

湿法橡胶改性沥青研究进展

葛冬冬^{1,2,3}, 姜向阳^{1,2,3}, 吕松涛^{1,2,3*}, 张洪刚^{1,2,3,4}, 宋小金⁵

(1.长沙理工大学 交通运输工程学院,湖南长沙 410114;2.公路养护技术国家工程研究中心,湖南长沙 410114;
3.极端环境绿色长寿道路工程全国重点实验室,湖南长沙 410114;4.广西交投集团有限公司,
广西南宁 530000;5.中腾智信科技(湖南)有限公司,湖南长沙 410036)

摘要:废旧轮胎在沥青路面中的应用不仅能有效降低资源消耗,还能显著减轻环境污染。处理废旧轮胎获得橡胶粉,通过湿法工艺与沥青共混,可作为改性剂改善沥青的性能。该文论述了湿法橡胶改性沥青的研究进展,探讨了其制备工艺、性能影响因素及改性机理。通过回顾相关研究,总结了制备过程中的关键条件及其对储存稳定性的影响。进一步分析了橡胶掺量、目数、基质沥青类型及制备参数对沥青物理和流变性能的影响,并通过谱学分析法和微观形貌分析法揭示了橡胶与沥青之间的相互作用机理。此外,还探讨了橡胶与其他改性剂复合使用对沥青性能的协同提升效果,为湿法橡胶改性沥青的进一步优化和应用提供了有益参考。最后,对湿法橡胶改性沥青在制备工艺、性能研究、改性机理方面的未来发展趋势和重点研究方向进行了展望。

关键词:道路材料;橡胶改性沥青;湿法;制备条件;改性机理

中图分类号:U414

文献标志码:A

Research Progress of Rubber-Modified Asphalt by Wet Process

GE Dongdong^{1,2,3}, JIANG Xiangyang^{1,2,3}, LYU Songtao^{1,2,3*}, ZHANG Honggang^{1,2,3,4}, SONG Xiaojin⁵

(1.School of Traffic & Transportation Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha, Hunan 410114, China; 2.National Engineering Research Center of Road Maintenance Technologies, Changsha, Hunan 410114, China; 3.National Key Laboratory of Green and Long-Life Road Engineering in Extreme Environment, Changsha, Hunan 410114, China; 4.Guangxi Transportation Science and Technology Group Co., Ltd., Nanning, Guangxi 530000, China; 5. Zhong Teng Technology Co., Ltd., Changsha, Hunan 410036, China)

Abstract: The application of waste tires in asphalt pavements can not only effectively reduce resource consumption but also significantly reduce environmental pollution. Crumb rubber could be obtained by processing waste tires and used as a modifier by mixing with asphalt through the wet process to improve the performance of asphalt. This paper reviewed the research progress of rubber-modified asphalt by wet process and discussed its preparation process, influencing factors of performance, and modification mechanism. By reviewing the relevant studies, the critical conditions in the preparation process and their effects on storage stability were summarized. Furthermore, the effects of rubber dosage, particle size, matrix asphalt type, and preparation parameters on the physical and rheological properties of asphalt were analyzed. The interaction mechanism between rubber and asphalt was revealed by spectroscopic analysis and microscopic morphology analysis. In addition, the synergistic enhancement effect of rubber compounded with other modifiers on asphalt properties was explored, which provided a useful reference for the further optimization and application of rubber-modified asphalt by wet process. Finally, the paper proposed future development trends and key research directions of rubber-modified asphalt by wet process in terms of preparation process, performance evaluation, and modification mechanism.

收稿日期:2024-09-28

基金项目:国家自然科学基金青年基金资助项目(编号:52108398)

作者简介:葛冬冬,男,博士,特聘教授.E-mail:dge1@csust.edu.cn

*通信作者:吕松涛,男,博士,教授.E-mail:lst@csust.edu.cn

Keywords: road material; rubber-modified asphalt; wet process; preparation condition; modification mechanism

0 引言

废旧轮胎作为高分子材料的循环利用资源,正逐渐受到全球各国政府的重视。为了促进其回收利用,多国政府已通过立法、设立专门机构及实施鼓励政策。至今,国际废旧轮胎再利用行业仍在持续探索与发展。

从全球范围来看,2022年废旧轮胎的产生量达3 923.8万t,回收量为3 013.9万t,回收率达到76.8%。在中国,随着汽车保有量的逐年攀升,加之汽车报废和车型更新换代的推动,年轮胎报废率6%~8%。然而,相较于国际市场,中国的废轮胎回收市场起步较晚,2022年回收率仅为48.15%,反映出中国废旧轮胎的回收产能相对不足,亟待改进和提升^[1]。图1、2分别展示了全球与中国废旧轮胎的产生与回收情况,不仅突显了废旧轮胎处理的紧迫性,更揭示了废旧轮胎回收利用的巨大潜力。

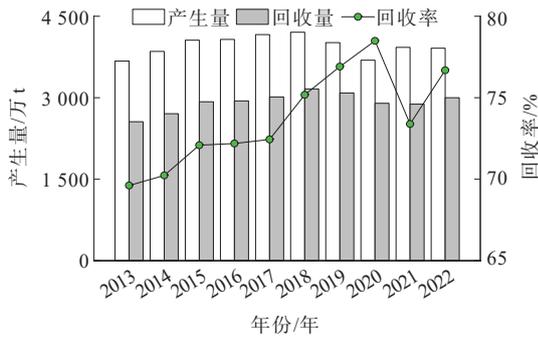


图1 全球废旧轮胎产生量及回收量

Figure 1 Global waste tire production and recycling volumes

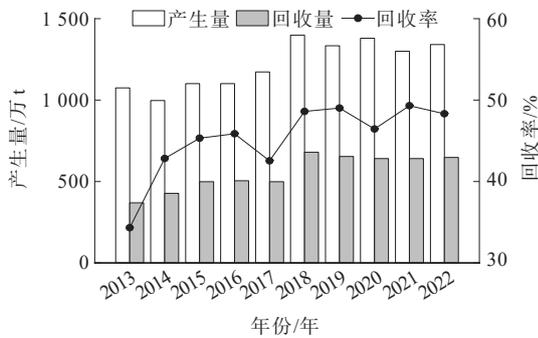


图2 中国废旧轮胎产生量及回收量

Figure 2 China's waste tire production and recycling volumes

然而,废旧轮胎因其难以自然降解、易燃,以及存在有害化学成分等原因,若处理不当,会引发诸多环境问题^[2-4]。例如:简单填埋会导致大量土地资源浪费;露天堆放易滋生细菌,威胁人类和动物健康;燃烧则会产生有毒气体和废渣,严重污染空气和水源。

目前,废旧轮胎的资源化利用方式包括翻新利用、原型改制利用、再生利用、焚烧利用、热解等^[5-6]。中国各种废旧轮胎处置方式占比如图3所示。其中,将废旧轮胎破碎加工成橡胶粉并应用于沥青改性和路面铺筑是实现废旧轮胎资源化、无害化利用的主要途径之一^[7-8]。这种方法不仅可以有效缓解废旧轮胎带来的环境压力,而且可提高道路的性能和使用寿命。

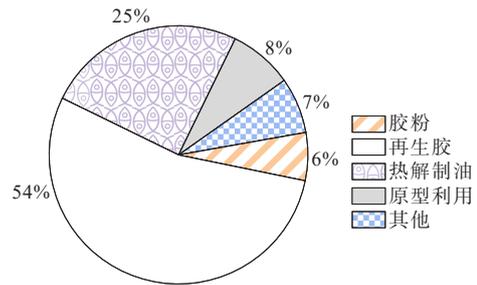


图3 中国各种废旧轮胎处置方式占比^[6]

Figure 3 Proportion of various waste tire disposal methods in China^[6]

橡胶改性沥青在高低温性能、疲劳性能以及降噪环保等方面具有显著优势。自20世纪80年代开始,中国在道路应用橡胶改性沥青已有超过40年的实践经验。为解决废旧轮胎再利用过程中的技术难题并实现更高效的资源转化,研究者们探索了多种生产工艺,主要包括湿法、干法以及 Terminal Blend (TB)法^[9]。其中,湿法是在高温下将橡胶与基质沥青混合,并通过持续搅拌促进其充分发育和膨胀,实现对沥青的有效改性。该工艺能确保橡胶在沥青中的均匀分散,增强橡胶与沥青之间的化学反应,使改性沥青展现出更高的耐久性、良好的黏附性和变形性,从而有效抵御大型车辆损坏并减少路面龟裂;干法是将橡胶粉直接加入沥青混合料中,替代部分细集料,而不是作为改性剂使用。此方法难以保证橡

胶粉在混合料中均匀分布,对沥青的改性效果有限,且橡胶与沥青间的反应程度难以精确控制;TB法采用高温高速剪切分散技术,使橡胶在沥青中脱硫和解聚,显著降低结合料黏度。尽管TB法在黏度控制、施工和易性方面表现出一定优势,但其主要局限于特定应用场景,如低温性能要求较高的地区,在高温性能方面存在不足。

在综合材料性能方面,湿法橡胶改性沥青通常展现出更全面的优势。在制备技术方面,湿法工艺主要分为两大类:“湿法-高黏度”工艺和“湿法-无搅拌”工艺^[10]。前者需要持续搅拌以确保橡胶改性沥青的均匀性;后者无须特殊设备即可保持其均匀性。此外,Chavez等^[11]还提出了一种独特的半湿法工艺,该工艺结合了湿法和干法工艺的特点,为橡胶改性沥青的生产提供了新的思路。

随着室内试验研究和现场应用的不断深入,湿法橡胶改性沥青的制备技术日趋成熟。目前已有大量的文献对其制备条件、物理特性、流变性质及改性机理进行了全面深入研究,为其在道路建设等领域得到更广泛的应用提供了有力支持。

本文对湿法橡胶改性沥青进行了全面评述。先总结湿法橡胶改性沥青的制备过程与条件,并分析储存稳定性。再深入研究湿法橡胶改性沥青的物理性能和流变性能,揭示了制备条件与这些性能之间的内在联系。然后,为了更深入地理解性能变化的本质,通过谱学分析法和微观形貌分析法,系统总结了橡胶颗粒与沥青之间的相互作用机理。最后,综述了橡胶与其他改性剂(聚合物、纳米材料、轻质油和生物油等)复合使用对沥青性能的影响,为湿法橡胶改性沥青的进一步优化和应用提供了有益参考。

1 湿法橡胶改性沥青的制备

1.1 制备过程与条件

湿法橡胶改性沥青的制备是指将橡胶粉加入沥青中制得橡胶改性沥青后,再与矿料拌和。在湿法工艺中,橡胶主要作为改性剂,其粒径大小和参加比例对最终沥青产品的性能具有重要影响^[12]。具体来说,橡胶粒径的大小会直接影响其在沥青中的溶解度,细橡胶粉更易在沥青中发生溶胀反应。这种溶胀作用有助于提升沥青的低温性能和抗疲劳性能。然而,橡胶粉过细,比表面积较大,在沥青中易被快

速降解,这不仅增加了沥青的黏度,还导致了和易性降低。同时,随着橡胶掺量的增加,橡胶改性沥青的溶胀度也会提升。因橡胶颗粒会吸收沥青中的轻质油分并发生溶胀,使得混合物变得更加黏稠,黏度显著增加,这有助于橡胶与沥青更好地融合,从而提升橡胶改性沥青的性能。但过高的橡胶掺量易导致改性沥青的黏度过高,和易性变差。

根据相关文献综述,湿法工艺通常采用颗粒尺寸较小的细橡胶粉,其粒径一般不超过2.0 mm^[10],平均橡胶粒径为0.56 mm^[13]。橡胶的掺量通常占沥青总质量的5%~20%^[7]。特别是对于湿法高黏度橡胶改性沥青,为满足临界黏度要求,通常需要至少15%的橡胶含量,但某些特定规格的沥青可能在低于15%的橡胶掺量下也能达到所需要的黏度^[13]。

橡胶改性沥青的制备主要基于高速剪切法。制备过程中的剪切时间、剪切温度、剪切速度等参数均对橡胶改性沥青的性能有显著影响^[10]。然而,通过查阅100多篇相关文献,发现目前湿法橡胶改性沥青的制备参数存在较大差异,且行业内缺乏统一的标准,如图4所示。

由图4可知:在制备湿法橡胶改性沥青的过程中,剪切时间为30~90 min,其中60 min是最常用的剪切时间,占总量的31.15%,同时也是中位数和众数。剪切温度为170~190℃,数据分布集中,中位数和众数均为180℃,180℃占总量的29.51%。随着橡胶改性沥青剪切时间的延长和剪切温度的升高,沥青在橡胶中的扩散速度和橡胶的溶胀度均会显著提升,从而提高了橡胶改性沥青的高温抗变形能力和低温韧性。但过高的剪切温度或长时间的高温剪切容易造成沥青老化和橡胶碳化,降低橡胶改性沥青的使用性能。

另外,剪切速度主要分布在1 000~4 500 r/min,数据高度分散。尽管3 000 r/min是中位数和众数,但仅占总量的12.30%。提高剪切速度与延长剪切时间在效果上是相当的,但这两个因素的影响在很大程度上受剪切温度的主导。仅当温度达到一定的临界值时,剪切速度和剪切时间才能有效促进橡胶与沥青的相互作用。

为保证橡胶对沥青的改性效果,建议橡胶改性沥青的剪切时间为60 min,剪切温度为170~190℃,剪切速度为1 000~4 500 r/min。

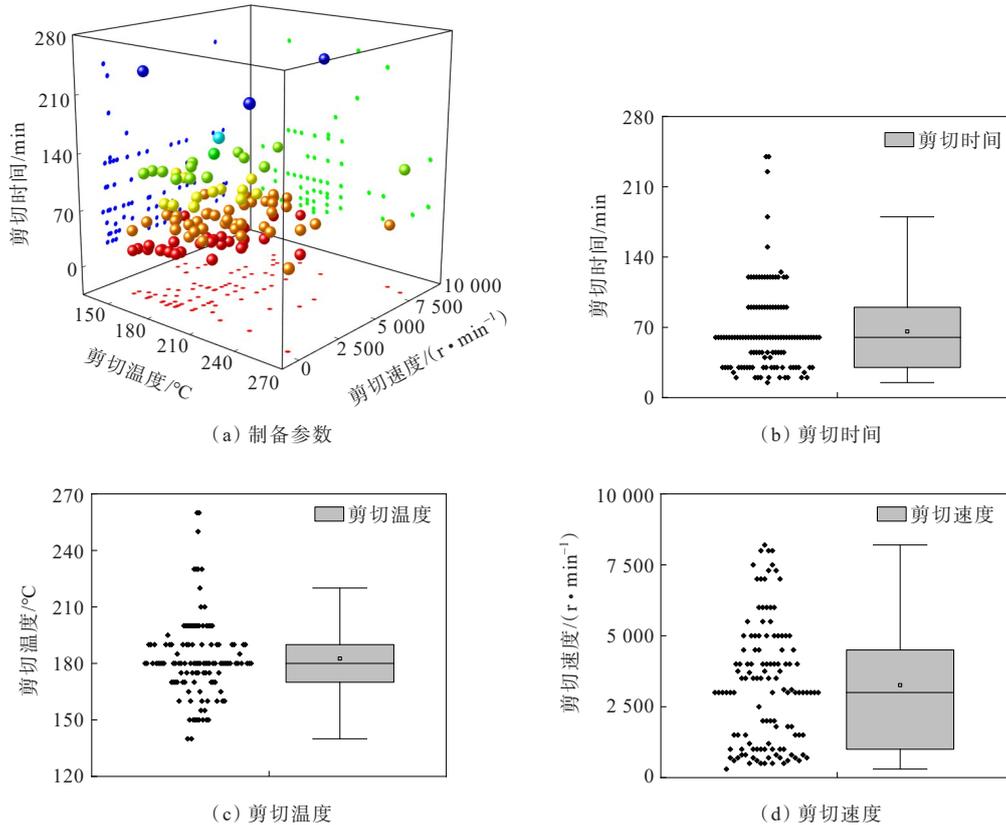


图4 不同文献中湿法橡胶改性沥青的制备参数

Figure 4 Preparation parameters of rubber-modified asphalt by wet process in different literature

