

服役温度范围内沥青混合料长期老化 室内模拟与性能评价

温 永¹, 孙丽君², 王雪松¹, 裴建中¹

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 东南大学 交通学院, 江苏 南京 211189)

摘要: 为解决现有室内老化模拟方法与实际沥青路面老化梯度和服役温度存在差异的问题,设计了一种基于纯氧加速老化的新型室内长期老化方法,以模拟服役温度范围内沥青混合料的老化行为。通过傅里叶变换红外光谱和动态剪切流变仪研究了沥青混合料老化性能随时间和空间的演变规律。研究表明,新方法能有效模拟服役温度范围内压实沥青混合料的老化行为,老化程度接近标准长期老化试验水平。随老化时间和温度的增加,沥青混合料 AC-13 和 SMA-13 老化程度加重,其中 SMA-13 的老化程度仅为 AC-13 的 1/5。同时,两种混合料的高温性能随之改善,而疲劳寿命下降。随着老化深度的增加,两种混合料的老化指数和高温性能逐渐降低,而疲劳寿命显著增加。在不同老化条件下, SMA-13 表现出更优异的抗老化和抗疲劳性能,尤其在低应变水平下。方差分析表明,老化时间对亚砷基和高温性能的影响显著,但对羰基和疲劳寿命无显著影响;老化温度对老化指数、高温性能和疲劳寿命均无显著影响,而老化深度仅对 0.1 kPa 下不可恢复蠕变柔量有显著影响,对其余指标无显著影响。

关键词: 道路工程; 沥青混合料; 氧化老化; 长期老化; 流变性能; 傅里叶变换红外光谱

中图分类号: U414

文献标志码: A

Laboratory Simulation and Performance Evaluation of Long-Term Aging of Asphalt Mixtures at Service Temperatures

WEN Yong¹, SUN Lijun², WANG Xuesong¹,
PEI Jianzhong¹

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. School of Transportation, Southeast University, Nanjing 211189, China)

Abstract: To address the discrepancies between existing laboratory aging simulation methods and the actual aging gradient and service temperature of asphalt pavements, this paper proposed a novel indoor long-term aging method based on the pure oxygen accelerated aging, aiming to simulate the aging behavior of asphalt mixtures at service temperatures. The investigation of the aging properties of asphalt mixtures with time and space was conducted using Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) and dynamic shear rheometer (DSR). The results show that the novel aging method proposed can effectively simulate the aging behavior of compacted asphalt mixtures within the service temperature range, achieving an aging degree close to that of standard long-term aging tests. With the increase of aging time and temperature, the aging degree of AC-13 and SMA-13 mixtures both increases, and the aging degree of SMA-13 mixtures is only 1/5 of that of AC-13 mixtures. Concurrently, the high temperature performance of the two mixtures increases, while the fatigue life decreases. With the increase of aging depth, the aging index and high-temperature performance of AC-13 and SMA-13 mixtures gradually decrease, whereas the fatigue life significantly increases. Under different aging conditions, SMA-13 mixtures show a superior aging resistance and fatigue resistance than AC-13 mixtures, particularly at low strain levels. ANOVA indicates that the aging time significantly impacts the sulfoxide index and high-temperature performance, but has no significant effect on the carbonyl index, high-temperature performance, and fatigue life. The aging depth only significantly impacts non-recoverable creep compliance at 0.1 kPa, with no significant effects on the other evaluation indexes.

Keywords: road engineering; asphalt mixtures;

收稿日期: 2023-12-20

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFB2600603, 2021YFB2600600); 国家自然科学基金(52178408, 51908056); 中国博士后科学基金(2019M653521)

第一作者: 温 永, 工学博士, 主要研究方向为道路工程。E-mail: wy-1026@163.com

通信作者: 裴建中, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为道路工程。E-mail: peijianzhong@126.com



论文
拓展
介绍

oxidative aging; long-term aging; rheological properties; Fourier transform infrared spectroscopy

沥青路面在长期服役过程中不可避免地受自然环境和交通荷载的双重作用,导致其性能逐渐劣化,尤其是沥青材料的老化劣化问题。沥青老化过程中,沥青的物化性质发生变化,表现为硬度增加和韧性降低,使得沥青路面在交通荷载作用下更易发生剥落和开裂等病害。沥青路面老化机制较为复杂,受混合料自身因素(如空隙率、级配、有效沥青含量等)和环境因素(如氧气浓度、温度、紫外线、湿度等)的共同影响^[1-4]。其中,温度和氧气被认为是沥青老化的两个主要影响因素^[5-6]。

相较于物理硬化、挥发性成分的损失和紫外线老化等其他老化机制,热氧老化在沥青老化过程中占据主导地位^[7-10]。在沥青路面服役期间,氧气通过空隙渗透到沥青混合料内部,与沥青中的高活性成分发生反应,引起沥青性能的逐渐退化^[7-9,11]。由此可见,氧气是影响沥青老化速率的主要因素。除此之外,老化温度对沥青老化速率的影响也不容忽视^[12]。然而,目前沥青老化研究主要集中在模拟沥青胶浆的老化过程及其老化性能^[13-17]。

沥青路面实际老化过程极其缓慢,因此在相关研究中,研究人员通常采用不同的室内老化方法来模拟和加速沥青路面老化过程,如延长老化时间、提高老化温度、采用紫外线照射等^[18]。沥青混合料室内长期老化方法存在以下几个共性:①尽管松散混合料的氧化速率较快,但是老化后的松散混合料会导致压实困难^[19],因此,通常优先选择压实试样模拟老化过程。②大多数研究选择60℃或85℃的老化温度,而很少将老化温度设置在100℃以上。主要原因是100℃被认为是老化机制转变的关键温度阈值。当老化温度超过100℃,沥青老化速率将随温度上升呈指数级增长,且高温下老化机制与低温下的老化机制存在较大差异^[20]。③大多数长期老化试验通常在常压空气条件下进行老化模拟。然而,也有少数研究借助压力设备并结合压缩空气或氧气,室内模拟沥青混合料的长期老化过程。

尽管现有研究对沥青混合料室内长期老化方法进行了广泛探讨,但仍有以下几个方面未得到足够重视。首先,在高温环境下,沥青混合料因受自重作用而导致其内部孔隙率和几何形貌等发生变化^[21-22]。为此,国家公路合作研究计划(NCHRP)项目9-23

