

道路沥青挥发性有机化合物减排材料的研究进展

Chang, Xiwen; Long, Yongshuang; Yi, Mingwei; Wang, Chen; Xiao, Yue

DOI

[10.11896/cldb.22040399](https://doi.org/10.11896/cldb.22040399)

Publication date

2023

Document Version

Final published version

Published in

Cailiao Daobao/Materials Reports

Citation (APA)

Chang, X., Long, Y., Yi, M., Wang, C., & Xiao, Y. (2023). 道路沥青挥发性有机化合物减排材料的研究进展. *Cailiao Daobao/Materials Reports*, 37(20), Article 22040399. <https://doi.org/10.11896/cldb.22040399>

Important note

To cite this publication, please use the final published version (if applicable).
Please check the document version above.

Copyright

Other than for strictly personal use, it is not permitted to download, forward or distribute the text or part of it, without the consent of the author(s) and/or copyright holder(s), unless the work is under an open content license such as Creative Commons.

Takedown policy

Please contact us and provide details if you believe this document breaches copyrights.
We will remove access to the work immediately and investigate your claim.

Green Open Access added to TU Delft Institutional Repository

'You share, we take care!' - Taverne project

<https://www.openaccess.nl/en/you-share-we-take-care>

Otherwise as indicated in the copyright section: the publisher is the copyright holder of this work and the author uses the Dutch legislation to make this work public.

道路沥青挥发性有机化合物减排材料的研究进展

常郗文¹, 龙永双¹, 仪明伟^{1,2}, 王晨³, 肖月^{1,4,✉}

- 1 武汉理工大学硅酸盐建筑材料国家重点实验室, 武汉 430070
- 2 中公高科养护科技股份有限公司, 北京 100095
- 3 代尔夫特理工大学土木工程与地球科学学院, 荷兰代尔夫特 2628CN
- 4 长安大学材料科学与工程学院, 西安 710061

沥青路面施工时, 由于沥青自身复杂有机物的特点, 受热会导致沥青挥发性有机化合物 (Volatile organic compounds, VOCs) 释放加剧。沥青 VOCs 的挥发, 不仅对环境造成不可逆的危害, 也对施工人员的健康构成威胁。道路建筑领域的研究者基于沥青 VOCs 的释放机理, 开展了各类减排技术和减排材料研究, 但是由于减排方法和减排效果量化标准的差异, 尚未有研究对沥青 VOCs 减排材料进行系统归纳和全面分析。本文概括了当前国内外沥青 VOCs 减排研究现状, 总结了减排技术的发展历程及以抑制剂、温拌剂和阻燃剂为主的各类减排材料的沥青 VOCs 减排机理。同时, 综合评述了不同减排材料的减排效果, 归纳了沥青 VOCs 高效减排技术的改进趋势和发展沥青 VOCs 新型减排材料的研究方向, 以期实现沥青绿色低碳排放施工。最后, 围绕沥青 VOCs 减排的环保主题, 对未来沥青 VOCs 全生命周期排放机制和高效复合减排材料的可行性研发提出了展望, 以支撑当前社会发展对绿色交通的迫切需求。

关键词 道路沥青材料 挥发性有机化合物 VOCs 减排 抑制剂 温拌剂 阻燃剂

中图分类号: U414 **文献标识码:** A

Research Progress of Emission Reduction Materials for Volatile Organic Compounds Reduction in Asphalt Pavement Construction

CHANG Xiwen¹, LONG Yongshuang¹, YI Mingwei^{1,2}, WANG Chen³, XIAO Yue^{1,4,✉}

- 1 State Key Laboratory of Silicate Materials for Architectures, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China
- 2 RoadMainT Co., Ltd., Beijing 100095, China
- 3 Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Delft University of Technology, Delft 2628CN, the Netherlands
- 4 School of Materials Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, China

Due to the complex organic properties of asphalt materials, the heating process during asphalt pavement construction will lead to the release of asphalt VOCs. Asphalt VOCs volatilization will cause irreversible harm to both the environment and health of construction workers. Researchers in the field of road construction have carried out extensive research on various emission reduction materials and technologies based on release mechanism of asphalt VOCs. There are no comprehensive research and intuitive comparison on emission reduction materials due to the differences between quantitative standards for emission reduction effects. This paper summarizes the current research status of asphalt VOCs emission reduction, including the development history of emission reduction technology and reduction mechanism of various asphalt VOCs emission reduction materials mainly based on inhibitors, warm mixing agents and flame retardants. In addition, the emission reduction effects of different emission reduction materials are compared and the improvement trend research direction of new and efficient asphalt VOCs reduction technology and materials are proposed to achieve green and low-emission construction. Finally, around the environmental protection theme of VOCs emission reduction, this study also put forward the prospect of full life cycle emission mechanism and feasibility of efficient composite materials design to support the urgent need for green transport.

Key words asphalt paving materials, volatile organic compounds, VOCs emission reduction, inhibitor, warm mixing agent, flame retardant

0 引言

沥青材料具有其他路面材料不具备的粘弹性特点, 能有效降低车辆行驶的噪音、减少路面积水, 因此, 被广泛用于道路和桥梁建筑中^[1]。据 2021 年《交通运输业发展统计公报》统计, 截至 2021 年末, 我国公路总里程 528.07 万 km, 比上年末增加 8.26 万 km^[2]。交通运输行业的飞速发展, 在支撑国民经济快速发展的同时, 亦导致了道路沥青材料的大量消耗, 预示着路面建设时产生的污染不可忽视^[3]。

鉴于沥青施工过程需满足和易性, 热拌沥青混合料生产温度需高达 160 °C, 该高温环境加速了挥发性有机化合物

(Volatile organic compounds, VOCs) 的大量逸出, 包括烷烯烃、烃类衍生物、含硫含氮物、苯环和杂环物质以及多环芳烃 (Polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs) 等, 对施工人员和环境造成了严重威胁^[4-5]。国内外学者围绕沥青 VOCs 的释放机理和减排方法开展了大量研究^[6], 由于沥青施工开放环境的限制, VOCs 减排不能简单沿用工业废气废水的处理方式——对有机物进行收集再处理, 有研究人员借助改性沥青思维, 尝试通过向沥青中添加抑制材料制备改性沥青, 实现了 VOCs 有效减排。当前具有 VOCs 减排效果的沥青添加剂根据其减排形式分为抑制剂、温拌剂和阻燃剂三大类。抑制剂材料通常借助自身孔道或网状交联结构对 VOCs 分子进行

基金项目: 国家自然科学基金 (51878526)

This work was financially supported by the National Natural Science Foundation of China (51878526).

✉ xiaoy@chd.edu.cn

22040399-1

DOI: 10.11896/cldb.22040399

物理和化学作用, 达到禁烟 VOCs 的效果^[7]。温拌剂是一种间接的 VOCs 减排技术, 温度是影响沥青 VOCs 排放的第一要素, 温度越高, VOCs 释放量越大, 温拌剂能通过降低拌合温度的方式间接减少 VOCs 的产生^[8]。阻燃剂则通过中断交换阻燃和凝聚相阻燃两种方式延缓沥青燃烧, 也为沥青 VOCs 减排提供了科学途径^[9]。

在环保需求不断扩大、节能减排观念不断加强的今天, 社会各界积极响应可持续发展的号召, 道路领域学者已基于沥青 VOCs 挥发性开展了系列减排研究工作。但由于减排材料和减排手段差异的限制, 沥青 VOCs 的减排体系尚未完全建立, 减排剂分类以及减排效果仍缺少全面的数据对比, 减排手段和机理尚缺乏完整的理论归纳。本文将梳理沥青 VOCs 减排研究历程, 归纳不同沥青减排抑制材料的减排机理与效果, 并建立系统的沥青 VOCs 材料-机理-效果的减排体系, 为进一步实现绿色交通提供理论基础和工程指导。

1 沥青 VOCs 减排研究的发展

1.1 沥青 VOCs 的主动减排策略

根据道路施工程序, 沥青 VOCs 的产生可分为短暂高温加工和长期低温服役两个阶段。高温阶段包括沥青自身受热阶段和沥青与集料的拌合摊铺两个过程, 通常温度大于 130 °C。依据温度对沥青 VOCs 的影响规律^[10], 高温条件下 VOCs 快速释放, 毒性和挥发量较大, 对环境和施工人员的危害较强。低温阶段指路面建成后的长期使用阶段, 即使是在夏季, 路面温度一般也低于 70 °C, 挥发速率相对较慢。鉴于沥青 VOCs 的挥发特性, 其减排方式经历了以电捕法、冷凝法和吸附法为主的后端传统减排方式, 向以抑制剂、温拌剂和阻燃剂为辅助的新型减排方式变革, 具体发展脉络如图 1 所示。

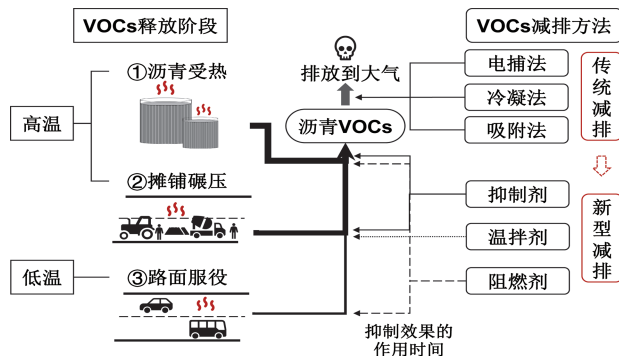


图 1 沥青 VOCs 减排技术的发展脉络
Fig. 1 Development of asphalt VOCs emission reduction technologies

传统减排法与其他领域 VOCs 治理一致, 虽然都能一定程度上减少空气污染, 但由于先产生后治理的步骤限制, 不能实现从源头处切断 VOCs 产生。由于开放的路面施工和服役环境, 路域 VOCs 收集困难、治理操作复杂等现实问题日趋明显, 传统减排法一直无法突破其瓶颈, 难以实现热拌沥青路面 VOCs 的高效减排。新型减排技术在不影响沥青路用性能的基础上, 采用添加剂材料制备改性沥青的方式, 有效解决了这一技术难点, 推动了沥青 VOCs 减排技术的发展。

1.2 沥青 VOCs 减排材料的分类

以降低沥青 VOCs 排放为目的的添加剂材料可统称为沥青 VOCs 减排材料, 其可根据减排方式和机理的不同, 分为如图 2 所示的三大类: 抑制剂、温拌剂和阻燃剂。其中, 抑制剂基于物理吸附、化学抑制和催化作用实现减排, 且大多数抑制剂具有多重减排效果; 温拌剂是基于沥青 VOCs 温度敏感性的一类材料, 通过降低施工温度实现有效减少沥青 VOCs 的排放; 阻燃剂则通过阻隔沥青加热过程中的热量传导以减少轻质组分的挥发, 其阻燃机理复杂, 涉及多元复合材料在高温下的物理化学性质。

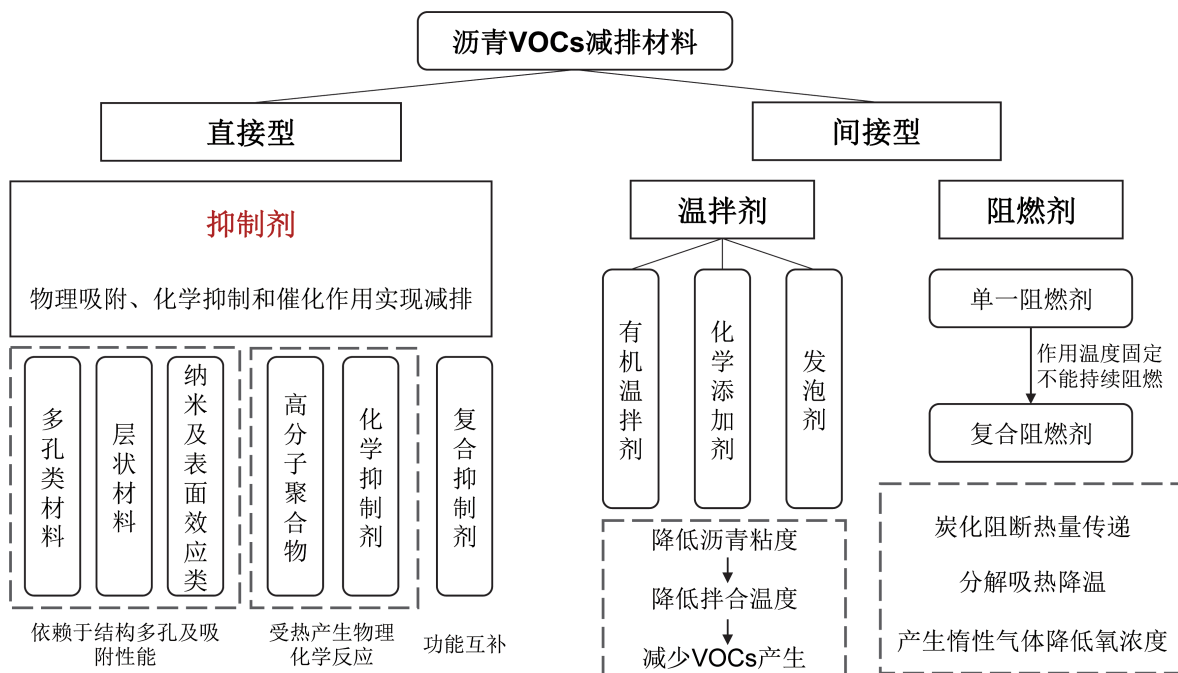


图 2 道路沥青中挥发性有机化合物减排材料的分类
Fig. 2 Classification of asphalt VOCs emission reduction materials