1.2 储存稳定性

橡胶与基质沥青共混后,由于它们之间的多相性和密度有差异(橡胶相对密度为1.10~1.30,而基质沥青为0.97~1.03)^[7],导致高温储存时,重质的橡胶与轻质的沥青相容性不佳。因此,相较于其他聚合物(如SBS),橡胶更易从沥青中分离^[14],进而影响橡胶改性沥青的储存稳定性。研究表明:橡胶改性

沥青的储存稳定性受制备条件、基质沥青类型及橡胶生产工艺等多重因素影响,见表1。

除了优化制备条件、选择适当的基质沥青类型和橡胶生产工艺外,许多国内外研究还致力于通过橡胶预处理、添加交联剂或高芳香烃含量的相容剂,以及与其他聚合物复合等方式^[22-24],来改善橡胶改性沥青的相容性、均匀性和高温储存稳定性,见表2。

表1 沥青储存稳定性影响因素

Table 1 Influencing factors of asphalt storage stability

研究者	影响因素	单位	储存稳定性
张鹏等 ^[15]	掺量 5、10、15、20、25	%	随着橡胶粉掺量的增大,改性沥青的离析软化点先增大后减小,胶粉掺量为15%时,离析软化点最大,达10.6℃
Li等 ^[16]	掺量 10、15、20 目数 30、40、80	% 目	橡胶粒径的影响不可忽略,但其影响程度低于橡胶掺量。储存稳定性随粒径的减小而提高
Lei等 ^[17]	目数 20、40、80、100	目	与20目和100目相比,将橡胶粒径控制在40~80目,可获得最佳的储存稳定性
杨德胜等 ^[18]	温度 160、180、200 时间 30、60、90、180	°C min	在180℃下,橡胶的降解程度随剪切时间从30 min延长至60 min、90 min,分别提高了68.3%、103.6%。而在剪切60 min时,将温度从160℃升至180℃、200℃则使橡胶的降解率分别增加170.5%、405.9%。与延长剪切时间相比,提高剪切温度对橡胶的降解影响更为显著

续表 1

研究者	影响因素	单位	储存稳定性	
Attia等 ^[19]	速度	1 800、3 000	r/min	储存稳定性的主要影响因素是剪切速度,较高的剪切速度可使橡胶改性沥青具备更出色的储存稳定性
Lewan-dowski等 ^[20]	基质沥青类型			基于溶胀理论,橡胶溶胀需要吸收以饱和组分和芳香组分为代表的轻组分,所以饱和组分和芳香组分含量较高的溶胶型沥青更容易使橡胶溶胀,从而增强橡胶与沥青的相容性,提高橡胶改性沥青的储存稳定性
廖明义等 ^[21]	胶粉生产工艺	常温法、常温助剂法、低温冷冻法		不同工艺生产的橡胶表面形态和形状各异,导致常温橡胶易降解,常温助剂橡胶次之,而冷冻橡胶难降解且分散性差,储存稳定性最差

表 2 橡胶改性沥青储存稳定性改进方法

Table 2 Improvement method of storage stability of rubber-modified asphalt

方法	研究者	改进措施	改进结果
橡胶预 处理	Chen等 ^[25]	利用N-甲基吡咯烷酮(NMP)萃取糠醛抽出油中的芳烃组分,并利用萃取油对橡胶预降解	橡胶改性沥青高温存储稳定性得到明显提高
	Yin等 ^[26]	微波处理	处理后的橡胶改性沥青具有较高的高温存储稳定性
	于凯等 ^[27]	次氯酸钠溶液对橡胶表面进行氧化预处理	高温存储稳定性得到明显提高
	Zhou等 ^[28]	微波和生物油处理	橡胶经过微波和生物油预处理后,分离指数从44%降低到26%
加入交 联剂或 芳香烃 含量高 的相 容剂	Li等 ^[16]	低温等离子体(LTP)处理	LTP对橡胶进行表面处理,改善了高温存储稳定性
	Liang等 ^[29]	加入连接剂TOR	TOR可以将沥青中的硫与橡胶表面的硫交联形成网状结构,从而建立沥青与橡胶的化学联系,改善橡胶与沥青的相容性
	李志刚等 ^[30]	加入杜仲胶(EUG)	杜仲胶具有与TOR相似的双键结构,可以通过硫化的方式建立杜仲胶、橡胶粉和沥青三者之间的交联网络,从而形成类似于TOR橡胶改性沥青的网络结构
复合 改性	Ye等 ^[31]	加入芳香分等助剂	在芳香分等助剂作用下,橡胶能分离出更多增溶剂,增强与沥青的相容性,从而制得高温存储性能更优的改性沥青
	宋应登等 ^[32]	加入相容剂	相容剂的加入,能增强橡胶与沥青的相容性,形成稳定的相界面
	Polacco等 ^[33]	使用SBS、微细脱硫橡胶和相容剂	脱硫和加相容剂对改善橡胶改性沥青的储存稳定性具有双重保障作用,加入SBS等改性剂能够提升沥青的高低温性能
底秀玲等 ^[36]	王辉等 ^[35]	将聚乙烯、橡胶、相容剂等共混后用于改性	得到储存稳定性优异的改性沥青
	王辉等 ^[35]	加入软化剂、废胶粉、活化剂、交联剂	化学助剂改性的废胶粉复合改性沥青,在热力学相容性和工艺相容性上,都优于仅靠机械剪切力和高温作用等物理改性的普通废胶粉改性沥青
	底秀玲等 ^[36]	润滑油预处理并加入疏水性纳米白炭黑	高低温性能、储存稳定性良好

2 物理性能的影响因素

2.1 基本物理性能(针入度、软化点、延度)

通过针入度、软化点和延度评估沥青的稠度及高低温性能。橡胶颗粒的掺入对沥青的基本物理性能具有显著影响。通过查阅相关国内外规范,发现各国对橡胶掺量和目数的规定和控制均非常严格,确保为不同工程应用提供质量稳定、性能优异的橡胶改性沥青^[7]。

众多研究表明:随着橡胶掺量的增加,沥青的软化点逐渐提高,而针入度则逐渐降低^[37-39]。这表明橡胶颗粒能有效提升沥青的高温稳定性,但对其工作性能可能产生不利影响。但随着橡胶目数的增加,即橡胶粒径的减小,沥青的针入度和延度均先增加后减小,而软化点整体呈下降趋势^[40-41]。

值得注意的是,关于沥青延度随橡胶掺量变化的研究结果存在分歧。例如,Khalili等^[42]的研究表明:随着橡胶掺量的增加,沥青延度降低;Niu等^[43]的

研究则证实,延度会随橡胶掺量增加而增加,尽管增加趋势逐渐减缓;Cong等^[39]通过将两种不同沥青与两种不同橡胶颗粒混合后发现,延度的变化主要取决于沥青类型而非橡胶种类。

除了橡胶的掺量和目数,沥青和橡胶的制备参数也是影响橡胶改性沥青基本物理性能的关键因素^[43-45]。Kök等^[46]的研究显示:针入度随剪切时间的延长而减小,且剪切速度对针入度的影响随剪切时间的增加而逐渐减弱;同时,软化点随剪切时间的增加而上升,但增速逐渐放缓。此结论与Liu等^[45]的研究结果一致。此外,与提高剪切速度相比,延长剪切时间对软化点的提升效果更为显著。

较高的剪切温度、较长的剪切时间和较快的剪切速度会导致橡胶改性沥青的软化点和延度的增加;过高的剪切温度($>200\text{ }^{\circ}\text{C}$)、过长的剪切时间

($>90\text{ min}$)和过快的剪切速度($>6\ 000\text{ r/min}$)均可能对这些性能产生不利影响。随着剪切时间的延长和剪切速度的增加,橡胶改性沥青的针入度呈现先减小后增加的趋势;随着剪切温度的升高,针入度则持续增加。

2.2 黏度

黏度是衡量橡胶改性沥青性能的重要指标,并在很大程度上反映了其流变特性的差异^[47-48]。橡胶改性沥青的黏度受多种因素共同影响。这些因素不仅包括制备过程中的各项条件,如制备参数、橡胶掺量以及所选用的制备方法,还与橡胶自身的特性,如粒径大小和生产工艺等紧密相关。如表3所示,这些因素相互作用,共同决定了橡胶改性沥青黏度的最终水平,因而也成为研究者深入探究的关键方向。

表3 橡胶对沥青黏度影响

Table 3 Effect of rubber on asphalt viscosity

研究者	影响因素	单位	橡胶对沥青黏度的影响
Khalili等 ^[42]	掺量	10、15、20	% 相较于橡胶掺量分别为15%和10%的沥青,掺量为20%的沥青平均黏度分别提高了52%和37%
	目数	20、40	
丁湛等 ^[47]	掺量	5、10、15、20、25	% 当温度195℃,橡胶掺量为10%~15%时,约30min后黏度开始衰减;橡胶掺量超过20%时,则需60min后黏度衰减。而对于橡胶掺量为20%和25%的橡胶改性沥青,其在180℃下处理90min后黏度衰减
	温度	140、150、160、180、195	
	时间	30、60、90、120、150	
杨小龙等 ^[49]	掺量	10、15、20	% 当橡胶掺量较小时,橡胶改性沥青的黏度随反应时间的增加而逐渐递增;当橡胶掺量达到较大值(20%)时,橡胶改性沥青的黏度在反应初期会快速增加,但随后增幅会逐渐减缓并趋于平稳
	速度	1 000、2 000、3 000	
	温度	160、190、220	
	时间	15、60、120、240	
栗培龙等 ^[48]	制备方法:剪切/搅拌工艺		分别以制备温度、制备时间及橡胶粒径为自变量时,135℃、150℃及165℃测试条件下,剪切橡胶改性沥青的黏度高于搅拌体系,而在180℃条件下,反之;无论橡胶掺量如何变化,搅拌体系的黏度始终高于剪切体系。
李波等 ^[50]	橡胶生产工艺:常温法/冷冻法		常温橡胶改性沥青黏度、橡胶与沥青的反应作用以及交联作用均高于使用冷冻橡胶改性沥青

丁湛等^[47]和Khalili等^[42]研究了橡胶掺量对沥青黏度的影响。研究表明:在橡胶掺量相对较低的情况下,橡胶改性沥青的黏度变化较为平缓。然而,随着橡胶掺量的不断增加,改性沥青的黏度呈急剧上升趋势。这一现象可以归因于沥青自身的黏滞性与橡胶颗粒所产生的位阻效应共同作用的结果。此外,与低温试样相比,常温试样受橡胶掺量的影响更为显著。

不同研究者对于沥青黏度随橡胶粒径变化所得

出的结论存在差异。理论上,由于较小的橡胶颗粒具有较大的比表面积,会产生更大的黏度。然而,Singh等^[51]的研究发现,当橡胶颗粒较大时,黏度反而增加。这可能是因为小颗粒在较短时间内就能达到最大溶胀状态,为解聚和脱硫过程提供了充足的时间,从而导致黏度降低;而大颗粒的溶胀量相对较小,在规定的搅拌时间内无法达到最大溶胀量。此外,橡胶颗粒的基本特性也可能对这一现象产生影响。值得注意的是,栗培龙等^[48]和王辉等^[41]的研究

则揭示了另一种规律:随着橡胶目数的增大,即橡胶粒径的减小,黏度会先增大后减小。

杨小龙等^[49]针对不同制备参数下橡胶改性沥青黏度的变化规律进行了研究。结果表明:在较短的反应时间(如15 min和60 min)内,随着混合温度的升高,橡胶改性沥青的黏度呈现出逐渐增加的趋势。然而,当反应时间延长至120 min和240 min时,橡胶改性沥青的黏度随混合温度的升高先增加后降低。这表明:过高的温度或过长的反应时间都可能导致橡胶分子链的降解,从而引发橡胶改性沥青黏度的下降。即提高混合温度和延长反应时间对橡胶改性沥青黏度的影响存在一定的等价关系;王枫成^[52]的研究表明,随着剪切时间的延长和温度的升高,橡胶改性沥青的黏度呈现出下降的趋势,并通过悬浮体系理论对此进行了解释。此外,还有研究指出,在相同的橡胶掺量和温度条件下,搅拌速度对橡胶改性沥青黏度的影响并不显著^[53]。

Li等^[54]深入研究了橡胶-沥青的交互效应(IE)以及橡胶颗粒效应(PE)对橡胶改性沥青黏度的影响。研究结果表明:橡胶改性沥青黏度=基质沥青黏度 \times (1+橡胶-沥青交互效应+橡胶颗粒效应),IE与橡胶掺量呈线性关系,而PE随着橡胶掺量呈指数增长。Jeong等^[55]运用统计分析方法,研究得出反应温度和橡胶掺量是影响橡胶改性沥青黏结性能的最主要因素;杨小龙等^[49]则进一步采用数理统计方法对橡胶改性沥青的制备条件与黏度进行了二次多项式逐步回归分析,发现在影响橡胶改性沥青黏度的因素中,橡胶掺量占据主导地位,其次是反应时间。

3 流变性能的影响因素

沥青材料流变学是研究沥青材料的弹性、黏性以及流动变形的学科,流变性能是全面评价沥青性能的重要指标^[56-57]。流变行为表征沥青在加热条件下形态转变过程中的变形和流动特性,可用于解释沥青在外荷载作用下流动和变形随时间的变化和发展。综合分析国内外研究成果发现,橡胶掺量、目数、基质沥青类型和制备参数是影响橡胶改性沥青流变性能的关键因素。因此,本节回顾国内外相关研究成果,归纳总结橡胶掺量、目数、基质沥青类型和制备参数对沥青流变性能的影响。