建议用金属网包裹试样以保持试样的完整性,但由于包裹试样的力量难以控制,试样仍可能发生下沉现象^[23]。其次,高压会导致沥青混合料试件产生微裂缝。这主要是由于加压和减压过程中,沥青混合料试件内部闭合空隙的体积随之变小和变大,导致闭合空隙周边出现微裂缝,进而影响沥青混合料的性能^[24-26]。再次,高温条件和环境温度下的沥青老化机制存在差异。Petersen等^[2,27-28]发现路面服役温度范围内亚砷基生成速率大于羰基,而高温条件下亚砷基的生成速率受热降解的作用而变慢。最后,目前室内老化模拟试验与实际沥青路面老化的梯度存在差异。实际沥青路面在深度方向上存在老化梯度,而现有的室内老化试验往往导致试件的老化程度从外向内逐渐减弱^[29]。

基于上述考虑和限制,提出了一种新的沥青混合料室内长期老化方法,旨在更为准确地模拟沥青路面在实际服役期间的老化行为。本文采用傅里叶变换红外光谱(Fourier transform infrared spectroscopy, FTIR)测试、多应力蠕变和恢复(multi-stress creep and recovery, MSCR)测试、线性振幅扫描(linear amplitude scanning, LAS)试验,探究了该长期老化方法的可行性,研究了老化时间、老化温度、老化深度、空隙率等因素对沥青性能的影响规律。研究成果不仅为室内研究沥青路面实际老化行为提供了新的思路和依据,也为提高沥青路面耐久性提供了重要的技术支持。

1 试验

1.1 原材料

采用茂名石化生产的东海70号沥青,其技术性能见表1,符合相关技术要求^[30]。使用石灰岩集料制备了AC-13和SMA-13沥青混合料试件(直径150 mm,高度60 mm,空隙率为6%)。

表1 东海70号沥青技术性能

Tab. 1 Technical properties of Donghai No. 70 asphalt

针入度(25℃)/0.1 mm	软化点/℃	延度(15℃)/cm	闪点/℃	密度(15℃)/(g·cm ⁻³)
67	48.0	126.0	292	1.032

1.2 室内长期老化方法

为了模拟沥青路面实际服役时环境条件,在沥青路面服役温度范围内选择了3个温度(35、45和55℃)作为老化温度。如果在空气条件下进行室内老化,只能通过高压的方式来加速沥青混合料的老

化进程,然而,高压会改变试件内部孔隙形貌并诱发微裂缝^[22,24],进而导致沥青混合料试件的不可逆损伤。因此,采用纯氧环境进行老化试验,以加快老化进程而不影响试件的空隙结构。为了保证试验安全,专门设计并制造了一套老化装置进行老化试验,如图1所示。该老化装置主要包括氧气供应系统和老化容器。容器的内径和内部高度分别为154 mm和190 mm。此外,为了模拟沥青路面服役过程中,氧气从路表面向下扩散而引起沥青路面在深度方向上的老化梯度,采用石蜡封闭了沥青混合料试件与老化容器内壁之间空隙,确保氧气只能从沥青混合料试件表面单向向下扩散,从而真实地模拟沥青路面的老化过程。

试验步骤如下:①在容器底部铺设10 cm厚的洁净干燥砂层,模拟沥青路面的基层。②将直径为150 mm的试件置于砂层之上,使试样与圆柱形容器的内壁之间的间隙尽可能均匀一致。③利用注射器将熔化的石蜡注入间隙中,防止气体由此处垂直向下扩散,如图2a所示。④待石蜡凝固后,将凡士林

涂于盖子密封圈上,拧紧盖子以确保容器密封性良好,如图2b所示。⑤打开所有气阀,通过进气口向老化容器内注入纯氧(纯度99.2%),并通过排气口排出容器内空气。⑥注气约10 min后,认为容器内已充满纯氧,随即关闭所有阀门,此时容器内维持大气压状态。⑦将持有试样的老化容器置于35、45和55℃的烘箱中,按照7、14、21、28 d进行老化,见图2c。⑧待到目标老化时间后,取出3个试件并自然冷却至室温,随后对试件进行钻芯和切片,以便后续分析测试,如图2d所示。

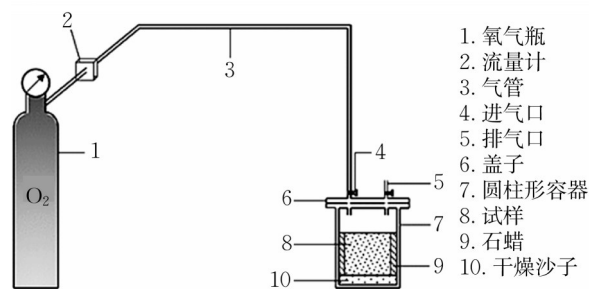


图1 自主设计老化装置

Fig. 1 Self-designed aging device

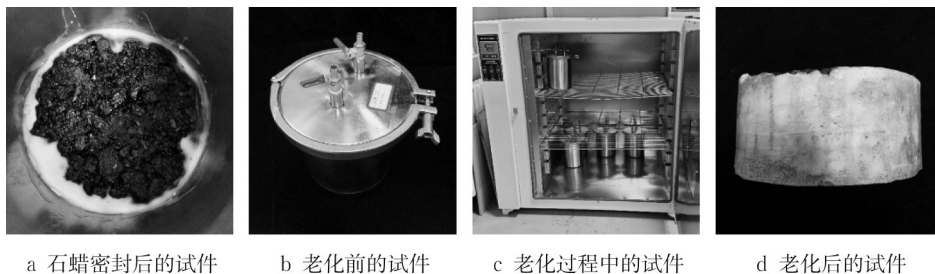


图2 不同老化阶段的沥青混合料试件

Fig. 2 Compacted asphalt mixtures at different aging stages

1.3 老化沥青抽提和回收

为了研究室内长期老化过程中氧气扩散对沥青混合料老化梯度的影响,首先使用钻芯机从直径为150 mm的试件中钻取直径为100 mm的试件,以消除石蜡对150 mm试件外围沥青的影响。然后,将直径为100 mm的试件沿径向均匀切割为3层,每层厚度大约为18 mm,并将每层试件敲碎,并按照规定步骤来抽提和回收老化沥青,如图3所示。

1.4 试验评价方法

1.4.1 FTIR 试验

采用 Nicolet iS50 傅里叶变换红外光谱仪测定不同老化状态下沥青的羰基和亚砷基的峰面积,以表征沥青的老化程度。根据公式(1)~(3)计算了羰基指数和亚砷基指数^[31]。

$$\sum A = A_{1700} + A_{1600} + A_{1460} + A_{1376} + A_{1030} + A_{863} + A_{809} + A_{742} + A_{722} + A_{(2953, 2923, 2862)} \quad (1)$$

$$I_c = A_{1700} / \sum A \quad (2)$$

$$I_s = A_{1030} / \sum A \quad (3)$$

式(1)~(3)中: A 为不同波数(如1 700、1 600、1 460 cm^{-1} 等)对应吸收峰的面积; I_c 为羰基($\text{C}=\text{O}$)指数; I_s 为亚砷基($\text{S}=\text{O}$)指数。