2 VOCs 抑制剂及其减排效果

抑制剂是一种直接型沥青 VOCs 减排添加剂,图 3 简要总结了其发展历程。自 2010 年以来,沥青 VOCs 抑制剂的研

究开始迅速发展,由最初的 5 种抑制材料逐渐发展为 10 余种。从抑制剂的结构来看,多孔类和层状物质由于较大的比表面积和优良的吸附特性而较早地被应用到沥青减排中。随着纳米材料及其制备技术的发展越来越成熟,基于纳米效

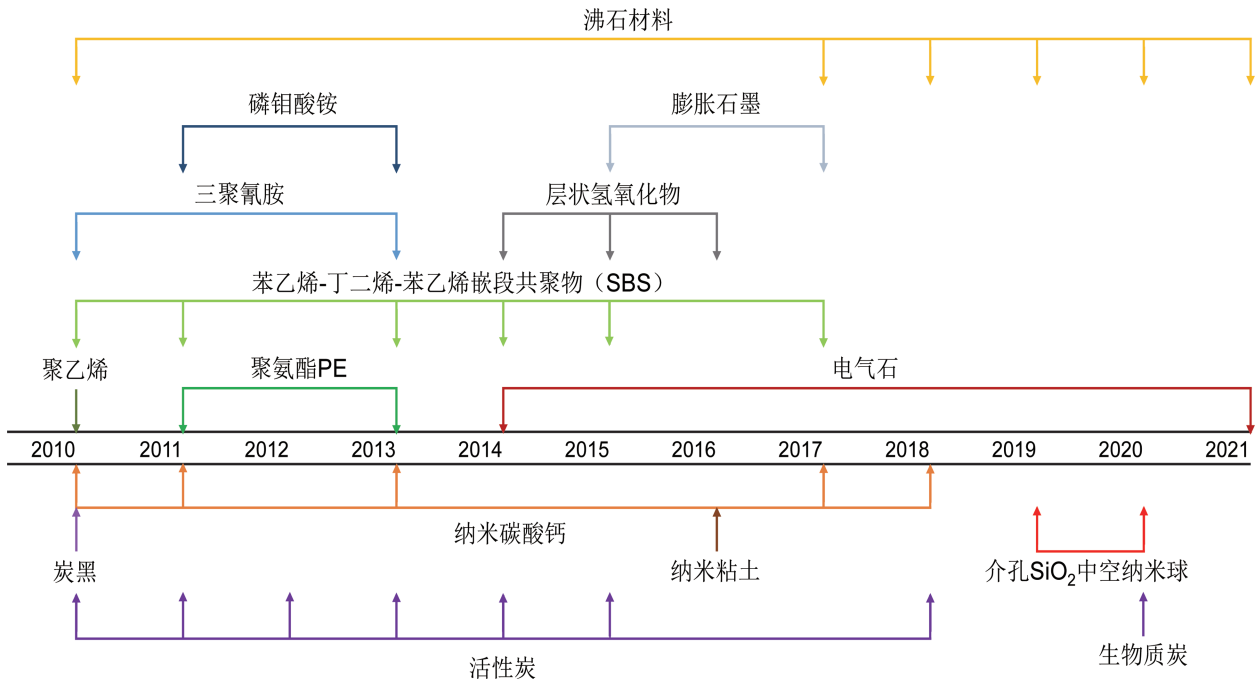


图 3 沥青 VOCs 抑制剂的简要发展历程
Fig. 3 Brief development history of asphalt VOCs inhibitors

应的沥青 VOCs 纳米抑制剂也得到了广泛关注。

根据抑制剂在沥青减排中发生的反应类型,可将其分为如图 4 所示的三类——物理吸附-抑制、化学吸附-抑制和复合抑制,其中物理吸附-抑制是当前 VOCs 减排最为高效的方式。在工业和民用工程领域中,物理吸附被广泛运用于各类有害气体的吸附^[11],可吸附性强、择形性不大、吸附机理简单

等优势使物理吸附抑制剂材料成为研究者的首要关注对象。现有的抑制剂,如多孔类材料^[12]、层状物^[13]、高分子聚合物^[14]以及纳米材料^[15]等,都具有物理吸附抑制效果。化学抑制则通过自身发生化学分解降温,或促进沥青分子间化学反应的方式实现沥青 VOCs 减排。大多数抑制剂的作用效果都不单纯表现在某一类吸附-抑制,通常具有复合抑制作用,

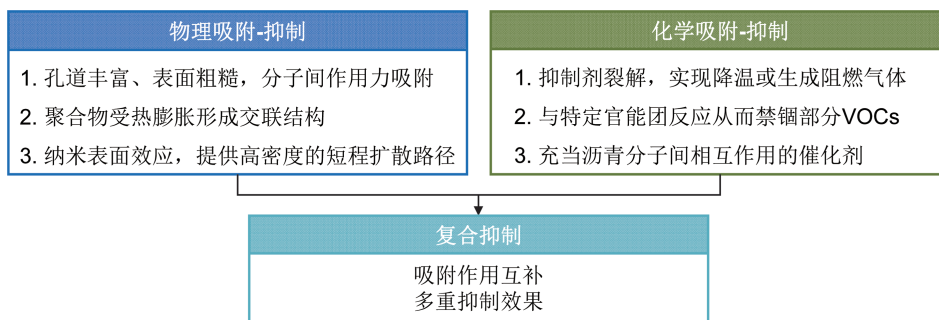


图 4 沥青 VOCs 抑制剂的减排机理
Fig. 4 Emission reduction mechanism of asphalt VOCs inhibitors

也具有比单一抑制类型更好的抑制效果。

2.1 多孔类材料

多孔类材料一般具有丰富的孔道结构和较大的比表面积,其粗糙的表面及丰富且可修饰的内部孔道结构有利于沥青 VOCs 的吸附,同时能为轻质分子的附着提供有效物理空间^[16-17]。

2.1.1 活性炭和生物质炭

沥青 VOCs 减排研究初期,活性炭由于优良的孔道结构

和高吸附容量而被众多研究者关注^[18]。同时,在活化过程中活性炭的表面发生不完全的炭化而带有其他元素,并以有机官能团的形式存在于表面,如羧基、羟基、酚类等。这些有机官能团能与被吸附物之间形成化学键,具有优异的潜在吸附效果^[19]。目前围绕活性炭和生物质炭用于沥青材料生态设计的相关研究可概括于表 1^[20-28]。

2010 年,Xiao 等^[24]采用重量法检测沥青 VOCs 的释放量,率先探究了活性炭对沥青 VOCs 的抑制效果,研究表明活

表 1 活性炭类材料分类及其 VOCs 减排特点

Table 1 Classification of activated carbon materials and their VOCs reduction characteristics

活性炭类	抑制剂特点	减排效果(减排效率@ 掺量质量分数)	文献		
活性炭	堆积密度低(0.38~0.65 g/cm ³) 比表面积大(>1 000 m ² /g) 介/微孔共存, 单层吸附和毛细吸附相配合 表面存在活性络合物	27.8% @ 3%	张红华(2014) ^[20]		
		30.3% @ 4%			
		33.5% @ 5%			
		30.8% @ 6%			
		21.6% @ 2%	黄刚(2013) ^[21]		
		18.9% @ 3%			
		不同 VOCs 的选择性吸附, 存在双向选择效应		Long Yongshuang (2018) ^[22]	
		41.6% @ 1%	Qian Shilin(2011) ^[23] Xiao Fei(2010) ^[24] 张新雨(2011) ^[25]		
		33.0% @ 3%			
		24.5% @ 1%			
19.6% @ 5%	Peng Xuya(2010) ^[19]				
33.9% @ 3%					
38.4% @ 4%	Cui Peiqiang (2015) ^[26]				
42.0% @ 5%					
39.3% @ 6%					
炭黑	无定形碳 轻、松且极细	-4.8% @ 4%	Xiao Fei(2010) ^[27]		
生物质炭	猪粪生物质炭(PBA)-聚集结构、无空隙	SBA-59.8%	Zhou Xinxing(2020) ^[28]		
	废木材生物质炭(WBA)-结构多孔、较密致	WBA-96.4%			
秸秆生物质炭(SBA)-结构多孔、较密致	PBA-47.6%				
PBA 和 WBA-石墨和无定形碳,SBA-完美晶体 吸附顺序: 饱和物-芳烃-胶质-沥青质	对烷烃、PAHs 和硫化物 抑制较强				

性炭掺量较小时以内部毛细管吸附作用为主,但当活性炭掺量达到特定值后,由于活性炭表面含氧化合物或络合物的催化活性促使新气体产生量大于物理吸附量,因此随着活性炭掺量增加抑制效果出现减弱趋势。张新雨^[25]的研究也证实了该发现,其结果还认为活性炭的吸附能力受材料孔容和表面催化反应两种相互制约因素的影响,存在掺量极值。张红华^[20]分析了掺 3%~6% 活性炭的沥青 VOCs 减排效果,得到与 Xiao 等^[24]一致的结论,即掺量对减排效果具有显著影响,掺量为 5% 时减排效果最佳,可达 33.5%。

Xiao 等^[24]和张新雨^[25]的研究均发现,活性炭的催化活性也会催化副反应,实验散发出强烈的青霉素气味,对后续研究产生了负面影响。同时期,黄刚^[21]也验证了该发现,通过对比多种阻燃型、非极性有机物型和物理吸附型抑制剂材料的抑制效果,证实虽然属于非极性有机物型的活性炭材料对沥青 VOCs 的吸附效果可达 20%,但将其掺入沥青时会有大量刺激性气味产生,造成二次环境污染,因此活性炭的催化作用和官能团间的化学作用有待进一步研究及验证。为深入研究活性炭的结构特性对 VOCs 不同分子的吸附机制,Long 等^[22]采用气相色谱质谱法探究了其吸附特性,结果表明,比表面积为 540 m²/g、总孔容为 0.427 8 cm³/g 的活性炭对小分子物质的减排可达 60% 以上,对 PAHs 和大分子的抑制效果高达 35%~50%,体现了沥青 VOCs 与活性炭之间存在双向选择特性。

生物质炭是生物质的副产品,可从猪粪、废木材和秸秆等生物质的热解产物中获得,其表面积和孔隙率较大,因此被认为具有类似活性炭的良好吸附性能。活性炭的形貌中孔结构较多,利于 VOCs 在其内部禁锢;而生物质炭的表面形

貌更丰富,更有利于 VOCs 在其表面附着。Zhou 等^[28]研究了三种生物质炭对沥青总挥发物的减排效果和对 18 种 VOCs 分子的减排特性,结果显示,长链烷烃均能获得较好的抑制效果,芳香族物质的抑制效果受物质种类影响较大,含硫含氮物的减排效果较差,可认为生物质炭能有效减少 VOCs 排放,但对毒性较大的物质抑制效果不强。该实验还从吸附热的角度分析了生物质炭的抑制机理,推断吸附热较小的猪粪生物质炭的抑制过程以物理吸附为主,秸秆和废木材生物质炭的抑制 VOCs 过程中则发生了部分化学反应。

抑制剂的减排效果由抑制剂种类和掺量两个因素决定。活性炭不同掺量下和生物质炭 5% 掺量下的抑制效果分别如图 5 和图 6 所示,由图可知,三种活性炭对 VOCs 抑制效果存在些许差异,主要归因于活性炭的种类不同。活性炭对小分子的抑制效率均大于 40%,对 PAHs 和大分子物质(如萘、十五烷)的抑制效率也能达到 20% 以上,表明活性炭的各类分子的抑制效果均较强。生物质炭对 VOCs 的抑制效率略高于活性炭,这是因为生物质炭存在微生物的分解作用而提高了

