

文章编号:1007-9629(2026)03-0356-07

螯合反应型净味剂对橡塑沥青的 净味效果与反应机理

徐茜¹, 张哲², 刘悦³, 耿立涛^{4,*}, 吕健涵⁵

(1. 山东建筑大学管理工程学院, 山东 济南 250101; 2. 青岛科凯达橡塑有限公司, 山东 青岛 266228; 3. 大连理工大学建设工程学院, 辽宁 大连 116024; 4. 山东建筑大学交通工程学院, 山东 济南 250101; 5. 山东金日交通发展集团有限公司, 山东 济南 250101)

摘要:为解决橡塑沥青传统抑烟净味技术效果不佳的问题,基于沥青技术性能测试、气味强度评价以及烟气气相色谱-质谱(GC-MS)分析,研究了螯合反应型净味剂在橡塑沥青中的净味效果与反应机理。结果表明:在 0.015%~0.035% 掺量范围内,净味剂对沥青技术性能无不利影响;掺加净味剂后,气味强度从 4 级降至 0 级,烟气质量减少 15.4%~44.3%,烟气种类减少 5~9 种;随着净味剂掺量的增加,恶臭、有毒及小分子无味烟气含量下降,大分子无味烟气含量上升。该净味剂通过与烟气中含 S、N、O 及双键等富电子基团发生络合反应实现净味作用,反应程度取决于反应物含量及其化学活性。

关键词:橡塑沥青;沥青烟气;螯合反应型净味剂;GC-MS 分析;抑烟机理

中图分类号:TE626.8;U414

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2026.03.010

Deodorizing Effect and Reaction Mechanism of Chelation Reaction Type Deodorizer on Rubber-Plastic Asphalt

XU Qian¹, ZHANG Zhe², LIU Yue³, GENG Litao^{4,*}, LÜ Jianhan⁵

(1. School of Management Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China; 2. Qingdao Cascade Polymer Co., Ltd., Qingdao 266228, China; 3. School of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 4. School of Transportation Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China; 5. Shandong Kingyue Transportation Development Group Co., Ltd., Jinan 250101, China)

Abstract: To address the deficiencies of conventional smoke-suppressing and deodorization technologies for rubber-plastic asphalt, investigations were conducted into the deodorization efficacy and reaction mechanism of a chelation-reactive deodorizer in rubber-plastic asphalt via asphalt technical performance tests, odor intensity evaluations, and gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) analysis of asphalt fume. The results show that when the deodorizer's dosage is in the range of 0.015%–0.035%, no adverse impacts are exerted on the technical performances of asphalt. Specifically, the odor intensity is reduced from grade 4 to grade 0; the mass of asphalt fume is decreased by 15.4%–44.3%, and the number of asphalt fume component types is cut by 5–9 species. With the increase in deodorizer dosage, the contents of malodorous, toxic, and small-molecule odorless flue gas components are declined progressively, while the content of large-molecule odorless flue gas components is increased accordingly. Mechanistically, the deodorizer's performance is achieved via complexation reactions with electron-rich functional

收稿日期:2025-05-15;修订日期:2025-08-28

基金项目:山东省自然科学基金创新发展联合基金资助项目(ZR2024LZN020);山东省自然科学基金资助项目(ZR2023ME037)

第一作者:徐茜(1978—),女,辽宁丹东人,山东建筑大学副教授,硕士生导师,博士。E-mail:xuqian@sdjzu.edu.cn

通讯作者:耿立涛(1979—),男,辽宁法库人,山东建筑大学教授,硕士生导师,博士。E-mail:glt@sdjzu.edu.cn

groups in asphalt fume (including those containing S, N, O, and carbon-carbon double bonds), where the extent of complexation is dependent on the content of reactants and their chemical reactivity.

Key words: rubber-plastic asphalt; asphalt fume; chelation reaction type deodorizer; GC-MS analysis; fume suppression mechanism

以废胎胶粉单独或联用废旧塑料对道路沥青进行改性,可在基质沥青中形成网络互联结构^[1-2],从而提升沥青的高低温性能、水稳定性与抗疲劳性能^[3-8],同时实现废旧材料的资源化利用并降低工程成本^[9-10]。然而,由于废胎胶粉和废塑料中含有硫化物、抗氧化剂、塑化剂及多种高分子聚合物,其改性沥青及混合料在生产与施工过程中易释放含S、含N化合物及挥发性有机物等异味烟气^[11-13],对周边环境和人体健康造成潜在危害^[14]。因此,研究适用于此类改性沥青的高效净味技术具有重要环保意义。