1.4.2 MSCR 试验

依据 ASTM D7405 标准对不同老化状态下沥青进行 MSCR 试验,并采用沥青的平均恢复率(R)和不可恢复蠕变柔量(J_{mr}),来评价沥青的高温性能。

1.4.3 LAS 试验

依据 AASHTO TP 101-12 标准对不同老化状态下沥青进行 LAS 试验,计算完整性指数(C)和累

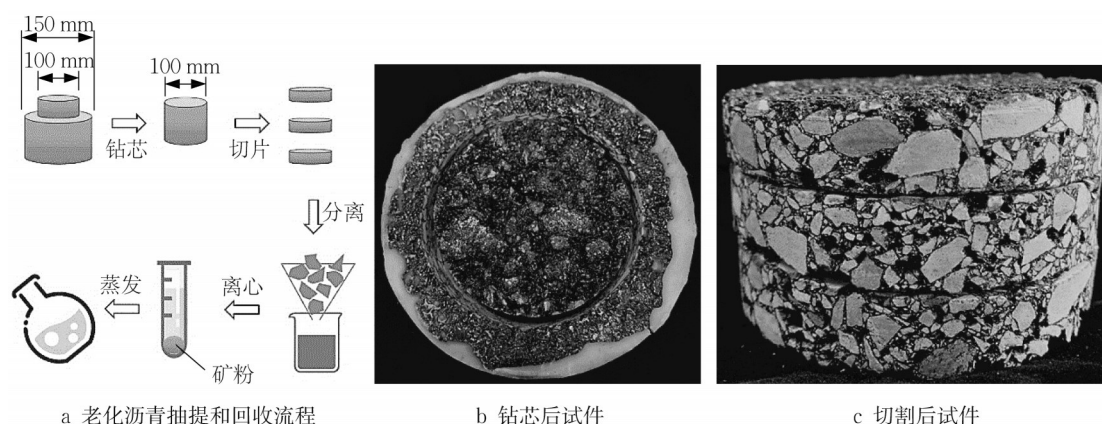


图3 老化沥青抽提和回收流程及其处理后试件

Fig. 3 Extraction and recovery process of aged asphalt binders and specimens after being treated

计损伤强度(D)并绘制 C - D 损伤特征曲线,预测不同加载模式和温度下沥青的损伤演化,见式(4)、(5)。然后,基于 S-VECD (simplified viscoelastic continuum damage) 模型计算了不同应变水平下沥青的疲劳寿命(N_f)。

$$C(t) = \frac{|G^*| \sin \delta(t)}{|G^*|_0 \sin \delta_{\text{limitia}}} \quad (4)$$

$$D(t) \cong \sum_{i=1}^N \left[\pi I_D \gamma_0^2 (|G^*| \sin \delta_{i-1} - G^* |\sin \delta_i|) \right]^{\frac{\alpha}{1+\alpha}} (t_i - t_{i-1})^{\frac{1}{1-\alpha}} \quad (5)$$

式(4)、(5)中: G^* 为动态剪切模量,MPa; δ 为相位角, $^\circ$; I_D 为应变水平为1%时的 G^* 初始损坏值,MPa; γ_0 为应变水平,%; α 为系数; t 为测试时间,s。

2 结果与分析

2.1 沥青混合料老化特性随老化时间的演变规律

2.1.1 老化程度随老化时间的变化规律

基于 FTIR 试验获得的羰基指数和亚砷基指数,研究了 AC-13 和 SMA-13 混合料在 3 种老化温度(35、45 和 55 $^\circ\text{C}$)下,老化程度随老化时间的变化规律,如图 4 所示。由图 4 可见,随着老化温度的升高,两种混合料的羰基和亚砷基指数尽管均呈增加趋势,但均低于长期老化标准试验条件(85 $^\circ\text{C}$ 老化 5 d)下的羰基和亚砷基指数。值得注意的是,在 55 $^\circ\text{C}$ 条件下老化 28 d 后,两种混合料的羰基和亚砷基指数可达标准试验条件下的 89%。表明提出的新室内长期老化方法可使沥青混合料老化程度接近标准试验条件下的水平,为室内研究沥青混合料自然热氧

老化提供了可行的方法。随着老化时间的增加,羰基和亚砷基指数先快速增加,然后以相对缓慢的线性速率增加,平均增幅分别为 13.0% 和 14.8%,而且 SMA-13 混合料的羰基和亚砷基指数大约为 AC-13 混合料的 1/5,表明间断级配的沥青混合料老化速率比连续级配更慢。作者前期研究发现,连续级配混合料的内部空隙小且分布均匀,有利于形成有效的连通孔隙,从而加速氧气的扩散。相反,间断级配混合料中空隙较大且分布不均,不易形成有效的连通孔隙,导致氧气在混合料中扩散速率降低,从而使得老化过程相对缓慢^[32]。由于沥青中硫比碳原子更易发生化学反应,而在相同的氧化条件下,亚砷基的生成速率较羰基更快^[2],所以在相同的老化条件(温度和时间)下,羰基指数普遍低于亚砷基指数。

2.1.2 高温性能随老化时间的变化规律

采用 MSCR 试验评价 AC-13 和 SMA-13 混合料中不同老化状态下沥青的弹性恢复性能与老化时间的关系。由图 5 可知,随老化时间和老化温度的增加,AC-13 和 SMA-13 混合料的 R 值均呈上升趋势,且前 14 天的上升速率明显大于后 14 天。这个规律与羰基和亚砷基的变化规律一致,主要原因是在老化过程中芳香族逐渐变成胶质,进而变成沥青质^[33],导致沥青质含量随着老化时间的增加而增加。沥青逐渐从溶胶-凝胶结构转变为凝胶结构,表现出更多的弹性性能。此外, R 值随老化温度的增加呈快速上升趋势,且 SMA-13 混合料的 R 值均低于同等老化条件下的 AC-13 混合料,这主要是由于 SMA-13 混合料的老化速率小于 AC-13 混合料。

图 6 显示了不同老化状态下 AC-13 和 SMA-13 混合料中沥青的不可恢复蠕变柔量(J_m)与老化时间的关系。AC-13 和 SMA-13 混合料的 J_m 值随老化时

