

基于纳米压痕的道路综合评价研究

梅子涵, 吴忱, 杨军, 王宣成

(东南大学, 江苏 南京 211189)

摘要:为准确得到沥青路面技术状况评价结果及相应养护方案,并将沥青混合料老化纳入现有道路技术状况评价体系中,该文基于纳米压痕试验结果,提出新的路面老化评价参数ARI,确定ARI在新道路使用状况指数(PQI)中占比,以及得到针对老化的道路养护方案及铣刨推荐值。此外该文基于老化梯度及老化系数ARI提出了一定时期内老化系数预测值和针对老化的养护方案,便于实际工程使用。

关键词:道路评价;老化系数及预测;养护方案;铣刨参考值

1 引言

在交通运输部下发的《“十三五”公路养护管理指导意见》中,普通干线公路大中修所占养护工程的比例已提高至17%,较上一年比例增加了30%,这表明近年来中国公路建设的重心已逐渐由大规模建设转变为大规模养护。而沥青混合料的老化直接影响沥青路面路用性能。老化后的沥青混合料一般高温稳定性有所提高,但水稳定性、低温抗裂性能和疲劳性能均有所降低,进而导致沥青路面出现裂缝、车辙、龟裂等各种病害,极大地影响了沥青路面使用性能。中国道路养护研究开始于20世纪80年代,目前应用现行JTG H20—2015《公路技术状况评定标准》中所规定方法,采用宏观手段对老化沥青混合料整体进行性能探究,通过定量表示路面各种病害如裂缝宽度、龟裂面积等得出沥青路面评分。该方法忽略了沥青混合料内部老化对沥青路面性能劣化造成的影响。在其他病害相对不明显,而老化为影响沥青路面性能的主要因素时,道路工作者依照现行标准无法得出合理的路面评价结果。此外,沥青路面养护方案往往基于工程经验和现行公路技术状况评定标准结果,难以根据路面真实使用状况做出合理路面养护决策。在这种情况下,道路工作者也不能针对路用性能劣化主要因素,往往依照其他病害最差情况做出相应的养护方案。这样的养护方案难免造成工期延长、资源浪费的现象。因此正确评价路面真实使用状况,充分考虑沥青路面老化影响,从而得

到合理的路面评价结果与养护方案在道路养护工作中显得尤为重要。

沥青混合料老化受温度、湿度、荷载、光照等因素影响,同时由于沥青混合料级配、空隙率不同,这些影响因素对混合料的作用也不尽相同,导致沥青混合料的老化及性能劣化在沿深度方向上呈现不均匀性。然而目前中国对沥青混合料的老化表征仍主要采用宏观试验手段,仅仅着眼于沥青混合料老化前后其宏观性能变化,不能准确表示出沥青混合料内部沿深度不均匀老化现象,更不能给出普适的老化规律模型。纳米压痕技术是一种微观力学性能测试技术,能够在高清显微镜下通过纳米尺寸的压头触探试样表面的不同材料,得出各种材料的微观力学性能。Tarefder等系统地探究了纳米压痕技术在沥青材料中的应用。姚泽恒等较为准确地表征了沥青混合料内部各项性能指标与沿深度不均匀老化行为。大量的试验成果表明:将该技术应用于沥青混合料的老化行为研究可实现对沥青混合料性能劣化规律的准确表征,从而获取较为准确的沥青路面使用状况表征指标,得出更为合理的路面使用状况评价结果与相应养护方案。

该文对不同老化程度的沥青混合料纳米压痕试验结果进行分析,得出了沥青混合料老化梯度模型,并提出了路面老化状况评价参数——老化系数(Aging Rating Index, ARI)和老化系数预测方法。为使老化系数能应用于工程实践,该文将老化系数与原有5大技术指标相结合,建立基于纳米压痕的道路综合评价及养护决策体系,给出了新的路面使用状况指数PQI