3.1 材料因素对沥青流变性能影响

3.1.1 橡胶掺量

Khalili等^[42]通过动态剪切流变仪(DSR)探究了橡胶掺量对沥青高温流变性能的影响。研究表明:在沥青中掺入橡胶会导致沥青的复数模量、车辙因子 $G^*/\sin\delta$ 和疲劳因子 $G^*\sin\delta$ 增加,而相位角 δ 则减小。近年来,多应力蠕变恢复(MSCR)试验因能有效模拟路面变形和荷载响应,可评价改性沥青的高温性能和弹性恢复能力;Niu等^[43]通过MSCR试验证实,橡胶与沥青混合后,弹性恢复率 R 增大,不可恢复蠕变柔量 J_{ir} 减小,这表明橡胶的加入显著提高了沥青的弹性恢复性能和高温抗变形能力;张鹏等^[15]和Li等^[16]使用弯曲梁流变仪(BBR)研究了橡胶掺量对沥青低温流变性能的影响。研究表明,随着橡胶掺量的增加,橡胶改性沥青的劲度模量 S 减小。不过,对于蠕变速率 m 的变化趋势,前者认为其随之减小,而后者则认为其随之增大。

3.1.2 橡胶目数

Singh等^[51]利用DSR探究了橡胶目数对沥青高温流变性能的影响。研究发现,随着橡胶目数的增大,沥青的车辙因子 $G^*/\sin\delta$ 呈降低趋势。这表明较大粒径的橡胶颗粒能更有效地提升沥青的高温抗车辙性能。然而,当橡胶细度达到80目后,车辙因子 $G^*/\sin\delta$ 的变化趋于平缓^[41],意味着当橡胶粒径达到一定的细度阈值,其对沥青高温性能影响不再明显。值得注意的是,Lei等^[17]在分析车辙影响因素时指出,橡胶目数对沥青的高温敏感性并无显著影响。

此外,随着橡胶目数的增加,橡胶改性沥青的相位角 δ 先减小后增大,这表明过大或过小的橡胶粒径均会导致沥青的弹性性能降低。Singh等^[51]通过MSCR试验进一步证实,随着橡胶目数的增加,橡胶改性沥青的不可恢复蠕变柔量 J_{ir} 增大,弹性恢复率 R 减小;Lei等^[17]的研究还发现,当橡胶粒径达到40目及以上时, R 的差异较小。

关于橡胶目数对橡胶改性沥青低温流变性能的影响,目前研究结论存在分歧。罗要飞等^[58]采用BBR进行了相关研究,结果显示随着橡胶目数的增加,沥青的劲度模量 S 呈现上升趋势,而蠕变速率 m 的变化则不明显,不同目数下的橡胶改性沥青 m 值基本相同;Sebaaly等^[59]的研究表明:橡胶目数对沥青的低温性能并无显著影响。研究结论出现分歧可能

是受改性沥青制备条件、沥青类型等因素的影响。

通过对国内外相关研究的综合分析,结果见表4,可以得出橡胶掺量及目数对沥青流变性能具有显著影响。具体而言,随着橡胶掺量的增加,沥青的车辙因子 $G^*/\sin \delta$ 和弹性恢复率 R 均增加,而相位角 δ

和劲度模量 S 逐渐减小;随着橡胶目数的增加,沥青的车辙因子 $G^*/\sin \delta$ 、弹性恢复率 R 和疲劳寿命均呈现不同程度的降低趋势,而相位角 δ 则先减小后增大。此外,不可恢复蠕变柔量 J_{ir} 会随着橡胶目数的增加而增大。

表4 橡胶掺量及目数对沥青流变性能影响

Table 4 Effect of rubber dosage and particle size on rheological properties of asphalt

研究者	橡胶掺量/%	橡胶目数/目	流变性能
Li等 ^[16]	10、15 20	30、40、80	蠕变速率 m ($-18\text{ }^\circ\text{C}$):随橡胶掺量增加而增大;橡胶掺量从10%增加到20%, m 从0.244增大到0.269
Lei等 ^[17]	—	20、40、80、100	车辙因子 $G^*/\sin \delta$ ($52\text{ }^\circ\text{C}$):橡胶从20目增至80目, $G^*/\sin \delta$ 从27 kPa降低至23 kPa
Khalili等 ^[42]	10、15、20	20、40	车辙因子 $G^*/\sin \delta$ ($58\sim 88\text{ }^\circ\text{C}$):随橡胶掺量增加而显著增大;与橡胶掺量10%的沥青相比,掺量20%的 $G^*/\sin \delta$ 约高3倍
Singh等 ^[51]	15	30~40 60~80	弹性恢复率 R ($64\text{ }^\circ\text{C}$):随橡胶目数增大而减小;在100 Pa时,加入30~40目橡胶后, R 增加到75%。加入60~80目橡胶后, R 仅增加到44%
张云萍等 ^[56]	12、16 20、24	20	劲度模量 S ($-18\text{ }^\circ\text{C}$ 和 $-24\text{ }^\circ\text{C}$):随橡胶掺量增加而减小;掺量为24%的橡胶改性沥青的 S 比掺量为12%的 S 降低了75%
罗要飞等 ^[58]	20	20、40、60、 80、100	蠕变速率 m ($-18\text{ }^\circ\text{C}$):随橡胶目数变化, m 规律不明显,各目数下的 m 值基本相当;100目时, m 值较高,但相比20~40目, m 增加幅度不明显

3.1.3 基质沥青类型

合理选择基质沥青对橡胶改性沥青产品研发至关重要。基质沥青的品质差异不仅影响橡胶改性沥青混合料的高温稳定性,还可能导致其性能差异达到30%^[60]。同一标号的基质沥青,因来源、产地及组分不同,流变性能也会有所区别。例如,王振龙等^[61]的研究显示,中海70#沥青在高温流变性能、感温性能及弹性性能上不如SK70#沥青,但低温性能略优;吕泉等^[62]则发现,不同产地的70#沥青在黏附性自愈合性能上存在显著差异。实际应用中,服役温度较高地区宜选用重组分含量多的70#或50#沥青,服役温度较低地区则宜选用轻组分含量多的70#或90#沥青^[63]。

橡胶改性沥青的改性过程复杂,取决于原材料性质,特别是沥青与橡胶的配伍性,起着决定性作用。胡松山等^[64]通过流变学手段证实,从黏弹特性角度提出的评价指标,能有效评估橡胶与不同基质沥青的配伍性;王筵铸等^[63]的研究也表明:橡胶改性沥青的表面能主要受基质沥青性质影响,而非橡胶掺量。

基质沥青与橡胶的配伍性主要体现在其四组分含量上。胡松山等^[65]采用SARA分析法对多种基质

沥青进行分析,发现沥青质等重质成分对橡胶改性沥青的温度敏感性和弹性恢复性能影响显著。此外,通过灰色关联度法,定量揭示了各组分对橡胶改性沥青黏弹特性的具体影响程度^[64]。

3.2 制备参数对沥青流变性能影响

王枫成^[52]和Kök等^[46]在不同制备参数下对橡胶改性沥青的流变性能进行了探究。研究表明:当剪切温度较低时,橡胶改性沥青内部反应以溶胀为主。随着剪切时间和速度的增加,黏度、复数模量 G^* 及车辙因子 $G^*/\sin \delta$ 均逐渐增大。当剪切温度较高时,黏度保持相对稳定,不受剪切时间和剪切速度的影响; Jamal等^[66]针对低含量橡胶改性沥青(7.5%)的流变性能受制备参数影响的研究表明,剪切时间对橡胶改性沥青流变性能的影响甚微,而较高的剪切速度则能有效提高橡胶改性沥青的复数模量 G^* ,并减小相位角 δ ,从而进一步增强橡胶改性沥青的耐老化性能。

在影响因素分析方面,丁维建等^[44]采用灰色关联度法,以黏度、车辙因子 $G^*/\sin \delta$ 、失效温度和复数模量指数 (I_{GTS}) 为评价指标,得出各因素主次关系为:温度 > 速度 > 时间;李海东^[67]则基于TOPSIS法对黏度、车辙因子 $G^*/\sin \delta$ 和存储稳定性等性能评价指

标的测试结果进行矩阵归一化处理,结果显示:在较低温度($\leq 190\text{ }^{\circ}\text{C}$)下,橡胶掺量成为影响橡胶改性沥青性能的最主要因素。

橡胶改性沥青的流变性能与剪切温度、剪切速度和剪切时间等制备参数密切相关,见表5。在适宜的范围内提高剪切温度或延长剪切时间,可加快橡胶的溶胀速度,进而提升橡胶改性沥青的流动性能。

表5 制备参数对沥青流变性能影响

Table 5 Effect of preparation parameters on rheological properties of asphalt

研究者	温度/ $^{\circ}\text{C}$	速度/ $(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	时间/min	流变性能
杨德胜等 ^[18]	160、 180、200	5 000	30、60、 90、180	在180 $^{\circ}\text{C}$,剪切时间从30 min延长至60 min和90 min时,橡胶降解率分别提升68.3%和103.6%。剪切60 min时,温度从160 $^{\circ}\text{C}$ 升至180 $^{\circ}\text{C}$ 和200 $^{\circ}\text{C}$,橡胶降解率分别提升170.5%和405.9%。提升剪切温度比延长剪切时间更能促进橡胶降解
Zhu等 ^[38]	170、190、 210、230	800	8、20、35、70、 125、180、225	弹性恢复率 R :在剪切温度为170 $^{\circ}\text{C}$ 时, R 随剪切时间的增加而增加;在剪切温度为190 $^{\circ}\text{C}$ 及以上时, R 先增大后减小
Kök等 ^[46]	180	1 000 2 000 5 000	30、60、 90、120	车辙因子 $G^*/\sin\delta(64\text{ }^{\circ}\text{C})$:在所有剪切时间内, $G^*/\sin\delta$ 随剪切速度增加而增大,剪切速度对 $G^*/\sin\delta$ 的影响在低剪切时间下更为显著
王枫成 ^[52]	180	5 000~6 000	30、60、90、 120、180	过长的剪切时间不利于橡胶改性沥青高温稳定性,主要表现为橡胶改性沥青弹性成分降低,黏性成分增强,材料变形恢复能力下降。但有利于降低材料玻璃转变温度(T_g),改善其低温流变性能
Jamal等 ^[66]	177 \pm 10	700、3 500	30、60、90	在剪切温度低于190 $^{\circ}\text{C}$ 和橡胶用量有限的情况下,剪切时间为30~90 min时对橡胶改性沥青的流变性能没有显著影响

具体而言,剪切温度和剪切时间的增加在一定程度上会导致橡胶改性沥青的高温性能的提升。但当剪切温度超过200 $^{\circ}\text{C}$ 或剪切时间超过60 min时,这些性能的提升将受到限制,甚至可能出现性能下降的情况。同样地,随着剪切温度的升高、剪切速度的加快以及剪切时间的延长,橡胶改性沥青的复数模量 G^* 和车辙因子 $G^*/\sin\delta$ 会呈现增加趋势,而相位角 δ 则会减小。但这些参数的影响并非线性,当它们超过一定的阈值时,可能会对橡胶改性沥青的性能产生不利影响。值得注意的是,适度地延长剪切时间、提高剪切温度和剪切速度,有助于改善橡胶改性沥青的低温流变性能。因此,在制备橡胶改性沥青时,需要综合考虑这些参数的影响,以确定最佳的制备条件。

4 改性机理

沥青和胶粉均由多种复杂成分构成,这使得橡胶改性沥青的组分异常多样且复杂^[68]。因此,在分

析其改性机理时,宏观测试指标存在明显局限性。为了更深入地理解其性质和特点,精确表征其微观结构,并优化橡胶改性沥青的设计和应用提供理论基础。目前,学术界普遍认为在橡胶改性沥青的改性过程中,橡胶与沥青之间会发生一系列复杂的反应。为了揭示这些反应机理,研究者们已经采用了多种微观测试方法,包括谱学分析法和微观形貌分析法。谱学分析法能够揭示橡胶与沥青之间的化学变化,如官能团结构、热性能以及分子量分布等,而微观形貌分析法则可以直观地展示橡胶在沥青中的分散状态、界面相互作用以及微观结构的变化。因此,本节将系统综述这些微观测试方法在橡胶改性沥青改性机理研究中的应用。

4.1 谱学分析法

谱学分析法在橡胶改性沥青改性机理的研究中具有精确性、非破坏性、高灵敏度、可重复性和多功能性等优点,是研究橡胶改性沥青改性机理的有效手段。

4.1.1 红外光谱分析法

红外光谱法(Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FTIR)利用红外光谱仪对橡胶改性沥青样品进行扫描,获得其红外光谱图。由于不同化学官能团具有不同的红外吸收特性,因此可以通过对光谱图中的特征峰进行分析,以定性或定量的方式研究分子中官能团的变化规律,用于检测橡胶改性沥青改性过程中是否发生化学反应^[69]。

Zhang等^[70]对比了70#基质沥青与不同橡胶含量的改性沥青红外光谱特性,如图5所示。研究发现基质沥青和橡胶改性沥青的特征峰基本一致,虽然在加入橡胶后,观察到 $1\ 742\text{ cm}^{-1}$ 处出现了新的特征峰,但这是由酯羰基($\text{O}=\text{C}=\text{O}$)的伸缩振动引起的,原因可能是橡胶改性沥青制备过程中部分沥青发生了老化,这表明在沥青改性过程中并未涉及化学反应,仅仅发生物理共混。这与Lyu等^[71]的研究结果一致。然而,康成生等^[72]发现相比基质沥青,橡胶改性沥青在 $1\ 396.83\text{ cm}^{-1}$ 和 870.78 cm^{-1} 处多了两个特征峰,其他峰与基质沥青一致,说明橡胶改性沥青的主要机理以物理共混反应为主,同时存在较微弱的化学反应。

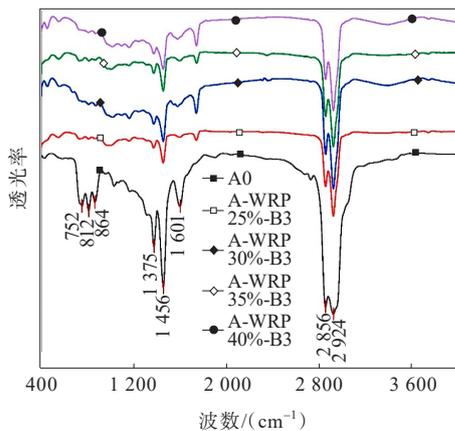


图5 基质沥青与不同橡胶含量的改性沥青的红外光谱对比图^[70]

Figure 5 Infrared spectrum comparison of matrix asphalt and modified asphalt with different rubber dosages^[70]

此外,FTIR还被用于研究制备参数对橡胶与沥青交互作用的影响。例如,王笑风等^[73]发现随搅拌时间增加,化学反应特征增强;而杨小龙等^[49]观察到低温时主要为物理反应,但 $220\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时则出现强烈的物理化学作用,形成新的官能团 $\text{C}-\text{O}-\text{C}$ 和 $=\text{C}-\text{O}-\text{C}$ 。