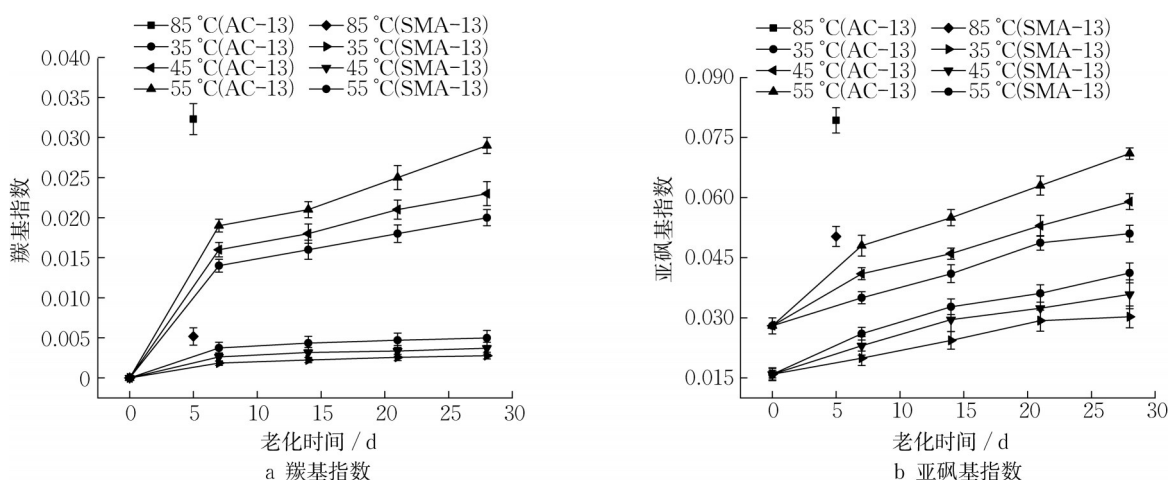
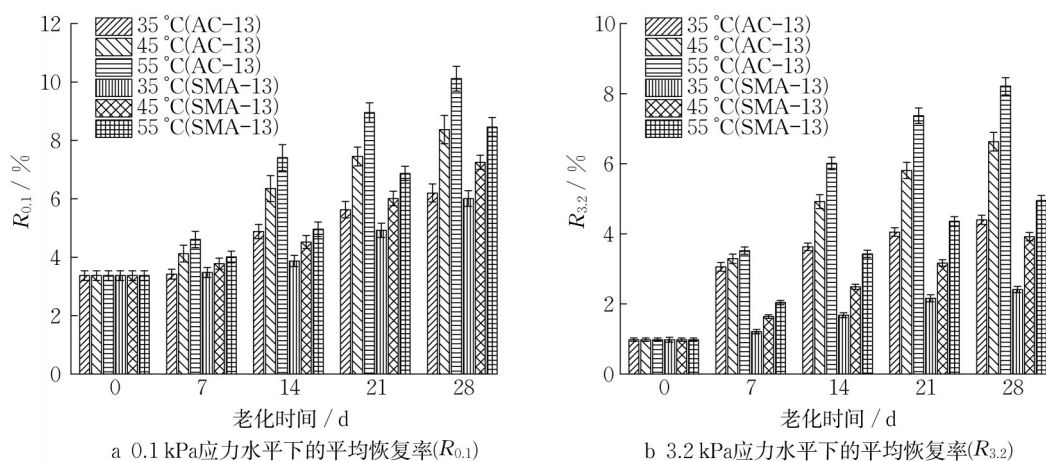


图4 AC-13和SMA-13混合料老化指数随老化时间的变化规律

Fig. 4 Aging indexes of AC-13 and SMA-13 mixtures versus aging time

图5 AC-13和SMA-13混合料 R 值随老化时间的变化规律Fig. 5 R values of AC-13 and SMA-13 mixtures versus aging time

间和老化温度的增加均呈下降趋势,降幅可达5%~50%,表明AC-13和SMA-13混合料的高温性能随老化时间和老化温度增加逐渐提高。这是由于老化时间和老化温度的增加均加剧沥青的老化程度,使其表现出更高的弹性和硬度,从而降低了 J_m 值。此外,SMA-13混合料中沥青老化前后的 J_m 差值均大于AC-13混合料。比如,在55℃下老化28d后,SMA-13和AC-13混合料老化前后的0.1 kPa应力水平下的不可恢复蠕变柔量($J_{m,0.1}$)差值分别为2.758和2.658 kPa^{-1} 。

2.1.3 疲劳性能随老化时间的变化规律

计算了AC-13和SMA-13混合料在不同老化状态下的完整性指数(C)和累计损伤强度(D),如图7所示。由图7可知,随着老化时间增加,AC-13和SMA-13混合料的完整性指数均逐渐下降,且下降速率呈加快趋势。此外,SMA-13混合料的完整性

指数下降速率低于AC-13混合料,表明SMA-13在抵抗沥青老化方面具有优势。

为了进一步研究老化时间对AC-13和SMA-13混合料疲劳寿命的影响,在0.5%、1.0%、2.5%、5.0%、10.0%、20.0%的应变水平下,分别计算了4种老化状态下AC-13和SMA-13混合料的疲劳寿命,结果如图8所示。由图8可知,AC-13和SMA-13混合料的疲劳寿命随应变水平和老化时间的增加均呈下降趋势。值得注意的是,在相同应变水平下,AC-13混合料随老化时间变化的疲劳寿命最高下降速率可达78%,而SMA-13混合料的最高下降速率仅为35%,进一步验证了SMA-13混合料具有更优异的抗老化性能。此外,低应变水平下AC-13和SMA-13混合料的疲劳寿命差值均大于高应变水平下,最高疲劳寿命差可达89.5倍,表明低应变水平下两种混合料的疲劳寿命对老化更为敏感。

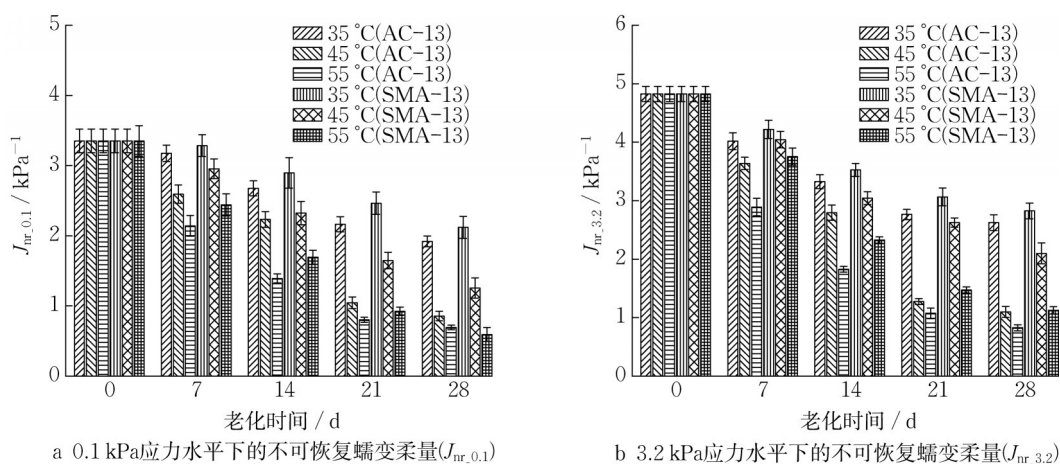


图6 AC-13和SMA-13混合料 J_{nr} 值随老化时间的变化规律
Fig. 6 J_{nr} values of AC-13 and SMA-13 mixtures changeover aging time