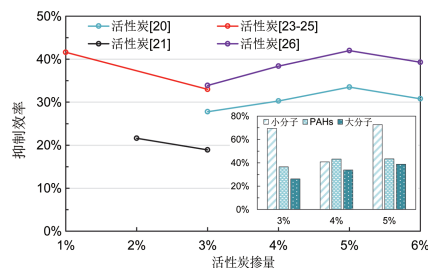


图 5 活性炭的 VOCs 减排效果对比^[20-21, 23-26] (电子版为彩图)

Fig. 5 VOCs emission reduction effect comparison of different activated carbon^[20-21, 23-26]

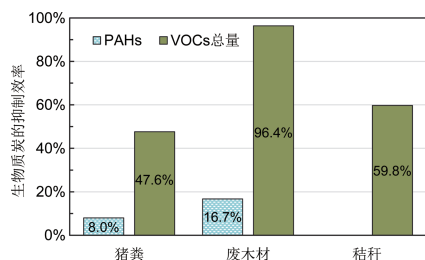
图6 生物质炭对PAHs和VOCs总量的抑制效果^[28]Fig. 6 VOCs emission reduction effect of biochar on PAHs and total VOCs^[28]

表2 沸石抑制材料分类及其VOCs减排特点

Table 2 Classification of zeolite materials and their VOCs reduction characteristics

抑制剂	抑制剂特点	减排效果(减排效率@ 掺量质量分数)	文献
ZSM-5沸石	三维的交叉通道 微孔,孔径约为0.55~0.9 nm 热稳定性强、比表面积大	抑制2~11种沥青VOCs A-16.0% B-11.1% C-42.9%	常郗文(2020) ^[10]
固废基沸石	不规则的八面体结构 明显的颗粒形状,表面光滑 介孔材料 高温稳定性强	抑制链烃、烃类衍生物、苯及同系物 45.7% @ 2% 60.0% @ 5% 45.9% @ 7%	张鹏飞(2020) ^[29]
氢氧化钙基沸石	表面粗糙,呈花簇状,无机元素 沸石结构的部分无定型化 100~200℃沸石水分的蒸发降低沥青黏度	35.0% @ 5% 74.3% @ 2% 80.5% @ 4% 83.1% @ 6%	肖月(2020) ^[30] Sharma Ajit(2017) ^[31-32]

时,吸附效率更高。吸附孔径过大会导致吸附气体的再脱附,吸附孔径过小会导致分子无法进入孔道内而无效吸附。沥青VOCs分子大部分处于微孔尺寸,理论上微孔沸石对沥青VOCs的物理吸附较强。常郗文等^[10]探究了微孔ZSM-5沸石物理化学特性对VOCs减排的影响机制,结果表明所用沸石虽然均能有效减少VOCs挥发的种类,但对VOCs挥发总含量有抑制效果的ZSM-5系列沸石只有三种,其硅铝比分别为300、600和1200,对VOCs的抑制效率分别为16.0%、11.1%和42.9%。该研究还认为,沸石硅铝比、粒度和晶体结构特性对抑制沥青VOCs排放有不同作用机制,其中粒度大的沸石抑制组分种类较多,但总抑制效率不高,粒度小的沸石能对环烷烃类特定组分进行有效抑制。

(2) 介孔沸石

相比微孔沸石ZSM-5,介孔沸石具有更多样化的孔结构,存在物理吸附作用的同时也包含表面活性官能团的化学作用,因此具有更好的理论减排效果。肖月等^[33]自制沸石用于抑制沥青VOCs的研究中认为,铝钙比为1:2的沸石在掺量为5%时具有最优减排效果。该沸石对沥青VOCs的抑制除了基本孔道物理吸附外,还包括氢氧化钙的水蒸发特性,其带有的结晶水能在沸石的孔道内短暂存在,有效降低沥青黏度,从而降低拌合温度,进而减少沥青VOCs的产生。

Zhang等^[34]和Sharma等^[31]都自主设计了以氢氧化钙为原料的沸石并开展了其对VOCs的减排探究,评价了其抑制效果并验证了物理化学吸附共存的减排机理。Sharma的实验数据表明,180℃下2%~6%掺量的沸石对VOCs的抑制效

其表面活性,进而提升了吸附能力。

2.1.2 沸石材料

沸石材料是一种具备丰富孔隙结构和优良高温稳定性的新型人造材料,能通过调整制备工艺实现其孔道大小、形状以及酸性官能团的正向设计,因此逐渐成为了工业VOCs减排的常用吸附剂。在道路沥青材料VOCs减排领域中已报道的沸石种类及其抑制效果如表2^[10,29-32]所示。

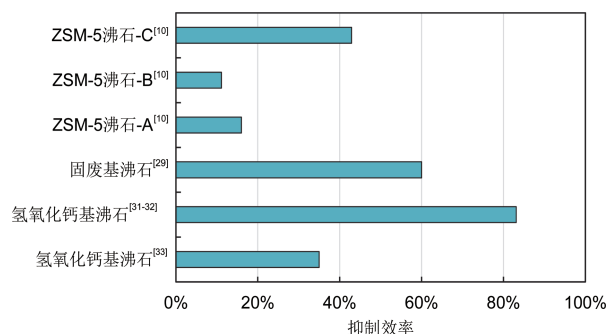
(1) 微孔沸石

物理吸附理论认为,当吸附孔径与被吸附物质粒径接近

率为61%~98%,其中醛类为52%~92%。张鹏飞等^[29]将固废基沸石用于VOCs减排,实现了对链烃类物质的有效抑制,结果表明,固废基沸石对苯及同系物的抑制效果随掺量增大而先增大后减小,最佳抑制效率高达60%。

(3) 催化效果前景

不同种沸石材料对沥青VOCs的减排效果总结如图7所示,沸石类型和孔径大小对其抑制效果有较大影响,但各类沸石的总体抑制效果均大于30%,其中Sharma等制备的氢氧化钙基沸石的抑制效果最好,最大抑制效率高达83%。固废基沸石对不同种类的VOCs抑制效果不同,具有选择性减排的潜力。

图7 沸石材料的VOCs抑制效果对比^[10,29,31-33]Fig. 7 VOCs emission reduction effect comparison of different zeolite materials^[10,29,31-33]

Chen等^[35]通过动态吸附实验对沸石进行结构测试,发现沸石除了吸附性能外,其催化性能可促进沥青VOCs的转化与吸附,因此,结合沸石丰富的孔道结构,进行沸石孔道内

修饰,实现特定官能团 VOCs 分子的定向抑制,将是后续沸石在沥青减排领域极具可行性的设计研发方向。Kamal 等^[36]总结了沸石对 VOCs 在催化体系中的研究进展和机理,为实现特定类型的 VOCs 减排提供思路。

活性炭类与沸石等多孔类材料的抑制机理均突出表现在物理吸附上,能通过孔道结构对 VOCs 组分进行大规模吸附,活性炭类的抑制效率为 20%~50%,沸石材料的抑制效率普遍大于 40%,可认为沸石作为一种热稳定材料掺入沥青具

有更高的减排价值。此外,相较于微孔沸石,介孔沸石由于其孔道结构更复杂,可设计性更强,后续综合催化和吸附的双重作用可设计开发特定型沸石材料。

2.2 层状材料

多孔类材料能通过孔道实现 VOCs 吸附,层状物质也能利用其层间相互作用减少 VOCs 逸出。目前,用于抑制沥青 VOCs 逃逸的层状材料有膨胀石墨和层状双氢氧化物,其基本情况总结于表 3^[20-21,26,37-41]。

表 3 层状抑制材料分类及其 VOCs 减排特点

Table 3 Classification of layered materials and their VOCs reduction characteristics

抑制剂	抑制剂特点	减排效果(减排效率@掺量质量分数)	文献
膨胀石墨	比表面积大,高表面活性和非极性表面微量极性基团,各向异性,可吸附极性分子 疏松多孔的蠕虫状,层间结构能被沥青组分插层或剥离 温度稳定性强(-204~1 650 ℃) 受热膨胀可将阻燃主体与热源隔开	61.1% @ 0.5%	孙仕伟(2017) ^[37]
		60.6% @ 1.0%	
		61.6% @ 1.5%	
		61.2% @ 2.0%	
		61.4% @ 2.5%	
		69.1% @ 0.25%	黄刚(2013,2015,2014) ^[21,38-39]
		67.5% @ 0.50%	
		62.0% @ 0.75%	
		64.5% @ 1.00%	
		67.4% @ 1.25%	
69.8% @ 1.50%			
层状双氢氧化物	Mg-Al 双层结构 具有特殊的层片结构 范德华力作用	对四种小分子的减排效果最好	Cui Peiqiang(2015,2016) ^[40-41]
		6.7% @ 3%	张红华(2014) ^[20]
		9.8% @ 4%	
		8.5% @ 5%	
		4.4% @ 3%	Cui Peiqiang(2015) ^[26]
		7.1% @ 4%	
6.2% @ 5%			

石墨经过一系列处理后,能制成疏松多孔类膨胀石墨,黄刚等^[39]对比了膨胀石墨在加入沥青前后的 SEM 图,证实掺入沥青后的膨胀石墨在受热时结构发生较大变化,石墨层变得空洞和折叠卷曲,其层间结构被沥青组分插层或剥离,从而实现沥青轻质组分和 PAHs 的有效吸附。该研究结论也被孙仕伟等^[37]证实,呈疏松多孔蠕虫状的膨胀石墨在掺入沥青后,按层展开,比表面积增大,有助于吸附毒性较强的 PAHs。黄刚和孙仕伟等的研究结果相互验证了膨胀石墨对 VOCs 减排的三点一致性,其一,膨胀石墨的掺入量一般较小,介于 0.25%~2.5%之间,这是由于膨胀石墨的层状铺展会极大地增加比表面积,达到吸附极限所需的掺量较少;其二,膨胀石墨的抑制效果较好,抑制效率均高于 60%,具有很强的吸附效应;其三,不同膨胀石墨掺量对沥青 VOCs 的抑制效果影响不大,通过调节掺量提升减排效率的实用性不强,均在 1.5%掺量时具有最好的抑制效果。Zhang^[42]的研究中也指出,虽膨胀石墨的 VOCs 抑制效果极佳,但其掺入沥青会导致沥青的粘度急剧下降,其作为沥青 VOCs 添加剂广泛应用还需开展更多增强沥青相容性的研究。

除此之外,Cui 等^[41]提出层状双氢氧化物(Layered double hydroxide,LDHs)具有特殊的 Mg-Al 双层结构,可依托其层间范德华力实现 VOCs 的物理吸附,减少沥青 VOCs 排放。张红华等^[20]也验证了不同 LDHs 掺量下的 VOCs 抑制效果,

该研究表明 LDHs 的总体 VOCs 抑制效率均低于 10%,且随着 LDHs 的掺量的增加,抑制效率呈先升高后降低的趋势,在 4%掺量时抑制效果最强,与 Cui 的研究结论一致。

层状材料主要通过层间铺展吸附 VOCs 分子,不同的层状物由于表面极性以及表面能的不同,对不同 VOCs 分子的吸附量也存在差异。如图 8 所示,LDHs 对 VOCs 的抑制效率均低于 10%,膨胀石墨的抑制效率高达 60%。

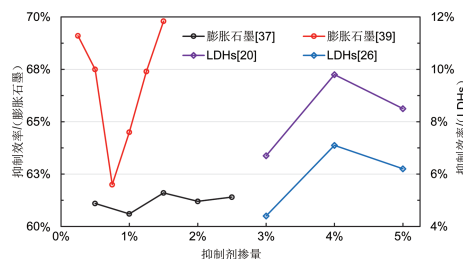


图 8 层状材料对 VOCs 的减排效果对比^[20,26,37,39](电子版为彩图)

Fig. 8 VOCs emission reduction effect comparison of different layered materials^[20,26,37,39]

虽然 LDHs 对 VOCs 挥发总量的抑制效率普遍低于 10%,但其对部分毒性较大的 VOC 组分抑制效果较好。如图 9 所示,Cui 等^[40-41]证实 LDHs 对小分子物质(包括 H₂S、氯乙烷、环庚烷等)的抑制效果较好,且随着掺量的增加而逐渐加强,对于大分子物质(包括二甲苯、异丙苯、芴、蒽等)的