目前,沥青烟气的治理主要采取源头抑制与烟气处理两种方式。其中,源头抑制技术多通过添加金属氢氧化物^[15-17]、碳单质材料^[18]、纳米材料^[19]或采用温拌技术实现^[20];而烟气处理技术包括燃烧法、静电捕集法及等离子体除尘法等^[21-24]。然而,现有技术对废橡胶、废塑料类改性沥青异味烟气的净化效果有限,部分方法还存在成本较高、工艺复杂或影响沥青性能等问题。

螯合反应基于螯合剂与特定金属或非金属原子反应形成稳定螯合物的机制,已在废水处理、医疗解毒及化工领域得到广泛应用,具有用量少、针对性强、效果显著等优势^[25-29]。本文通过掺加螯合反应型净味剂制备净味橡塑沥青,系统采集并检测烟气排放情况,结合改性沥青技术性能测试、烟气排放量统计及成分定性定量分析,评估了净味效果并分析了反应机理。

1 试验

1.1 原材料

基质沥青选用山东地区广泛使用的齐鲁70#道路石油沥青,其技术性能指标列于表1。改性剂基于前期研发的废旧橡胶-塑料复合改性剂^[4],其中废胎

橡胶粉粒度范围为250~425 μm(40~60目),废旧塑料以聚乙烯为主要成分,按照橡塑质量比7:3,经双螺杆挤出机共混制备。稳定剂采用生物基硫磺类稳定剂,S含量(质量分数,文中涉及的含量、掺量等均为质量分数)约为40%^[30]。净味剂为实验室自主开发的螯合反应型净味剂,由不饱和脂肪酸取代芳香酰基丙酮与活性稀土金属离子形成的络合物、促进剂及高分子聚合物载体经共混接枝制得;其在高温条件下可与含S、N等富电子基团的臭味杂环物质发生螯合反应,生成稳定性更高的配合物。图1为改性剂、净味剂及稳定剂的外观。

表1 齐鲁70#道路石油沥青的技术性能指标

Table 1 Technical performance indicators of Qilu 70# road asphalt

Item	Result	
Penetration (25 °C)/(0.1 mm)	72.5	
Softening point/°C	50.3	
Ductility (5 cm·min ⁻¹ , 10 °C)/cm	52.0	
Dynamic viscosity (60 °C)/(Pa·s)	236	
Thin film oven test (163 °C, 5 h)	Mass loss ratio/%	-0.12
	Penetration ratio (25 °C)/%	66.3
	Ductility (5 cm·min ⁻¹ , 10 °C)/cm	9.1

1.2 净味橡塑沥青的制备

在实验室条件下,采用常规工艺制备净味橡塑沥青,具体操作步骤如下:首先,将基质沥青加热至185 °C,依次加入改性剂与净味剂,利用剪切机以3 500 r/min的速率剪切1.5 h;之后,保持温度与剪切速率恒定,添加稳定剂,继续剪切0.5 h,至此完成试样制备。其中,改性剂和稳定剂的掺量分别设定为20.000%和0.200%;净味剂设置4个掺量水平,分别为0%、0.015%、0.025%和0.035%,以上掺量均以基质沥青质量计。

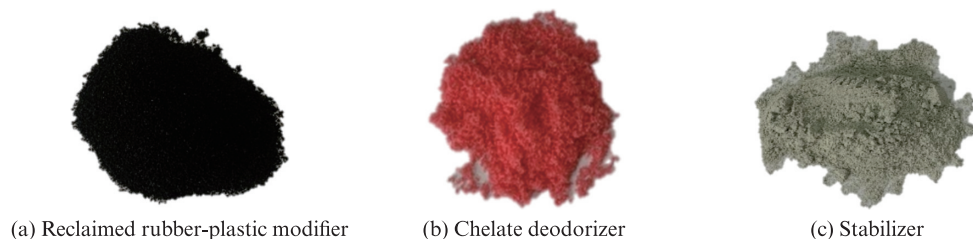


图1 改性剂、净味剂及稳定剂的外观

Fig. 1 Appearance of reclaimed rubber-plastic modifier, chelate deodorizer and stabilizer

1.3 技术性能与气味强度测试

依据JTGE20—2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》，对各橡塑沥青样品开展代表性指标测试，分析净味剂掺量对其性能的影响；同时，采用嗅觉测定法，测试不同净味剂掺量新鲜样品及在163℃下热存储72h后老化样品的气味强度，并参照六级分级法^[9]完成定量分级。

1.4 沥青烟气收集与气相色谱-质谱(GC-MS)测试

采用富集检测法^[31]收集橡塑沥青烟气，收集装置如图2所示，主要由3部分构成：沥青烟气发生装置(含搅拌功能，可促进烟气释放)、富集装置(内置经二次甲醇洗脱处理的滤膜及聚氨酯泡沫吸附剂)和抽气装置(真空泵，用于加速烟气富集)。试验过程中，先在发生装置中加热样品使其释放烟气，烟气在真空泵驱动下依次通过富集介质，从而完成收集。

