

# 不同除味剂改性沥青的微观与性能研究

李希成, 王 帅

(日照经济技术开发区人力资源管理服务有限公司, 山东 日照 276800)

**摘 要:** 为明确不同抑烟材料对沥青烟气排放及路用性能的影响, 选取二氰二胺、高岭土和沸石三类材料, 从微观孔结构、高温流变性能、10 °C 延度及 180 °C 条件下烟气释放行为开展系统研究。结果表明, 比表面积与孔容是影响抑烟效果的关键因素, 沸石因微孔结构发达、吸附位点丰富, 烟气抑制效果最佳; 高岭土次之; 二氰二胺以化学捕获为主。性能分析表明, 沸石可显著提升高温模量与车辙因子, 但因强吸附轻质组分导致 10 °C 延度下降幅度较大; 高岭土对沥青结构扰动较小, 对低温延展性能影响相对温和; 二氰二胺增强体系刚性, 使延度明显降低。烟气测试显示, 沸石对多类污染物的抑制效果最为显著。

**关键词:** 沥青; 除味剂; 孔径吸附; 流变性能; 抑烟机制

**中图分类号:** U414.3

**文献标志码:** B

**文章编号:** 1009-7716(2026)07-0098-06

## Microscopic and Performance Research on Asphalt Modified by Different Deodorizers

LI Xicheng, WANG Shuai

(Rizhao Economic and Technological Development Zone Human Resources Management Service Co., Ltd., Rizhao 276800, China)

**Abstract:** To clarify the effects of different smoke-suppressing materials on asphalt fume emissions and pavement performance, three materials of dicyandiamide, kaolin and zeolite are selected to systematically study the fume release behavior from the microscopic pore structure, high-temperature rheological properties, 10 °C ductility and 180 °C conditions. The results indicate that the specific surface area and pore volume are the key factors influencing the smoke suppression efficiency. Owing to its well-developed microporous structure and abundant adsorption sites, the smoke suppression efficiency of zeolite is the best, followed by kaolin, while dicyandiamide is mainly captured by chemical means. The performance analysis shows that zeolite can significantly enhance the high-temperature modulus and rutting factor. However, due to the strong adsorption of light components, the ductility at 10 °C decreases significantly. Kaolin causes relatively minor disturbance to the asphalt structure and thus has a limited impact on low-temperature ductility. Whereas dicyandiamide increases system stiffness, resulting in a noticeable decrease in ductility. Fume emission tests further confirm that zeolite provides the highest suppression efficiency for multiple pollutants.

**Keywords:** asphalt; deodorizing agent; pore size adsorption; rheological properties; fume suppression mechanism

## 0 引 言

沥青在加热施工过程中会释放挥发性有机物和颗粒物, 对施工人员健康及大气环境造成不利影响<sup>[1-2]</sup>, 开发高效除味材料已成为绿色道路建造的重要方向。不同类型除味剂的作用机制涵盖化学反应、片层吸附和微孔捕获等<sup>[3-5]</sup>, 其微观结构差异将影响其在沥青体系中的分散状态、界面作用、最终除味效果与路用性能, 因此有必要开展系统研究。本文选取二氰二胺(下文简称 EQ)、高岭土(下文简称

GL)和沸石(下文简称 FS)三类具有代表性的除味剂, 通过比表面积、孔径与孔容等参数表征其微观结构特征, 并制备不同掺量的改性除味沥青, 开展温度扫描和弯曲梁流变试验评价其高低温性能。同时在 180 °C 条件下测试烟气抑制率, 比较三类除味剂的除味效果。研究旨在揭示除味剂结构特征、流变性能变化与除味能力之间的关系, 为新型环保改性除味沥青材料的设计提供依据。

## 1 试验材料

选用 70# 基质沥青为胶结料, 外掺二氰二胺、高岭土和沸石三类典型除味剂。三类除味剂掺量均设为 4%、7% 和 10%<sup>[6-8]</sup>, 用于分析其掺量敏感性与优化