抑制存在掺量极值(4%)。同时,该抑制剂受温度的影响较大,温度升高会导致其对二氯乙烷和萘的抑制作用减弱,不利于 PAHs 的减排。故在沥青 VOCs 减排过程中,合理控制加热温度也能有效降低沥青 VOCs 的挥发量和毒性。

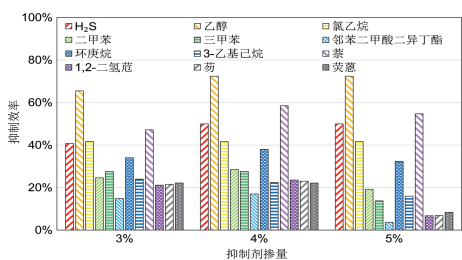


图9 LDHs 对各 VOCs 分子的选择性抑制^[41]

Fig. 9 Selective inhibition of LDHs on different VOCs components^[41]

相较于多孔材料,层状材料主要侧重于层间扩展与吸附,对 VOCs 分子的吸附能力与材料的表面能相关,膨胀石墨的抑制效率高达 60%,远高于 LDHs(4%~10%)。LDHs 在高温下会发生能级跃迁产生自由基,可与沥青 VOCs 的自由基结合,但其捕获自由基的能力有限。相较之下,膨胀石墨除

表4 纳米抑制剂分类及其 VOCs 减排特点

Table 4 Classification of nano-inhibitor materials and their VOCs reduction characteristics

抑制剂	抑制剂特点	减排效果(减排效率@掺量质量分数)	文献
纳米碳酸钙	较大比表面积(>40 m ² /g)和较强的吸附能力 量子尺寸效应、表面效应等纳米结构效应 与沥青相容性好	4.8% @ 3%	Qian Shilin (2011) ^[23]
		5.7% @ 4%	张新雨 (2011) ^[25]
		7.4% @ 6%	杨锡武 (2013) ^[45]
		4.8% @ 4.0%	孙仕伟 (2017) ^[37]
		7.0% @ 4.5%	
		8.4% @ 5.0%	
介孔 SiO ₂ 中空纳米球	比表面积大、气孔大、负载量大 与烃类衍生物的分子间作用力强 表面羟基与羧基物质形成氢键	9.2% @ 5.5%	Shu Benan (2019) ^[46] Wu Shaopeng (2020) ^[47]
		9.3% @ 6.0%	
		7.6% @ 0.5%	
		28.0% @ 1%	
		38.2% @ 2%	

同样具有纳米结构的介孔二氧化硅空心纳米球(Mesoporous silica hollow nanospheres, MSHSs)被 Shu 等^[46]运用到沥青 VOCs 减排研究中。MSHSs 具有比表面积大、气孔丰富、吸附量强的特点。因为 MSHSs 与烃类衍生物之间存在较强的分子间作用,同时其表面的羟基能与羧基通过氢键相结合,所以 MSHSs 对烃类衍生物的抑制效果最好。同时有研究表明,温度升高,其对烃类衍生物的减排效果加强^[47]。

用于改善沥青车辙性能的纳米粘土被 Abdullah^[48]证实能在骨料之间产生良好的粘结性,从而实现无机气体 CO₂、SO₂ 和 NO_x 分别减排 40.1%、41.3% 和 57.9%,但尚未有研究者探究其对 VOCs 有机分子的选择性抑制分析。

图 10 汇总了文献中纳米及表面效应类抑制剂的 VOCs 减排效果,其中纳米碳酸钙的抑制效率均低于 10%,与聚脲酯的抑制效果接近。相较于其他抑制剂,介孔中空 SiO₂ 纳米球的掺量较少,掺量 2% 时其对 VOCs 的抑制效率可高达 38.2%,与活性炭的抑制效果相近,同时其对烃类衍生物和 PAHs 的抑制效果较强,表明 SiO₂ 纳米球在 VOCs 总量减排和毒性减弱方面具有很好的发展潜力。

了具有层状结构外,还有较为丰富的膨胀孔道结构,对 VOCs 的吸附效率加强,故可推断若抑制剂能综合不同的抑制机理,则复合抑制的效果能得到有效提升。

2.3 纳米及表面效应类抑制剂

纳米及表面效应类抑制剂的 VOCs 减排方式是物理吸附的进一步升级。此类抑制剂除了粗糙的表面外,还具有表面活性、纳米效应及静电场作用,能有效捕获 VOCs 分子。

2.3.1 纳米材料

纳米类材料的 VOCs 减排主要依赖于纳米结构的大比表面积和表面静电效应等作用^[43]。目前已报道的纳米抑制剂材料如表 4 所示。张新雨等^[25]证实纳米碳酸钙对轻组分的吸附较强,同时其静电效应使碳酸钙对轻组分的吸附能力强于轻组分的挣脱能力,减少了轻组分的脱附。沥青中加入纳米碳酸钙改性的可行性也被马峰等^[44]的研究证实,由于纳米微粒比表面积大、活性强,VOCs 分子与其接触概率较大,能形成稳定的团簇而被固定在纳米颗粒表面和内部。同时孙仕伟等^[37]认为,纳米碳酸钙可提升沥青的热稳定性与抗老化性能,推动沥青性能向利于路面耐久性方向发展。

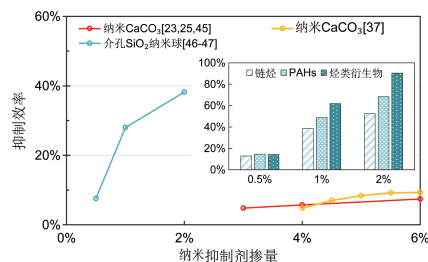


图10 纳米抑制剂的 VOCs 减排效果对比^[23, 25, 37, 45-47]

Fig. 10 VOCs emission reduction effect comparison of different nano-inhibitor materials^[23, 25, 37, 45-47]

2.3.2 电气石

电气石材料由于其表面静电场能自发极化而具备热电和压电性能,从而可实现高温减排,被广泛应用于环保和纺织等行业^[49],也有研究者将其运用于沥青拌合减排中,其应用情况汇总于表 5^[50-52]。

王朝晖等^[50]提出,电气石减排依赖于其高温下形成的高活性静电场和压电效应,拌合过程中机械的持续搅拌使电气石内部应力不断变化,产生极强的压电效应,大量负离子释

表 5 电气石的 VOCs 减排特点

Table 5 VOCs reduction characteristics of tourmaline

电气石抑制机理	减排效果(减排效率@ 掺量质量分数)	备注	文献			
温度场活性促进表面静电场产生压电性与热电性 释放负离子, 吸附正电颗粒而沉降分散、还原 VOCs 中有有机分子	Tourmaline 粉 12.5% @ 14% 44.1% @ 17% 66.6% @ 20%	两种电气石, VOCs 抑制效率存在差异	王朝辉 (2014) ^[50]			
	Tourmaline 负离子粉 18.8% @ 14% 48.6% @ 17% 65.9% @ 20%					
	电气石: 69.3% @ 10% 0.5% 石墨烯 A/电气石: 76.2% @ 10% 1.0% 石墨烯 A/电气石: 79.4% @ 10% 1.5% 石墨烯 A/电气石: 82.4% @ 10%			复合剂的加入可提升电气石的 VOCs 抑制效果	乔志 (2021) ^[51]	
	电气石: 36.1% @ 10% 0.5% 石墨烯 B/电气石: 37.8% @ 10% 1.0% 石墨烯 B/电气石: 41.4% @ 10% 1.5% 石墨烯 B/电气石: 44.9% @ 10%					
						Guo Tengting (2021) ^[52]

放并与周围表面带正电的颗粒物吸附而沉降, 与此同时, 负离子还能分散、还原部分有机分子, 实现多层次减排。SEM 图显示电气石掺入沥青后能均匀分散, 且无明显结团现象, 证实电气石与沥青的相容性较好, 其掺入不会对沥青的路用性能造成较大影响。

为增强电气石的减排效果, 有研究者尝试将复合剂与电气石混合掺入沥青, 如图 11 所示。乔志等^[51] 制备的系列电气石抑制剂的 VOCs 抑制效果超过 80%, 其复合剂是一种密度远小于电气石的特殊二维材料石墨烯。Guo 等^[52] 证实了石墨烯/电气石复合材料不仅能提升沥青的 VOCs 抑制效果, 还能增强沥青的温度敏感性、耐高温性、抗老化性能和流变性能。石墨烯/电气石材料比单纯电气石材料的减排效果更好, 且随复合剂掺量增多, VOCs 抑制效果逐渐增强。相较于纯电气石, 上述两个实验证实石墨烯的加入能分别提升约 13% 和 8% 的抑制效率。

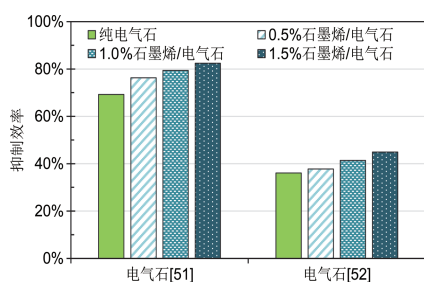


图 11 电气石在 160 °C 和 10% 掺量下对沥青 VOCs 的抑制效果^[51-52]
Fig. 11 VOCs emission reduction effect of tourmaline at 160 °C and 10% content^[51-52]

纳米及表面效应类抑制剂材料的抑制效果好归因于其表面效应和纳米效应, 介孔 SiO₂ 中空纳米球的抑制效果较强 (10%~40%), 普遍高于纳米碳酸钙 (<10%); 电气石作为一种具有压电效应的抑制剂, 能实现 40%~80% 的 VOCs 减排, 且其与沥青相容性好, 是一种可广泛应用于实际道路施工领域的抑制剂材料。

2.4 高分子聚合物材料

虽然多孔类和层状类抑制剂具有较为出色的 VOCs 减排效果, 但从沥青性能而言, 非相容性物质的掺入必然会打破

沥青内部存在的胶体平衡状态, 从而显著降低其路用性能、缩短服役年限。为减少抑制剂对沥青相容性的影响, 部分研究者提出向沥青中添加具有胶粘作用的高分子聚合物, 其能通过网状结构牵制小分子物质的挥发, 以实现减排和提升沥青路用性能的双重需求^[53]。常见的高分子聚合物材料及其对 VOCs 的抑制特点如表 6 所示。

苯乙烯-丁二烯-苯乙烯嵌段共聚物 (Styrene-butadiene-styrene, SBS) 具有受热膨胀交联的特性, 对道路沥青材料改性效果显著, 因此 SBS 改性沥青已成为我国当前最普遍的改性沥青。Possebon 等^[55] 的研究表明, 相较于基质沥青, SBS 改性沥青虽然会提高拌合和压实温度, 但其挥发性有机物的总排放量一般更低, 初步证实其具有 VOCs 减排效果。Xiao 等^[24] 通过纤维滤纸增重法探究 SBS 改性沥青的 VOCs 减排效果, 结果显示当掺入 4% SBS 时, 改性沥青的抑制效果可达 21.2%。该实验还提出了两种 SBS 吸附机理: (1) SBS 与沥青中易挥发的小分子溶胀而形成大分子, 增加了分子内聚力, 减少 VOCs 逸出; (2) 当达到溶胀平衡后, 内部形成的分散相与聚集相发生物理交联构成网状结构, 吸附部分 VOCs。与 Xiao 同课题组的 Qian 等^[23] 细化了 SBS 掺量对 VOCs 减排的影响研究, 发现 3% 掺量的 SBS 改性沥青能实现沥青烟气减排 19.2%, 随着 SBS 掺量增大, 减排效果逐渐增强。SBS 抑烟的双重吸附机理被张红华等^[20] 证实, 小分子缠绕和网状结构禁锢能协同有效实现沥青 VOCs 减排。

理论上, 同样具有交联效果的聚氨酯和聚乙烯也具有减排潜力, 但其抑制效果被证实不敌聚合物 SBS。张新雨等^[25] 证实聚氨酯受热溶胀可形成网状结构, 吸附沥青 VOCs 中易挥发的轻组分, 整体减排可达 4.0%~6.5%。

SBS、PE 和聚乙烯的 VOCs 最佳减排效果对比如图 12 所示, 总抑制效果在 4%~22% 之间, 低于多孔类沸石材料。SBS 减排效果普遍高于聚氨酯和聚乙烯, 且减排效果随其掺量增加而增强, 掺量为 4% 时, 抑制效果普遍趋于稳定。孙仕伟等^[37] 研究了掺量大于 4% 的 SBS 的 VOCs 减排效果, 数据显示掺量为 6% 时 VOCs 减排效率趋于稳定, 表明 SBS 改性剂的最佳掺量也受 SBS 种类的影响。聚乙烯的 VOCs 抑制效果低

