

# 沥青紫外光老化研究进展

金大中<sup>1</sup>, 钱国平<sup>1,2</sup>, 白献萍<sup>1</sup>, 黄乾晋<sup>1</sup>

(1.长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410114; 2.长沙理工大学 道路结构与材料交通行业重点实验室)

**摘要:** 为了进一步研究紫外光照对沥青老化的影响, 探寻预防和减少紫外光对沥青老化影响的方法, 该文阐述了沥青紫外光老化机理, 梳理了相关的试验方法及评价指标, 归纳了抗紫外光老化的措施, 指出了现有沥青紫外光老化研究存在的问题, 并在此基础上提出几点研究展望, 以期对沥青的紫外光老化程度进行定量描述, 预估沥青路面使用寿命, 并为深入研究沥青路面老化及抗老化措施提供理论参考, 为最佳养护时机及养护方案的确定提供有力依据和技术支持。

**关键词:** 沥青; 紫外老化; 模拟试验; 养护

随着“一带一路”互联互通开放通道的建设, 中国公路路网建设布局与重点将向西部和低纬度等强紫外线辐射地区转移。沥青路面是中国主要路面类型之一, 沥青作为一种有机高分子材料, 在沥青路面建设与运营过程中易发生老化。太阳紫外辐射对沥青路面老化作用较为显著, 进而劣化其路用性能、缩短使用寿命, 在强紫外线辐射地区这种破坏作用更为显著。

目前国内外对于沥青的热氧老化研究已趋于成熟, 而对于紫外线老化的研究相对甚少, 且尚未形成统一的标准体系。因此, 对沥青的紫外光老化机理进行深入研究, 提出相对合理的评价指标, 形成可靠完整的老化评价体系, 并在此基础上进一步研究沥青的抗紫外光老化措施, 对提高强紫外线辐射地区公路沥青路面的建设和养护水平, 保障沥青路面在全寿命周期内的路用性能, 推动“一带一路”国家战略顺利实施具有重要意义。

## 1 沥青紫外光老化机理分析

沥青的四组分(沥青质、胶质、饱和分、芳香分)含量对其性能有较大影响。在沥青的紫外光老化过程中, 各组分之间可进行相互转化。沥青胶体结构模型以及各组分之间相互转化过程如图1所示。

Glotova 等通过分析沥青中化合物性质、组分含量等方面的变化对沥青光氧化进行了研究, 发现沥

青光氧化速度与辐射类型有关。紫外线是太阳辐射中波长为 100~400 nm 的电磁波, 其占太阳辐射总量虽不大, 但其光子能级较高, 而沥青中主要化学键的键能相对较小, 故紫外光辐射对沥青的老化作用极为显著。各波长光对应的能量如表1所示, 沥青分子典型化学键能量如表2所示。

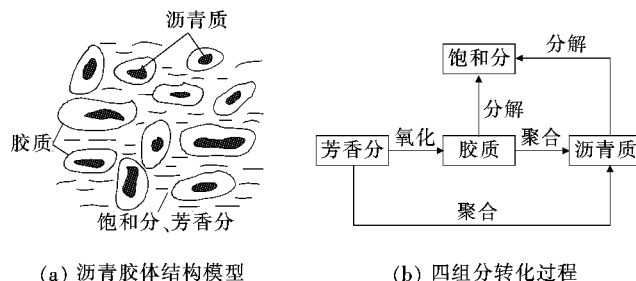


图1 沥青胶体结构及转化过程

表1 各波长光对应的能量

| 波长/<br>nm | 能量/<br>(kJ · mol <sup>-1</sup> ) | 波长/<br>nm | 能量/<br>(kJ · mol <sup>-1</sup> ) |
|-----------|----------------------------------|-----------|----------------------------------|
| 200       | 595.5                            | 580       | 205.3                            |
| 300       | 397.1                            | 620       | 192.1                            |
| 420       | 283.6                            | 700       | 170.2                            |
| 470       | 253.5                            | 1 000     | 119.1                            |
| 530       | 224.8                            |           |                                  |

自然环境中存在氧气, 在紫外光照条件下可导致

收稿日期: 2019-01-12

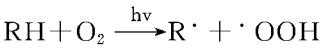
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(编号: 51778071)