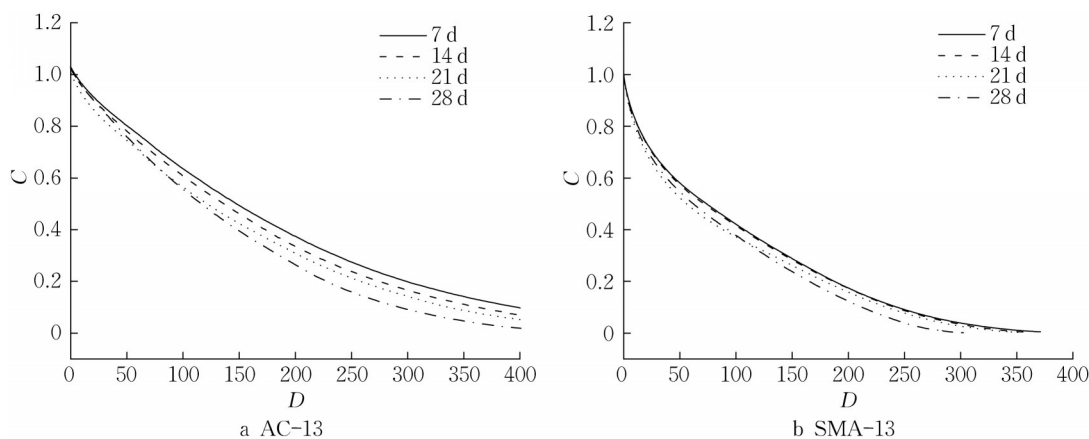


图7 AC-13和SMA-13混合料完整性指数(C)和累计损伤(D)随老化时间的变化规律
Fig. 7 Integrity indexes (C) and damage accumulation (D) of AC-13 and SMA-13 mixtures versus aging time

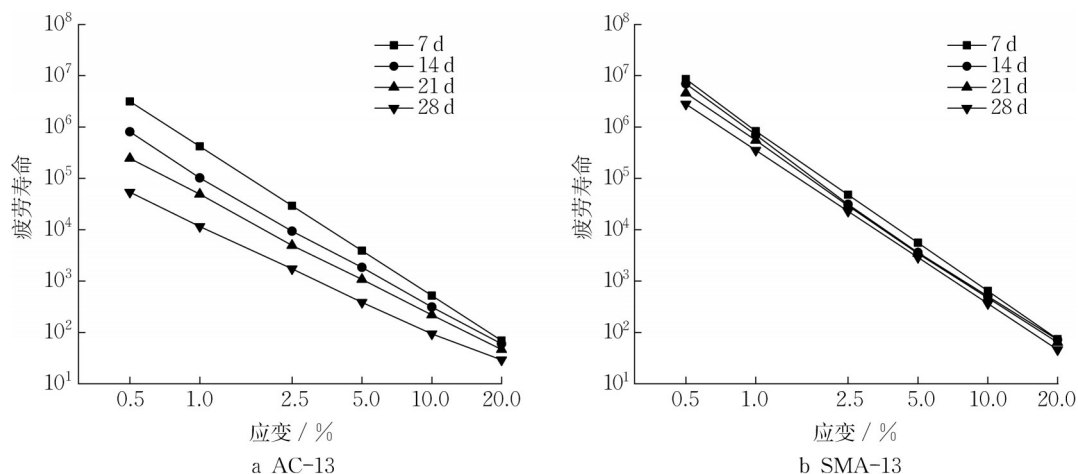


图8 AC-13和SMA-13混合料疲劳寿命随老化时间的变化规律
Fig. 8 Fatigue life of AC-13 and SMA-13 mixtures versus aging time

2.2 沥青混合料老化特性随深度的演变规律

2.2.1 老化程度随老化位置的变化规律

基于FTIR试验获得的羰基指数和亚砷基指

数,研究了AC-13和SMA-13混合料在55℃老化后的老化程度随深度的变化规律,如图9所示。由图9可知,两种混合料的羰基和亚砷基指数均随着

深度的增加而逐渐降低,且降低趋势近似呈线性关系,其中AC-13和SMA-13混合料的老化指数的平均降幅分别为13.7%和9.9%,这归因于沥青混合料老化过程中,氧气通过试件中的连通孔隙由上部向下部扩散,随着试件深度的增加,氧气浓度逐渐降低,进而导致孔隙内氧气与沥青中活性基团反应产

生的活性自由基量减少^[34]。这些活性自由基进一步与氧气反应生成不稳定的中间产物(氢过氧化物, $R-O-O-H$),随后分解或与硫醚基团反应,形成稳定的羰基和亚砷基官能团^[35]。因此,混合料的老化程度随着老化深度的增加而减弱。

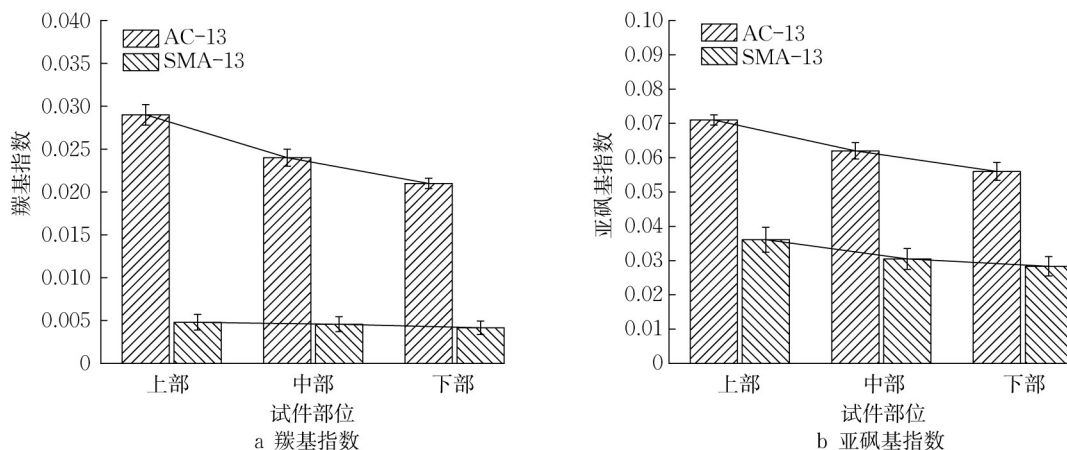


图9 AC-13和SMA-13混合料老化指数随老化深度的变化规律

Fig. 9 Aging indexes of AC-13 and SMA-13 mixtures versus aging depth

2.2.2 高温性能随老化位置的变化规律

采用 R 和 J_{nr} 来评价AC-13和SMA-13混合料中沥青高温性能随老化位置的变化规律,如图10所示。由图10可知,随着老化深度增加, R 和 J_{nr} 分别呈下降和上升趋势,且上升或下降趋势近似呈线性关