表 6 高分子聚合物抑制材料分类及其 VOCs 减排特点

Table 6 Classification of polymer materials and their VOCs reduction characteristics

抑制剂	抑制剂特点	减排效果(减排效率@ 掺量质量分数)	文献
SBS 改性剂	网状结构捕获 VOCs 分子 裹附小分子聚合,增加分子内聚力 与轻质分子结合禁锢其挥发 相容性好,改善沥青的热稳定性	8.0% @ 1%	Peng Xuya (2011) ^[54]
		19.2% @ 3%	
		21.2% @ 4%	
		14.6% @ 3%	
		17.1% @ 4%	
		11.3% @ 4.0%	
聚氨酯 PE	聚合物,受热溶胀 网状结构,抑制轻组分挥发	17.5% @ 4.5%	Peng Xuya (2011) ^[54]
		21.3% @ 5.0%	
		24.5% @ 5.5%	
聚乙烯	受热膨胀形成网状结构 与轻组分交联反应	26.1% @ 6.0%	Peng Xuya (2010) ^[19]
		22.1% @ 3%	
		26.5% @ 4%	
		23.9 @ 5%	

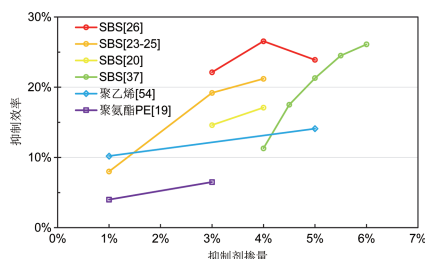
图 12 高分子聚合物材料的 VOCs 减排效果对比^[19-20,23-26,37,54] (电子版为彩图)Fig. 12 VOCs emission reduction effect comparison of different polymer materials^[19-20,23-26,37,54]

表 7 化学抑制剂分类及其 VOCs 减排特点

Table 7 Classification of chemical inhibitors and their inhibition characteristics on VOCs reduction

抑制剂	抑制剂特点	减排效果(减排效率@ 掺量质量分数)	文献
三聚氰胺	高温分解为 N ₂ 、CO ₂ 和 H ₂ O 非助燃气体降低周围氧含量 吸收大量热量,降低温度	23.5% @ 1%	Qian Shilin (2011) ^[23] Xiao Fei (2010) ^[24] 张新雨 (2011) ^[25]
		45.1% @ 3%	
		27.5% @ 2%	
		30.0% @ 3%	黄刚 (2013) ^[21]
		25.0% @ 4%	
磷钼酸铵	高温氧化为黏性氧化酸 表面加速炭化,隔离外部氧气	18.3% @ 1%	Peng Xuya (2010) ^[19]
		24.0% @ 5%	
		-15.0% @ 1%	张新雨 (2011) ^[25]
		23.3% @ 3%	

的方式实现沥青 VOCs 多重减排。

张新雨等^[25]围绕化学抑制剂三聚氰胺、磷钼酸铵进行了沥青 VOCs 抑制研究。实验证实,三聚氰胺在受热后会分解释放出 N₂、CO₂ 和 H₂O 等不助燃气体,降低周围氧浓度,并吸收大量热量,从而减排沥青烟雾。减排效果随掺量的增大先增强后减弱,掺量为 3% 时,减排效果很好,高达 45.1%。

磷钼酸铵在高温下也能分解并释放出 H₂O 和 NH₃ 等物质,吸热降低氧含量的同时,磷在高温下氧化为含氧酸附于沥青表面,加速脱水炭化,隔绝了沥青与外部氧气接触。研

于 15%,且抑制效果随掺量变化不明显。聚氨酯的抑制效果均低于 10%,且其加入沥青后会出现未知原因的层析现象,故不适用于沥青 VOCs 的减排研究。

2.5 化学抑制剂

化学抑制剂通常通过自身发生分解反应降温或者充当催化剂促进小分子转化为大分子从而被禁锢的方式实现 VOCs 减排,其减排情况如表 7 所示。但由于化学抑制受活性位点影响大,反应随机性强,在高温条件下,沥青的多组分特性会导致不确定反应频发,故单纯的化学吸附由于反应不可控而不常用于沥青 VOCs 抑制研究,多与物理吸附相结合

究表明磷钼酸铵掺量为 1% 时没有 VOCs 减排效果,这是由于磷钼酸铵高温分解对 VOCs 挥发既有促进作用又有抑制作用,掺量较少时,促进作用强于抑制作用,导致了 VOCs 含量不减反增。随磷钼酸铵掺量增大,VOCs 抑制效果加强,当掺量为 3% 时,抑制效果达到 23.3%。

三聚氰胺与磷钼酸铵吸附剂的减排效果如图 13 所示,整体抑制效果可达 20%~50%,介于沸石材料和高分子聚合物材料之间。虽然三聚氰胺抑制能力较强,但值得注意的是,加热后发现滤筒上收集到了一些乳白色物质,推测是三

聚氰胺不稳定, 升华后凝华导致的。故此类物质在大规模用于沥青 VOCs 抑制前, 其化学反应机理有待更深入地探究和梳理, 暂不适合作为沥青的高温减排抑制剂。

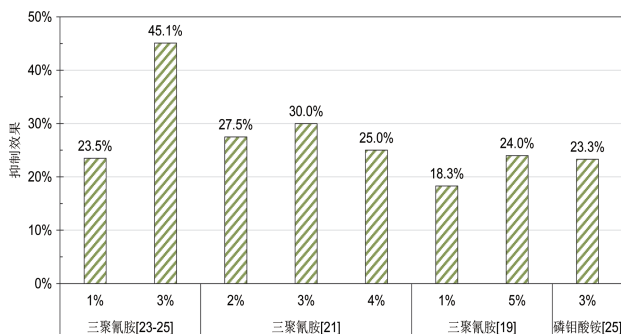


图 13 化学吸附剂的 VOCs 减排效果对比^[19, 21, 23-25]

Fig. 13 VOCs emission reduction effect comparison of different chemical inhibitors^[19, 21, 23-25]

2.6 复合抑制剂

鉴于前述不同类抑制剂对沥青 VOCs 的减排机理各不相同, 有研究者尝试通过复合添加不同类抑制剂, 以期实现多层次沥青 VOCs 减排。但由于当前围绕单体抑制剂的研究尚且不够系统深入, 因此已发表的复合抑制剂相关研究非常少, 包括 SBS 和活性炭、SBS 和纳米碳酸钙。

前述研究证明, SBS 和活性炭均具备较好的 VOCs 减排效果, 且其抑制机理差异较大。Cui 等^[56] 尝试通过向沥青中添加 4% 活性炭和 4% SBS 的方式制备复合改性沥青, 结合热重-质谱和紫外-可见光谱的检测方式对该复合改性沥青进行了四种 VOCs (萘、二氯乙烷、正辛烷和甲基苯) 的减排探究。结果表明, 在 165 °C 时四种 VOCs 的减排效果分别为 63%、56%、11% 和 2%, 随着温度升高, 萘和二氯乙烷的减排效率降低, 其他两种物质减排的温度敏感性不强。

两种复合抑制剂的减排效果对比如图 14 所示。单纯 SBS 抑制效果低于分别加入活性炭和纳米碳酸钙的复合抑制剂, 其中活性炭和 SBS 复合能更大程度提升减排效果, 这是因为活性炭和 SBS 两种减排机理差异更大, 在复合添加时能更大限度地相互促进, 实现高效减排, 故综合多重抑制机理的抑制剂具有更广阔的 VOCs 减排前景。

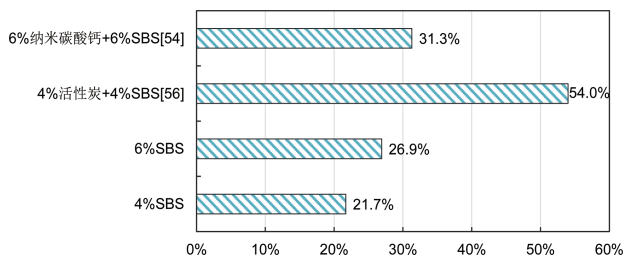


图 14 复合抑制剂的 VOCs 减排效果对比^[54, 56]

Fig. 14 VOCs emission reduction effect comparison of different composite inhibitors^[54, 56]

纳米碳酸钙/SBS 复合抑制剂的抑制效果与其掺量呈正相关, 如图 15 所示。研究证实在沥青中单独加入 4%~6% 的 SBS 或纳米 CaCO₃ 时, VOCs 减排效果增强趋势缓慢, 但将两种抑制剂复合时, 其减排效果增强趋势明显, 表明两种不同类型的抑制剂能互补, 甚至促进整体抑制效率的阈值提升。

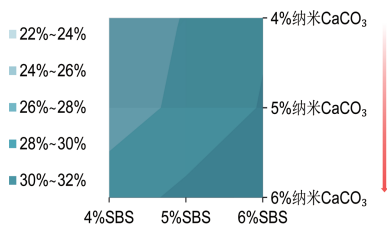


图 15 不同百分比的纳米 CaCO₃/SBS 复合抑制剂的减排效果^[25]

Fig. 15 VOCs emission reduction effect with different CaCO₃/SBS content^[25]

除了上述复合抑制剂之外, Shen 等^[57] 通过傅里叶变换红外光谱和荧光显微镜阐明了 LDHs 对 SBS 改性沥青的 VOCs 减排机理, 证实 LDHs 通过提高 SBS 改性沥青的活化能, 形成更致密的焦炭, 从而显著提高沥青的阻燃性能。

通过对比单一抑制剂与复合抑制剂对沥青 VOCs 的抑制情况, 可明确看到复合抑制剂能有效提升 VOCs 的减排效率, 当两类抑制剂的减排机理相近时, 可能由于抑制作用达到极限而导致无效复合添加, 但抑制剂间减排机理差异较大时, 复合添加能作用互补, 从而显著提升抑制效率的整体阈值。

3 温拌剂

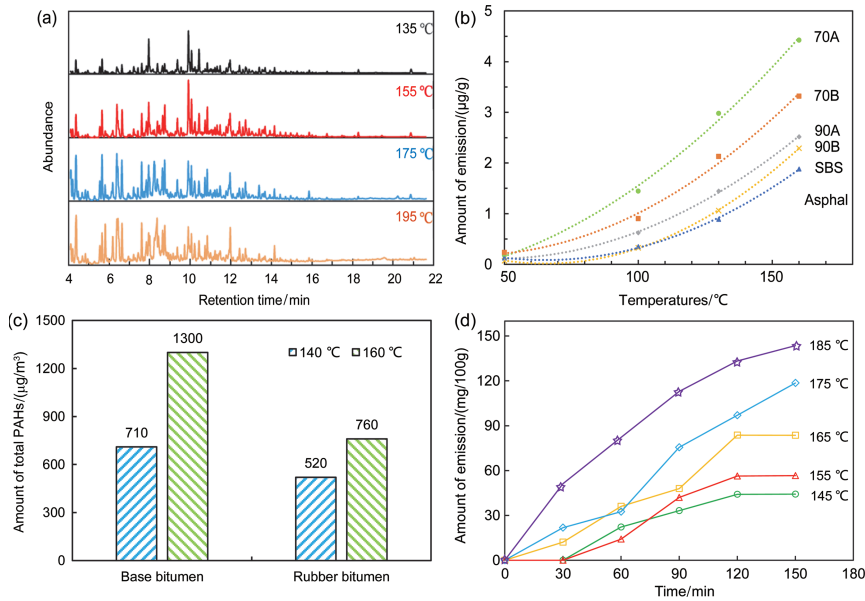
温拌剂是一种在拌合过程中通过降温实现减排的添加剂, 其 VOCs 减排效果体现在: 相对于热拌沥青, 温拌沥青混合料的拌合和碾压温度可降低约 20 °C。