收稿日期: 2025-12-19

作者简介: 李希成(1992—), 男, 本科, 工程师, 从事交通运输工作。

范围。除味剂照片如图 1 所示,从左到右依次为二氰二胺、高岭土和沸石。



图 1 除味剂照片

2 试验方法

2.1 改性除味沥青制备

基质沥青加热至 160 °C 完全熔融后,采用高速剪切机加入设计掺量的二氰二胺、高岭土或沸石,4 000 r/min 共剪切 40 min,制得均匀的改性除味沥青体系,并在 160 °C 恒温下 30 min 消泡备用。

2.2 微观结构表征

采用氮气吸附-脱附法测试除味剂的比表面积、孔径分布与孔容,分析其物理吸附能力及除味机理基础。

2.3 高低温性能测试

采用 DSR 在 46~76 °C 条件下测试沥青的复数剪切模量( $G^*$ )和相位角( $\delta$ ),并以车辙因子( $G^*/\sin\delta$ )评价其高温流变性能;采用 10 °C 延度试验评价抑烟沥青的低温延展性能,试件在 10 °C 条件下恒温养护后,以 5 cm/min 的拉伸速度测定其断裂延伸长度,用以分析不同抑烟材料对低温性能的影响。

2.4 烟气抑制性能测试

沥青样品加热至 180 °C,采用密闭烟气收集系统采集挥发物,使用烟气分析仪测定 VOCs、CO、 $H_2S$  和  $SO_2$  浓度<sup>[9-10]</sup>。以基质沥青为对照,计算除味剂沥青的抑制率并分析其除味机制。

3 除味剂微观性能分析

如图 2 所示,不同除味剂的孔结构特征对除味机制和效果具有决定性影响。孔径分布、比表面积和孔容等结构参数直接决定了材料对沥青中挥发性气味组分的吸附能力及作用方式。

二氰二胺虽具有相对较大的平均孔径,但其比表面积和孔容处于较低水平,可供吸附的有效位点数量有限,难以形成稳定的物理吸附体系。因此,其除味作用主要依赖于化学反应机理,即通过参与热氧反应或自由基捕获过程,抑制部分挥发性组分的生成与释放,而非对已生成气味分子的有效吸附。

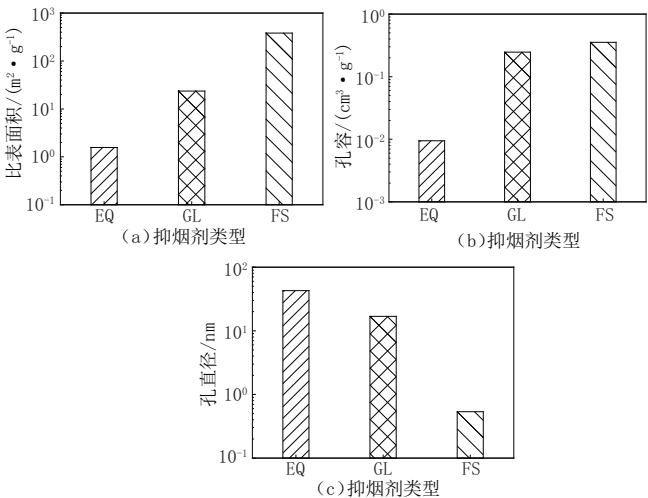


图 2 三种除味剂微观性能

二氰二胺通过化学反应抑制沥青中挥发性有机物(VOCs)的生成与释放,其较大的孔径提供一定吸附位点,但主要依赖高温下与沥青成分的化学反应,如热氧反应和自由基捕获,减少有害气体的生成。因此,二氰二胺的除味效果来源于其化学反应性,而非物理吸附能力。

相比之下,高岭土具有中等孔径分布及较高的比表面积和孔容,其典型的层状硅酸盐结构和发育良好的介孔特征为气味分子的吸附提供了较多有效位点。在沥青加热过程中,高岭土可通过物理吸附和空间阻隔作用,限制轻质组分和部分挥发性有机物向外扩散,从而在不显著破坏沥青胶体结构的前提下实现一定程度的除味效果,表现出较为温和且稳定的除味特性。高岭土通过物理吸附和空间阻隔作用减少沥青中挥发性气味的释放,限制轻质组分的外扩。其层状结构和发达的介孔特性提供了有效的吸附位点。高岭土能够在不破坏沥青胶体结构的情况下,抑制烟雾的产生,具有温和且稳定的除味效果。