计算方法和老化为主要性能劣化因素路段的养护方案,在实例分析中取得了较为理想的成果。

2 老化系数 *ARI*

现有路面评价及养护决策系统未充分考虑老化对沥青混合料路用性能的影响,导致据此做出的决策不具有针对性。纳米压痕技术的发展为解决这个问题提供了契机,分析纳米压痕试验结果能建立沥青混合料沿深度不均匀老化模型,将其用简洁的分数表示并应用于路面技术状况评价中,将有助于道路管理者及时知悉沥青路面老化状况,及时做出针对路面老化的养护决策,有效降低老化对沥青混合料路用性能的不利影响。

2.1 老化梯度

除了材料性质的影响,沥青混合料的老化程度主要与进入沥青混合料内部的氧与沥青混合料的接触程度有关。由于不同沥青混合料所受压力、空隙率等均不相同,其内部与氧接触程度也不相同,产生不均匀老化现象,以老化梯度来表示其内部这种差异性。姚泽恒等研究者表明:对不同深度和老化时长[未老化 Unaged、短期老化 STA、长期老化 2 d、5 d、8 d(LTA2、5、8)]的沥青混合料进行纳米压痕试验,可得到该种沥青混合料的老化梯度,其中 3%空隙率 SMA 沥青混合料的纳米试验结果最具有代表性,其纳米压痕模量和老化梯度分别如图 1、2 所示。

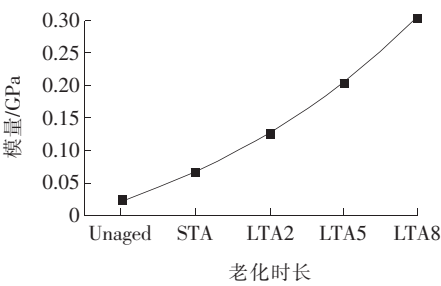


图 1 老化沥青混合料的纳米压痕模量

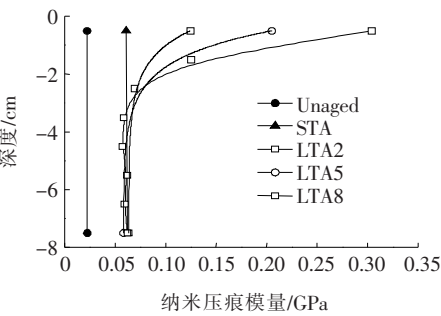


图 2 3%空隙率 SMA 老化梯度

实际需要养护路段往往已开始出现各种路面病害,其使用状况更接近 LTA8 所示长期老化。图 2 所示 3%空隙率 SMA 沥青混合料 LTA8 曲线近似于对数函数曲线,因此为准确表征沥青混合料老化梯度,该文尝试采用 Logistic 模型、对数模型 I、对数模型 II、对数模型 III、Lorentz 模型等函数模型对 LTA8 所示曲线进行拟合,各曲线拟合情况如表 1 所示。

表 1 模型拟合情况分析

模型	公式形式	残差平方和	概率> <i>F</i>
Logistic 模型	$M=x_0\sqrt{\frac{A_1-A_2}{y-A_2}}-1, x_0=0.053\ 6, A_1=12.495, A_2=2.885, p=2.769$	16.690 4	0.018 99
对数模型 I	$M=a+e^{\frac{y}{b}}, a=0.055\ 3, b=1.081$	18.193 1	0.000 71
对数模型 II	$M=\frac{e^y-a}{b}, a=-0.053, b=0.934$	18.461 8	0.000 74
对数模型 III	$M=e^{\frac{a-y}{b}}-c, a=1.387, b=-1.511, c=-0.052$	17.270 4	0.010 84
Lorentz 模型	$M=\frac{1}{2}\sqrt{\frac{\frac{w}{\pi(y-y_0)}-w^2}{2A}}+x_c,$ $y_0=1.500, x_c=0.061\ 7, w=0.004\ 2, A=0.058\ 3$	8.484 6	0.071 10

由表 1 可知, Lorentz 模型残差平方和最小,表明在数据分布方面 Lorentz 模型拟合情况最好,但是该模型的 *F* 值检验值最大,表明其在进行数据估计时可靠性较低,在沥青混合料老化行为表征时,大量的纳米