3.1 温拌剂的 VOCs 减排机理

温拌剂的减排机理基于沥青 VOCs 随温度变化的两种释放特性。其一, 在相同加热时间和沥青质量的条件下, VOCs 释放量随温度升高逐渐增大 (如图 16a 所示, 温度越高, VOCs 色谱图峰越多, 峰面积越大, 物质组分越复杂^[58])。基质沥青的 VOCs 释放量随温度升高呈二项式增加, 60 °C 的温差可导致沥青 VOCs 挥发量存在三倍差异^[10] (图 16b 对比了两种 70# 沥青、两种 90# 沥青和一种 SBS 沥青的 VOCs 释放情况), 有实验证实 150 °C 温拌施工比 180 °C 热拌施工减排超 80%^[59]。基质沥青和橡胶沥青在 160 °C 的 PAHs 排放量分别是 140 °C 时的 1.8 倍和 1.5 倍^[60] (如图 16c 所示)。其二, 温度越高, 相同质量的沥青达到挥发稳定阶段所需的时间越长^[19], 如图 16d 所示, 当温度高于 170 °C 时, 保温 150 min 后 VOCs 排放量依然较大。设定温度越高, 沥青分子内能越大, 热稳定性越低, 更多轻质组分挥发, 同时更易达到反应所需活化能, 从而促进各种化学反应正向进行, 导致 VOCs 组分更复杂、挥发量更大。

温拌剂的出现, 可通过降低沥青施工温度从而抑制 VOCs 产生, 沥青温拌技术可追溯到 1995 年^[61], 随后逐渐形成了三大类不同减排机理的温拌体系: 有机添加剂、化学添加剂 (具有阳离子表面活性剂) 和发泡剂, 不同类型温拌剂对沥青混合料的降温能力也不同。

常见的有机温拌添加剂包括 Sasobit、EC-120、SAS、RH 等, 其通过降低沥青黏度从而降低施工温度, 能在最初加热沥青时掺入, 减少沥青加热-拌合-摊铺整个过程的 VOCs 排放, 大多数有机温拌剂都能降低拌合温度 20~30 °C。Dokandari 等^[62-63]

图 16 沥青 VOCs 的温度释放特性^[10,19,58,60]Fig. 16 Release characteristics with temperature of asphalt VOCs^[10,19,58,60]

证实一种长链脂肪族聚亚甲基羟有机添加剂能保持沥青中的蜡含量,其熔点约为 120 °C,在温拌温度下可完全溶于沥青,降低生产和压实温度下的沥青黏度,具有较好的温拌减排特性。化学添加剂是一类结合有机添加剂与阳离子表面活性剂的温拌剂,包括 Evotherm-3、Evotherm DAT、EvothermM1 等,其减排依赖于改变沥青和集料间的粘附性,提高沥青粘合剂涂覆骨料颗粒的能力,可实现降低拌合温度 20~40 °C^[64-67]。发泡技术主要通过向沥青粘合剂中引入少量水,如水蒸气、冷水、乳化沥青等,随后受热液体转化为气体,该

过程的膨胀系数即是发泡技术的关键指数。由于沸石自身具有大量结晶水,通常沸石也会作为温拌发泡剂加入到沥青中,实现一定程度的 VOCs 减排。

3.2 温拌剂的 VOCs 减排效果

当前温拌剂的研究主要集中于路面性能提升,鲜少涉及直接对沥青 VOCs 减排效果及机理的探索,故通常依赖于 VOCs 温度释放规律,结合拌合温度的降低情况,间接推断温拌剂对沥青 VOCs 的减排效果^[68]。当前温拌剂类型及其温拌效果汇总于表 8。

表 8 温拌剂成分及其温拌效果

Table 8 Composition and effect of warm mixing agent

温拌剂类型	温拌剂成分	温拌效果	文献
发泡剂	污水污泥灰分自制沸石	降低 25 °C 的施工温度	Zhang Yuan (2018) ^[69]
	Asphamin	降低沥青的高温黏度和压实温度 18~24 °C	马峰(2021) ^[70]
	Aspha-Min 泡沫型温拌剂合成沸石	20%RAP 时降低压实温度 23 °C	盛宁(2021) ^[71]
	沸石类发泡剂	降低黏度	季节(2021) ^[72]
	沸石	沸石的水受热释放产生泡沫沥青	Cao Ruijun (2019) ^[73]
	地聚合物温拌剂	自由水在沥青中受热发泡,造成沥青体积膨胀	杨凯凯(2020) ^[74]
	双效剂 106T、GL-16-7	降低黏度、降低拌合温度 30 °C	邹泰(2021) ^[75]
	Retherm	改善表面活性	邓奕(2021) ^[76]
	Evotherm 第三代	20%RAP 时降低压实温度 32 °C	盛宁(2021) ^[71]
	Evotherm	降低黏度	季节(2021) ^[72]
Evotherm-3	降黏效果明显	赵百磊(2021) ^[77]	
化学添加剂	表面活性剂添加剂	采用包括乳化剂和附着力促进剂在内的化学组件来提高混合料的工作性	Cao Ruijun (2019) ^[73]
	Evotherm 和 DAT	DAT 降黏效果比 Evotherm 好	贾荷柱(2020) ^[78]
	Evotherm DAT/ET	温拌基质沥青、SBS 改性沥青混合料各环节温度可分别降低 30~45 °C、40~55 °C。减少有害气体排放近 70%,摊铺过程可减少废气排放 80% 以上	杨文杰(2019) ^[79]
	Evotherm 3G	混合料压实温度降低约 20 °C	刘秘强(2017) ^[80]
	温拌剂-化学添加剂	温拌 SMA 能分别降低全球变暖、化石燃料消耗、标准空气污染物和雾霾 14.5%、15.9%、11.7% 和 28.4%	Leng Zhen (2018) ^[81]

(续表 8)

温拌剂类型	温拌剂成分	温拌效果	文献
	Sasobit 与 ATH/MH/LDHs 和 EC-120 与 FRMAX 的温拌阻燃复合剂	降低黏度并提高极限氧指数	刘贤鹏 (2022) ^[82]
	Sasobit 有机降黏型	20% RAP 时降低压实温度 29℃	盛宁 (2021) ^[71]
	RH, Sasobit	降低黏度	季节 (2021) ^[72]
	Sasobit	降黏效果明显	赵百磊 (2021) ^[77]
	有机蜡	有机蜡添加剂在施工温度降低沥青结合料的粘度	Cao Ruijun (2019) ^[73]
有机添加剂	石蜡-橡胶改性沥青	降低黏度 (175℃ 黏度下降近 50%)	曹芳 (2021) ^[83]
	降黏型温拌剂 SAS	降低黏度	邓奕 (2021) ^[76]
	降黏型温拌剂 Sasobit 和发泡型温拌剂 Asphamin	降低沥青的高温黏度和压实温度 (降温范围 18~24℃)	马峰 (2021) ^[70]
	LF-2 和 Sasobit	0.1% 掺量的 LF-2 温拌剂降温效果与 3% 掺量 Sasobit 温拌剂相当, 降温幅度均在 20℃ 左右	范群保 (2017) ^[84]
	F2 和 F4 两种型号的 Sasobit 温拌剂	掺加 3% F2 及 3% F4 温拌剂使普通沥青和 SBS 沥青的拌合温度降低 45℃ 和 25℃	王文奇 (2015) ^[85]
	Sasobit/常规石蜡	降低拌合温度	Leng Zhen (2018) ^[81]
新型温拌剂	Siligate 硫磺温拌剂	降低拌和和压实温度 13℃ 和 14℃ 极大地提高了 H ₂ S 气体的抑制效果	罗浩原 (2021) ^[86] 周彬 (2015) ^[87]

冷真教授课题组^[73,81,88]依托温拌沥青混合料设计,探究了不同类型温拌剂对沥青 VOCs 的减排效果,建立了结合不确定性分析的生命周期评价框架,量化了使用有机蜡、表面活性添加剂和沸石温拌剂建造路面的生命周期能耗。沸石材料作为抑制剂可直接吸附沥青 VOCs 分子,但由于部分沸石内部存在特殊的结构水,也被研究者用于温拌发泡技术。Zhang 等^[69]以传统的城市污泥灰渣为原料合成沸石作为温拌沥青添加剂,实现施工温度降低 25℃,从而降低能耗和污染物排放。使用污水污泥灰分原料制备沸石既实现了污泥灰渣的有效利用,又促进了沥青 VOCs 减排,具有很高的环境

效益。

杨文杰等^[79]自主设计了一种 SBS 温拌改性沥青,施工时施工温度降低 35~40℃,有害气体减排近 70%,摊铺过程废气减排 80% 以上。杨凯凯等^[74]尝试了利用氢氧化钠和水玻璃作为激发剂制备地聚合物温拌剂,其对三类 VOCs (小分子、多环芳烃、其他有机物质)的抑制效果如表 9 所示。总体而言,温拌剂能降低温度,有效降低小分子物质的挥发,对于 PAHs 等大分子物质,温拌剂通过降低温度能间接减少该物质的受热挥发或与其他物质反应,具有一定的减排效果。

表 9 地聚合物温拌剂对各类 VOCs 的抑制情况^[74]

Table 9 VOCs emission reduction effect of geopolymer warming agent^[74]

VOCs 种类	组分	抑制情况	抑制效率
小分子	H ₂ O/H ₂ S/CO ₂ /NO ₂ /SO ₂	对小分子均有抑制效果 除水外四种小分子的释放量随温度升高而降低	70%~90% 60% 60%~75% 80%~90% 40%~55%
PAHs	C ₁₀ H ₈ /C ₁₂ H ₁₀ /C ₁₃ H ₁₀ /C ₁₄ H ₁₀ /C ₁₆ H ₁₀ (萘/菲、葱/荧葱、芘)	减排 PAHs, 对萘的抑制作用最明显 温度升高,萘的释放呈现明显下降趋势 其他四种 PAHs 随温度变化不明显	50%~60% 25%~30% 20%~30% 25% 30%~40%
其他有机物	C ₇ H ₇ Cl/C ₁₅ H ₁₂ /C ₁₅ H ₃₂ (氯甲苯/甲基菲/十五烷)	抑制烷烃和卤代烃 随温度升高,十五烷释放先增加后减少	20% 25%~45% 30%

新型温拌剂对特定物质具有减排效果,邱延峻等^[89]对比热拌和温拌沥青在施工中的排放情况,发现温拌剂能有效减排致癌物质苯并芘,同时也能一定程度上减排 CO_x、SO_x 和 NO_x 等无机挥发物,对 VOCs 有较强的减排选择性。周彬等^[87]通过向硫磺中添加 H₂S 抑制剂来制备硫磺温拌剂,实

现了对 H₂S 的超强减排效果。

由于温拌剂已作为较成熟的技术广泛运用于沥青施工,当前对温拌剂的研究更侧重于如何实现温拌沥青混合料各项路用性能的提升,对其减排效果的定量探究较少。但由于各类温拌剂均能实现拌合温度降低 10~40℃,结合沥青

VOCs 排放量随温度的变化规律,可推测温拌剂能降低沥青 VOCs 排放 50%~70%,普遍优于抑制剂的减排效果。

4 阻燃剂

阻燃剂最初用于公路隧道的目的是防止火灾发生和蔓延,但其阻燃过程中同时具备降低热解速度、抑制有害烟气排放的潜力,理论上可一定程度减少挥发污染。常见的阻燃剂有卤系、磷系、氮系、锑化合物类、硼化合物类、镁化合物类、镁化合物类等^[90]。由于绿色建材的不断发展,当前阻燃

剂正向着无卤、无毒、低烟的方向发展,其中环保型阻燃剂包括氢氧化铝和氢氧化镁等。

4.1 阻燃剂对 VOCs 减排的间接贡献

当前较为常用的阻燃剂及其作用如表 10 所示,铝镁系阻燃剂可提高沥青的热分解温度,且其孔道结构能抑制有害气体排放,达到阻燃及环保效益。但单一阻燃剂作用温度固定,不能实现沥青持续阻燃,故复合阻燃有效解决了这一瓶颈。阻燃过程可总结为三步,炭化阻断热量传递、分解吸热降温并抑制 VOCs 产生、惰性气体氛围降低氧浓度。

表 10 沥青材料阻燃剂类型及其 VOCs 减排特点

Table 10 Classification of flame retardants and their VOCs reduction characteristics