4.1.2 热分析法

热分析法(Thermal Analysis, TAM)在分析橡胶改性沥青改性机理中的主要作用是通过研究其在加热过程中的物理和化学变化,揭示橡胶改性沥青的改性机制。这种方法能监测橡胶改性沥青的热稳定性、化学反应和相变行为,为优化制备工艺和预测性能提供重要依据。热分析方法涵盖了多种具体的技术手段,在橡胶改性沥青测试中常用的热分析技术分类详见表6。

表6 热分析技术分类^[68]

Table 6 Classification of thermal analysis technology^[68]

热分析方法	测量物理量	热分析方法	测量物理量
差示扫描量热法(DSC)	比热容、热量	差热分析法(DTA)	温差
热重分析法(TG)	质量	热机械分析法(TMA)	模量、能耗

差示扫描量热法(Differential Scanning Calorimetry, DSC)通过分析橡胶改性沥青在加热过程中的热量变化,揭示其热力学过程和相变行为,为理解橡胶改性沥青的改性机理提供关键信息。许爱华等^[74]运用DSC分析改性沥青中聚集态组分的变化规律,发现橡胶改性沥青在 $175\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之后几乎没有吸热峰,说明该物质在一定温度下大部分组分已完成聚集态的转变,表现出黏流状态;曾凡奇等^[75]运用DSC测定基质沥青聚集状态转变时的热量变化,定性评价了不同沥青的温度稳定性和高温性能;丁海波^[76]利用DSC定量分析了吸热峰面积,发现橡胶的加入使沥青轻组物质减少,大分子物质增多;王辉等^[77]比较了普通橡胶改性沥青与复合橡胶改性沥青的玻璃转变温度(T_g),发现前者 T_g 略高,这归因于橡胶对沥青轻组分的吸附溶胀作用及脱硫降解导致的体系结构弱化,进而影响低温性能。

热重分析(Thermo Gravimetry, TG)是一种高效的橡胶改性沥青组分分析方法,能够快速识别橡胶的主要成分^[68]。如图6所示,橡胶的典型TG曲线清晰地展示了不同温度下橡胶各组分[如加工油、天然橡胶(NR)、合成橡胶(SR)和炭黑(CB)]的含量变化^[78]。橡胶作为改性剂加入沥青后,会与沥青组分发生相互作用,进而改变沥青的热稳定性^[79]。Ge等^[80]和Venudharan等^[81]通过TG曲线分析发现,橡胶的加入提高了沥青的失重起始温度,并降低了失

重百分比,从而增强了它的热稳定性。然而,Yang等^[82]进一步对比分析了基质沥青、橡胶改性沥青以及活化橡胶改性沥青的TG曲线,如图7所示。当橡胶经过活化处理后,改性沥青的分解温度,尤其是起始分解温度会降低,这表明活化橡胶会降低沥青的热稳定性,这可能是由于微波活化破坏了橡胶中的化学交联键。

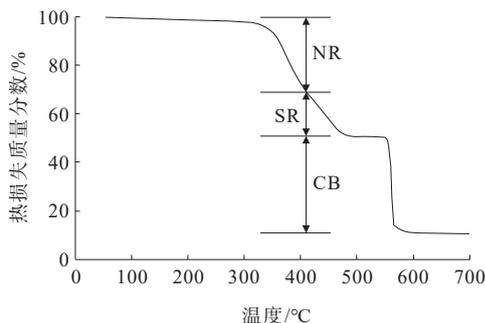


图6 橡胶的典型TG曲线^[78]

Figure 6 Typical TG curve of rubber^[78]

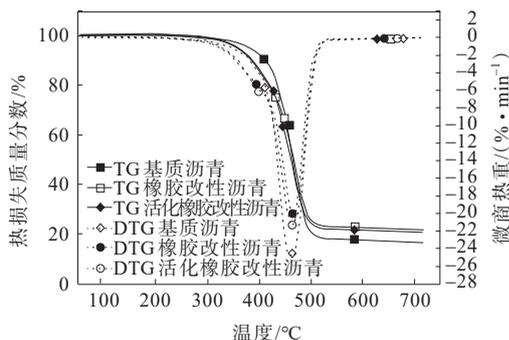


图7 基质沥青、橡胶改性沥青和活化橡胶改性沥青的TG和DTG曲线^[82]

Figure 7 TG and DTG curves of matrix asphalt, rubber-modified asphalt, and activated rubber-modified asphalt^[82]

值得注意的是,橡胶对沥青的改性主要依赖于它们之间的组分交换。Ghavibazoo等^[83]和Ragab等^[84]利用TG和FTIR揭示了橡胶释放组分的类型和数量,并探讨了相互作用条件对橡胶改性沥青内部网络结构发展的影响。研究表明:橡胶改性沥青的复数模量 G' 和相位角 δ 的增强与橡胶组分在特定相互条件下的溶解和释放密切相关,这导致了橡胶改性沥青液相中三维网络结构的形成。

4.1.3 凝胶渗透色谱法

凝胶渗透色谱法(Gel Permeation Chromatography, GPC)通过特种凝胶色谱柱将聚合物按分子大小分离^[85],如图8所示。在分析橡胶改性沥青改性机

理时,GPC可全面评估橡胶颗粒的分子量、分子量分布及改性剂含量,进而揭示橡胶与沥青间的相互作用和改性中的化学变化,为深入理解改性机理提供重要依据。

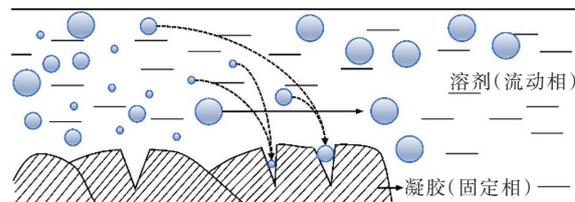


图8 GPC试验原理^[85]

Figure 8 GPC test principle^[85]

冯小佼等^[86]成功运用高效液相色谱法,实现了对改性沥青中橡胶成分的精确分离与测定,该方法不仅精确度高,而且操作简便;Yu等^[87]采用自行设计的分离装置,将溶胀橡胶颗粒从沥青液相中有效分离,并通过改进的分级萃取方法,将橡胶-沥青相互作用区域由外向内分为4层,如图9所示。

鉴于沥青的化学组成复杂且分子量分布广泛,研究人员依据其分子质量的不同,将沥青的色谱图细分为大分子量组分(Large Molecular Size, LMS)、中分子量组分(Medium Molecular Size, MMS)和小分子量组分(Small Molecular Size, SMS)^[88]。进一步的研究表明:与MMS和SMS组分相比,LMS组分与橡胶改性沥青的最终物理性能之间的相关性最为显著^[89]。此外,通过对比橡胶改性沥青中不同分子的吸收情况,发现小分子含量在沥青层的分级萃取过程中由外向内呈现逐渐增加的趋势。这表明:橡胶颗粒更易吸收轻质组分,即小分子量组分相较于大分子量组分更容易被吸收到橡胶-沥青相互作用区^[53]。

GPC也被广泛应用于研究制备参数对橡胶改性沥青分子组成的影响。通过分析橡胶改性沥青的GPC图,研究人员发现,在160°C和190°C时,橡胶改性沥青主要发生物理溶胀反应,即橡胶吸收沥青中的轻质组分,且随橡胶掺量和反应时间的增加会导致橡胶吸收更多的沥青轻质油分,从而使改性沥青中的LMS增加^[44]。但当温度升至220°C时,除了物理溶胀,还发生化学降解作用。在这种情况下,随橡胶掺量和反应时间的增加,橡胶改性沥青中形成新的大分子物质,导致LMS显著增加^[53,90]。然而,Gha-

vibazoo 等^[91]通过 GPC 试验证实,在 220 °C 下,随时间延长,LMS 含量实际上减少,这表明:高温下,橡胶改

性剂释放的组分发生解聚。此过程主要受温度和时间的调控,与混合速度的关系相对较小。

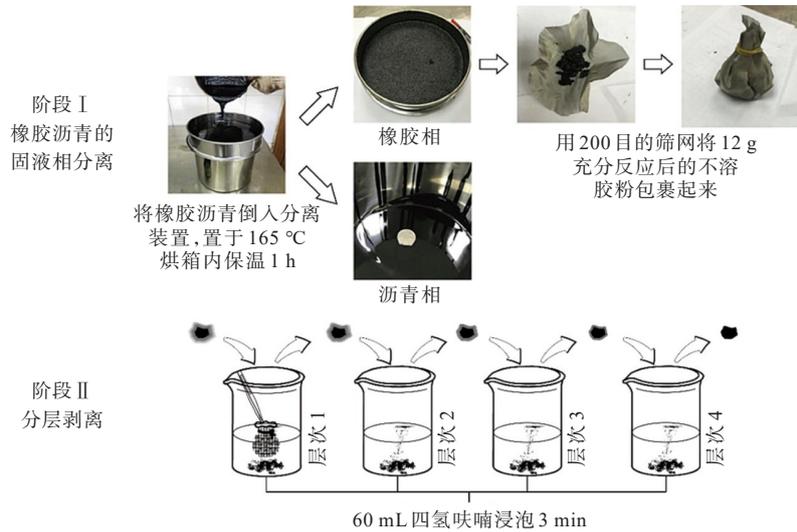


图 9 溶胀橡胶的分离及分级萃取方法^[87]

Figure 9 Separation and grading extraction method of swelling rubber^[87]

4.1.4 核磁共振波谱法

核磁共振波谱仪(Nuclear Magnetic Resonance, NMR)被用于检测橡胶改性沥青样品,生成相应的核磁共振波谱图。通过对波谱图中的化学位移、峰形及峰强度进行详细分析,可以探究不同橡胶与沥青之间的相容性,以及橡胶改性沥青内部的分子结构、交联程度和添加剂分布等关键信息^[92-93]。

Kovaláková 等^[94]证实了 NMR 的基本参数,包括质子自旋-晶格弛豫时间 T_1 、质子自旋-自旋弛豫时间 T_2 以及 ^{13}C NMR 和 ^1H NMR 谱线的展宽,对检测橡胶改性沥青降解变化的高度敏感性。进一步建议在将橡胶改性沥青应用于沥青混合料之前,利用这些 NMR 参数来评估其降解情况;Wang 等^[95]研究发现 NMR 是一种比傅里叶变换红外光谱衰减全反射模式 (FTIR-ATR) 来分析化合物结构更准确的方法,采用 NMR 分析了正硅酸四乙酯 (TEOS) 对橡胶改性沥青物理性能的影响。

尽管核磁共振波谱法具有这些显著优势,但在实际应用中仍面临多重挑战,包括高昂的成本、时间消耗、技术复杂性、数据解读的专业性要求、建模的复杂性、设备间模型传递的难题、间接定量检测的局限性以及对标准样品绝对准确度的苛刻要求等。这些因素共同制约了该方法在橡胶改性沥青改性机理分析中的广泛应用。

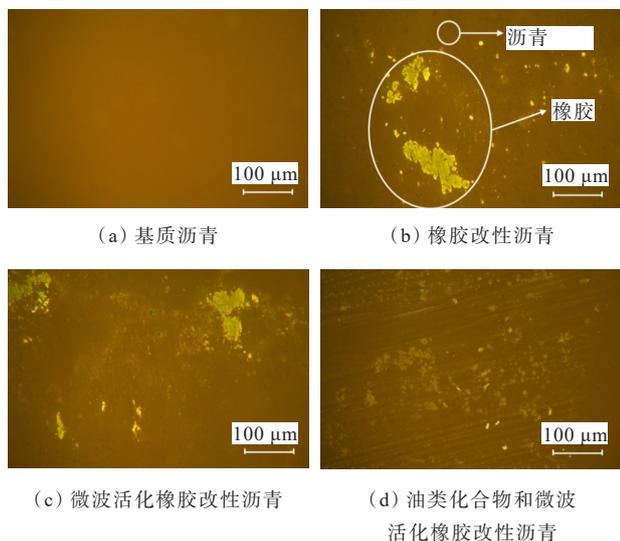
4.2 微观形貌分析法

运用微观形貌分析法分析橡胶改性沥青改性机理,具有直观性、高分辨率、定量与定性分析结合和无损检测等优点。这些优点使得微观形貌分析法成为研究橡胶改性沥青改性机理的有效手段之一。

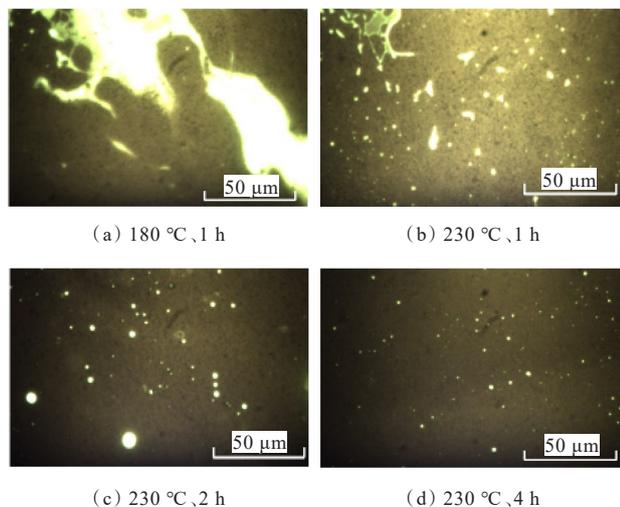
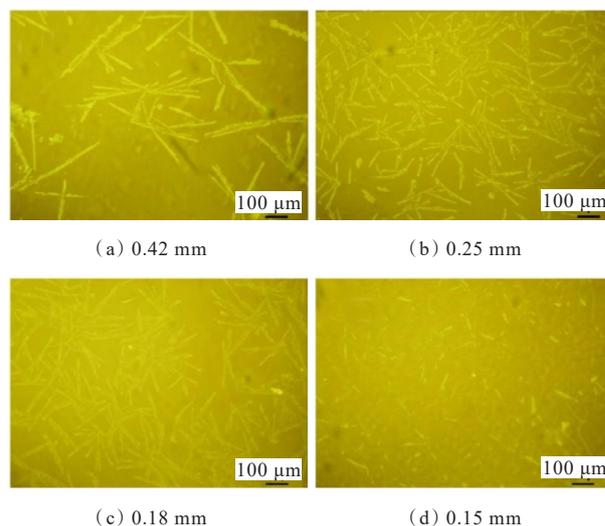
4.2.1 荧光显微镜技术

由于橡胶颗粒和沥青在荧光显微成像条件下具有不同的荧光特性,因此通过荧光显微镜 (Fluorescence Microscopy, FM) 可以直观地展示橡胶改性沥青中改性剂的分布状况和形态结构,包括改性剂的大小、分布均匀性以及与基质沥青的相容性等。

