等.金尾矿砂作为混凝土集料的物化性质及其改性试验[J].金属矿山,2021(5):211-220.

LIU J Y, SUN Z H, WEN J R, et al. Physicochemical properties of gold tailing sand as concrete aggregate and its modification test[J]. Metal Mining, 2021(5):211-220.

[3] 程和平,陆璐.改良铁尾矿砂混凝土的力学和耐腐蚀性能研究[J].矿产综合利用,2021(6):47-52.

CHENG H P, LU L. Research on mechanical properties and corrosion resistance of improved iron tailings concrete[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2021(6):47-52.

[4] 陈振富,蔡双阳,陶秋旺,等.铅锌尾矿砂混凝土抗压强度及屏蔽性能试验研究[J].混凝土,2021(2):68-71+76.

CHEN Z F, CAI S Y, TAO Q W, et al. Experimental study on compressive strength and shielding performance of lead-zinc tailing sand concrete[J]. Concrete, 2021(2):68-71+76.

[5] 赵连平,郝绍菊,马竞.铁尾矿沥青混合料基本性能及老化耐久性研究[J].矿产综合利用,2022(4):111-118.

ZHAO L P, HAO S J, MA J. New technology for efficient resource utilization of red mud from bayer process[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2022(4):111-118.

[6] 胡超,包惠明,迟恩涛,等.高岭土尾矿沥青混合料抗腐蚀性试验与机理研究[J].矿产综合利用,2020(5):161-168.

HU C, BAO H M, CHI E T, et al. Test and mechanism study on corrosion resistance of kaolin tailings asphalt mixture[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2020(5):161-168.

[7] 张铁志,吴进.铁尾矿砂在沥青混合料中的路用性能研究[J].公路,2015,60(6):207-210.

ZHANG T Z, WU J. Research on road performance of iron tailing sand in asphalt mixture[J]. Highway, 2015, 60(6):207-210.

[8] 李军,徐林荣,刘小明.石棉尾矿用作沥青混合料集料特性研究[J].铁道科学与工程学报,2011,8(5):31-34.

LI J, XU L R, LIU X M. Characterization of asbestos tailings as aggregate for asphalt mixtures[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2011, 8(5):31-34.

[9] 廖湘南.基于再生粗骨料性能的沥青混凝土设计方法与路用性能研究[D].广州:华南理工大学,2016.

LIAO X N. Research on design method and road performance of asphalt concrete based on recycled coarse aggregate properties [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2016.

[10] 王修山, 周恒宇, 沈森杰, 等. 纤维增强聚合物改性沥青混合料路用性能研究[J]. 公路, 2021, 66(6):54-59.

WANG X S, ZHOU H Y, SHEN S J, et al. Research on road performance of fiber-reinforced polymer-modified asphalt mixtures[J]. Highway, 2021, 66(6):54-59.

[11] 杨志全, 杨文才, 张宗国, 等. 锡尾矿用作二级及以下公路路面底基层材料的试验与效果指标预测模型研究[J]. 硅

酸盐通报, 2019, 38(8):2578-2585.

YANG Z Q, YANG W C, ZHANG Z G, et al. Experimental and effect index prediction modeling study of tin tailings used as sub-base material for pavements on secondary and lower roads[J]. Silicate Bulletin, 2019, 38(8):2578-2585.

[12] 程俊霞, 朱亚明, 高丽娟, 等. H-NMR、FT-IR 解析煤系针状焦原料的沥青分子结构[J]. 炭素技术, 2019, 38(1):24-27+58.

CHENG J X, ZHU Y M, GAO L J, et al. H-NMR and FT-IR analysis of asphaltene molecular structure of coal-based needle coke feedstock[J]. Carbon Technology, 2019, 38(1):24-27+58.

Performance Research and Infrared Spectroscopy Analysis of Asphalt Concrete with Iron Tailings

WANG Li¹, WANG Youtao^{2,3}, CHENG Heping⁴

(1.Department of Civil Engineering, Neijiang Vocational and Technical College, Neijiang 641000, Sichuan, China; 2.Zunyi Highway Administration of Guizhou Province, Zunyi 563000, Guizhou, China; 3.School of Civil Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, Liaoning, China; 4.Institute of Construction Engineering Technology, Changzhou Vocational Institute of Engineering, Changzhou 213164, Jiangsu, China)

Abstract: This is an article in the field of ceramics and composites. The performance of asphalt mixtures with different iron tailings content was analyzed. The rutting resistance, water stability and crack resistance of the asphalt mixture were analyzed. This verified the feasibility of iron tailings applied to the middle surface of low-grade roads. The results showed that the flexural strength decreased the most when the dosage was from 20% to 40%. The increase rate of immersion residue stability began to decrease after the dosage was 20%. As the content of iron tailings continued to increase, the FT-IR spectrum of iron tailings asphalt concrete showed a small, new absorption peak locally and an enhancement to the original absorption peak. This showed that after the addition of iron tailings, the asphalt concrete chemically reacted with it, and the internal structure of the original asphalt was changed and new functional groups were generated. With the increasing content of iron tailings, the proportion of the area of cycloalkane and alkane C-H functional groups in the asphalt concrete of iron tailings asphalt concrete showed a trend of first increasing and then decreasing. And when the iron tailings content was 20%, the area ratio of asphalt naphthenic and alkane C-H functional groups reached the maximum.

Keywords: Ceramics and composites; Iron tailings; Rutting resistance; Water stability; Crack resistance; Absorption peak