作者简介: 金大中, 男, 硕士研究生. E-mail: dazhongjin@163.com

表 2 沥青分子典型化学键的能量

| 化学键 | 键能/<br>(kJ·mol <sup>-1</sup> ) | 化学键  | 键能/<br>(kJ·mol <sup>-1</sup> ) |
|-----|--------------------------------|------|--------------------------------|
| O—H | 463.0                          | C—C  | 347.9                          |
| C—F | 441.2                          | C—Cl | 328.6                          |
| C—H | 413.0                          | C—N  | 290.9                          |
| N—H | 389.3                          | C=C  | 615.3                          |
| C—O | 351.6                          |      |                                |

沥青发生光氧化降解反应。沥青在紫外光照射下呈激发态,在氧气作用下生成氢过氧化物,进一步反应后沥青被降解:



从化学角度分析,沥青中含有的羰基基团可吸收紫外光,导致其发生 Norrish I (Ⅱ 或Ⅲ)型光老化反应。沥青的老化机理较为复杂,各国学者对沥青老化的机理做了大量的研究,表明沥青老化并非哪一种单一反应,而是包括氧化、挥发、聚合、团聚等在内的多种

反应的综合结果,可以简单表示为:芳香分→胶质→沥青质,即小分子量向大分子量转变,沥青结合料密度由小到大转变;芳香分和胶质对沥青抗紫外光老化性能有很大影响。

2 沥青紫外光老化试验与评价

现阶段主要采用(旋转)薄膜烘箱试验对沥青的短期热氧化进行表征,对沥青的长期老化则是采用压力老化试验。有研究表明沥青对高温和紫外光的敏感度不同,两种老化过程并不一致,紫外光老化后的沥青性能变化更加复杂,不能用热老化评价方法代替光老化。国内外学者对沥青的紫外光老化早有研究,表 3 列举了沥青紫外光老化试验方法。

研究发现,沥青在紫外光老化后其物理化学性能均发生了较大变化。目前对于沥青的紫外光老化试验和评价方法并没有统一标准。表 4 列举了目前常用沥青紫外光老化评价方法。

表 3 沥青紫外光老化试验方法

| 研究人员                        | 试验方法                             | 试验结果                                 |
|-----------------------------|----------------------------------|--------------------------------------|
| Toch                        | 在太阳光照下研究不同颜色玻璃板下沥青试样损坏情况         | 紫色>绿色>红色,提出沥青的光氧化理论                  |
| Montepara, Bocci, Cerni     | 开发了加速沥青紫外光老化的试验方法,模拟沥青在自然环境中老化状况 | 模拟沥青在自然环境中的老化状况,并进行了验证               |
| Montepara, Giuliani         | 进行紫外光老化试验,模拟沥青在野外老化情况            | 研究旋转薄膜烘箱试验、紫外辐射灯和压力老化 3 种不同老化方法之间的关系 |
| 叶奋,等                        | 建立了沥青紫外光老化仿真系统                   | 紫外线对沥青老化有很大影响                        |
| 王佳妮                         | 模拟试验、流变试验                        | 研究沥青流变特性力学行为和凝聚态的变化                  |
| Prabir Kumar Das, Jing Yu,等 | 原子力显微镜分析沥青紫外光老化前后性能变化            | 对沥青性能进行定量表征                          |
| Wenbo Zeng,等                | 采用紫外分光光度法和剥离法研究沥青紫外光老化的深度        | 只有表面(0~4.5 μm)可直接进行紫外光老化,老化沥青可往下扩散   |
| Lei Zhang,等                 | 老化沥青的临界自愈合温度、流动行为和自愈率            | 达到老化极限后无自愈阈值温度,愈合温度与流动激活能量有良好线性关系    |
| Jinxuan Hu,等                | 不同老化程序对沥青紫外光老化的影响                | 首先对沥青进行薄膜烘箱测试更适合分析沥青的紫外光老化           |
| Jinxuan Hu,等                | 不同波段紫外光辐射对沥青性能的影响                | 不同波段紫外辐射对沥青产生不同影响,对沥青低温性能影响更大        |

目前主要是从微观角度对沥青紫外光老化进行分析,有一定的局限性。可通过微观试验分析沥青紫外光老化前后分子结构、分子量、组分以及沥青表面形态的变化;同时利用宏观试验(动态剪切流变试验、弯曲