Kong 等^[96]通过 FM 观察到,经油类化合物活化后的橡胶在沥青中的分布更均匀,这证实了油类化合物能有效增强橡胶与沥青的相容性;Chen 等^[69]利用 FM 分析了油类化合物和微波处理对橡胶改性沥青改性机理的影响。基质沥青呈现单相结构[图 10(a)],不适合 FM 观察。而橡胶改性沥青中可见大岛状结构被星状结构包围[图 10(b)],表明橡胶溶解不充分。微波处理后,岛状结构变小、边缘模糊[图 10(c)],说明微波促进了橡胶分解。最终,油类化合物的加入使岛状结构转变为均匀的星状结构[图 10(d)],进一步促进了橡胶在沥青中的溶解。

图10 橡胶改性沥青的FM图^[69]Figure 10 FM diagram of rubber-modified asphalt^[69]

众多研究者利用FM探究了制备参数对橡胶改性沥青微观结构的影响。其中,董瑞琨等^[97]利用FM研究了制备温度和反应时间的作用,其结果如图11所示。与180℃相比,230℃下制备的橡胶改性沥青中大片絮团状胶粉结构消失。且随着反应时间的延长,橡胶颗粒逐渐细化且形态更规则。在230℃下改性4h后,荧光颗粒在沥青全局图像中的分布更为均匀,表明橡胶与沥青形成了稳定的交联体系;Liang等^[98]的FM图像揭示,橡胶颗粒呈细长或长条状,而非球形,其长径比(长度/直径)随橡胶粒径的减小而减小(图12),且随橡胶粒径的减小,在FM图中其分布越密集,越趋于不明显,表明橡胶与沥青的相容性

图11 橡胶改性沥青的FM图^[97]Figure 11 FM diagram of rubber-modified asphalt^[97]图12 橡胶改性沥青的FM图:颗粒平均直径^[98]Figure 12 FM diagram of rubber-modified asphalt: average particle size^[98]

得到改善。值得注意的是,有研究指出,橡胶改性沥青反应过程中轻质组分的减少和橡胶颗粒尺寸的增加会导致黏度上升,但橡胶颗粒的解聚则会释放轻质组分并部分溶解于沥青中,从而降低黏度^[68]。

4.2.2 扫描电子显微镜技术

扫描电子显微镜技术(Scanning Electron Microscopy, SEM)在分析橡胶改性沥青改性机理中,通过直观展示微观结构,揭示橡胶与沥青的相互作用方式以及研究相分离现象,为深入理解改性机理提供了有力支持。

崔亚楠等^[99]通过SEM对橡胶改性沥青的形貌特征进行了分析,发现橡胶颗粒虽不溶于沥青,但能被沥青完全包裹,二者界面结合紧密,形成良好的黏结性,从而确认了橡胶改性沥青的非均相体系本质;徐安花等^[100]利用SEM图像分析发现,橡胶颗粒能够吸收沥青中的轻质组分并发生溶胀,在沥青体系中形成均匀的互连网络,这也验证了橡胶改性沥青是一种非均相体系和相互连接的两相连续结构^[68]。

Yin等^[101]利用SEM观察到微波活化对橡胶改性沥青形貌的显著影响,发现其表面较普通橡胶改性沥青更为疏松多孔且反应区域广泛[图13(a)、(b)],表明微波活化橡胶在与沥青混合时形成了相对稳定的结构;Li等^[102]发现脱硫橡胶改性沥青中颗粒较少、表面光滑[图13(c)、(d)],表明脱硫过程中橡胶发生了较多化学反应,增强了其稳定性和稠度;Wang

等^[95]的研究则显示,正硅酸乙酯(TEOS)预改性未明显改变橡胶形貌,但在其表面生成的白色小颗粒证实了溶-凝胶反应的发生[图 13(e)、(f)],从而增加了表面粗糙度并改善了与基质沥青的相容性。

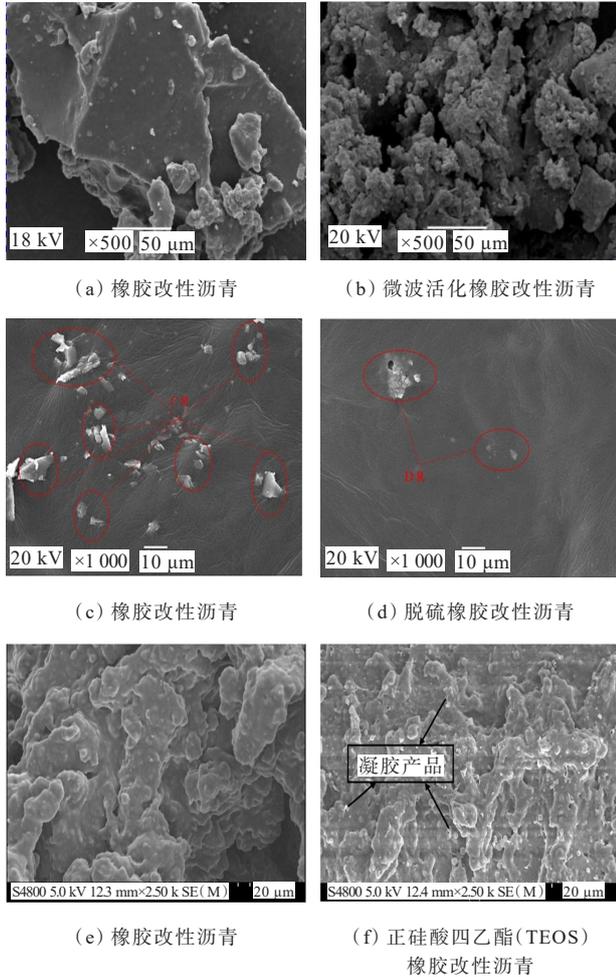


图 13 橡胶改性沥青的 SEM 图^[95,101-102]

Figure 13 SEM diagram of rubber-modified asphalt^[95,101-102]

SEM 还被用于研究橡胶掺量与反应时间等制备参数对橡胶颗粒在沥青中分布与发展的影响。Yang 等^[103]利用 SEM 图像(图 14)分析了不同橡胶掺量对改性沥青的影响,发现随橡胶掺量增加,沥青表面的橡胶颗粒分布更为致密、均匀,且颗粒尺寸也有所增大。值得注意的是,橡胶颗粒溶胀后,其体积占整体材料的 20%~30%,从而形成了高黏度的半固态体系;Zhu 等^[38]通过研究不同反应时间下的橡胶改性沥青 SEM 图(图 15)观察到,随反应时间延长,橡胶改性沥青表面的胶粉量逐渐减少,直至 180 min 时表面变得均匀光滑,此时胶粉已充分溶胀并降解为小颗粒,完全溶解在沥青中;Thives 等^[104]的研究显示,仅需 90 min 反应时间即可实现橡胶颗粒的完全

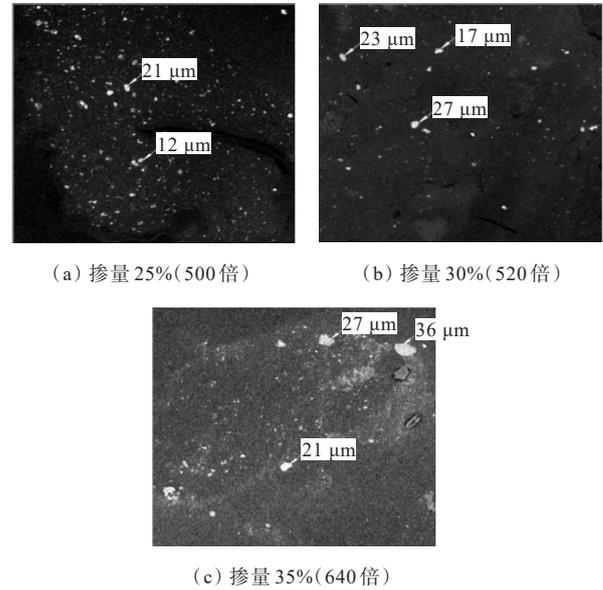


图 14 不同橡胶掺量改性沥青的 SEM 图^[103]

Figure 14 SEM diagram of modified asphalt with different rubber dosages^[103]

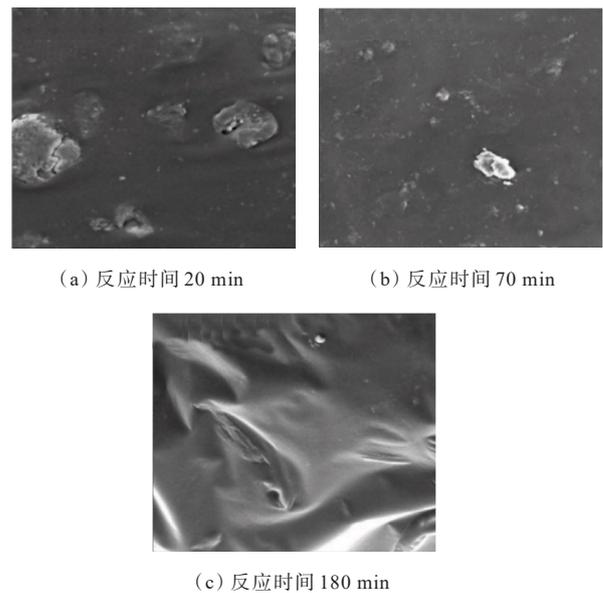


图 15 不同反应时间橡胶改性沥青的 SEM 图^[38]

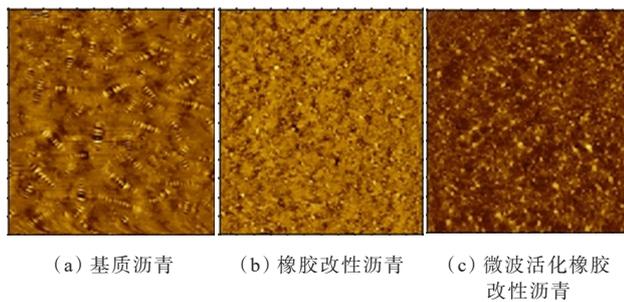
Figure 15 SEM diagram of rubber-modified asphalt with different reaction time^[38]

分散。这种差异主要归因于 Zhu 等^[38]的样品中添加了芳烃油(AO)。

4.2.3 原子力显微镜技术

原子力显微镜技术(Atomic Force Microscopy, AFM)能够在纳米尺度上深入研究橡胶颗粒与沥青之间的相互作用,精准捕捉表面形貌的关键细节。此外,该技术还可通过测量表面粗糙度的变化,有效评估橡胶改性沥青的改性效果。

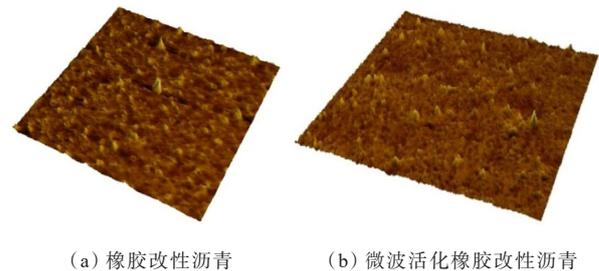
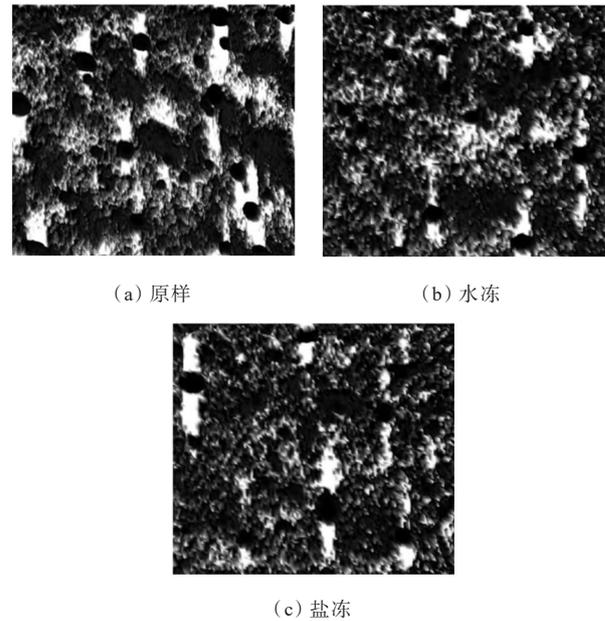
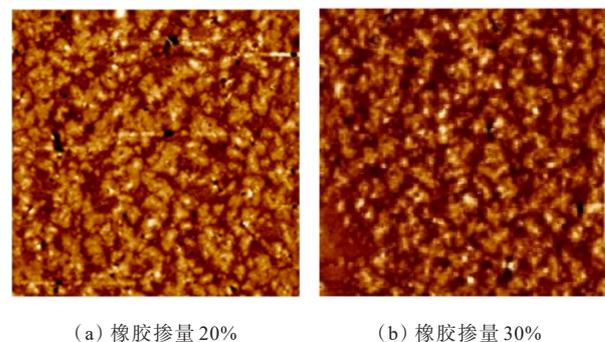
Badri等^[37]通过分析AFM图像发现,基质沥青与橡胶改性沥青中均存在“蜂状”结构(bee-like structures)、包裹相(peri-phase)和连续相(para-phase)3种相态。相较于基质沥青,橡胶改性沥青中“蜂状”结构数量增多、尺寸减小,这可能与其较高的黏度有关;Yang等^[82]进一步研究指出,“蜂状”结构在基质沥青中呈随机分散状态[图16(a)],而加入橡胶后,沥青表面性质显著变化,“蜂状”结构消失,形貌更趋均匀[图16(b)、(c)]。这是由于橡胶粉吸收了沥青中的轻质组分和部分蜡,减少了形成“蜂状”结构的蜡含量,同时橡胶分子链的均匀分散阻碍了沥青质的聚集^[105]。从胶体理论角度看,胶体分散的均匀性有助于提高宏观性能,这也验证了橡胶改性沥青的优异表现。此外,AFM图像显示橡胶改性沥青的颜色比微波活化橡胶改性沥青更浅,表明活化橡胶在沥青中的溶胀反应更为有效。

图16 AFM图^[82]Figure 16 AFM diagram^[82]

Wang等^[105]利用AFM研究了橡胶改性沥青老化前后的相位图像,发现老化对沥青微观结构影响不明显,但通过定量分析表面粗糙度揭示,老化使橡胶改性沥青微观表面更均匀、平缓,增强了其高温稳定性;Yin等^[101]对比了长期老化后的橡胶改性沥青与微波活化橡胶改性沥青的AFM图像(图17),发现长期老化导致橡胶改性沥青中沥青质等物质明显聚集,而微波活化橡胶改性沥青聚集程度较小,长期老化使橡胶改性沥青的均方根粗糙度(R_q)显著增加,而微波活化橡胶改性沥青的 R_q 降低。这表明:微波活化,提升了橡胶改性沥青的抗老化性能。

还有研究者们利用AFM观察到橡胶改性沥青在经历盐冻循环后微观结构的变化。研究发现,盐冻循环导致橡胶改性沥青中的链状结构减少,橡胶颗粒聚团及颗粒间的连接作用减弱(图18)。这些变