阻燃剂	特性	颜色	作用
膨胀石墨 (EG)	纯度为 95%~99%, 膨胀率大于 270 mL/g	黑色粉末	160 °C 产生膨胀层,阻碍氧气供应和热量传递
氢氧化铝 (ATH)	Al ₂ O ₃ 超 64%,烧失量为 (34.5±0.5)%	白色粉末	240 °C 开始分解降低温度,320 °C 释放的 H ₂ O 稀释了可燃挥发物和氧气的浓度,同时生成 Al ₂ O ₃ 覆盖在沥青表面,阻止 EG 分解导致的炭化层脱落
氢氧化镁 (MH)	烧失量大于 28%	白色粉末	温度超过 330 °C 时,MH 热分解吸热,芳烃基体降温;同时释放的 H ₂ O 稀释了易燃气体产物和氧气的浓度,生成的活性氧化镁促进 EG 膨胀层在高温下炭化,形成叠加的厚阻挡层
熟石灰 (HL)	有效含量大于 95%	紫色粉末	CaO/CO ₂ 生成 CaCO ₃ 层覆盖表面阻碍 VOCs 释放,活性 CaO 高温炭化形成炭化层,HL 还通过吸附早期的氧化可燃性挥发物来阻止其释放
微胶囊化红磷 (MRP)	有效磷含量大于 80%	紫色粉末	MRP 因氧化反应而分解,生成氧化磷和磷酸,与 MH 协调阻燃

4.2 阻燃剂的 VOCs 减排分析

阻燃剂的阻燃机理与化学抑制剂的抑制机理存在部分重合,均可通过化学作用促进沥青 VOCs 分子转化,部分阻燃剂加热后释放的惰性气体覆盖在沥青表面,降低沥青表面氧浓度,阻断热量传递和氧气接触,切断更多 VOCs 产生所需的条件,与前述三聚氰胺抑制剂减排相互验证。刘文娟等^[91]选取氢氧化镁、硼酸锌、聚磷酸铵为原料制备无机复合阻燃剂,复合阻燃剂与 SBS 改性剂发生交联而阻碍了 SBS 链段运动,提高了小分子物质的挥发温度,降低了其挥发机率。盛燕萍

等^[92]对阻燃剂表面进行了改性处理,使阻燃剂可以促进沥青成炭从而减少 VOCs 逸出。

许涛等^[93]对沥青阻燃剂的阻燃机制和应用技术进行了深入系统的研究,并提出了如表 11 所示的复合阻燃剂抑制机理。研究表明,阻燃剂的阻燃峰主要出现在 330 °C 和 500 °C,该研究提出,施工中调整工艺,设置升温速率遵循“两头快,中间慢”的原则能达到更好的阻燃效果。复合型阻燃剂也提升了阻燃效果,如复合阻燃剂 (CFR) 和纳米复合阻燃剂 (NCFR) 等能在沥青表面形成更紧密和稳定的炭渣^[94-95]。

表 11 复合阻燃剂种类及其 VOCs 抑制机理

Table 11 Types of composite flame retardants and their VOCs inhibition mechanism

抑制劑	抑制机理	文献
复合阻燃剂 (CFR)	CFR 中的 Ca-Al 水滑石、聚磷酸铵、包覆红磷和膨胀蛭石依次分解,抑制了沥青的多级燃烧过程	Xia Wenjing (2021) ^[95]
纳米复合阻燃剂 (NCFR)	NCFR 在沥青混合物上形成更紧密和稳定的炭渣;降低了沥青混合物燃烧过程中凝相和气相的烟气释放量和质量损失率	Xia Wenjing (2021) ^[94]
复合阻燃剂 (EG、ATH、HL、MH 和 MRP)	复合阻燃剂的协同作用,形成了叠加和致密的炭化层;厚厚的炭化层阻止了热量的传递,阻碍了氧气的供应,并抑制了易燃挥发物的释放	Xu Tao (2018) ^[96]
MH 阻燃剂	MH 分解在凝相和气相中起到冷却、阻塞和稀释作用	Xu Tao (2013) ^[97]

复合阻燃剂的阻燃特性也被余剑英等^[98]证实,该研究制备了一种三元复合阻燃 SBS 改性沥青,当加入三元复合阻燃剂后沥青中氧指数达到 27.5%,成为自熄性材料,同时复合阻燃剂与 SBS 改性沥青产生轻度交联从而使其软化点升高,实现沥青的轻组分减排。

5 结语与展望

5.1 结语

道路沥青的 VOCs 减排技术支撑着实现交通强国绿色发展的重大需求。本文围绕沥青材料 VOCs 抑制材料和减排技

术的发展,总结了多种 VOCs 抑制材料的抑制机理及抑制效果,得出以下结论:

(1) 目前用于沥青 VOCs 减排的添加剂包括抑制剂、温拌剂和阻燃剂三类。抑制剂材料通常为孔道丰富和表面粗糙的材料,一般具有物理和化学的多重抑制效果;温拌剂是基于沥青 VOCs 温度敏感性的一类降低施工温度的间接减排材料;阻燃剂则通过阻隔沥青加热过程中的热量传导或降低周围氧含量的方式,减少轻质组分的挥发,阻燃过程涉及多元复合材料在高温下的复杂物理化学反应。

(2) 通过向沥青中添加抑制剂是当前实现沥青 VOCs 源头减排最直接的方式。抑制剂种类繁多,包括多孔类材料、层状材料、纳米及表面效应类抑制剂、高分子聚合物材料、化学抑制剂和复合抑制剂等。广泛使用的多孔类材料包括活性炭、生物质炭以及沸石等,催化和吸附双重作用下减排效果达到 20%~85%。层状抑制剂的代表物质有膨胀石墨和 LDHs,其中膨胀石墨由于其出色的层间卷曲作用,抑制效果(60%~70%)远高于 LDHs(4%~10%)。纳米及表面效应类抑制剂材料的抑制效果归因于其表面效应和纳米效应,电气石作为一种具有表面静电场效应的抑制剂,可实现 40%~80%的 VOCs 减排。高分子聚合物的掺入有效解决了抑制剂与沥青相容性差的问题,SBS、聚氨酯和聚乙烯具有受热溶胀交联形成网状结构的特点,其掺入能实现高达 40%的 VOCs 减排。化学抑制剂材料可促进沥青分子间化学反应,包括三聚氰胺和磷钼酸铵,它们的抑制效果为 20%~30%,但由于高温下化学反应复杂且不可控,导致各类副反应频发,故当前研究一般不采用该类抑制剂进行 VOCs 减排。

(3) 鉴于不同类型抑制剂的抑制机理不同,多种抑制剂混合添加的方式能极大地改善 VOCs 抑制效果。由于活性炭和 SBS 两种减排机理差异较大,复合添加时能更大限度的相互促进,复合抑制剂的减排效果能提升 20%,具有很大的减排应用前景。

(4) 降低沥青混合料施工温度能间接减少沥青 VOCs 产生,温拌剂普遍能降低拌合温度 10~40 °C,对 VOCs 的间接减排效率达 50%~70%。阻燃剂显示出高温阻燃和低温抑烟的功效,部分阻燃剂能在受热时分解出不助燃气体,吸热降温的同时降低周围氧浓度,减少沥青 VOCs 排放。

5.2 未来研究方向与展望

针对降低公路建设与运营对路域环境负面影响的迫切需求,亟待围绕下述三个方向开展前沿科技攻关:

(1) 多因素耦合条件下沥青路面 VOCs 排放检测方法。沥青 VOCs 的释放受到沥青种类、加热温度、加热时间、沥青混合料油石比、级配等多因素的耦合影响,建立便捷、精确且统一的检测方法有利于系统地开展沥青 VOCs 减排研究;

(2) 考虑时空域的沥青路面全生命周期 VOCs 排放机制。在道路建设和服役过程中,沥青在加热、拌合、摊铺和服役全生命周期均有 VOCs 挥发,为量化沥青全生命周期的 VOCs 排放情况,需建立沥青路面全生命周期 VOCs 排放分析模型;

(3) 高效复合沥青 VOCs 抑制剂的研发与应用。通过对现有沥青 VOCs 减排材料的综合分析可知,复合抑制剂具有

比单一抑制剂更优异的抑制效果,开展沥青 VOCs 抑制材料的复合设计与制备研究,设计并推动高效沥青 VOCs 抑制剂在公路工程沥青路面中的应用,是实现绿色道路发展的重要途径。

参考文献

- Chang X W, Zhang R H, Xiao Y, et al. *Construction and Building Materials*, 2020, 234, 117370.
- Statistical bulletin on the development of the transportation industry (2021)*. Ministry of Transport of the People's Republic of China, 2022 (in Chinese). 2021 年交通运输行业发展统计公报. 交通运输部, 2022.
- Kitto A M, Pirbazari M, Badriyha B N, et al. *Environmental Technology*, 1997, 18(2), 121.
- Brandt H C, De Groot P C, Molyneux M K, et al. *The Annals of occupational hygiene*, 1985, 29(1), 27.
- Wey H E, Breitenstein M J, Toraason M A. *Carcinogenesis*, 1992, 13(6), 1047.
- Huang L S. *Sensors and Materials*, 2018, 30(3), 633.
- Wang M, Wang C, Huang S, et al. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 318, 128596.
- Shu Guang Y. *Advanced Materials Research*, 2015, 3696, 826.
- Tao P. In: 3rd International Conference on Civil Engineering, Architecture and Building Materials (CEABM 2013). Jinan, 2013, pp. 1829.
- Chang X W. Research on quantitative analysis of asphalt vocs and inhibitor contribution of zeolites. Master's Thesis, Wuhan University of Technology, China, 2020 (in Chinese). 常郗文. 沥青 VOCs 的全组分定量分析及沸石的 VOCs 抑制研究. 硕士学位论文, 武汉理工大学, 2020.
- Agboola O D, Benson N U. *Frontiers in Environmental Science*, 2021, 9, 678574.
- Conner W C. *Abstracts of Papers of the American Chemical Society*, 2010, 240, 13.
- Khalkhali M, Zhu X, Shi Y, et al. *Journal of CO₂ Utilization*, 2020, 36, 64.
- Fan W J, Yang G J, Chi J W, et al. *RSC Advances*, 2016, 6(60), 54841.
- Cychoz K A, Thommes M. *Engineering*, 2018, 4(4), 559.
- Puziy A M, Lodowyckx P, Ritter J A, et al. *Frontiers in Chemistry*, 2021, 9, 668553.
- Ovechko V, Dmytruk A, Mygashko V. *Optica Applicata*, 2003, 33(1), 41.
- Wei Y, Wang J, Gu C, et al. *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*, 2021, 56(6), 932.
- Peng X, Li Z. *Intelligent Automation and Soft Computing*, 2010, 16(5), 833.
- Zhang H H. Study on performance and suppression effect of inhibitors modified asphalt. Master's Thesis, Wuhan University of Technology, China, 2014 (in Chinese). 张红华. 抑烟沥青的性能及抑烟效果评价研究. 硕士学位论文, 武汉理工大学, 2014.
- Huang G. Exploitation of modified asphalt of fume suppression and study on performance of its mixture under the elevated temperature. Ph. D. Thesis, Chongqing Jiaotong University, China, 2013 (in Chinese). 黄刚. 高温条件下抑烟改性沥青开发及混合料性能研究. 博士学位论文, 重庆交通大学, 2013.
- Long Y, Wu S, Xiao Y, et al. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 181, 784.
- Qian S L, Wang F. *Advanced Materials Research*, 2011, 413, 472.
- Xiao F, Peng X, Qian S. *Intelligent Automation and Soft Computing*, 2010, 16(5), 797.
- Zhang X Y. Green road with low flue gas asphalt and mixture experimental research. Master's Thesis, Chongqing Jiaotong University, China, 2011 (in Chinese). 张新雨. 低烟气环保路用沥青及其混合料性能试验研究. 硕士学位论文, 重庆交通大学, 2011.
- Cui P Q, Wu S P, Xiao Y, et al. *Materials Research Innovations*, 2015,