流变梁试验、直接拉伸试验等)分析沥青紫外老化前后性能变化。通过微观与宏观相结合的方法,定性与定量地分析沥青老化前后其微观与宏观变化之间的关系,评价沥青紫外光老化程度,探究沥青紫外光老化过

表 4 沥青紫外光老化评价方法

| 评价方法                  | 分析内容                           | 方法特点                           | 局限性   |
|-----------------------|--------------------------------|--------------------------------|---|
| 渗透凝胶色谱与核磁共振结合         | 分析沥青在紫外光老化过程中化学结构与分子的变化        | 分析沥青紫外光老化前后相对分子量分级与分布及其性能变化    |   |
| 傅里叶红外光谱               | 分析沥青紫外光老化前后官能团变化、研究沥青老化程度和老化速度 | 定量分析沥青紫外光老化前后分子量变化、分析其老化进程与速度  | 仅从微观角度分析沥青老化前后分子结构、分子量及成分变化,未从宏观角度分析其老化前后力学性能变化 |
| X 射线衍射                | 分析沥青老化前后的分子晶体结构参数              | 测定晶体结构、分析其物相、定性定量分析分子结构变化      |   |
| 电子显微镜、原子力显微镜与荧光显微镜相结合 | 研究沥青的微观结构形貌                    | 从微观角度分析沥青老化前后表面结构及其性能变化        |   |
| 环境扫描电子显微镜             | 分析沥青三维网络结构,探究其结构变化与流变性能之间的关系   | 分析沥青紫外光老化前后其结构形态以及成分变化特征       |   |
| 分光光度法                 | 分析沥青组分与其吸光度的关系,用分光光度法检测沥青的老化效应 | 首次引入分光光度法来表征沥青的老化效应,对其老化特征进行描述 |   |

程,对沥青紫外光老化进行综合、全面的分析与评价。

3 沥青抗紫外光老化措施

沥青路面在整个寿命周期内将承受长期的紫外线辐射作用,从而造成沥青路面的损坏,目前对于提高沥青抗紫外光老化性能,较为行之有效的方法主要是通过添加抗紫外光老化的助剂来改善其抗老化性能。根据助剂抗紫外光老化的作用机理不同,其主要包括紫外线吸收剂、受阻胺类、光屏蔽剂、猝灭剂、抗氧化剂等。

3.1 紫外线吸收剂

紫外线吸收剂的主要作用是吸收辐射在沥青上的太阳光并将其转换为热能发散出去,对沥青起到保护作用。不同紫外光吸收剂在最佳掺量下能够减少沥青的催化程度,并能有效改善沥青抗紫外光老化性能。常见的紫外线吸收剂主要有水杨酸酯类、二苯甲酮类、苯并三唑类等有机化合物。

3.2 受阻胺类

受阻胺类光稳定剂(HALS)可通过捕获自由基、分解氢过氧化物等多种途径增加聚合物的稳定性,其中受阻胺生成的氮氧自由基对断裂链自由基的捕获反应被认为是受阻胺的主要作用。受阻胺类光稳定剂根据其母体分子结构可分为:哌啶系衍生物、哌嗪系衍生物、咪唑烷酮系衍生物。

3.3 光屏蔽剂

光屏蔽剂类光稳定剂主要包括氧化锌、二氧化钛、二氧化铈、炭黑等,由于它们具有较好的分散性和遮盖

能力,能够将吸收的光能转化成热能发散出去,或者将有害的光波反射出去,进而对聚合物起到保护作用,改善聚合物的抗紫外光老化性能。

3.4 猝灭剂

猝灭剂能够与吸收能量后处于激发态的聚合物分子作用,将激发态能量以无害的方式传递出去,使聚合物分子恢复到稳定基态,以避免其引发光化学反应,进而对聚合物起到保护作用,防止其发生紫外老化,造成性能降低。猝灭剂一般通过两种方式吸收激发态能量:0FÖrster 长程能量转移,猝灭剂与激发态分子间距离大于 5 nm 时就可吸收其能量;接触或碰撞或交换能量转移,在这种方式下猝灭剂与激发态分子间距离小于 1.5 nm 时猝灭剂方可吸收分子的能量。猝灭剂多为镍有机络合物,此类光稳定剂对聚烯烃类材料具有良好的稳定效果。