沸石材料具有最为显著的除味能力。其内部微孔结构高度发达,孔道规则且分布密集,对小分子气味组分和烟气成分具有极强的吸附选择。在加热阶段能高效捕获已生成的挥发性气味分子,还可通过“吸附—滞留”机制延缓其释放过程,从而显著降低烟气和异味排放水平。综合分析可知,除味剂的除味能力总体上随孔结构参数的增强而提升,具体表现为沸石效果最佳、高岭土次之、二氰二胺最弱。

4 改性除味沥青性能分析

4.1 高温流变性能测试

如图 3 所示,二氰二胺改性除味沥青对高温流变

性能的提升较为有限。各掺量的复数剪切模量和车辙因子随温度升高均同步下降,差异不明显,仅7%掺量在高温区略有增强,表明其对沥青结构的稳定作用有限。由于主要依靠化学除味机理,其对沥青骨架强化不足,10%掺量亦未体现进一步提升。总体来看,二氰二胺对沥青高温抗变形性能改善较弱。

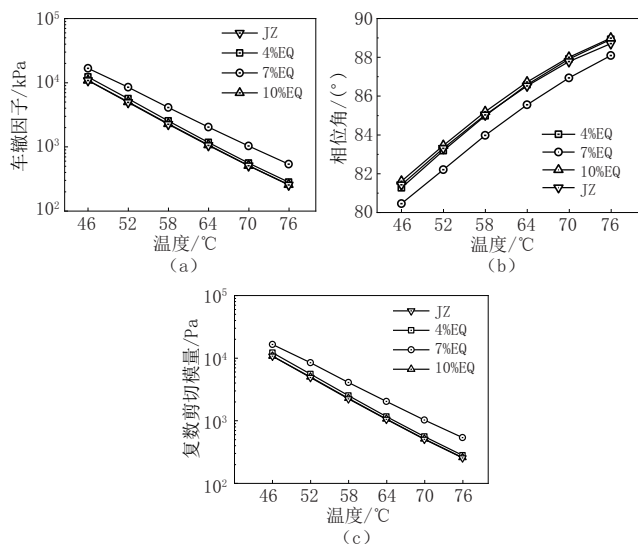


图3 二氰二胺改性除味沥青高温流变试验结果

如图4所示,高岭土改性除味沥青在高温流变性能上呈现显著的最优掺量特征。随温度升高,复数剪切模量整体下降,但7%掺量在全温域保持最高水平,表明适中片层填料可有效增强沥青的弹性与结构稳定性。当掺量增至10%时,模量反而下降,说明过量填料影响分散性并削弱增强效果。车辙因子与模量趋势一致,7%掺量显著提升抗变形能力,而10%掺量的回落进一步验证了高岭土在过量添加时强化作用受限。