系。这表明AC-13和SMA-13混合料的高温性能随老化深度增加近似呈线性下降趋势。此外,与AC-13混合料相比,SMA-13混合料的 R 值普遍较小,而 J_{nr} 值相对较高,表明SMA-13混合料的抗老化性能优于AC-13混合料。

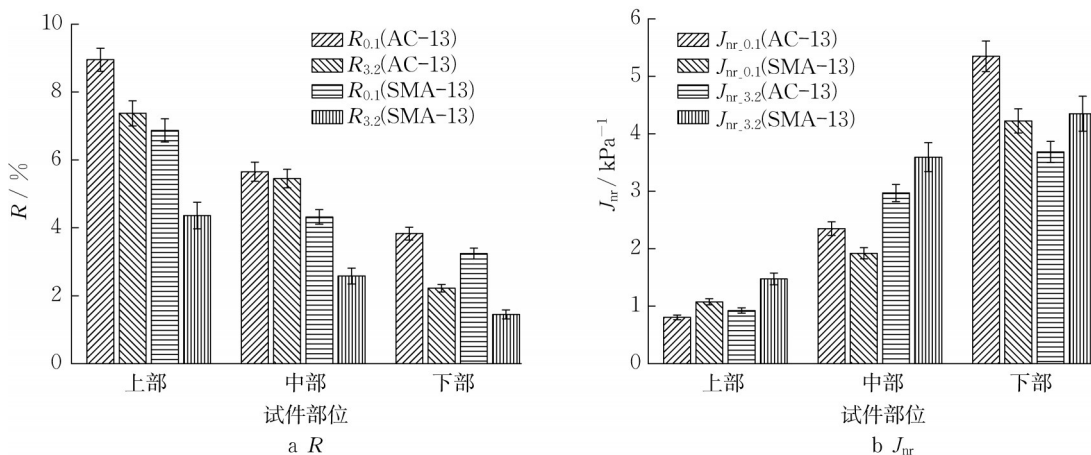


图10 AC-13和SMA-13混合料 R 值和 J_{nr} 值随老化位置的变化规律

Fig. 10 R and J_{nr} values of AC-13 and SMA-13 mixtures versus aging depth

2.2.3 疲劳性能随老化位置的变化规律

AC-13和SMA-13混合料在不同老化位置处的完整性指数(C)和累计损伤强度(D),如图11所示。由图11可知,随着老化深度的增加,AC-13和SMA-13混合料的完整性指数均呈现上升趋势,且

SMA-13混合料的完整性指数上升速率低于AC-13混合料。这一趋势与前面高温性能和疲劳性能的规律相吻合。原因在于随着老化深度的增加,沥青混合料内部的氧气浓度逐渐降低,导致沥青的老化程度减弱,使得沥青呈现出更加柔软的特性。同时,沥

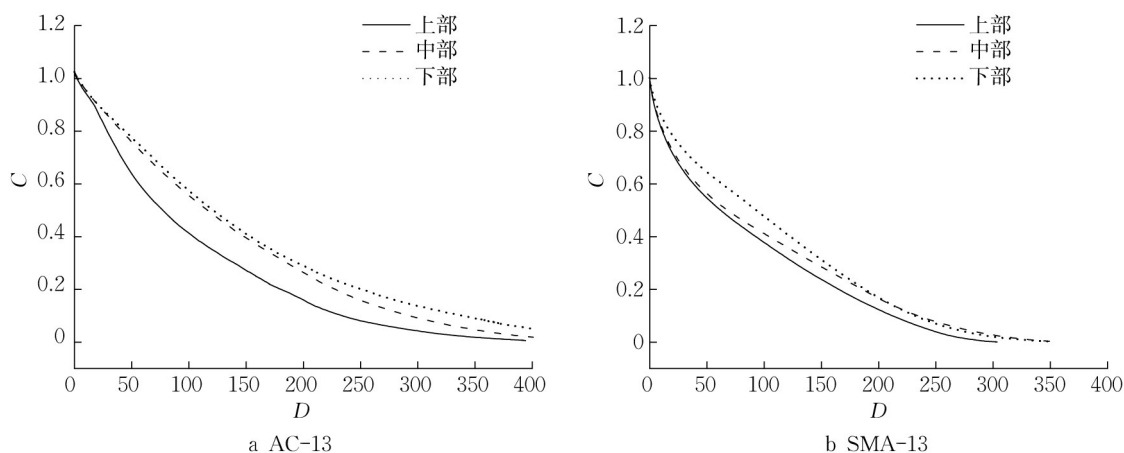


图11 AC-13和SMA-13混合料完整性指数(C)和累计损伤(D)随老化位置的变化规律

Fig. 11 Integrity indexes and damage accumulation of AC-13 and SMA-13 mixtures versus aging depth

青混合料在低应变水平下更易产生微裂缝,从而加速了疲劳损伤的累积。

为了深入研究AC-13和SMA-13混合料的疲劳寿命随老化深度的变化规律,对两种混合料在5种应变水平下的疲劳寿命进行计算,如图12所示。由图12可知,AC-13和SMA-13混合料的疲劳寿命均随老化深度的增加而增加,平均增加幅度分别为101.1%和93.4%。同时,随应变水平的增加,AC-13和SMA-13混合料的疲劳寿命均呈下降趋势,平均下降幅度分别为74.5%和89.1%。特别在高应变水平下,不同深度处的疲劳寿命差值更为显著。此外,在相同应变水平下,SMA-13混合料的疲劳寿命均大于AC-13混合料,且在低应变水平下疲劳寿命差值更加明显。这归因于不同试件及其深度处沥