采用GC-MS技术^[32]对橡塑沥青烟气开展定性与定量分析。具体操作如下：首先，将样品在185℃下收集烟气30min；随后，用65mL色谱纯丙酮进行洗脱，并稀释定容至1mL，以此制备GC-MS试样；最后，依据各组分的出峰时间与峰面积，鉴定其化学组成。

2 结果与讨论

2.1 技术性能及气味强度

橡塑沥青的技术性能及气味强度测试结果列于表2。由表2可知：(1)在技术性能方面，与未掺净味剂的对照组相比，掺加净味剂后橡塑沥青的针入度、延度、软化点及离析指标的最大相对变化率均在8%

以内，且PG等级保持稳定，表明净味剂的引入未显著影响橡塑沥青的技术性能。值得注意的是，净味剂的掺加使橡塑沥青的旋转黏度略有上升，推测与螯合反应生成的部分固态产物阻滞高温下黏性流体运动有关。(2)气味评价方面，未掺净味剂的对照组气味强度为4级(强烈气味)；掺加净味剂后，各橡塑沥青气味强度均降至0级(无味)，且该脱味效果经72h热存储后仍保持稳定。其核心机理为净味剂中活性离子络合物与沥青中含S基团等发生络合反应，形成了稳定无味的大分子络合物。

2.2 烟气质量变化

图3展示了橡塑沥青烟气质量与净味剂掺量的关系。由图3可见：与对照组相比，净味剂掺量为0.015%、0.025%和0.035%时，各橡塑沥青的烟气质量分别下降15.4%、40.7%和44.3%。这表明，净味剂对烟气的抑制效率随其掺量的增加而提高；然而，当净味剂掺量超过0.025%后，抑制效率的提升幅度明显变缓，这反映出螯合反应程度从不充分逐渐趋于饱和。此外，烟气质量的显著降低也证实净味剂与沥青组分反应后，其主要产物以非气态形式留存于沥青基体中。

2.3 GC-MS测试结果及反应机理

2.3.1 烟气数量

图4汇总了不同净味剂掺量下橡塑沥青GC-MS测试得到的色谱图。基于GC-MS分析及质谱库检索，橡塑沥青烟气主要成分为烷烃、烯烃、苯系物、噻唑、萘、噻吩、胺及醛类等化合物。通过质谱图解析和谱库检索鉴定发现：未掺净味剂时，橡塑沥青中鉴