化共同导致了橡胶改性沥青低温性能的下降^[106-108]。Guo等^[106]则通过AFM研究了橡胶掺量对沥青微观形貌的影响(图19),发现高掺量的橡胶改性沥青具有更丰富的链状结构和更均匀的橡胶颗粒分布。

图17 长期老化(PAV)后橡胶改性沥青的AFM图^[101]Figure 17 AFM diagram of rubber-modified asphalt after long-term aging (PAV)^[101]图18 橡胶改性沥青AFM图^[107]Figure 18 AFM diagram of rubber-modified asphalt^[107]图19 不同橡胶掺量的AFM图^[106]Figure 19 AFM diagram of different rubber dosages^[106]

这归因于橡胶中的高分子量聚合物在沥青中密集分布,增强了交联和聚集,进而提升了网状结构的稳定性。因此,高掺量的橡胶改性沥青展现出更优越的黏结强度和低温抗裂性能。

5 橡胶与其他改性剂复合改性沥青

在沥青改性领域,橡胶与其他改性剂的复合使用已成为一种重要的技术策略。这种策略的核心在于通过综合多种改性剂的优势,实现更全面、协同的性能提升,以满足日益复杂多变的工程需求。由于单一改性剂可能无法在所有性能方面都达到最佳效果。因此,复合改性不仅有助于弥补橡胶在某些性能上的不足,还能发挥其他改性剂的独特优势,从而获得更优异的综合性能。

5.1 聚合物改性剂

当橡胶与聚合物改性剂复合使用时,可以显著提升沥青的多项性能。例如,周育名等^[109]发现多聚磷酸(PPA)与橡胶粉的复合使用能显著提高沥青的高温性能,但PPA对低温延度有不利影响,建议掺量控制在1%以内;Leng等^[110]和马奇言等^[111]分别利用废弃聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)和低密度聚乙烯增强了橡胶改性沥青的储存稳定性和流变性能。对于SBS与橡胶粉的复合改性,郭吉坦等^[112]和Li等^[113]发现其效果优于单独使用SBS或橡胶粉,但关于最佳掺量,不同研究存在一定差异。例如,郭吉坦等^[112]推荐SBS掺量为5%,橡胶粉为11%~13%;倪彤元等^[114]则建议SBS减至3%,橡胶粉增至15%~20%;颜可珍等^[115]探讨了橡胶与非晶态 α -烯烃共聚物(APAO)的复合改性效果,发现APAO虽略微降低了软化点,但显著提升了存储稳定性,可能与其与沥青和橡胶的良好混溶性有关;Wei等^[116]指出APAO对沥青的低温性能有不利影响。

5.2 纳米改性剂

纳米材料在橡胶改性沥青改性中展现出了显著的效果。多项研究发现,不同纳米材料对橡胶改性沥青的改性效果具有差异性。例如,杨晨光等^[117]的研究表明,纳米ZnO因其高比表面积,能有效增加橡胶改性沥青中的结构沥青比例和黏聚力,进而优化其多项性能,包括温度敏感性、高低温性能、抗老化性和储存稳定性,且经济可行;Zheng等^[118]发现多壁碳纳米管与橡胶的复合使用能显著提高沥青的黏弹

性能,特别是在高温黏度和抗永久变形能力方面表现突出;Tian等^[119]发现纳米有机蒙脱土与橡胶改性沥青的化学反应能改善复合体系的高温稳定性、抗老化性和储存稳定性,但会对低温性能产生一定影响;张荣辉等^[120]发现纳米碳酸钙能增强橡胶改性沥青的高温稳定性,但对其低温延度有所影响;Guo等^[121]聚焦于石墨烯与橡胶复合改性沥青的性能,发现石墨烯与沥青间的范德华相互作用能显著提升沥青的黏度和韧性,以及储存稳定性和抗变形能力。然而,石墨烯吸收沥青中的轻质组分,导致低温延度降低。

5.3 轻质油改性剂

轻质油作为另一种重要的改性剂,在橡胶改性沥青改性中也发挥了重要作用。多项研究证实,轻质油能显著提升橡胶改性沥青在施工中的相容性、和易性及储存稳定性,并大幅改善其低温性能。例如,汤岷^[122]采用芳烃油对橡胶进行超活化处理,制备出复合改性沥青。在芳烃油超活化橡胶47%的掺量下,该改性沥青展现出优异的高低温性能和储存稳定性,同时提高了废旧橡胶在沥青中的利用率和相容性;单达^[123]的研究表明,妥尔油对老化基质沥青有良好再生效果,与橡胶结合使用时对老化SBS沥青效果更佳;Li等^[124]成功利用废机油作为降黏剂,大幅降低了传统橡胶改性沥青的黏度,解决了施工难度大的问题。在180℃下,橡胶改性沥青的旋转黏度降低了64.5%。

5.4 生物油改性剂

近年来,生物油作为一种环保、可持续的改性剂,在橡胶改性沥青改性中的应用也受到了广泛关注。众多学者开始研究生物油和橡胶在复合改性沥青制备中的应用潜力^[125-126]。例如,Fini等^[127]发现猪粪生物油能显著提升橡胶改性沥青的流变特性、存储稳定性和抗疲劳开裂性能,并降低其压实温度;Peralta等^[128]利用红橡木热解生物油制备的橡胶改性沥青展现出更低的加工温度和增强的抗疲劳、低温抗裂性能;Lei等^[129]则通过玉米秸秆热解生物油与橡胶粉的复合改性,成功提高了沥青的高温性能和短期老化后的弹性;牛冬瑜等^[125]采用复配煎炸废油(WFO)和废胎橡胶粉制备了改性沥青,并定量分析傅里叶红外光谱。结果发现,当WFO与橡胶的质量分数分别为5.0%和20.0%时,该改性沥青的碳基指数和亚砷基指数达到最低,相比基质沥青分别降低了36.02%和

32.04%,表明其抗老化性能得到了显著改善。

6 结论

本研究围绕湿法橡胶改性沥青的制备条件、物理性能、流变性能及改性机理进行了深入探讨。通过对现有文献的综述与试验数据的分析,得出以下主要结论:

(1) 湿法橡胶改性沥青的制备主要基于高速剪切法。建议橡胶粒径控制在2.0 mm以下,掺量为5%~20%,剪切温度维持为170~190℃,剪切速度为1 000~4 500 r/min,并且剪切时间持续60 min。

(2) 湿法橡胶改性沥青的物理与流变性能受到橡胶掺量、目数、基质沥青类型以及制备参数的共同影响。然而,关于这些影响因素的具体作用机制,目前尚未形成完全统一的认识。

(3) 尽管橡胶和沥青的组成复杂,但借助微观表征手段,能清晰地揭示橡胶与沥青之间的相互作用,进而洞察橡胶改性沥青分子结构和相结构的演化过程。改性效果主要源于橡胶在沥青中的溶胀和交联反应。在改性过程中,物理反应占据主导地位,而湿法橡胶改性沥青的制备参数、橡胶目数及其掺量则对橡胶改性沥青的均匀性和分散性产生显著影响。

7 研究展望

本文系统论述了湿法橡胶改性沥青领域的研究成果,深入分析了其制备技术、性能影响因素及改性机理。尽管湿法橡胶改性沥青的研究与应用已取得显著进展,但仍存在诸多有待深入探讨的问题和挑战。

(1) 制备工艺方面。当前湿法橡胶改性沥青的生产工艺虽已较为成熟,但仍面临生产效率提升、能耗降低及环境友好性增强的迫切需求。未来研究应聚焦于对制备过程中温度控制、反应速率及反应时间等关键参数的精细化调控,以期实现生产工艺的高效化、绿色化。此外,还需要进一步探索新型且高效的橡胶颗粒表面处理技术。例如,通过采用纳米材料涂层、等离子体处理或超临界流体技术等前沿手段,旨在保持橡胶颗粒原有力学性能的同时,显著提升其表面活性和与沥青等基体的相容性。同时,应积极探索废旧橡胶制品(如橡胶鞋底、橡胶手套等)在改性沥青生产中的应用,进一步拓宽废旧橡胶

的资源化利用途径,促进循环经济的发展。

(2) 在性能研究方面。为了更全面、系统地评估橡胶改性沥青的黏结性能,亟须构建一套多尺度、多维度的综合评估体系。该体系应涵盖但不限于宏观力学性能测试(如拉伸强度、剥离强度)、微观界面分析(运用先进的扫描电子显微镜、透射电子显微镜结合能谱分析技术)以及动态力学性能分析(如DMA测试)。此外,未来应重点关注湿法橡胶改性沥青在极端环境(如高温、低温、高湿、高盐、强紫外线辐射等)下的性能表现及耐久性。同时,随着智能交通和物联网技术的快速发展,研究湿法橡胶改性沥青与智能道路技术的融合应用,探索其在提升道路智能化水平、保障交通安全等方面的潜在价值,将成为未来研究的重要方向。

(3) 改性机理方面。仍需深入探究橡胶与沥青之间的相互作用机制及制备参数对改性沥青性能的微观影响。通过建立更为精确的橡胶-沥青相互作用模型,揭示橡胶特性与改性沥青性能之间的内在联系,为制备高性能橡胶改性沥青提供理论指导。同时,应建立一套完善的评价橡胶在沥青中反应程度的指标体系,以指导高性能橡胶改性沥青的制备与质量控制,推动该领域的持续发展与进步。

参考文献:

References:

- [1] 赵树杰,许竣媛,曾现来.典型轮胎可回收性评估及生态设计[J].中国环境科学,2024,44(8):4731-4736.
ZHAO Shujie, XU Junyuan, ZENG Xianlai. Measuring the recyclability and eco-design of typical tires[J]. China Environmental Science, 2024, 44(8): 4731-4736.
- [2] 叶长建,陆少毅,黄秋山,等.废胶粉/天然沥青复合改性沥青流变性能与改性机理研究[J].中外公路,2022,42(3): 219-224.
YE Changjian, LU Shaoyi, HUANG Qiushan, et al. Study on rheological properties and modification mechanism of crumb rubber/natural asphalt composite modified asphalt[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2022, 42(3): 219-224.
- [3] OBOIRIEN B O, NORTH B C. A review of waste tyre gasification[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2017, 5(5): 5169-5178.
- [4] 杨晚生,易帅兵,戴天乐,等.废轮胎热解炭黑(TPCB)改性沥青抗紫外老化性能试验研究[J].中外公路,2024,44(2):

- 103-109.
- YANG Wansheng, YI Shuaibing, DAI Tianle, et al. Experimental research on anti-UV aging performance of tire pyrolysis carbon black(TPCB) modified asphalt[J]. Journal of China & Foreign Highway,2024,44(2):103-109.
- [5] 杨三强,孙爽,李倩,等.胶粉改性沥青混合料动荷载力学响应分析[J].中外公路,2023,43(2):227-233.
- YANG Sanqiang,SUN Shuang,LI Qian,et al.Dynamic load response analysis of rubber powder modified asphalt mixture[J].Journal of China & Foreign Highway,2023,43(2):227-233.
- [6] 黄平安.废旧轮胎热解制备炭黑及球磨改性研究[D].杭州:浙江大学,2022.
- HUANG Ping'an.Study on preparation of carbon black by pyrolysis of waste tires and ball milling modification[D]. Hangzhou:Zhejiang University,2022.
- [7] 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.
- [8] AKKENZHEYEVA A, HARITONOV V, BUSSURMANOVA A, et al. Study of the viscoelastic and rheological properties of rubber-bitumen binders obtained from rubber waste[J]. Polymers,2023,16(1):114.
- [9] 宋冬平,韩菁,李晓林,等.再生橡胶改性沥青湿法工艺的研究[J].橡胶科技,2022,20(8):369-373.
- SONG Dongping,HAN Jing,LI Xiaolin,et al.Study on wet process of recycled rubber modified asphalt[J]. Rubber Science and Technology,2022,20(8):369-373.
- [10] PICADO-SANTOS L G, CAPITÃO S D, NEVES J M C. Crumb rubber asphalt mixtures: A literature review[J]. Construction and Building Materials,2020,247:118577.
- [11] CHAVEZ F, MARCOBAL J, GALLEGO J. Laboratory evaluation of the mechanical properties of asphalt mixtures with rubber incorporated by the wet, dry, and semi-wet process[J]. Construction and Building Materials, 2019,205:164-174.
- [12] 马庆伟,郭忠印,李文博,等.不同因素对橡胶复合改性沥青高温性能影响分析[J].中外公路,2022,42(3):225-230.
- MA Qingwei, GUO Zhongyin, LI Wenbo, et al. Analysis on the influence of different factors on the high temperature performance of composite rubber asphalt[J]. Journal of China & Foreign Highway,2022,42(3):225-230.
- [13] BRESSI S, FIORENTINI N, HUANG J D, et al. Crumb rubber modifier in road asphalt pavements: State of the art and statistics[J]. Coatings,2019,9(6):384.
- [14] OUYANG C F, GAO Q, SHI Y T, et al. Compatibilizer in waste tire powder and low-density polyethylene blends and the blends modified asphalt[J]. Journal of Applied Polymer Science,2012,123(1):485-492.
- [15] 张鹏,尹振羽.废旧轮胎再生橡胶粉对沥青物理性能及流变性能的影响[J].山东科技大学学报(自然科学版), 2019,38(2):57-64.
- ZHANG Peng, YIN Zhenyu. Effect of waste tyre recycled rubber powder on physical and rheology properties of asphalt[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science),2019,38(2):57-64.
- [16] LI J, XIAO F P, AMIRKHANIAN S N. Storage, fatigue and low temperature characteristics of plasma treated rubberized binders[J]. Construction and Building Materials, 2019,209:454-462.
- [17] LEI Y, WEI Z, WANG H N, et al. Effect of crumb rubber size on the performance of rubberized asphalt with bio-oil pretreatment[J]. Construction and Building Materials,2021, 285:122864.
- [18] 杨德胜,郭豪.基于储存稳定性的橡胶改性沥青制备工艺[J].硅酸盐通报,2021,40(9):3168-3176.
- YANG Desheng, GUO Hao. Preparation process of rubber modified asphalt based on storage stability[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society,2021,40(9):3168-3176.
- [19] ATTIA M, ABDELRAHMAN M. Enhancing the performance of crumb rubber-modified binders through varying the interaction conditions[J]. International Journal of Pavement Engineering,2009,10(6):423-434.
- [20] LEWANDOWSKI L H. Polymer modification of paving asphalt binders[J]. Rubber Chemistry and Technology, 1994,67(3):447-480.
- [21] 廖明义,李雪.废橡胶粉改性沥青稳定性及其影响因素[J].石油化工高等学校学报,2004,17(4):38-41,49.
- LIAO Mingyi, LI Xue. The stability of crumb rubber modified asphalt and the factors of the effect on stability [J]. Journal of Petrochemical Universities, 2004, 17(4): 38-41, 49.
- [22] 袁剑波,殷婵,冯新军,等.多聚磷酸/脱硫胶粉复合改性沥青的制备及性能研究[J/OL].中外公路,1-10[2024-06-14]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/43.1363.U.20240614.1606.003.html>.
- YUAN Jianbo, YIN Chan, FENG Xinjun, et al. Preparation and performance study of polyphosphoric acid/