青老化程度存在差异,具体解释见上文。

2.3 沥青混合料老化影响的显著性分析

采用单因素方差分析(one-way ANOVA)方法,对老化时间、老化温度、老化深度对沥青混合料老化特性的影响进行统计分析,结果汇总于表2。

表2 老化因素对沥青混合料老化性能的ANOVA结果

Tab. 2 ANOVA results of aging factors on aging properties of asphalt mixtures

评价指标	老化因素	均方和	F值	显著性
羟基指数	温度	$2.999\ 0 \times 10^{-5}$	0.328 5	0.722 8
	时间	$1.797\ 6 \times 10^{-4}$	2.488 9	0.069 1
	位置	$2.220\ 1 \times 10^{-5}$	0.235 5	0.793 1
亚砷基指数	温度	$2.202\ 9 \times 10^{-4}$	1.064 0	0.359 1
	时间	$6.273\ 7 \times 10^{-4}$	4.454 3	0.007 4
	位置	$1.590\ 7 \times 10^{-4}$	0.703 6	0.510 4
$R_{0.1}$	温度	7.229 9	1.999 3	0.155 0
	时间	20.015 1	15.618 9	0
	位置	9.932 9	9.249 4	0.052 1
$R_{3.2}$	温度	5.975 4	1.558 9	0.2287
	时间	14.192 2	6.046 9	0.001 5
	位置	8.138 6	2.729 6	0.211 2
$J_{nr,0.1}$	温度	2.527 5	3.350 9	0.050 1
	时间	4.569 0	15.988 5	0
	位置	6.669 6	12.632 3	0.034 6
$J_{nr,3.2}$	温度	3.059 3	1.936 1	0.163 8
	时间	9.542 9	22.481 5	0
	位置	4.538 4	9.154 4	0.052 8
疲劳寿命	时间	$1.527\ 4 \times 10^{12}$	0.480 3	0.697 7
	位置	$3.834\ 7 \times 10^{12}$	0.378 7	0.687 7
	应变水平	$2.420\ 6 \times 10^{13}$	3.289 6	0.017 4

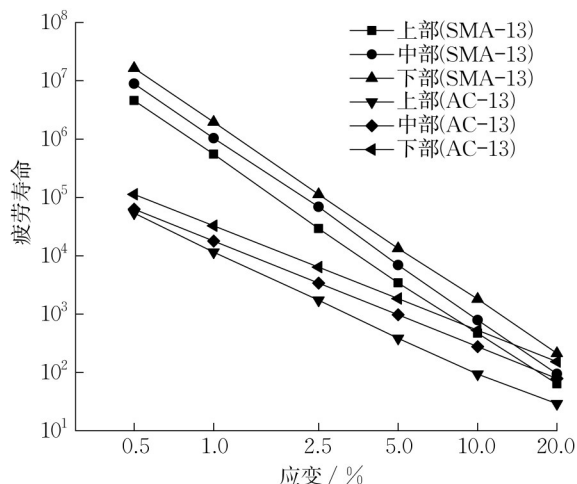


图12 AC-13和SMA-13混合料疲劳寿命随老化深度的变化规律

Fig. 12 Fatigue life of AC-13 and SMA-13 mixtures versus aging time

由表2可知,老化温度对羰基指数、亚砷基指数、 R 、 J_{nr} 的影响均不显著(均大于0.05的显著性水平),表明基于路面服役温度选择的老化温度对沥青分子结构和性能的影响较小。除羰基指数和疲劳寿命外,老化时间对其他评价指标(如亚砷基指数、 R 、

J_{nr})的影响均显著(均小于0.05的显著性水平),表明随着老化时间的延长,沥青混合料中亚砒基含量和高温抗变形能力均呈现出显著增加趋势,而羰基含量和抗疲劳能力的变化则不明显。此外,老化深度对 $J_{nr,0.1}$ 有显著影响,而对其他评价指标的影响则不显著,这归因于沥青混合料的老化程度呈现出近似线性的递减趋势,且整体差异相对较小。最后,应变水平对沥青混合料的疲劳寿命具有显著的影响。

3 结论

提出了一种新的沥青混合料长期老化室内模拟方法,模拟了沥青混合料在服役温度范围内的老化行为,通过FTIR、MSCR和LAS试验研究了老化时间、老化温度、老化深度对沥青老化性能的影响规律。得出以下结论:

(1)提出了一种新型室内长期老化装置及其方法,可在实际路面温度范围内模拟沥青路面的热氧老化过程,并使沥青混合料老化程度接近标准试验条件下的水平。在55℃条件下对AC-13和SMA-13混合料老化28d,两种混合料的羰基和亚砒基指数可达标准试验条件下指数的89%以上。

(2)AC-13和SMA-13混合料的老化程度和高温性能随老化时间及温度的增加而增加,但SMA-13混合料的老化程度及高温性能变化程度均小于AC-13混合料,表明SMA-13混合料的抗老化性能优于AC-13混合料。

(3)AC-13和SMA-13混合料的老化程度和高温性能随试件深度的增加而降低。同一深度位置,SMA-13混合料的老化程度和高温性能均优于AC-13混合料,再次验证了SMA-13混合料的抗老化性能优势。

(4)AC-13和SMA-13混合料的疲劳寿命随老化时间的增加而下降,随老化深度的增加而上升,且在低应变水平下疲劳平均下降速率分别为35%和78%,平均增加幅度分别为101.1%和93.4%。同样,SMA-13混合料的疲劳寿命大于AC-13混合料。

(5)老化时间对亚砒基和高温性能影响显著,但对羰基含量和疲劳寿命影响不显著。老化温度对老化指数、高温性能和疲劳寿命的影响均不显著。然而,老化深度仅对 $J_{nr,0.1}$ 有显著影响,对其他评价指标的影响则不显著。

作者贡献声明:

温 永:论文构思与修订,项目资助。

孙丽君:数据处理,论文撰写。

王雪松:试验测试,数据处理。

裴建中:论文审阅,项目资助。

参考文献:

- [1] HOFKO B, MASCHAUER D, STEINER D, *et al.* Bitumen ageing - impact of reactive oxygen species [J]. *Case Studies in Construction Materials*, 2020, 13: e00390.
- [2] PETERSEN J C. A review of the fundamentals of asphalt oxidation: chemical, physicochemical, physical property, and durability relationships [R]. Washington DC: Transportation Research Board, 2009.
- [3] TARSI G, VARVERI A, LANTIERI C, *et al.* Effects of different aging methods on chemical and rheological properties of bitumen [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2018, 30(3): 04018009.
- [4] YU H, BAI X, QIAN G, *et al.* Impact of ultraviolet radiation on the aging properties of SBS-modified asphalt binders [J]. *Polymers*, 2019, 11(7): 1111.
- [5] DOMKE C H, DAVISON R R, GLOVER C J. Effect of oxygen pressure on asphalt oxidation kinetics [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2000, 39(3): 592.
- [6] 梁波, 兰芳, 郑健龙. 沥青的老化机理与疲劳性能关系的研究进展[J]. *材料导报*, 2021, 35(9): 9083.
LIANG Bo, LAN Fang, ZHENG Jianlong. Research and development of relationship between aging mechanism and fatigue properties of asphalt [J]. *Materials Reports*, 2021, 35(9): 9083.
- [7] TAUSTE R, MORENO-NAVARRO F, SOL-SÁNCHEZ M, *et al.* Understanding the bitumen ageing phenomenon: a review [J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 192: 593.
- [8] PETERSEN J C. A thin film accelerated aging test for evaluating asphalt oxidative aging (with discussion) [C]// Association of Asphalt Paving Technologists Proc. Nashville: Association of Asphalt Paving Technologists, 1989:220-237.
- [9] DESSOUKY S, ILIAS M, PARK D-W, *et al.* Influence of antioxidant-enhanced polymers in bitumen rheology and bituminous concrete mixtures mechanical performance [J]. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2015, 2015: 1.
- [10] 郭猛, 任鑫, 焦峪波, 等. 沥青及沥青混合料老化与抗老化研究综述[J]. *中国公路学报*, 2022, 35(4): 41.
GUO Meng, REN Xin, JIAO Yubo, *et al.* Review of aging and antiaging of asphalt and asphalt mixtures [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2022, 35(4): 41.
- [11] ZAIDULLIN I M, PETROVA L M, YAKUBOV M R, *et al.* Variation of the composition of asphaltene in the course of bitumen aging in the presence of antioxidants [J]. *Russian Journal of Applied Chemistry*, 2013, 86(7): 1070.

- [12] RAHMANI E. Continuum-based constitutive modeling of coupled oxidative aging-mechanical response of asphalt concrete [D]. College Station: Texas A&M University, 2015.
- [13] ZHAO X, WANG S, WANG Q, *et al.* Rheological and structural evolution of SBS modified asphalts under natural weathering [J]. *Fuel*, 2016, 184: 242.
- [14] ZHANG W, BAHADORI A, SHEN S, *et al.* Comparison of laboratory and field asphalt aging for polymer-modified and warm-mix asphalt binders [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2018, 30(7): 04018150.
- [15] MENAPACE I, YIMING W, MASAD E. Chemical analysis of surface and bulk of asphalt binders aged with accelerated weathering tester and standard aging methods [J]. *Fuel*, 2017, 202: 366.
- [16] 胡栋梁, 顾兴宇, 孙丽君, 等. 基于量子化学的沥青热老化与紫外老化机理[J]. *交通运输工程学报*, 2023, 23(2): 141.
HU Dongliang, GU Xingyu, SUN Lijun, *et al.* Quantum chemistry-based thermal and UV aging mechanism of asphalt [J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2023, 23(2): 141.
- [17] 赵可成, 王予红, 杨震. 沥青老化过程中流变和化学性质的联系[J]. *公路交通科技*, 2021, 38(5): 10.
ZHAO Kecheng, WANG Yuhong, YANG Zhen. Connection between rheological and chemical properties of asphalt during aging [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2021, 38(5): 10.
- [18] 屈鑫, 丁鹤洋, 汪海年. 道路沥青老化评价方法研究进展[J]. *中国公路学报*, 2022, 35(6): 205.
QU Xin, DING Heyang, WANG Hainian. The state-of-the-art review on evaluation methods of asphalt binder aging [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2022, 35(6): 205.
- [19] KIM Y R, CASTORENA C, ELWARDANY M D, *et al.* Long-term aging of asphalt mixtures for performance testing and prediction [R]. Washington DC: Natinal Cooperative Highway Research Program, 2018.
- [20] VERHASSELT A F. A kinetic approach to the aging of bitumens [M]. Amsterdam: Elsevier, 2000.
- [21] SHAREW YEHUALAESET J. Development of a laboratory ageing method for bitumen in porous asphalt [D]. Delft: Delft University of Technology, 2010.
- [22] REED J. Evaluation of the effects of aging on asphalt rubber pavements [D]. Phoenix: Arizona State University, 2010.
- [23] HOUSTON W N, MIRZA M W, ZAPATA C E, *et al.* Environmental effects in pavement mix and structural design systems [R]. Washington DC: National Cooperative Highway Research Program, 2005.
- [24] WEN Y, WANG Y. Effect of oxidative aging on dynamic modulus of hot-mix asphalt mixtures [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2019, 31(1): 04018348.
- [25] WEN Y. The effects and causes of oxidative aging of compacted asphalt mixtures [D]. Hong Kong: The Hong Kong Polytechnic University, 2018.
- [26] ELWARDANY M D, YOUSEFI RAD F, CASTORENA C, *et al.* Evaluation of asphalt mixture laboratory long-term ageing methods for performance testing and prediction [J]. *Road Materials and Pavement Design*, 2017, 18(S1): 28.
- [27] PETERSEN J C. Binder characterization and evaluation. volume 1 [R]. Washington DC: Strategic Highway Research Program, National Research Council Washington DC, 1994.
- [28] PETERSEN J C, HARNSBERGER P M. Asphalt aging: dual oxidation mechanism and its interrelationships with asphalt composition and oxidative age hardening [J]. *Transportation Research Record*, 1998, 1638(1): 47.
- [29] WANG P E Y, WEN Y, ZHAO K, *et al.* Evolution and locational variation of asphalt binder aging in long-life hot-mix asphalt pavements [J]. *Construction and Building Materials*, 2014, 68: 172.
- [30] 中华人民共和国交通部. 公路沥青路面施工技术规范: JTG F40—2004 [S]. 北京: 中华人民共和国交通部, 2004.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Technical specifications for construction of highway asphalt pavements: JTG F40—2004 [S]. Beijing: Ministry of Transport of the People's Republic of China, 2004.
- [31] LAMONTAGNE J, DUMAS P, MOUILLET V, *et al.* Comparison by Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy of different ageing techniques: application to road bitumens [J]. *Fuel*, 2001, 80(4): 483.
- [32] WEN Y, WANG Y. Determination of oxygen diffusion coefficients of compacted asphalt mixtures [J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 160: 385.
- [33] WANG Y, ZHANG H. Influence of asphalt microstructure to its high and low temperature performance based on atomic force microscope (AFM) [J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 267: 120998.
- [34] MIRWALD J, MASCHAUER D, HOFKO B, *et al.* Impact of reactive oxygen species on bitumen aging - the viennese binder aging method [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 257: 119495.
- [35] OUYANG C, WANG S, ZHANG Y, *et al.* Improving the aging resistance of styrene - butadiene - styrene tri-block copolymer modified asphalt by addition of antioxidants [J]. *Polymer Degradation and Stability*, 2006, 91(4): 795.