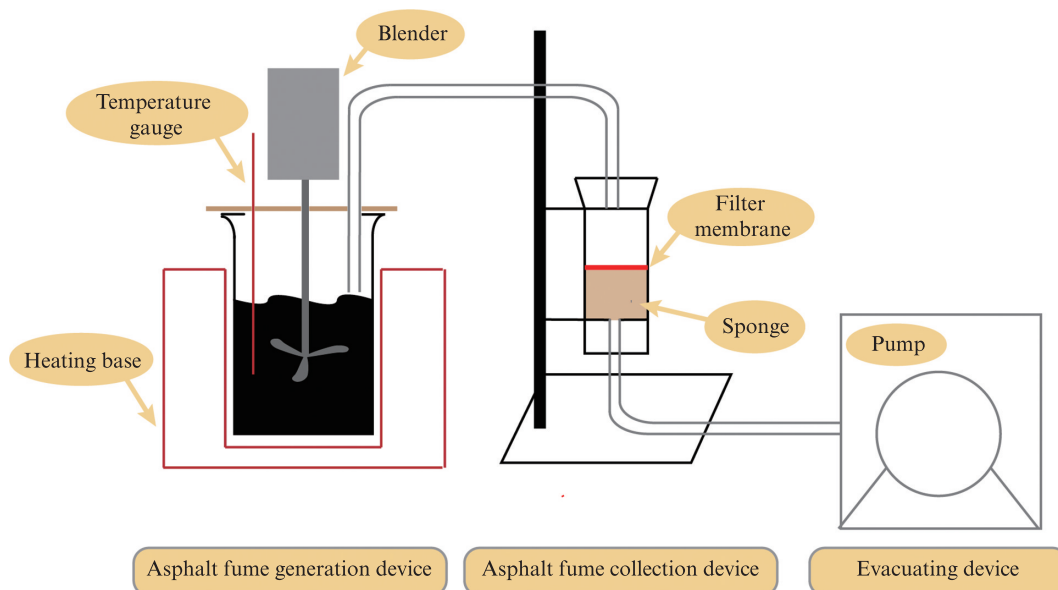


图2 沥青烟气收集装置

Fig. 2 Collecting device of asphalt fume

表2 橡塑沥青的技术性能及气味强度

Table 2 Technical properties and odor intensity of rubber-plastic asphalt

Item	$w(\text{deodorizer})/\%$				Maximum relative difference/%
	0	0.015	0.025	0.035	
Penetration (25 °C)/(0.1 mm)	40.5	40.0	43.1	42.4	6.40
Ductility (5 °C)/cm	8.7	9.2	8.8	9.1	5.70
Softening point/°C	69.4	69.8	70.0	68.8	0.90
Brookfield viscosity (135 °C)/(Pa·s)	12.20	12.80	13.30	14.30	17.21
Brookfield viscosity (175 °C)/(Pa·s)	2.05	2.14	2.64	2.83	38.00
Segregation softening point difference (163 °C, 48 h)/°C	4.0	3.6	4.2	4.3	7.50
Performance grade	76-22	76-22	76-22	76-22	
Odor intensity (163 °C, 0 h/72 h)	4	0	0	0	

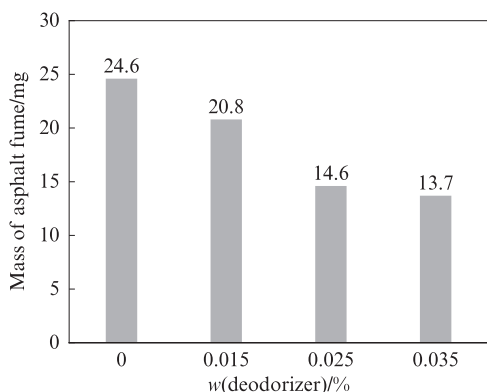


图3 橡塑沥青烟气质量与净味剂掺量的关系

Fig. 3 Relationship between mass of rubber-plastic asphalt fume and dosage of deodorizer

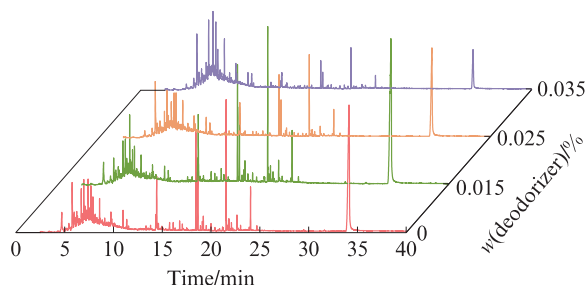


图4 不同净味剂掺量下橡塑沥青的色谱图

Fig. 4 Chromatograms of rubber-plastic asphalt with different dosages of deodorizers

定出115种组分;掺加净味剂后,组分总数降至106~110种,且各组分色谱峰面积随净味剂掺量呈规律性变化。通过CAS数据库与化学毒性数据库比对,将检测出的化合物分为3类:恶臭物质、有毒物质及无毒无味物质。基于图4数据,对各色谱曲线基线校准后积分目标峰,计算得到表征各化合物相对含量的峰面积。

2.3.2 恶臭烟气相对含量

恶臭烟气包括苯并噻唑(C_7H_5NS)、2-甲巯基苯并噻唑($C_8H_7NS_2$)、1-甲基二苯并噻吩($C_{13}H_{10}S$)、噻

吨($C_{13}H_{10}S$)及2,7-二甲基二苯并噻吩($C_{14}H_{12}S$)5种含S有机物。上述有机物本身具有强烈恶臭,且受热时还会与 O_2 反应,分解产生 H_2S 、 CO 等有毒有害气体。

图5展示了5种恶臭烟气峰面积随净味剂掺量的变化规律。由图5可见:(1)净味剂对恶臭烟气具有显著脱除效果,且净味效率与掺量呈正相关关系。具体而言,当净味剂掺量为0.015%、0.025%和0.035%时,5种恶臭烟气的总峰面积分别下降约8%、53%和62%。(2)苯并噻唑始终是含量最高的恶臭组分,其峰面积约为其余4种物质总和的4.5~8.5倍。(3)净味剂对不同恶臭组分的脱除效果存在差异,与对照组相比,当净味剂掺量为0.035%时,5种恶臭气体的排放量降幅依次为61.6%、100.0%、16.7%、93.5%和32.4%。