- desulfurized crumb rubber composite modified asphalt[J/OL]. Journal of China & Foreign Highway, 1-10[2024-06-14]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/43.1363.U.20240614.1606.003.html>.
- [23] HALLMARK-HAACK B L, HERNANDEZ N B, WILLIAMS R C, et al. Ground tire rubber modification for improved asphalt storage stability[J]. Energy & Fuels, 2019, 33(4):2659-2664.
- [24] 李晓娟,徐希娟,王清清.不同基质沥青的脱硫橡胶改性沥青性能研究[J].中外公路,2022,42(5):156-160.
LI Xiaojuan, XU Xijuan, WANG Qingqing. Study on performance of desulfurized rubber modified asphalt with different original asphalt[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2022, 42(5):156-160.
- [25] CHEN F Z, QIAN J L. Studies of the thermal degradation of waste rubber[J]. Waste Management, 2003, 23(6):463-467.
- [26] YIN J M, WANG S Y, LYU F R. Improving the short-term aging resistance of asphalt by addition of crumb rubber radiated by microwave and impregnated in epoxidized soybean oil[J]. Construction and Building Materials, 2013, 49:712-719.
- [27] 于凯,张琛,王欢,等.次氯酸钠氧化废轮胎胶粉对改性沥青性能的影响[J].环境工程学报,2016,10(1):350-354.
YU Kai, ZHANG Chen, WANG Huan, et al. Influence of sodium hypochlorite oxidization of crumb tire rubber on performance of modified bitumen[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2016, 10(1):350-354.
- [28] ZHOU T, KABIR S F, CAO L P, et al. Comparing effects of physisorption and chemisorption of bio-oil onto rubber particles in asphalt[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 273:123112.
- [29] LIANG M, XIN X, FAN W Y, et al. Thermo-stability and aging performance of modified asphalt with crumb rubber activated by microwave and TOR[J]. Materials & Design, 2017, 127:84-96.
- [30] 李志刚,邓思奇,谭发茂,等.杜仲胶改性橡胶粉的混炼制备温度与时间参数分析[J].东南大学学报(自然科学版), 2020, 50(6):1109-1114.
LI Zhigang, DENG Siqi, TAN Famao, et al. Analysis on temperature and time for mixing preparation of crumb rubber modified by eucommia ulmoides gum[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2020, 50(6):1109-1114.
- [31] YE Z G, ZHANG Y Z, KONG X M. Modification of bitumen with desulfurized crumb rubber in the present of reactive additives[J]. Journal of Wuhan University of Technology-Mater Sci Ed, 2005, 20(1):95-97.
- [32] 宋应登,李晓林,张立群.超细全硫化粉末丁苯橡胶改性沥青的性能及相容剂的影响[J].合成橡胶工业,2011,34(2):139-142.
SONG Yingdeng, LI Xiaolin, ZHANG Liqun. Properties of asphalt modified with ultra-fine full-vulcanized powdered styrene-butadiene rubber and influence of compatilizer[J]. China Synthetic Rubber Industry, 2011, 34(2):139-142.
- [33] POLACCO G, FILIPPI S, MERUSI F, et al. A review of the fundamentals of polymer-modified asphalts: Asphalt/polymer interactions and principles of compatibility[J]. Advances in Colloid and Interface Science, 2015, 224:72-112.
- [34] 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.
- [35] 王辉,王旭,黄威麟,等.废胶粉复合改性沥青相容性研究[J].中南大学学报(自然科学版),2022,53(10):3879-3889.
WANG Hui, WANG Xu, HUANG Weilin, et al. Study on compatibility of crumb rubber powder composite modified asphalt[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2022, 53(10):3879-3889.
- [36] 底秀玲,仲富,仇新玲,等.橡胶粉改性沥青的热稳定性及其复合沥青的研究[J].化工新型材料,2023,51(2):229-234.
DI Xiuling, ZHONG Fu, QIU Xinling, et al. Study on the thermal stability of rubber powder modified asphalt and its composite asphalt[J]. New Chemical Materials, 2023, 51(2):229-234.
- [37] BADRI R M, ALKAISSI Z A, SUTANTO M. Physical, rheological and morphological characterization of modified asphalt binder with differing crumb rubber contents[J]. Materials Today: Proceedings, 2021, 42: 3028-3034.
- [38] ZHU Y J, XU G J, MA T, et al. Performances of rubber asphalt with middle/high content of waste tire crumb rubber[J]. Construction and Building Materials, 2022, 335: 127488.
- [39] 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.
- [40] 许旭.废弃轮胎胶粉沥青改性技术与机理研究[D].西安:长安大学,2020.
XU Xu. Study on modification technology and mechanism

- of waste tire rubber powder asphalt[D]. Xi'an: Chang'an University, 2020.
- [41] 王辉,邓乔,罗建军,等. 橡胶粉的掺量与细度对沥青性能的影响研究[J]. 中外公路, 2017, 37(4): 259-262.
WANG Hui, DENG Qiao, LUO Jianjun, et al. Study on the influence of rubber powder content and fineness on asphalt properties[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2017, 37(4): 259-262.
- [42] KHALILI M, JADIDI K, KARAKOUZIAN M, et al. Rheological properties of modified crumb rubber asphalt binder and selecting the best modified binder using AHP method[J]. Case Studies in Construction Materials, 2019, 11: e00276.
- [43] NIU D Y, XIE X W, ZHANG Z, et al. Influence of binary waste mixtures on road performance of asphalt and asphalt mixture[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 298: 126842.
- [44] 丁维建,何欣怿,杨艳华,等. 基于反应参数的橡胶改性沥青流变性能及机理研究[J]. 公路, 2023, 68(6): 403-409.
DING Weijian, HE Xinyi, YANG Yanhua, et al. Study on rheological properties and mechanism of rubber asphalt based on reaction parameters[J]. Highway, 2023, 68(6): 403-409.
- [45] LIU H B, LUO G B, WANG X Q, et al. Effects of preparation process on performance of rubber modified asphalt[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2015, 87: 012008.
- [46] KÖK B V, YILMAZ M, AKPOLAT M, et al. Effects of preparation conditions on the properties of crumb rubber modified binder[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2018, 12: 233-238.
- [47] 丁湛,蒋修明,赵浚凯,等. 橡胶沥青黏度影响因素及黏流特性分析[J]. 郑州大学学报(工学版), 2019, 40(3): 57-62.
DING Zhan, JIANG Xiuming, ZHAO Junkai, et al. The influencing factors analysis of viscosity and viscous flow properties for rubber asphalt[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2019, 40(3): 57-62.
- [48] 栗培龙,王霄,孙胜飞,等. 不同制备方法的橡胶沥青黏度特性对比分析[J]. 硅酸盐通报, 2021, 40(9): 3159-3167.
LI Peilong, WANG Xiao, SUN Shengfei, et al. Comparative analysis of viscosity characteristic of rubber asphalt with different preparation methods[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2021, 40(9): 3159-3167.
- [49] 杨小龙,李波,刘祥,等. 基于生产工艺参数的橡胶沥青改性机理研究[J]. 建筑材料学报, 2017, 20(4): 640-645.
YANG Xiaolong, LI Bo, LIU Xiang, et al. Mechanism of modification of rubber asphalt on process parameters[J]. Journal of Building Materials, 2017, 20(4): 640-645.
- [50] 李波,李鹏,张新雨,等. 废旧胶粉的反应与交联作用对橡胶沥青黏度的影响[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2017, 37(2): 26-34.
LI Bo, LI Peng, ZHANG Xinyu, et al. Interaction and particle effect of crumb rubber characteristics on brookfield viscosity of rubber asphalt binder[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2017, 37(2): 26-34.
- [51] SINGH D, ASHISH P K, JAGADEESH A. Influence of particle and interaction effects of different sizes of crumb rubber on rheological performance parameters of binders [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2018, 30(5): 04018066.
- [52] 王枫成. 再生橡胶粉改性沥青性能的变化[J]. 弹性体, 2023, 33(5): 20-24.
WANG Fengcheng. Changes in properties of modified asphalt by reclaimed rubber powder[J]. China Elastomerics, 2023, 33(5): 20-24.
- [53] LEE S J, KIM H, AKISETTY C K, et al. Laboratory characterization of recycled crumb-rubber-modified asphalt mixture after extended aging[J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2008, 35(11): 1308-1317.
- [54] LI P L, JIANG X M, DING Z, et al. Analysis of viscosity and composition properties for crumb rubber modified asphalt[J]. Construction and Building Materials, 2018, 169: 638-647.
- [55] JEONG K D, LEE S J, AMIRKHANIAN S N, et al. Interaction effects of crumb rubber modified asphalt binders[J]. Construction and Building Materials, 2010, 24(5): 824-831.
- [56] 张云萍,王晓丽,赵任帅,等. 橡胶复合改性沥青流变性能分析[J]. 河南科技, 2020, 39(31): 73-77.
ZHANG Yunping, WANG Xiaoli, ZHAO Renshuai, et al. Analysis of rheological properties of rubber compound modified asphalt[J]. Henan Science and Technology, 2020, 39(31): 73-77.
- [57] 黄诗洪. 不同类型抗剥落剂与橡胶复合改性沥青的流变性能研究[J]. 中外公路, 2023, 43(5): 254-258.
HUANG Shihong. Study on rheological properties of asphalt modified by different types of anti-stripping agents and rubber[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2023, 43(5): 254-258.
- [58] 罗要飞,李志宏,张苛. 目数对橡胶沥青性能的影响[J]. 石油沥青, 2013, 27(1): 1-5.
LUO Yaofei, LI Zhihong, ZHANG Ke. Influence of mesh

- on performance of rubber modified asphalt[J]. Petroleum Asphalt,2013,27(1):1-5.
- [59] SEBAALY P E, GOPAL V T, EPPS J A. Low temperature properties of crumb rubber modified binders[J]. Road Materials and Pavement Design,2003,4(1):29-49.
- [60] 黄卫东,王伟,黄岩,等. 橡胶沥青混合料高温稳定性影响因素试验[J]. 同济大学学报(自然科学版),2010,38(7):1023-1028.
HUANG Weidong, WANG Wei, HUANG Yan, et al. Influencing factor research on high-temperature performance of asphalt rubber mixture[J]. Journal of Tongji University (Natural Science),2010,38(7):1023-1028.
- [61] 王振龙,张文武,张鸣功. 废胎胶粉改性沥青影响因素探讨[J]. 石油沥青,2010,24(4):42-48.
WANG Zhenlong, ZHANG Wenwu, ZHANG Minggong. Effects of scrap tires type on performance of crumb rubber modified asphalt binder[J]. Petroleum Asphalt,2010,24(4):42-48.
- [62] 吕泉,黄卫东,孙立军,等. 沥青粘附性自愈合性能评价与机理分析[J]. 哈尔滨工业大学学报,2021,53(3):33-41.
LYU Quan, HUANG Weidong, SUN Lijun, et al. Evaluation and mechanism analysis of adhesive self-healing property of asphalt[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2021,53(3):33-41.
- [63] 王筵铸,王旭东,张龙生,等. 橡胶沥青配伍性及黏附性能研究[J]. 公路交通科技,2019,36(3):34-41,72.
WANG Yanzhu, WANG Xudong, ZHANG Longsheng, et al. Study on compatibility and adhesion property of rubber asphalt[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development,2019,36(3):34-41,72.
- [64] 胡松山,谭华,覃润浦,等. 基于流变学的橡胶粉与基质沥青配伍性试验[J]. 复合材料学报,2018,35(12):3487-3499.
HU Songshan, TAN Hua, QIN Runpu, et al. Compatibility test of rubber powder and matrix asphalt based on rheology[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2018, 35(12):3487-3499.
- [65] 胡松山,覃润浦,李辉,等. 橡胶改性沥青性能测试技术的应用[J]. 复合材料学报,2018,35(8):2260-2273.
HU Songshan, QIN Runpu, LI Hui, et al. Application of rubber asphalt performance test technology[J]. Acta Materiae Compositae Sinica,2018,35(8):2260-2273.
- [66] JAMAL M, GIUSTOZZI F. Low-content crumb rubber modified bitumen for improving Australian local roads condition[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 271:122484.
- [67] 李海东. 不同生产工艺参数对橡胶改性沥青性能的影响[J]. 甘肃科技纵横,2022,51(4):34-37.
LI Haidong. Influence of different production process parameters on properties of rubber asphalt[J]. Scientific & Technical Information of Gansu,2022,51(4):34-37.
- [68] 张庆,侯德华,史纪村. 橡胶沥青的微观表征方法及其微观特性综述[J]. 材料导报,2019,33(增刊2):247-253.
ZHANG Qing, HOU Dehua, SHI Jicun. Research progress of microscopic characterization of rubber asphalt[J]. Materials Reports,2019,33(sup 2):247-253.
- [69] CHEN Y, HU K, CHEN Y J, et al. Preparation and modification mechanism study of microwave-treated crumb rubber and waste engine oil-modified asphalt[J]. Environmental Science and Pollution Research International,2024,31(8):12483-12498.
- [70] ZHANG J W, CHEN M Z, WU S P, et al. Evaluation of VOCs inhibited effects and rheological properties of asphalt with high-content waste rubber powder[J]. Construction and Building Materials,2021,300:124320.
- [71] LYU S T, TAN L, PENG X H, et al. Experimental investigation on the performance of bone glue and crumb rubber compound modified asphalt[J]. Construction and Building Materials,2021,305:124734.
- [72] 康成生,李良英,张星宇,等. 废旧胶粉改性沥青的红外图谱特征[J]. 中国建材科技,2016,25(5):46-47,114.
KANG Chengsheng, LI Liangying, ZHANG Xingyu, et al. Infrared spectrum characteristics of waste rubber powder modified asphalt[J]. China Building Materials Science & Technology,2016,25(5):46-47,114.
- [73] 王笑风,曹荣吉. 橡胶沥青的改性机理[J]. 长安大学学报(自然科学版),2011,31(2):6-11.
WANG Xiaofeng, CAO Rongji. Rubber asphalt modification mechanism[J]. Journal of Chang' an University (Natural Science Edition),2011,31(2):6-11.
- [74] 许爱华,郭朝阳,卢伟. 废胎胶粉橡胶沥青改性机理研究[J]. 交通科技,2010(3):87-89.
XU Aihua, GUO Chaoyang, LU Wei. Study of the modified mechanism of ground tire asphalt rubber[J]. Transportation Science & Technology,2010(3):87-89.
- [75] 曾凡奇,黄晓明,李海军. 沥青性能的DSC评价方法[J]. 交通运输工程学报,2005,5(4):37-42.
ZENG Fanqi, HUANG Xiaoming, LI Haijun. Evaluation method of differential scanning calorimetry for asphalt performance[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering,2005,5(4):37-42.
- [76] 丁海波. Asphaltan A[®]温拌剂对橡胶沥青微观特性的影响研究[J]. 公路工程,2016,41(6):25-28.