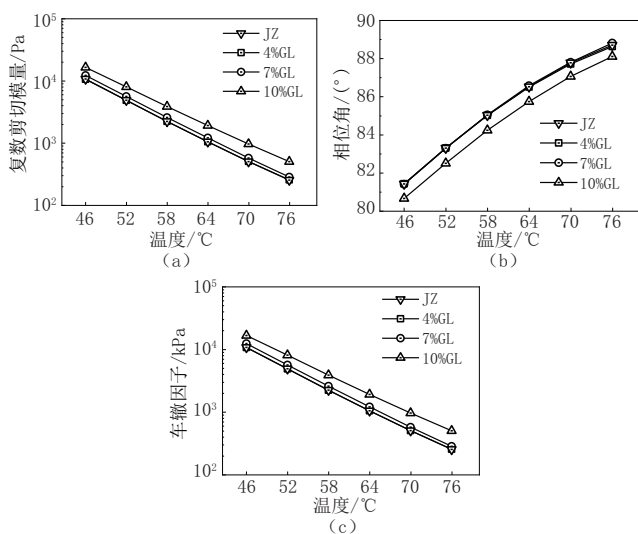


图4 高岭土改性除味沥青高温流变试验结果

如图5所示,沸石对沥青高温性能的提升最为显著。其复数剪切模量在各掺量下均显著高于基质沥青,并随掺量增加持续提升,10%掺量在高温区仍保持最高水平,体现出沸石依托高比表面积和发达微孔结构对沥青骨架的有效增强。车辙因子亦随掺量线性升高,10%掺量在全温域表现最优,具有显著提升沥青弹性响应与抗车辙能力,是三类除味剂中高温强化效果最突出的材料。

青,并随掺量增加持续提升,10%掺量在高温区仍保持最高水平,体现出沸石依托高比表面积和发达微孔结构对沥青骨架的有效增强。车辙因子亦随掺量线性升高,10%掺量在全温域表现最优,具有显著提升沥青弹性响应与抗车辙能力,是三类除味剂中高温强化效果最突出的材料。

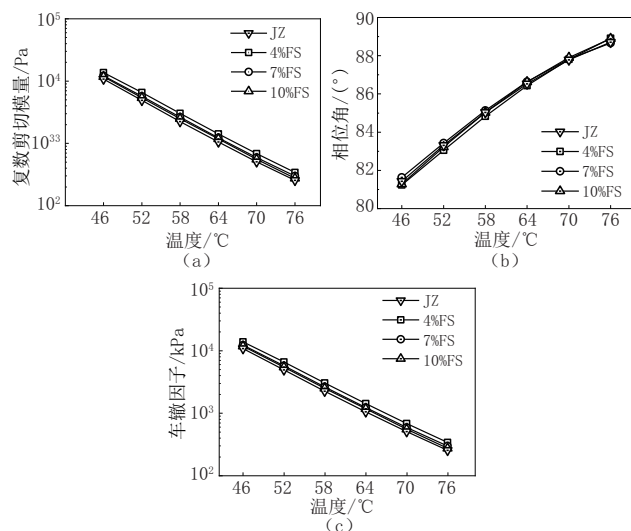


图5 沸石改性除味沥青高温流变试验结果

## 4.2 低温延度性能测试

如图6所示,在低温条件下,各类抑烟沥青的延度均较基质沥青发生不同程度变化,表明抑烟剂的引入在发挥烟气抑制作用的同时,不可避免地对沥青低温延展性能产生影响。10℃延度试验对沥青分子结构变化较为敏感,其结果能够反映抑烟材料对沥青体系柔顺性和分子链运动能力的影响差异。

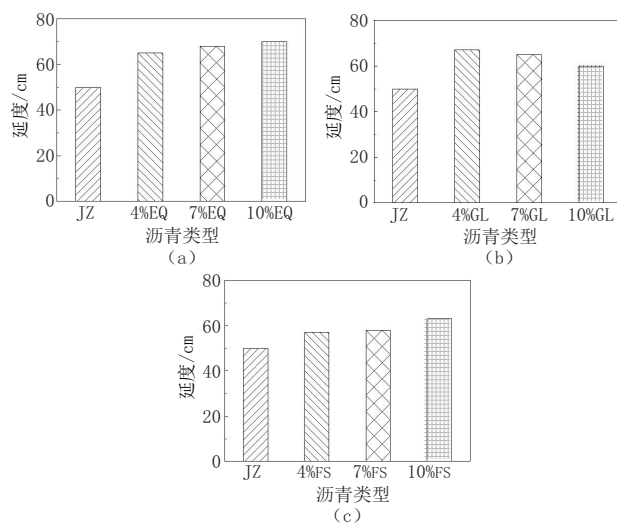


图6 除味沥青10℃延度试验结果

掺入二氰二胺后,抑烟沥青在10℃条件下的延度表现出较为明显的下降趋势。这主要是由于二氰二胺分子极性较强,在沥青体系中易与胶质、沥青质

等极性组分发生相互作用,同时对部分轻质组分产生吸附或固化效应,导致体系中有利于低温延展的柔性相比比例降低。此外,该作用会在一定程度上增强沥青结构的刚性,使分子链段在低温拉伸过程中运动受限,从而使延度降低,低温延展性能减弱。