3.5 抗氧化剂

抗氧化剂的主要作用是阻断和延缓氧化过程,避免材料在热、光、氧等条件下发生氧化反应,引起其性能的劣化。在沥青材料中添加适量的抗老化剂,目的在于消除老化反应过程中生成的过氧化自由基,同时还原烷氧基或羟基自由基等,进而使氧化的反应终止,对材料起到保护作用。常见抗氧化剂主要有含活性氢的芳胺衍生物和受阻酚衍生物、分子中带硫醚基团的脂类化合物和亚磷酸脂类等化合物。

不同种类光稳定剂对沥青以及沥青路面性能的影响不同,在使用过程中需根据工程实际进行试验对比分析,然后再进行选用。表 5 对比分析了几种常见的沥青抗紫外光老化措施。

表 5 几种沥青抗紫外光老化措施

| 沥青抗紫外光<br>老化剂种类 | 常见助剂   | 作用机理                                     | 作用效果  | 局限性  | 适用条件   |
|-----------------|--|--|---|--|--|
| 紫外线<br>吸收剂      | 水杨酸酯类<br>二苯甲酮类<br>苯并三唑类                      | 吸收紫外线将其能<br>量转化成热能并释<br>放                | 改善沥青抗紫外光老<br>化性能与路用性能,吸<br>收剂进行改性或复配,<br>其效果更显著   | 长 时 间 受<br>热 可 能 分<br>解,稳定性<br>不足              | 适用于环境温度较<br>低的沥青路面                           |
|                 | 哌啶系衍生物<br>哌嗪系衍生物<br>咪唑烷酮系<br>衍生物             | 捕获自由基转移激<br>发态分子能量                       | 对沥青性能的影响与<br>光稳定剂和沥青种类<br>有关                      | 对 有 些 种<br>类 沥 青 性<br>能 有 负 面<br>影响            | 对 SBS、SBR 改性沥<br>青效果更佳                       |
| 光屏蔽剂            | 氧化锌<br>二氧化钛<br>二氧化铈<br>炭黑                    | 反射或吸收沥青表<br>面的太阳光                        | 显著提高沥青抗紫外<br>光老化性能,不同光屏<br>蔽剂复配均可改善沥<br>青抗紫外光老化性能 | 无 机 材 料<br>在 沥 青 中<br>分 散 不 均<br>匀             | 宜与其他改性材料<br>复配改善其与沥青<br>相容性,提高抗紫外<br>光老化性能   |
|                 | 猝灭剂  | 镍有机络合物                                   | 转移激发态能量避<br>免光降解反应                                | 对聚烯烃材料的抗老<br>化具有显著效果                           | 多用于薄<br>膜和纤维<br>宜与紫外线吸收剂<br>并用,具有良好的协<br>同作用 |
| 抗氧化剂            | 芳胺衍生物<br>受阻酚衍生物<br>带硫醚基团的<br>脂类化合物和<br>亚磷酸脂类 | 消除过氧化自由基,<br>还原烷氧基或羟基<br>自由基等,终止氧化<br>反应 | 改善沥青低温性能、热<br>氧和紫外老化性能,提<br>高混合料强度                | 部 分 抗 氧<br>化 剂 对 沥<br>青 低 温 性<br>能 有 负 面<br>影响 | 对 SBS、SBR 改性沥<br>青作用效果更好                     |

4 展望

- (1) 通过室内模拟沥青紫外光老化试验,研究在不同紫外光照工况条件下沥青的性能变化特征;分别测试在室内老化与自然环境条件下老化后沥青性能的变化,并对比分析其异同。
- (2) 模拟沥青在实际工程中的紫外老化环境,分析影响沥青紫外光老化的因素以及各因素对沥青老化程度影响的大小(权重),拟利用各影响因素及其权重对沥青紫外光老化程度进行定量分析。
- (3) 通过分析沥青路面在使用过程中的环境(光强、温度、水等)特征,对沥青路面在一定时期内的老化程度进行预测,进而预测其使用寿命,为沥青路面最佳养护时机的确定提供依据并提出合理的养护方案。