基于上述结果分析可知,净味剂对恶臭烟气展现的脱除效果,源于其与含S、N等富电子基团发生的特异性螯合作用。例如,式(1)呈现了净味剂与

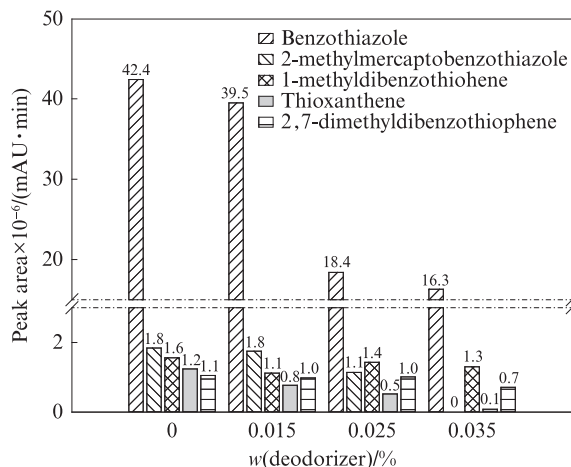
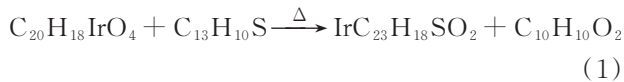


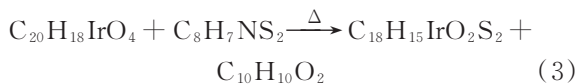
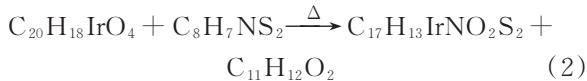
图5 恶臭烟气峰面积随净味剂掺量的变化

Fig. 5 Change of peak area of malodorous fume peak area with dosage of deodorizer

1-甲基二苯并噻吩的配体交换反应过程:



净味效果不仅受净味剂掺量的影响,还与恶臭烟气的相对含量及其分子反应活性密切相关。例如,2-甲基巯基苯并噻唑分子中含有2个S原子和1个N原子,可按通过式(2)、(3)所示的2种路径与净味剂发生螯合反应,故而其脱除效率最高。



对于苯并噻唑、噻吨及2,7-二甲基二苯并噻吩等其他恶臭物质,其脱除效果的差异主要源于分子结构与取代基位置的不同,这些因素共同决定了其电子云分布及反应活性,从而影响其与净味剂的螯合效率。

2.3.3 化学毒性烟气相对含量

对比化学毒性数据库可知,橡塑沥青烟气中含有数种化学毒性物质,包括苯并噻唑($\text{C}_7\text{H}_5\text{NS}$)、1-甲基萘($\text{C}_{11}\text{H}_{10}$)、三甲基-1,2-二氢喹啉($\text{C}_{12}\text{H}_{15}\text{N}$)和2,4,6-三叔丁基苯酚($\text{C}_{18}\text{H}_{30}\text{O}$)。其中,苯并噻唑同时具有毒性与恶臭属性。

图6展示了这些化学毒性物质峰面积随净味剂掺量的变化规律。需强调的是,实验室加速富集条件下的烟气浓度远超实际环境,而毒性危害与暴露剂量密切相关,故该结果仅能反映净味剂的相对抑制效果,无法用于实际场景的绝对风险评估。由图6可见:(1)未掺净味剂时,橡塑沥青中各化学毒性烟气的相对含量差异显著,其中苯并噻唑占主导地位(55.2%),其次为三甲基-1,2-二氢喹啉(30.9%)和

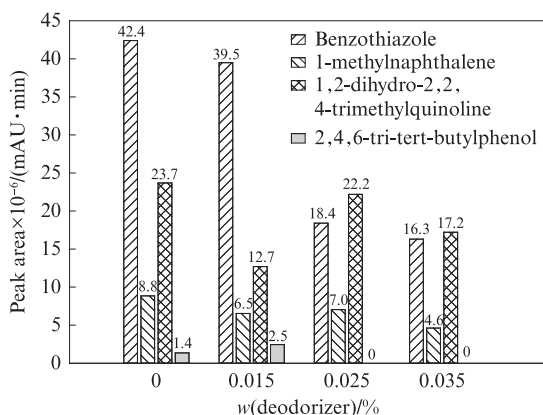


图6 化学毒性烟气峰面积随净味剂掺量的变化

Fig. 6 Change of peak area of chemical toxic fume with dosage of deodorizer

1-甲基萘(11.5%)。(2)化学毒性烟气的总排放量(以峰面积总和计)随净味剂掺量增加而持续下降,与对照组相比,净味剂掺量为0.015%、0.025%和0.035%时,化学毒性烟气的峰面积总和分别降低约20%、37%和50%。(3)净味剂对不同组分表现出选择性脱除特性,当净味剂掺量为0.035%时,4种毒性烟气的降幅介于27.4%~100.0%之间。这种选择性源于分子反应活性的差异:尽管所有组分均含有富电子基团(如S、N、O、双键等),能够与净味剂发生螯合反应,然而其具体的电子云分布、空间结构及反应路径不同,进而致使脱除效率有所差异。