相比之下,高岭土抑烟沥青的 10℃延度变化幅度较小,整体表现为小幅下降或基本保持稳定。这主要与高岭土的层状硅酸盐结构及其中等孔径特征有关,在沥青中主要通过物理填充、空间阻隔及有限吸附作用发挥抑烟效果,对沥青原有胶体结构的扰动相对较弱。同时,高岭土对轻质组分的吸附能力有限,未显著破坏沥青体系中柔性相与刚性相之间的平衡,因此对低温延展性能的影响相对温和,表现出较好的性能保持性。

沸石类抑烟材料掺入后,抑烟沥青的 10℃延度下降幅度相对较大。这一现象与沸石发达的孔结构和较高的比表面积密切相关,其内部微孔结构对沥青中轻质组分及挥发性组分具有较强的吸附能力,在有效抑制烟气和异味释放的同时,也减少了体系中有利于低温延展的轻质相含量。此外,沸石颗粒的引入在一定程度上增强了沥青体系的结构约束效应,使材料在低温拉伸条件下更易发生脆性断裂,从而导致延度显著降低。为了应对这一问题,可以采取以下优化策略:控制沸石的添加量和粒径,减少对低温延度的负面影响;与聚合物(如 SBS、橡胶)联合改性,提高沥青的韧性和低温延展性;优化沸石孔结构,进一步减轻其对低温性能的影响,确保沥青保持良好的延展性。

5 改性除味沥青除味效果分析

在本研究中,抑制效果的计算基于气体浓度的变化。试验通过收集 30 min 内的浓度数据,并对浓度-时间曲线进行积分,得出除味剂对沥青挥发性气体的抑制效果。烟气测试中监测了几种主要污染物,包括挥发性有机化合物(VOCs)、一氧化碳(CO)、硫化氢(H<sub>2</sub>S)和二氧化硫(SO<sub>2</sub>)<sup>[14]</sup>。这些污染物的生成主要源于沥青在高温条件下的热解反应,其中 VOCs 为主要有害气体,CO 为常见的有毒气体,H<sub>2</sub>S 和 SO<sub>2</sub>则是含硫物质分解所产生的气体。为了准确评估除味剂的抑制效果,抑制率是通过将处理过的沥青气体浓度与未添加除味剂的沥青样本浓度进行比较得出的。考虑到实验条件的一致性(如相同的容器、温度和时间),沥青的挥发量在整个实验过程

中保持恒定,因此,沥青自身的挥发量可视为定值,且其波动对抑制效果的计算不产生显著影响。这种计算方法为准确评估不同除味剂在抑制效果上的差异提供了可靠基础。

为便于比较不同除味剂在相近掺量条件下的性能,依据文献数据并结合本文试验结果,对各类除味材料的综合性能进行了整理。相关除味性能及其掺量如表 1 所示<sup>[13]</sup>。

表 1 不同除味材料在相近掺量条件下的性能对比<sup>[13]</sup>

| 除味材料                | 典型掺量/% | 抑制率/% | 高温性能   | 低温性能  |
|---------------------|--------|-------|--------|-------|
| 生物碳                 | 3~7    | 35~70 | 高温提升有限 | 稳定    |
| Mg(OH) <sub>2</sub> | 4~10   | 25~45 | 改善有限   | 影响较小  |
| 分子筛                 | 3~7    | 40~60 | 高温提升一般 | 改善低温  |
| 二氰二胺(本文)            | 4~10   | 30~40 | 提升弱    | 延度下降  |
| 高岭土(本文)             | 4~10   | 30~50 | 提升抗变形  | 低温变化小 |
| 沸石(本文)              | 4~10   | 30~65 | 高温表现佳  | 延度下降  |