- DING Haibo. Asphaltan A[®] warm mix agent on the microcharacteristics of the rubber asphalt[J]. Highway Engineering,2016,41(6):25-28.
- [77] 王辉,熊梦日,杨震.基于化学改性的废胶粉复合改性沥青性能与机理研究[J].湖南大学学报(自然科学版),2021,48(6):30-37.
- WANG Hui, XIONG Mengri, YANG Zhen. Research on performance and mechanism of crumb rubber composite modified asphalt with chemical modifier[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences),2021,48(6):30-37.
- [78] WANG S F, CHENG D X, XIAO F P. Recent developments in the application of chemical approaches to rubberized asphalt[J]. Construction and Building Materials, 2017, 131: 101-113.
- [79] 宋亮,王朝辉,舒诚,等. SBS/胶粉复合改性沥青研究进展与性能评价[J]. 中国公路学报, 2021, 34(10): 17-33.
- SONG Liang, WANG Chaohui, SHU Cheng, et al. Research progress and performance evaluation of SBS/CR-modified asphalt[J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(10): 17-33.
- [80] GE D D, YAN K Z, YOU Z P, et al. Modification mechanism of asphalt binder with waste tire rubber and recycled polyethylene[J]. Construction and Building Materials, 2016, 126: 66-76.
- [81] VENUDHARAN V, BILIGIRI K P, DAS N C. Investigations on behavioral characteristics of asphalt binder with crumb rubber modification: Rheological and thermo-chemical approach[J]. Construction and Building Materials, 2018, 181: 455-464.
- [82] YANG X L, SHEN A Q, LI B, et al. Effect of microwave-activated crumb rubber on reaction mechanism, rheological properties, thermal stability, and released volatiles of asphalt binder[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 248: 119230.
- [83] GHAVIBAZOO A, ABDELRAHMAN M, RAGAB M. Mechanism of crumb rubber modifier dissolution into asphalt matrix and its effect on final physical properties of crumb rubber-modified binder[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2013, 2370(1): 92-101.
- [84] RAGAB M, ABDELRAHMAN M. Effects of interaction conditions on internal network structure of crumb rubber-modified asphalts[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2014, 2444(1): 130-141.
- [85] 谭忆秋,李冠男,单丽岩,等. 沥青微观结构组成研究进展[J]. 交通运输工程学报, 2020, 20(6): 1-17.
- TAN Yiqiu, LI Guannan, SHAN Liyan, et al. Research progress of bitumen microstructures and components[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2020, 20(6): 1-17.
- [86] 冯小佼,郭治安,王培,等. 改性沥青中橡胶含量的高效液相色谱测定法[J]. 应用化学, 2012, 29(3): 364-366.
- FENG Xiaojiao, GUO Zhian, WANG Pei, et al. Determination of the content of styrene-butadiene rubber in modified asphalt using high performance liquid chromatography[J]. Chinese Journal of Applied Chemistry, 2012, 29(3): 364-366.
- [87] YU H Y, LENG Z, ZHANG Z Y, et al. Selective absorption of swelling rubber in hot and warm asphalt binder fractions[J]. Construction and Building Materials, 2020, 238: 117727.
- [88] HUANG W D, LIN P, TANG N P, et al. Effect of crumb rubber degradation on components distribution and rheological properties of terminal blend rubberized asphalt binder[J]. Construction and Building Materials, 2017, 151: 897-906.
- [89] LEE S J, HU J, KIM H, et al. Aging analysis of rubberized asphalt binders and mixes using gel permeation chromatography[J]. Construction and Building Materials, 2011, 25(3): 1485-1490.
- [90] LI J, JIANG H, HAN F H, et al. Investigation of the effects of chemical modification and oxidative aging on the properties and compatibility of rubber asphalt based on thermodynamic principles[J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 428: 139070.
- [91] GHAVIBAZOO A, ABDELRAHMAN M, RAGAB M. Changes in composition and molecular structure of asphalt in mixing with crumb rubber modifier[J]. Road Materials and Pavement Design, 2016, 17(4): 906-919.
- [92] 严家,赵立民. 核磁共振波谱在沥青化学结构分析中的应用[J]. 中国建筑防水材料, 1991(2): 44-46.
- YAN Jia, ZHAO Limin. Application of nuclear magnetic resonance spectroscopy in chemical structure analysis of asphalt[J]. China Building Waterproofing, 1991(2): 44-46.
- [93] DUAN S C, MUHAMMAD Y, LI J, et al. Enhancing effect of microalgae biodiesel incorporation on the performance of crumb Rubber/SBS modified asphalt[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 237: 117725.
- [94] KOVALÁKOVÁ M, FRIČOVÁ O, HRONSKÝ V, et al.

- Characterisation of crumb rubber modifier using solid-state nuclear magnetic resonance spectroscopy[J]. Road Materials and Pavement Design,2013,14(4):946-958.
- [95] WANG Z J, XU X, WANG X F, et al. Performance of modified asphalt of rubber powder through tetraethyl orthosilicate (TEOS) [J]. Construction and Building Materials,2021,267:121032.
- [96] KONG P P, XU G, YANG J Y, et al. Study on storage stability of activated reclaimed rubber powder modified asphalt[J]. Materials,2021,14(16):4684.
- [97] 董瑞琨,戚昌鹏,郑凯军,等. 高温裂解胶粉改性沥青的低温性能试验[J]. 中国公路学报,2017,30(10):32-38.
DONG Ruikun, QI Changpeng, ZHENG Kaijun, et al. Test on low-temperature performance for high-temperature pyrolytic rubber modified asphalt[J]. China Journal of Highway and Transport,2017,30(10):32-38.
- [98] LIANG M, XIN X, FAN W Y, et al. Viscous properties, storage stability and their relationships with microstructure of tire scrap rubber modified asphalt[J]. Construction and Building Materials,2015,74:124-131.
- [99] 崔亚楠,邢永明,王岚,等. 废胶粉改性沥青改性机理[J]. 建筑材料学报,2011,14(5):634-638.
CUI Yanan, XING Yongming, WANG Lan, et al. Improvement mechanism of crumb rubber-modified asphalt [J]. Journal of Building Materials,2011,14(5):634-638.
- [100] 徐安花,王小雯,熊锐,等. 橡胶粉改性沥青制备及性能试验研究[J]. 硅酸盐通报,2017,36(4):1326-1332,1344.
XU Anhua, WANG Xiaowen, XIONG Rui, et al. Experimental investigation on preparation technology and performance of rubber powder modified asphalt[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society,2017,36(4):1326-1332,1344.
- [101] YIN L, YANG X L, SHEN A Q, et al. Mechanical properties and reaction mechanism of microwave-activated crumb rubber-modified asphalt before and after thermal aging[J]. Construction and Building Materials,2021,267:120773.
- [102] LI H B, DONG B, ZHAO D, et al. Physical, rheological and stability properties of desulfurized rubber asphalt and crumb rubber asphalt[J]. Arabian Journal for Science and Engineering,2019,44(5):5043-5056.
- [103] YANG S Q, SUN S, QIN L S, et al. Microstructure and meso-mechanical properties of asphalt mixture modified by rubber powder under a multi-scale effect[J]. Coatings,2021, 11(11):1321.
- [104] THIVES L P, PAIS J C, PEREIRA P A A, et al. Assessment of the digestion time of asphalt rubber binder based on microscopy analysis[J]. Construction and Building Materials,2013,47:431-440.
- [105] WANG L, LIU Y, ZHANG L. Micro/nanoscale study on the effect of aging on the performance of crumb rubber modified asphalt[J]. Mathematical Problems in Engineering,2020,2020(1):1924349.
- [106] GUO J, CHANG C Q, WANG L. Low-temperature crack resistance of high-content rubber-powder-modified asphalt mixture under freeze-thaw cycles[J]. Polymers,2024,16(3):402.
- [107] 崔亚楠,韩吉伟,冯蕾,等. 盐冻循环条件下改性沥青微观结构[J]. 吉林大学学报(工学版),2017,47(2):452-458.
CUI Yanan, HAN Jiwei, FENG Lei, et al. Microstructure of asphalt under salt freezing cycles[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition),2017,47 (2):452-458.
- [108] 韩吉伟,崔亚楠,李震,等. 改性沥青微观结构及低温性能的研究[J]. 功能材料,2017,48(2):2140-2143.
HAN Jiwei, CUI Yanan, LI Zhen, et al. Research on microstructure and low temperature performance of modified asphalt[J]. Journal of Functional Materials,2017, 48(2):2140-2143.
- [109] 周育名,魏建国,时松,等. 多聚磷酸及橡胶粉复合改性沥青性能[J]. 长安大学学报(自然科学版),2018,38(5):9-17.
ZHOU Yuming, WEI Jianguo, SHI Song, et al. Properties of composite-modified asphalt with polyphosphoric acid and rubber powder[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition),2018,38(5):9-17.
- [110] LENG Z, PADHAN R K, SREERAM A. Production of a sustainable paving material through chemical recycling of waste PET into crumb rubber modified asphalt[J]. Journal of Cleaner Production,2018,180:682-688.
- [111] 马尚言,王斌,韦正鹏,等. 橡胶粉-废塑料复合改性沥青高低温性能研究[J]. 中国科技论文,2023,18(12):1334-1339.
MA Keyan, WANG Bin, WEI Zhengpeng, et al. Investigation on high and low temperature performance of rubber powder and waste plastics jointly modified asphalt [J]. China Sciencepaper,2023,18(12):1334-1339.
- [112] 郭吉坦,张波. SBS与橡胶粉复合改性沥青性能研究[J]. 新型建筑材料,2010,37(5):66-69.
GUO Jitan, ZHANG Bo. Research on the performance of SBS and rubber powder combined modified asphalt[J]. New Building Materials,2010,37(5):66-69.
- [113] LI H B, LI W B, SHENG Y P, et al. Influence of compound action of rubber powder and SBS on high-temperature

- performance of asphalt pavement surface[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*,2021,33(6):04021126.
- [114] 倪彤元,戴晓栋,杨杨,等.SBS与废胶粉复合改性沥青性能试验研究[J].*新型建筑材料*,2009,36(6):65-68.
NI Tongyuan, DAI Xiaodong, YANG Yang, et al. Experimental study on compound modified asphalt by SBS and crumb rubber[J].*New Building Materials*,2009,36(6):65-68.
- [115] 颜可珍,陈明,胡玥.废胶粉/APAO复合改性沥青性能[J].*长安大学学报(自然科学版)*,2018,38(2):1-8.
YAN Kezhen, CHEN Ming, HU Yue. Performance of composite modified asphalt by waste rubber powder and amorphous poly alpha olefin[J]. *Journal of Chang' an University (Natural Science Edition)*,2018,38(2):1-8.
- [116] WEI J M, LI Y N, DONG F Q, et al. Study on the amorphous poly alpha olefin (APAO) modified asphalt binders[J]. *Construction and Building Materials*, 2014, 66: 105-112.
- [117] 杨晨光,赵士峰.纳米ZnO/橡胶粉复合改性沥青的性能研究[J].*公路交通科技(应用技术版)*,2013(11):23-27.
YANG Chenguang,ZHAO Shifeng.Study on properties of nano-ZnO/rubber powder composite modified asphalt[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*,2013(11):23-27.
- [118] ZHENG M L, LIU Y M, LIU X, et al. Study on the viscoelastic behaviour of the modified asphalt containing multi-walled carbon nanotubes (MWCNTs) and crumb rubber (CR)[J].*Construction and Building Materials*,2021, 311:125244.
- [119] TIAN X G,ZHANG R,YANG Z,et al.Multiscale study on the effect of nano-organic montmorillonite on the performance of rubber asphalt[J]. *Journal of Nanomaterials*, 2018,2018(1):9638603.
- [120] 张荣辉,曾志煌,李毅.纳米碳酸钙和橡胶粉复合改性沥青性能研究[J].*新型建筑材料*,2010,37(5):63-65.
ZHANG Ronghui, ZENG Zhihuang, LI Yi. Research on performance of composite modified asphalt with nano calcium carbonate and rubber powder[J]. *New Building Materials*,2010,37(5):63-65.
- [121] GUO R, TANG J H, GU J F, et al. Analysis on the road performance of graphene composite rubber asphalt and its mixture[J]. *Case Studies in Construction Materials*, 2022, 17:e01664.
- [122] 汤岷.基于单螺杆连续挤出制备超活化胶粉及其改性沥青性能的研究[D].青岛:青岛科技大学,2023.
TANG Min. Study on preparation of super-activated rubber powder and its modified asphalt properties based on single screw continuous extrusion[D]. Qingdao: Qingdao University of Science & Technology,2023.
- [123] 单达.胶粉再生沥青的性能及机理研究[D].北京:北京化工大学,2021.
SHAN Da.Study on properties and mechanism of rubber powder recycled asphalt[D].Beijing:Beijing University of Chemical Technology,2021.
- [124] LI H B, ZHAO Q Y, FENG Z X, et al. Recycling waste engine oil as a viscosity reducer for asphalt rubber: An insight from molecular dynamics simulations and laboratory tests[J]. *Environmental Science and Pollution Research International*,2023,30(15):44251-44265.
- [125] 牛冬瑜,谢希望,杨政险,等.WFO-CR改性沥青的分子结构变化与抗老化性能[J].*深圳大学学报(理工版)*,2020,37(6):589-596.
NIU Dongyu, XIE Xiwang, YANG Zhengxian, et al. Molecular structure change and anti-aging performance of WFO-CR composite modified asphalts[J]. *Journal of Shenzhen University (Science and Engineering)*, 2020, 37(6):589-596.
- [126] 程培峰,白月,李艺铭,等.玉米秸秆油对老化沥青流变性能的影响及其再生效果研究[J/OL].*中外公路*, 1-15 [2024-02-01]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/43.1363.U.20240201.1012.002.html>.
CHENG Peifeng, BAI Yue, LI Yiming, et al. Study on the effect of corn stover oil on the rheological properties of aged asphalt and its regeneration effect[J/OL]. *Journal of China & Foreign Highway*, 1-15[2024-02-01]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/43.1363.U.20240201.1012.002.html>.
- [127] FINI E H, HOSSEINNEZHAD S, OLDHAM D, et al. Bio-modification of rubberised asphalt binder to enhance its performance[J]. *International Journal of Pavement Engineering*,2019,20(10):1216-1225.
- [128] PERALTA J, SILVA H, WILLIAMS R, et al. Development of an innovative bio-binder using asphalt-rubber technology[J]. *International Journal of Pavement Research and Technology*,2013,6(4):447-456.
- [129] LEI Y, WANG H N, FINI E H, et al. Evaluation of the effect of bio-oil on the high-temperature performance of rubber modified asphalt[J]. *Construction and Building Materials*, 2018,191:692-701.