2.3.4 无毒无味烟气相对含量

净味剂的掺入亦会对无毒无味烟气的排放产生影响。图7呈现了部分此类烟气组分峰面积随净味剂掺量的变化规律。由图7可见:(1)相对分子质量较小的化合物,如1,2,3,4-四氢异喹啉-6-醇-1-羧酸($\text{C}_{10}\text{H}_{11}\text{NO}_2$)、三甲基-1-丙烯基-吡嗪($\text{C}_{10}\text{H}_{14}\text{N}_2$)、1,6,7-三甲基萘($\text{C}_{13}\text{H}_{14}$)和十八烷基环己烷($\text{C}_{24}\text{H}_{48}$)等,其峰面积随净味剂的掺入而降低,表明它们参与了螯合反应。(2)相对分子质量较大的化合物,如3,5-双(1,1-二甲基乙基)苯丙酸十八烷基酯($\text{C}_{35}\text{H}_{62}\text{O}_2$)、2-[2-羟基-5-(1,1,3,3-四甲丁基)苯基]苯并三唑($\text{C}_{21}\text{H}_{27}\text{N}_3\text{O}$)、4,4'-二辛基二苯胺($\text{C}_{28}\text{H}_{43}\text{N}$)、双(4-叔丁基苯基)胺($\text{C}_{20}\text{H}_{27}\text{N}$)、叔辛基二苯胺($\text{C}_{28}\text{H}_{43}\text{N}$)和邻苯二甲酸二丁酯($\text{C}_{16}\text{H}_{22}\text{O}_4$)等,其峰面积随净味剂的掺入有所增加。结合式(1)~(3)推测,净味剂与恶臭物质反应产生的游离基团,引发了小分子的胺化与酯化反应,进而生成了新的大分子化合物。

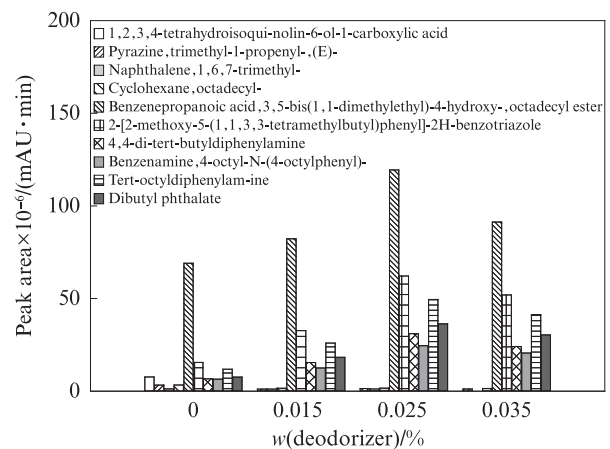


图7 无毒无味烟气峰面积随净味剂掺量的变化

Fig. 7 Change of peak area of non-toxic and odorless fume with dosage of deodorizer

综上所述,净味剂不仅可选择性脱除含S、N、O等富电子基团物质,还可能促使体系内的小分子转

化为大分子。故而,GC-MS检测中无毒无味组分峰面积的变化,是上述多重反应协同作用所致。

3 结论

(1)离子螯合型净味剂对橡塑沥青具有理想的净味效果,且未对其关键技术性能产生显著影响。

(2)在本研究净味剂掺量范围内,橡塑沥青的烟气质量与组分数均随净味剂掺量增加而显著下降,但抑烟效率在净味剂掺量超过0.025%后趋缓。

(3)净味剂的作用机制包括两方面:一是选择性螯合脱除含S、N、O等富电子基团的恶臭及毒性物质;二是诱导小分子化合物发生胺化与酯化反应,生成相对分子质量更大的无毒无味物质。

参考文献:

- [1] 朱浩然,蔡海泉,李峰,等.活性橡胶沥青胶结料微观结构分析[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2016,35(4):35-39. ZHU Haoran, CAI Haiquan, LI Feng, et al. Microstructure analysis of the reacted and activated rubber asphalt binder[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2016, 35(4):35-39. (in Chinese)
- [2] WANG S F, YUAN C H, DENG J X. Crumb tire rubber and polyethylene mutually stabilized in asphalt by screw extrusion[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2014, 131(23):81-86.
- [3] HAJIKARIMI P, AFLAKI S, HOSEINI A S. Implementing fractional viscoelastic model to evaluate low temperature characteristics of crumb rubber and gilsonite modified asphalt binders[J]. Construction and Building Materials, 2013, 49(49):682-687.
- [4] 任瑞波,耿立涛,徐强,等.废旧橡塑改性沥青及混合料的技术性能研究[J].建筑材料学报,2016,19(6):1092-1096,1110. REN Ruibo, GENG Litao, XU Qiang, et al. Performance of reclaimed rubber-plastic modified asphalt and its mixture[J]. Journal of Building Materials, 2016, 19(6):1092-1096,1110. (in Chinese)
- [5] 王永宁,李晓民,杨涛,等.活化胶粉复合改性沥青混合料的路用性能评价[J].建筑材料学报,2024,27(2):114-120. WANG Yongning, LI Xiaomin, YANG Tao, et al. Evaluation of road performance of activated rubber power composite modified asphalt mixture[J]. Journal of Building Materials, 2024, 27(2):114-120. (in Chinese)
- [6] LIANG M, REN S S, SUN C J, et al. Extruded tire crumb-rubber recycled polyethylene melt blend as asphalt composite additive for enhancing the performance of binder[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2020, 32(3):04019373.
- [7] 温永,王祯国,董永康,等. Terminal Blend 橡胶泡沫沥青制备及性能评价[J].建筑材料学报,2023,26(10):1129-1136. WEN Yong, WANG Zhenguo, DONG Yongkang, et al. Preparation and performance evaluation of foamed terminal blend rubberized asphalt binders[J]. Journal of Building Materials, 2023, 26(10):1129-1136. (in Chinese)
- [8] YAO Z Y, ZHANG J Z, GAO F L, et al. Integrated utilization of recycled crumb rubber and polyethylene for enhancing the performance of modified bitumen[J]. Construction and Building Materials, 2018, 170:217-224.
- [9] CONG P L, XUN P J, XING M L, et al. Investigation of asphalt binder containing various crumb rubbers and asphalts[J]. Construction and Building Materials, 2013, 40:632-641.
- [10] 马涛,陈葱琳,张阳,等.胶粉应用于沥青改性技术的发展综述[J].中国公路学报,2021,34(10):1-16. MA Tao, CHEN Conglin, ZHANG Yang, et al. Development of using crumb rubber in asphalt modification: A review[J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(10):1-16. (in Chinese)
- [11] WANG H P, LIU X Y, ERKENS S, et al. Experimental characterization of storage stability of crumb rubber modified bitumen with warm-mix additives[J]. Construction and Building Materials, 2020, 249:118840.
- [12] GHAVIBAZOO A, ABDELRAHMAN M, RAGAB M. Effect of crumb rubber modifier dissolution on storage stability of crumb rubber-modified asphalt[J]. Transportation Research Record, 2013, 2370(1):109-115.
- [13] 张超,杨飞燕,李青松,等.胶粉改性沥青存储稳定性研究进展[J].合成橡胶工业,2017,40(5):409-412. ZHANG Chao, YANG Feiyan, LI Qingsong, et al. Research progress in storage stability of rubber powder modified asphalt[J]. China Synthetic Rubber Industry, 2017, 40(5):409-412. (in Chinese)
- [14] 董宴华,丛玉凤,孙蕊,等.无烟废旧胶粉改性沥青的制备及抑烟机理[J].建筑材料学报,2023,26(10):1111-1116,1136. DONG Yanhua, CONG Yufeng, SUN Rui, et al. Preparation and smoke suppression mechanism of smokeless waste rubber powder modified asphalt[J]. Journal of Building Materials, 2023, 26(10):1111-1116,1136. (in Chinese)
- [15] 郭恩霞,任向征,谷晓昱,等.聚合物抑烟剂的研究进展[J].现代塑料加工应用,2021,33(6):48-51. GUO Enxia, REN Xiangzheng, GU Xiaoyu, et al. Research progress of polymer smoke suppressant [J]. Modern Plastics Processing and Applications, 2021, 33(6):48-51. (in Chinese)
- [16] 黄志义,武斌,康诚,等.复合氢氧化物改性沥青阻燃和路用性能[J].浙江大学学报(工学版),2016,50(1):27-32. HUANG Zhiyi, WU Bin, KANG Cheng, et al. Flame retardant and pavement performance of composite hydroxide modified asphalt[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2016, 50(1):27-32. (in Chinese)
- [17] 朱凯.基于沥青多组分燃烧特性的钙基纳米复合阻燃体系研究[D].杭州:浙江大学,2015. ZHU Kai. Study on calcium-based flame retardant nanocomposites base on multi-components combustion characteristics of asphalt[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015. (in Chinese)
- [18] 崔培强.沥青VOC分析技术及抑制方法研究[D].武汉:武汉理工大学,2015.