如图 7 所示,在三类除味剂中,二氰二胺的整体除味效果处于中等水平,其抑制率随掺量变化呈现出明显的非线性特征,表现为“7% 掺量最优”。试验结果表明,当二氰二胺掺量为 7% 时,对沥青烟气中 VOCs 和 SO<sub>2</sub>的抑制率分别达到 39.00% 和 40.68%,相较于 4% 掺量均有显著提升,说明适当提高掺量有助于增强其除味效果。当掺量进一步增加至 10% 时,抑制率虽略有下降,但整体仍维持在较高水平,表明过量掺加并不会导致除味性能的急剧衰减,但其增效作用趋于减弱。从作用机理上看,二氰二胺属于典型的化学反应型除味剂,其除味过程主要依赖于分子中的活性基团与沥青热裂解过程中产生的自由基或反应性中间体之间的氢键结合及亲核反应,从而抑制烟气前体物的生成与进一步演化。与多孔材料依靠物理吸附发挥作用的机理不同,二氰二胺的除味能力更多受化学反应效率和反应条件的影响,而其自身并不具备显著的结构吸附优势。

此外,结合高温流变性能测试结果可知,二氰二胺对沥青高温性能的改善同样呈现出“适量有效、提升有限”的特征。适宜掺量下,其在一定程度上能够协同发挥除味与性能调控作用,而过量掺加则难以进一步提升综合性能。综上所述,二氰二胺在除味效果与性能增强方面均表现出最佳掺量区间,其工程应用中宜控制在适中掺量范围内,以实现除味效果与路用性能的协同优化<sup>[11-12]</sup>。

如图 8 所示,高岭土表现出稳定且较强的除味能力,对沥青烟气中多种有害气体均具有良好的抑制

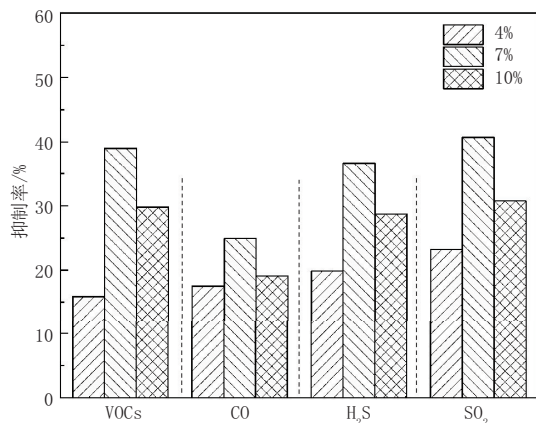


图7 二氰二胺改性除味沥青烟气抑制率

效果,整体上呈现出随掺量增加而持续增强的规律。在所研究的掺量范围内,提高高岭土掺量可显著提升其综合除味性能,高掺量条件下的除味效果明显优于低、中掺量,表明其除味作用具有较好的掺量依赖性和稳定性。从作用机理上分析,高岭土属于典型的片层结构物理型除味剂,其层状结构稳定、有效比表面积较大,在高温条件下可对沥青体系中的半挥发性组分产生持续吸附作用。同时,高岭土在沥青中分散后能够形成一定的无机屏蔽与阻隔结构,延缓轻质组分向气相迁移,从而抑制烟气的释放过程。由于该过程主要依赖物理吸附与结构阻隔效应,其除味能力随有效吸附位点数量的增加而不断增强,因此掺量提高时除味效果提升更为明显。

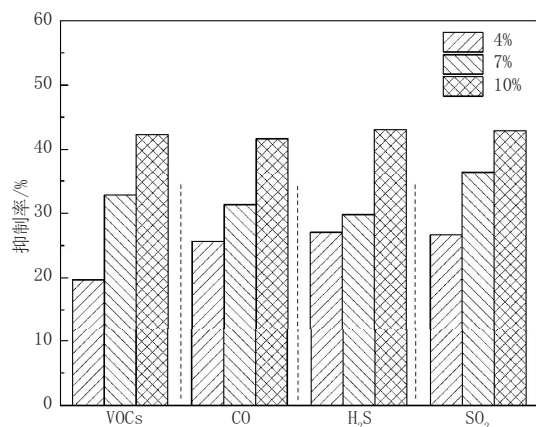


图8 高岭土改性除味沥青烟气抑制率

此外,高岭土除味性能的变化趋势与其对沥青高温流变性能的强化规律具有良好一致性。随着掺量增加,其在沥青体系中所形成的结构约束和骨架支撑作用逐渐增强,不仅有利于改善沥青的高温稳定性,也进一步强化了烟气抑制效果。综合来看,高岭土在较高掺量条件下能够实现除味性能与高温路用性能的协同提升,体现出良好的工程应用潜力。