5 结论

- (1) 沥青紫外光老化机理较为复杂,是多种物理

化学反应综合作用的结果,是由小分子量向大分子量转变,由溶胶结构向凝胶结构转变,再由凝胶结构向固体结构转变的过程。

- (2) 目前对沥青紫外光老化研究的试验方法主要是室内模拟紫外光老化和自然环境老化试验,对沥青紫外光老化的评价主要通过微观试验分析其性能变化,对沥青紫外光老化试验和评价方法、评价指标均未形成统一标准,亟需建立一套标准的试验、评价体系。

- (3) 光屏蔽剂、紫外线吸收剂、受阻胺类等光稳定剂常用于改善沥青抗紫外光老化性能,不同种类抗紫外光老化剂对沥青性能影响不同,在实际应用过程中需根据实际情况选择使用。

参考文献:

[1] 叶奋,黄彭.强紫外线辐射对沥青路用性能的影响[J].同济大学学报(自然科学版),2005(7).

[2] 余剑英,庞凌,吴少鹏.沥青材料老化与防老化[M].武汉:武汉理工大学出版社,2012.

[3] 王强,袁野,欧阳春发,等.废旧橡胶改性沥青的老化研究

- 现状[J].高分子通报,2015(6).
- [4] 王佳妮.模拟紫外环境下沥青流变行为及老化机理的研究[D].哈尔滨工业大学博士学位论文,2008.
- [5] 李晶,刘宇,张肖宁.沥青老化微观机理分析[J].硅酸盐通报,2014,33(6):7—13.
- [6] Yong S Doh, Serji N Amirkhanian, Kwang W Kim. Analysis of Unbalanced Binder Oxidation Level in Recycled Asphalt Mixture Using GPC[J]. Construction and Building Materials, 2008, 22(6): 1 253—1 260.
- [7] Soon-Jae Lee, Serji N Amirkhanian, Khaldoun Shatanawi, et al. Short-Term Aging Characterization of Asphalt Binders Using Gel Permeation Chromatography and Selected Superpave Binder Tests[J]. Construction and Building Materials, 2008, 22(1): 2 220—2 227.
- [8] 谭忆秋,王佳妮,冯中良,等.沥青结合料紫外老化机理[J].中国公路学报,2008(1).
- [9] 张争奇,梁晓莉,李平.沥青老化性能评价方法[J].交通运输工程学报,2005(1).
- [10] Montepara A., Santagata E., Tosi G.. Photochemical Degradation of Pure Bitumen by UV Radiation. Proc. 1st Eurasphalt & Eurobitume Congress, E&E, 1996, 5: 133.
- [11] Bocci M, Cerni G. The Ultraviolet Radiation in Short-Term and Long-Term Aging of Bitumen. Proc. 2nd Eurasphalt & Eurobitume Congress, Session 1: Performance Testing and Specifications for Binder and Mixtures, (Barcelona), 2000: 49—58.
- [12] Montepara A, Giuliani F. Performance Testing and Specification Tests of Road Bitumen. Proc. 2nd Eurasphalt & Eurobitume Congress, Session 1: Performance Testing and Specifications for Binder and Mixtures, (Barcelona), 2000: 518—523.
- [13] 叶奋,黄彭.沥青紫外线老化仿真系统的建立[J].建筑材料学报,2005(5).
- [14] 王佳妮,薛忠军,谭忆秋.紫外老化对沥青力学行为及聚集态的影响[J].中国公路学报,2011(1).
- [15] Prabir Kumar Das, Hassan Baaj, Susan L Tighe, et al. Atomic Force Microscopy to Investigate Asphalt Binders: A State-of-the-Art Review [J]. Road Materials and Pavement Design, 2016, 3: 693—718.
- [16] Jing Yu, Zhen Dai, Junan Shen, et al. Aging of Asphalt Binders from Weathered Asphalt Mixtures Compared with a SHRP Process[J]. Construction and Building Materials, 2018, 160: 475—486.