- 19, S158.
- 27 Xiao F, Zhang H Z, Zhang X Y, et al. *Intelligent Automation and Soft Computing*, 2010, 16(5), 805.
- 28 Zhou X X, Moghaddam T B, Chen M Z, et al. *Science of the Total Environment*, 2020, 745, 10.
- 29 Zhang P F. Synthesize zeolite with red mud and steel slag for asphalt VOCs reduction. Master's Thesis, Wuhan University of Technology, China, 2020 (in Chinese).
张鹏飞. 赤泥-钢渣复合制备沸石及其在沥青 VOCs 抑制中的应用. 硕士学位论文, 武汉理工大学, 2020.
- 30 Xiao Y, Chang X W, Dong Q K, et al. *China Journal of Highway and Transport*, 2020, 30(10), 276 (in Chinese).
肖月, 常郗文, 董前坤, 等. *中国公路学报*, 2020, 33(10), 276.
- 31 Sharma A, Lee B K. *Environmental Science-Nano*, 2017, 4(3), 613.
- 32 Sharma A, Lee B K. *Energy*, 2017, 136, 142.
- 33 Xiao Y, Chang X W, Zhang X S, et al. *Journal of Chang'an University (Natural Science Edition)*, 2019, 39(4), 17 (in Chinese).
肖月, 常郗文, 张晓晓, 等. *长安大学学报(自然科学版)*, 2019, 39(4), 17.
- 34 Zhang X, Xiao Y, Long Y, et al. *Construction and Building Materials*, 2021, 279, 122485.
- 35 Chen J, De Crisci A G, Xing T. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 2016, 94(1), 7.
- 36 Kamal M S, Razzak S A, Hossain M M. *Atmospheric Environment*, 2016, 140, 117.
- 37 Sun S W, Qiao Y Y, Yang X F, et al. *New Building Materials*, 2017, 44(1), 5 (in Chinese).
孙仕伟, 乔云雁, 杨晓菲, 等. *新型建筑材料*, 2017, 44(1), 5.
- 38 Huang G, He Z Y, Zhou C, et al. *China Journal of Highway and Transport*, 2015, 28(10), 1 (in Chinese).
黄刚, 何兆益, 周超, 等. *中国公路学报*, 2015, 28(10), 1.
- 39 Huang G, He Z Y, Huang Y C, et al. *Journal of Wuhan University of Technology-Materials Science Edition*, 2014, 29(6), 1229.
- 40 Cui P, Wu S, Xiao Y, et al. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 108, 987.
- 41 Cui P Q, Zhou H G, Li C, et al. *Construction and Building Materials*, 2016, 123, 69.
- 42 Zhang Z M. *Shanxi Science and Technology of Communications*, 2014, 12(6), 38 (in Chinese).
张志敏. *山西交通科技*, 2014, 12(6), 38.
- 43 Guillet-Nicolas R, Wainer M, Marcoux L, et al. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2020, 579, 489.
- 44 Ma F. Research on performance of pavement and modification mechanism of nano-CaCO₃ modified asphalt. Master's Thesis, Chang'an University, China, 2004 (in Chinese).
马峰. 纳米碳酸钙改性沥青路面性能及改性机理研究. 硕士学位论文, 长安大学, 2004.
- 45 Yang X W, Peng X Y, Zhang X Y, et al. *Journal of Chongqing University*, 2013, 36(12), 70 (in Chinese).
杨锡武, 彭绪亚, 张兴雨, 等. *重庆大学学报*, 2013, 36(12), 70.
- 46 Shu B, Wu S, Li C, et al. *Emerging Materials Research*, 2019, 8(2), 1.
- 47 Wu S, Ye Y, Shu B, et al. *Journal of Testing and Evaluation*, 2020, 48(3), 20190208.
- 48 Abdullah M E, Haimin M R, Yusoff N I M, et al. *Construction and Building Materials*, 2016, 113, 488.
- 49 Wang G H, Dong F Q. *China Non-metallic Minerals Industry*, 2007(5), 9 (in Chinese).
王光华, 董发勤. *中国非金属矿工业导刊*, 2007(5), 9.
- 50 Wang Z H, Li Y W, Ge J, et al. *China Journal of Highway and Transport*, 2014, 27(11), 17 (in Chinese).
王朝辉, 李彦伟, 葛娟, 等. *中国公路学报*, 2014, 27(11), 17.
- 51 Qiao Z, Chen Q, Wang Z H, et al. *Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science)*, 2021, 40(8), 7 (in Chinese).
乔志, 陈谦, 王朝辉, 等. *重庆交通大学学报:自然科学版*, 2021, 40(8), 7.
- 52 Guo T, Fu H, Wang C, et al. *Sustainability*, 2021, 13(16), 8932.
- 53 Yuan J A, Zhou J P, Li Y Z. *China Journal of Highway and Transport*, 2005, 18(4), 21 (in Chinese).
原健安, 周吉萍, 李玉珍. *中国公路学报*, 2005, 18(4), 21.
- 54 Peng X, Qian S, Xiao F, et al. *International Conference on Chemical Engineering and Advanced Materials*, 2011, 507.
- 55 Possebon E P, Specht L P, Pereir D S, et al. *Road Materials and Pavement Design*, 2019, 20(6), 1481.
- 56 Cui P, Wu S, Li F, et al. *Materials*, 2014, 7(9), 6130.
- 57 Shen A, Wu H, Guo Y, et al. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2021, 33(2), 04020454.
- 58 Li N, Jiang Q, Wang F, et al. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 278, 123479.
- 59 Du L, Li Y, Li C. In: *International Forum on Mechanical and Material Engineering (IFMME 2013)*. Guangzhou, 2013, pp. 913.
- 60 Nilsson P T, Bergendorf U, Tinnerberg H, et al. *Annals of Work Exposures and Health*, 2018, 62(7), 828.
- 61 Yang J G. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2006(8), 26.
仰建岗. *公路交通科技*, 2006(8), 26.
- 62 Dokandari P A, Kaya D, Topal A, et al. In: *4th International Conference on Road and Rail Infrastructure (CETRA)*. Sibenik, 2016, pp. 245.
- 63 Dokandari P A, Topal A. *Periodica Polytechnica-Civil Engineering*, 2015, 59(4), 475.
- 64 D'angelo J, Harm E, Bartosze J, et al. *American trade initiatives*, 2008, 1, 42.
- 65 Qin Y C, Wang S Y, Zeng W, et al. In: *2nd International Conference on Advanced Engineering Materials and Technology (AEMT)*. Zhuhai, 2012, pp. 1686.
- 66 Carreno Gomez N H, Oeser M. *Road Materials and Pavement Design*, 2021, 22, S641.
- 67 Ferrotti G, Ragni D, Lu X, et al. *Materials and Structures*, 2017, 50(5), 226.
- 68 Xiu M, Wang X Y, Morawska L, et al. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 275, 9.
- 69 Zhang Y, Leng Z, Zou F, et al. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 172, 686.
- 70 Ma F, Wang Y J, Fu Z, et al. *Highway*, 2021, 66(3), 1 (in Chinese).
马峰, 王钰洁, 傅珍, 等. *公路*, 2021, 66(3), 1.
- 71 Sheng N. *Traffic Engineering and Technology for National Defense*, 2021, 19(4), 64 (in Chinese).
盛宁. *国防交通工程与技术*, 2021, 19(4), 64.
- 72 Ji J, Dong Y, Yang Y Q, et al. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2020, 44(6), 133 (in Chinese).
季节, 董阳, 杨跃琴, 等. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2020, 44(6), 133.
- 73 Cao R, Leng Z, Yu H, et al. *Resources Conservation and Recycling*, 2019, 147, 137.
- 74 Yang K K. Preparation and performance of warm mix asphalt additives based on geopolymer. Master's Thesis, Shenyang Jianzhu University, China, 2020 (in Chinese).
杨凯凯. 地聚合物沥青混合料温拌剂的制备与性能研究. 硕士学位论文, 沈阳建筑大学, 2020.
- 75 Zou T, Dong G B, Hao X J, et al. *Journal of Liaocheng University (Natural Science Edition)*, 2021, 34(6), 50 (in Chinese).
邹泰, 董光彬, 郝晓君, 等. *聊城大学学报(自然科学版)*, 2021, 34(6), 50.
- 76 Deng Y, Huang W R, Yang Y Z, et al. *Subgrade Engineering*, 2021(2), 70 (in Chinese).
邓奕, 黄维蓉, 杨玉柱, 等. *路基工程*, 2021(2), 70.
- 77 Zhao B L, Tu H T. *Transportation Science and Technology*, 2021(1), 125 (in Chinese).
赵百磊, 涂洪涛. *交通科技*, 2021(1), 125.
- 78 Jia H Z. *Shandong Jiaotong Keji*, 2020(6), 15 (in Chinese).
贾荷柱. *山东交通科技*, 2020(6), 15.
- 79 Yang W J. Study on performance and application of asphalt warm mix agent based on surface active technology. Master's Thesis, Dalian University of Technology, China, 2019 (in Chinese).
杨文杰. 基于表面活性技术的沥青温拌剂性能及应用研究. 硕士学位论文, 大连理工大学, 2019.
- 80 Liu M Q, Li R K, Zhao T Y, et al. *Technology of Highway and Trans-*

- port, 2017, 33(6), 32 (in Chinese).
刘秘强, 李汝凯, 赵天宇, 等. 公路交通技术, 2017, 33(6), 32.
- 81 Leng Z, Al-Qadi I L, Cao R. *Transportmetrica a-Transport Science*, 2018, 14(7), 562.
- 82 Liu X P, Xi W B, Zou Y X, et al. *Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science and Engineering)*, 2022, 46(3), 532 (in Chinese).
刘贤鹏, 奚文彬, 邹莹雪, 等. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2022, 46(3), 532.
- 83 Cao F. *Journal of China and Foreign Highway*, 2021, 41(3), 323 (in Chinese).
曹芳. 中外公路, 2021, 41(3), 323.
- 84 Fan Q B, Xie D, Jiao L Y. *Highway*, 2017, 62(11), 25 (in Chinese).
范群保, 谢东, 焦丽亚. 公路, 2017, 62(11), 25.
- 85 Wang W Q, Wen J H, Shi Y F, et al. *Construction Technology*, 2015, 44(11), 78 (in Chinese).
王文奇, 文建华, 石银峰, 等. 施工技术, 2015, 44(11), 78.
- 86 Luo H Y, Qiu Y J, Zhao B Y, et al. *Journal of Building Materials*, 2021, 24(1), 153 (in Chinese).
罗浩原, 邱延峻, 赵碧云, 等. 建筑材料学报, 2021, 24(1), 153.
- 87 Zhou B, Feng Z P, Xiao X C, et al. *Gonglu JiaoTong Keji*, 2015, 11(2), 88 (in Chinese).
周彬, 封志鹏, 肖雪春, 等. 公路交通科技(应用技术版), 2015, 11(2), 88.
- 88 Leng Z, Yu H, Zhang Z, et al. *Construction and Building Materials*, 2017, 144, 291.
- 89 Qiu Y J, Luo H Y, Ouyang C F, et al. *Journal of China and Foreign Highway*, 2020, 40(2), 233 (in Chinese).
邱延峻, 罗浩原, 欧阳铖霏, 等. 中外公路, 2020, 40(2), 233.
- 90 Xu T, Huang X M, Xie J. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2008, 38(2), 274 (in Chinese).
许涛, 黄晓明, 谢军. 东南大学学报(自然科学版), 2008, 38(2), 274.
- 91 Liu W J, Zhou T, Sun Y, et al. *Research and Exploration in Laboratory*, 2019, 38(12), 10 (in Chinese).
刘文娟, 周婷, 孙杨, 等. 实验室研究与探索, 2019, 38(12), 10.
- 92 Shen Y P, Qiao Y Y, Xue Z, et al. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2018, 37(3), 961 (in Chinese).
盛燕萍, 乔云雁, 薛哲, 等. 硅酸盐通报, 2018, 37(3), 961.
- 93 Xu T, Huang X M, Zeng L, et al. *Journal of Building Materials*, 2008, 11(5), 6 (in Chinese).
许涛, 黄晓明, 曾磊, 等. 建筑材料学报, 2008, 11(5), 6.
- 94 Xia W, Wang S, Xu T, et al. *Construction and Building Materials*, 2021, 266, 121203.
- 95 Xia W, Wang S, Wang H, et al. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 279, 123538.
- 96 Xu T, Wang Y, Xia W, et al. *Construction and Building Materials*, 2018, 173, 209.
- 97 Xu T, Wang H, Huang X, et al. *Fuel*, 2013, 105, 757.
- 98 Yu J Y, Luo X F, Wu S P, et al. *China Journal of Highway and Transport*, 2007, 20(2), 5 (in Chinese).
余剑英, 罗小锋, 吴少鹏, 等. 中国公路学报, 2007, 20(2), 5.
(责任编辑 汪芸竹)



常郗文, 武汉理工大学博士研究生, 于2020年在武汉理工大学获得硕士学位。主要研究方向为沥青 VOCs 的全组分定量分析和基于多孔沸石材料的沥青 VOCs 减排效果研究, 目前已在国内外期刊上发表学术论文 4 篇。



肖月, 通信作者, 研究员, 博士研究生导师, 绿色建筑材料及制造教育部工程研究中心副主任。博士毕业于代尔夫特理工大学, 曾获教育部霍英东青年教师奖。一直从事沥青基道路材料设计等研究工作, 在低烟气排放沥青材料、抗滑罩面和固废道材资源化利用等方面取得了一系列原创研究成果。近五年主持国家自然科学基金项目 3 项, 发表学术论文 57 篇。