如图9所示,沸石在三类除味剂中展现出最为突

出的除味能力,其综合抑制效果明显优于二氰二胺和高岭土,并且在所研究的掺量范围内呈现出随掺量增加而近似线性增强的变化规律。相比其他材料,沸石在不同掺量条件下均能保持较高且稳定的除味水平,体现出优异的除味效率与适用性。从作用机理上分析,沸石具有较高的比表面积和发达的微孔结构,可为烟气中多种小分子有害组分提供大量有效吸附位点。其规则孔道结构产生的“分子筛”效应能够对小分子挥发物形成选择性截留,从源头上抑制挥发性组分向气相迁移,从而显著降低烟气的释放强度。与以化学反应为主或片层吸附为主的除味剂相比,沸石的物理吸附过程更为充分且稳定,使其在高温条件下仍能保持较强的除味能力。

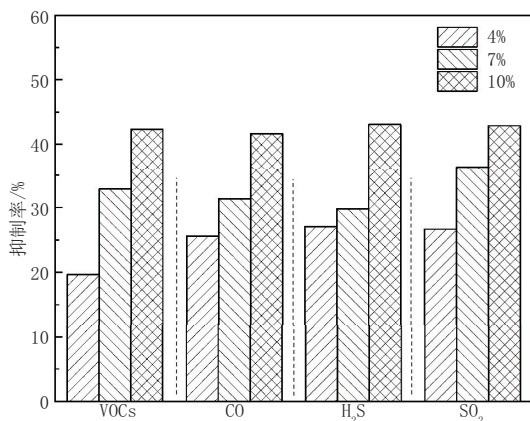


图9 沸石改性除味沥青烟气抑制率

此外,高温流变性能分析表明,沸石对沥青体系结构的强化作用最为显著,其在沥青中形成的多孔骨架与结构约束效应可有效提高体系黏弹性与结构稳定性,进一步增强对烟气扩散路径的阻隔作用。上述结构强化与吸附抑制的协同效应,使沸石在高温工况下依然保持优异的除味性能。综合来看,三类除味剂的除味能力由弱到强依次为二氰二胺、高岭土和沸石,该排序与其微观结构特征及吸附机制具有良好一致性,验证了结构—性能关系在沥青除味体系中的主导作用。

## 6 结 语

(1)三类除味剂的微观结构显著影响除味行为。沸石凭借最大比表面积和发达微孔展现最优除味能力,高岭土依靠片层与介孔实现较稳定的吸附效果,二氰二胺主要发挥自由基捕获作用,除味与结构强化均相对温和。

(2)流变性能结果表明,沸石显著提升沥青高温模量与抗车辙能力,高岭土增强效果较为均衡,二氰

二胺改善有限。10℃延度试验显示,高岭土体系低温延度保持性较好,而二氰二胺和沸石在强化抑烟性能的同时,对低温延展性产生一定不利影响。

(3)180℃条件下的烟气抑制结果与其微观结构及流变变化规律一致,沸石除味最强,高岭土次之,二氰二胺较弱。综合而言,沸石在除味的同时,高温抗变形能力增强,高岭土性能稳定,二氰二胺适用于温和型除味体系,为改性除味沥青材料设计提供参考。

参考文献:

[1] 王盟,李萍,念腾飞,等.沥青烟中16种PAHs组成及毒性当量变化规律研究[J].安全与环境学报,2023,23(1):296-303.  
[2] 王玮巍,常帅帅,孔维兵,等.沥青铺面材料VOCs排放特征、环境及健康影响分析[J].中国环境科学,2023,43(增刊1):38-45.  
[3] 狄乾斌,梁晨露,陈小龙.京津冀减污降碳与经济动态关联研究[J].地理与地理信息科学,2024,40(5):124-133.  
[4] 李瑛,申峻,王玉高,等.石油沥青烟气组成及抑烟技术研究进展[J].