- CUI Peiqiang. Research methodologies on the VOC emissions from bituminous materials and its inhibitor[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2015. (in Chinese)
- [19] 杨锡武, 彭绪亚, 张兴雨, 等. 沥青烟气抑制剂及沥青混合料性能的试验[J]. 重庆大学学报, 2013, 36(12):70-78.
YANG Xiwu, PENG Xuya, ZHANG Xingyu, et al. Experiments on the asphalt fume suppression agents and properties of asphalt concrete with fume suppression agent[J]. Journal of Chongqing University, 2013, 36(12):70-78. (in Chinese)
- [20] 刘至飞, 吴少鹏, 陈美祝, 等. 温拌沥青混合料现状及存在问题[J]. 武汉理工大学学报, 2009, 31(4):170-173.
LIU Zhifei, WU Shaopeng, CHEN Meizhu, et al. Status and problems of warm mix asphalt[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2009, 31(4):170-173. (in Chinese)
- [21] 曹威扬. 微波加热焚烧法处理沥青烟气的研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2012.
CAO Weiyang. Study of microwave assisted incineration of asphalt flue gas[D]. Kunming: Kunming University of Technology, 2012. (in Chinese)
- [22] 刘平, 李六一, 周英涛, 等. 炭素焙烧沥青烟气治理[J]. 环境污染与防治, 2002, 24(1):34-35.
LIU Ping, LI Liuyi, ZHOU Yingtao, et al. Treatment for asphalt fume from carbon baking[J]. Environmental Pollution & Control, 2002, 24(1):34-35. (in Chinese)
- [23] 张洪林. 流化吸附法净化处理沥青烟气的研究[J]. 环境工程, 1995, 13(1):21-24.
ZHANG Honglin. A study on the treatment of asphalt smoke by fluiding adsorbent[J]. Environmental Engineering, 1995, 13(1):21-24. (in Chinese)
- [24] 宁前进. 炭素厂沥青烟气的危害及治理[J]. 轻金属, 2011(11):40-45.
NING Qianjin. Harm and treatment of pitch fume from carbon plants[J]. Light metals, 2011(11):40-45. (in Chinese)
- [25] 陈韦帆, 周丽玲, 陈家斌, 等. 化学沉淀法处理含铊钢铁废水研究及应用进展[J]. 净水技术, 2025, 44(3):35-43, 85.
CHEN Weifan, ZHOU Liling, CHEN Jiabin, et al. Research and application progress of chemical sedimentation for thallium removal in steel industrial wastewater [J]. Water Purification Technology, 2025, 44(3):35-43, 85. (in Chinese)
- [26] 管映兵, 汤超, 黄慧, 等. 重金属絮凝剂MAAPAM对水中Cu(II)捕集条件的优化和机理[J]. 水处理技术, 2024, 50(12):39-44.
GUAN Yingbing, TANG Chao, HUANG Hui, et al. Condition optimization and mechanism of heavy metal flocculant maapam for the removal of cu from water [J]. Technology of Water Treatment, 2024, 50(12):39-44. (in Chinese)
- [27] 周大洲, 余志成, 宋凯利. 中性黄220酸性浴锦纶染色匀染性研究[J]. 纺织科学与工程学报, 2024, 41(4):32-37.
ZHOU Dazhou, YU Zhicheng, SONG Kaili. Study on levelness of neutral yellow 220 acid bath nylon dyeing[J]. Journal of Textile Science and Engineering, 2024, 41(4):32-37. (in Chinese)
- [28] 李德凤, 查晓明, 许常旭, 等. 金属离子及其螯合剂在阿尔茨海默症中的研究进展[J]. 亚太传统医药, 2013, 9(9):56-59.
LI Defeng, ZHA Xiaoming, XU Changxu, et al. Recent progress in the studies of metal ions and metal chelators in Alzheimer's disease[J]. Aisa-Pacific Traditional Medicine, 2013, 9(9):56-59. (in Chinese)
- [29] 杨彪, 冯妍, 李峥, 等. 动物羽毛和大豆豆粕制备复合氨基酸螯合钙的工艺研究[J]. 应用化工, 2024, 53(6):1320-1324.
YANG Biao, FENG Yan, LI Zheng, et al. Technology research on the preparation of calcium complex amino acid chelate from animal feathers and soybean meal[J]. Applied Chemical Industry, 2024, 53(6):1320-1324. (in Chinese)
- [30] GENG L T, LIU Y, XU Q, et al. Development of bio-based stabilizers and their effects on the performance of SBS-modified asphalt [J]. Construction and Building Materials, 2021, 271:121889.
- [31] WANG M, LI P, NIAN T F. An overview of studies on the hazards, component analysis and suppression of fumes in asphalt and asphalt mixtures [J]. Construction and Building Materials, 2021, 289:123185.
- [32] 周佳璐, 丛培盛, 汤桂林, 等. 利用气质联用技术对木材进行分类和鉴别[J]. 建筑材料学报, 2006, 9(1):36-40.
ZHOU Jialu, CONG Peisheng, TANG Guilin, et al. Classification and identification of wood by GC-MS [J]. Journal of Building Materials, 2006, 9(1):36-40. (in Chinese)