- [17] Wenbo Zeng, Shaopeng Wu, Ling Pang, et al. Research on Ultra Violet (UV) Aging Depth of Asphalts[J]. Construction and Building Materials, 2018, 160: 620—627.
- [18] Lei Zhang, Quantao Liu, Shaopeng Wu, et al. Investigation of the Flow and Self-Healing Properties of UV Aged Asphalt Binders[J]. Construction and Building Materials, 2018, 174: 401—409.
- [19] Jinxuan Hu, Shaopeng Wu, Quantao Liu, et al. Effect of Ultraviolet Radiation on Bitumen by Different Ageing Procedures [J]. Construction and Building Materials, 2018, 163: 73—79.
- [20] Jinxuan Hu, Shaopeng Wu, Quantao Liu, et al. Effect of Ultraviolet Radiation in Different Wavebands on Bitumen[J]. Construction and Building Materials, 2018, 159: 479—485.
- [21] Siddiqui M. N., Ali M. F. Investigation of Chemical Transformations by NMR and GPC during the Laboratory Aging of Arabian Asphalt[J]. Fuel, 1999, 78: 1 407—1 416.
- [22] Robert Karlsson and Ulf Isacson. Application of FTIR-ATR to Characterization of Bitumen Rejuvenator Diffusion[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2003, 15(2): 157—165.
- [23] Mohammad Nahid Siddiqui, Mohammad Farhat Ali, John Shirokoff. Use of X-Ray Diffraction in Assessing the Aging Pattern of Asphalt Fractions[J]. Fuel, 2002, 81: 51—58.
- [24] Loeber L., Sutton O., Morel J., et al. New Direct Observations of Asphalts and Asphalt Binder by Scanning Electron Microscopy and Atomic Force Microscopy[J]. Journal of Microscopy, 1996, 182: 32—39.
- [25] Steven J., Rozeveld E., Eugene Shin, et al. Network Morphology of Straight and Polymer Modified Asphalt Cements[J]. Microscopy Research and Technique, 1997, 38: 529—543.
- [26] Xiangdao Hou, Feipeng Xiao, Jingang Wang, et al. Identification of Asphalt Aging Characterization by Spectrophotometry Technique[J]. Fuel, 2018, 226: 230—239.
- [27] 吴茂英.聚合物光老化、光稳定机理与光稳定剂(下)[J].高分子通报,2006(6).
- [28] 冯振刚.紫外光吸收剂对沥青性能的影响及其作用机理研究[D].武汉理工大学博士学位论文,2013.
- [29] Pieter Gijsman. A Review on the Mechanism of Action and Applicability of Hindered Amine Stabilizers[J]. Polymer Degradation and Stability, 2017, 145: 2—10.
- [30] Amir Rastar, Mohamad E. Yazdanshenas, Abusaeed Rashidi, et al. Estimation and Prediction of Optical Properties of PA6/TiO<sub>2</sub> Nanocomposites[J]. Arabian Journal of Chemistry, 2017, 10: 219—224.
- [31] 吴茂英.塑料降解与稳定化(IV):光降解与光稳定(下)