应用化工,2023(1):256-260;265.

[5] 肖月,常郁文,董前坤,等.道路沥青材料VOCs的指纹组分及其定量分析[J].中国公路学报,2020,33(10):276-287.  
[6] 王文光,谢瑾,高雄,等.道路石油沥青VOCs释放特征研究进展[J].公路,2024,69(5):251-261.  
[7] 李澳.橡胶沥青净味机理及性能评价[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2020.  
[8] 黄刚.高温条件下抑烟改性沥青开发及混合料性能研究[D].重庆:重庆交通大学,2013.  
[9] 陈修乐.热拌抑烟沥青复配比优化及抑烟减排效果评价[D].兰州:兰州理工大学,2023.  
[10] 张新强,唐伯明,曹雪娟,等.道路沥青材料VOCs释放特性与抑制措施研究进展[J].材料导报,2023(6):227-235.  
[11] 胡懿容.净味沥青性能及除味机理研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2020.  
[12] 张瑞.沥青材料有机排放物逃逸行为与抑制研究[D].重庆:重庆交通大学,2023.  
[13] 常郁文,龙永双,仪明伟,等.道路沥青挥发性有机化合物减排材料的研究进展[J].材料导报,2023,37(20):247-262.

(上接第97页)

(3)红外光谱试验表明:沥青基质均呈现以饱和烷烃长链结构为主的特征,三种体系均成功实现了SBS在沥青中的良好分散与相容。其中:SBS-LTM体系表现出良好的相容性,但检测到微弱的羰基特征峰;SBS-SAS体系因添加剂引入了含S=O/C-O等极性官能团,并在1600cm<sup>-1</sup>处显示出聚苯乙烯特征峰,表明其在提升界面相容性与储存稳定性的同时,初始氧化程度较低;SBS-XT体系则通过添加剂引入了含氧、含硅或含硫等极性官能团,并同时检测到聚苯乙烯芳香环及甲基特征振动,进一步增强了体系相容性与稳定性。

参考文献:

[1] 季节,徐世法,罗晓辉.重复再生沥青混合料及温拌沥青混合料性能评价[M].北京:人民交通出版社,2011.  
[2] 于新,李淑娥,董夫强.温拌橡胶改性沥青性能及工程应用[M].北京:科学出版社,2016:1-9.  
[3] 徐健.低碳生态型道路建设技术[M].北京:人民交通出版社,

2012:1-2.

[4] Li Y, Zhao R, Liu T, et al. Does urbanization lead to more direct and indirect household carbon dioxide emissions? Evidence from China during 1996-2012[J]. Journal of Cleaner Production, 2015 (102): 103-114.  
[5] 顾兴宇,姜严旭,周洲,等.再生沥青低温抗裂性能评价[J].建筑材料学报,2018,21(3):523-528.  
[6] Yu H, Leng Z, Zhou Z, et al.Optimization of preparation procedure of liquid warm mix additive modified asphalt rubber[J].Journal of Cleaner Production, 2017(14): 336 - 345 .  
[7] 唐培培,申爱琴,肖葳.基于流变特性的温拌沥青温度与频率敏感性分析[J].公路交通科技,2016,33(3):7-12.  
[8] 李萍,宋闯闯,杨萌,等.温拌再生沥青混合料低温性能影响因素分析[J].公路,2025(10):19-28.  
[9] 吴超凡.添加剂型温拌与再生温拌沥青混合料路用性能及试验研究[D].长沙:湖南大学,2015.  
[10] Xiao F, Amirkhanian S N, Karakouzian M, et al.Rheology evaluations of WMA binders using ultraviolet and PAV aging procedures[J]. Construction& Building Materials, 2015(79): 56-64.  
[11] 马育,何兆益,何亮,等.温拌橡胶沥青的老化特征与红外光谱分析[J].公路交通科技,2015,32(1):13-18.