- [J].塑料助剂,2011(1).
- [32] Zhen Gang Feng, Jian Ying Yu, Heng Long Zhang, et al. Preparation and Properties of Aging Resistant Asphalt Binder with Various Anti-Aging Additives[J]. Applied Mechanics and Materials, 2011, 71-78: 1 062-1 067.
- [33] 黄芸. 沥青路面紫外防护涂料的制备与性能研究[D]. 武汉理工大学硕士学位论文, 2011.
- [34] 冯振刚, 陈冲, 栗培龙, 等. 紫外光吸收剂改性沥青的流变与老化性能[J]. 公路, 2016(1).
- [35] 姚婷婷. 紫外吸收剂/LDHs 改性沥青的制备与性能研究[D]. 武汉理工大学硕士学位论文, 2014.
- [36] Song Xu, Jianying Yu, Canlin Zhang, et al. Effect of Ultraviolet Aging on Rheological Properties of Organic Intercalated Layered Double Hydroxides Modified Asphalt[J]. Construction and Building Materials, 2015, 75: 421-428.
- [37] 程可飞. 紫外添加剂对沥青混合料抗紫外线性能及路用性能的影响研究[D]. 西安建筑科技大学硕士学位论文, 2014.
- [38] 王佳妮, 薛忠军, 谭忆秋, 等. 几种沥青抗紫外老化措施性能对比试验研究[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2013(5).
- [39] 韦慧, 曾胜, 李振存, 等. 抗紫外老化剂对沥青性能的影响[J]. 铁道科学与工程学报, 2013(5).
- [40] 徐松, 冯振刚, 余剑英. 受阻胺光稳定剂对不同沥青性能的影响研究[J]. 公路, 2012(10).
- [41] Christian W. Klampfl, Markus Himmelsbach. Advances in the Determination of Hindered Amine Light Stabilizers—A Review[J]. Analytica Chimica Acta, 2016, 933: 10-22.
- [42] Zhengang Feng, Xinjun Li. Effect of Hindered Amine Light Stabilizer on Rheological and Aging Properties of SBS Modified Asphalt[C]. Conference Paper in Geotechnical Special Publication, 2014.
- [43] 张明祥. 纳米氧化锌改性沥青及其抗老化性能研究[D]. 长安大学硕士学位论文, 2015.
- [44] 何东坡, 李欣, 姜利. 纳米 TiO<sub>2</sub> 晶体类型对沥青抗紫外老化性能影响的研究[J]. 中外公路, 2013(2).
- [45] 谭邦耀. 蛭石与纳米二氧化钛复配改性沥青的制备与性能研究[D]. 湖南大学硕士学位论文, 2015.
- [46] 肖楠. 青藏高原地区沥青路面光屏蔽预养护剂制备与性质研究[D]. 长安大学硕士学位论文, 2013.
- [47] Hossein Nazari, Koorosh Naderi, Fereidoon Moghadas Nejad. Improving Aging Resistance and Fatigue Performance of Asphalt Binders Using Inorganic Nanoparticles[J]. Construction and Building Materials, 2018, 170: 591-602.
- [48] Saeed Sadeghpour Galooyak, Masoud Palassi, Ahmad Goli, et al. Performance Evaluation of Nano-Silica Modified Bitumen[J]. International Journal of Transportation Engineering, 2015, 3(1): 55-66.
- [49] Marwa M Hassan, Louay N Mohammad, Samuel B Cooper, et al. Evaluation of Nano-Titanium Dioxide Additive on Asphalt Binder Aging Properties[J]. Transportation Research Record, 2011, 2 207: 11-15.
- [50] Henglong Zhang, Chongzheng Zhu, Jianying Yu, et al. Effect of Nano-Zinc Oxide on Ultraviolet Aging Properties of Bitumen with 60/80 Penetration Grade[J]. Materials and Structures, 2015, 48(10): 3 249-3 257.
- [51] Chongzheng Zhu, Henglong Zhang, Caijun Shi, et al. Effect of Nano-Zinc Oxide and Organic Expanded Vermiculite on Rheological Properties of Different Bitumens before and after Aging[J]. Construction and Building Materials, 2017, 146: 30-37.
- [52] H Y Liu, Henglong Zhang, P W Hao, et al. The Effect of Surface Modifiers on Ultraviolet Aging Properties of Nano-Zinc Oxide Modified Bitumen[J]. Petroleum Science and Technology, 2015, 33(1): 72-78.
- [53] Dongmei Zhang, Henglong Zhang, Chongzheng Zhu, et al. Synergetic Effect of Multi-Dimensional Nanomaterials for Anti-Aging Properties of SBS Modified Bitumen[J]. Construction and Building Materials, 2017, 144: 423-431.
- [54] Chongzheng Zhu, Henglong Zhang, Guoqing Xu, et al. Investigation of the Aging Behaviors of Multi-Dimensional Nanomaterials Modified Different Bitumens by Fourier Transform Infrared Spectroscopy[J]. Construction and Building Materials, 2018, 167: 536-542.
- [55] Chunfa Ouyang, Shifeng Wang, Yong Zhang, et al. Improving the Aging Resistance of Asphalt by Addition of Zinc Dialkyldithiophosphate[J]. Fuel, 2006, 85: 1 060-1 066.
- [56] Alex K Apeagyei. Laboratory Evaluation of Antioxidants for Asphalt Binders[J]. Construction and Building Materials, 2011, 25: 47-53.
- [57] Seung Ho Jeong, Feipeng Xiao, Yeong Sam Kim, et al. Kim. Evaluation of Age Retardation Effect of Antioxidants in Dense-Graded Asphalt (DGA) Mixture Using Large Molecular Size[J]. Construction and Building Materials, 2017, 149: 459-466.