压痕试验是不现实的,因此最终确定的模型应具有较好的数据估计可靠性。Logistic 模型在残差平方和与 *F* 值检验方面均较为满意,但其公式过于复杂,在实际工程使用中实用性较低。对数模型 I、II、III 中,对数

模型Ⅲ残差平方和最小, F 值检验也在可接受范围内, 因此该文采用对数模型Ⅲ作为老化梯度的数学模型, 即:

$$M = e^{\frac{a-y}{b}} - c \quad (1)$$

式中: M 为模量; y 为任意深度值; a 、 b 、 c 为计算相关系数, 其中 $a=1.40$, $b=-1.50$, $c=-0.05$ 。

2.2 老化系数

上节基于纳米压痕试验得出的老化模量梯度, 拟合得出了 3% 空隙率 SMA 沥青混合料任意深度处的老化模量及其表达式, 并提出基于纳米压痕的路面评价参数老化系数 (ARI) 及其计算方法。用老化系数 ARI 可以表示任意老化时长下沥青混合料老化模量变化值占整个沥青混合料使用期限内模量变化的多少, 能够一定程度上反映沥青路面沿深度不均匀老化的程度。ARI 计算表达式为:

$$ARI = 100 \left(1 - \frac{M - M_1}{M_2 - M_1} \right) \quad (2)$$

式中: M 为检测深度处沥青混合料纳米压痕模量值; M_1 、 M_2 分别为由式(1)求得的沥青混合料最大、最小纳米压痕模量, 在该文中只表示 3% 空隙率 SMA 沥青混合料使用过程中的最大与最小纳米压痕模量, 在技术条件允许时, 应采用纳米压痕试验仪进行精确测量。对 3% 空隙率 SMA 沥青混合料可使用式(1)计算试验室长期老化 8 d 时任意深度沥青混合料老化模量并评价此处沥青路面 ARI 值。

但由于中国目前缺乏沥青路面长期使用过程中各个时期的纳米压痕试验数据, 想要得出普适的沥青混合料老化梯度表达式较为困难。该文基于已有试验室纳米压痕试验成果, 提出的算法仅适用于 3% 空隙率 SMA 沥青混合料, 对于其他空隙率或级配沥青混合料可以采用试验室试验得出的经验值对 ARI 进行初步判断, 具体数值如表 2 所示。

表 2 ARI 评价方法

等级	ARI	M/M_0
优	95	1~3
良	85	3~6
中	75	6~10
次	65	10~15
差	50	>15

注: M 为实测检测深度处纳米压痕模量; M_0 为铺筑初期检测深度处纳米压痕模量, 具体检测深度应根据道路实际状况和工程需要确定。

2.3 ARI 预测

系统性的纳米压痕试验成本较高, 且需要对路面进行钻芯取样。在实际路面使用过程中, 对沥青路面老化状况进行定期监测相对难以实现, 也就无法及时通过实测的方法得到路面 ARI 值, 因此在实际工程中需要对路面 ARI 值进行预测, 以便于道路管理者能够及时预知路面 ARI 值, 做出相应养护决策。

然而基于现有 5 大参数的中国路面使用性能历史数据和沥青混合料老化梯度相关试验数据均偏少, 采用传统经验回归法缺乏精度。该文基于沥青路面老化行为的复杂性和诸多不确定性, 用灰色预测模型 GM(1,1) 进行简化分析, 以沥青混合料老化时长为自变量, 相同深度下取样的 ARI 值作为因变量, 通过时间序列寻找 ARI 变化数学规律。使用灰色预测模型与传统拟合经验回归法相比具有更高精度和可靠性。传统 GM(1,1) 模型将已知数据视作随机序列, 对已知数据进行累加处理降低随机性, 随后对新生成的数列建立白化微分方程得到均值矩阵与常数项向量, 最后用最小二乘法求解待解系数矩阵并代入原白化微分方程求解即可得到预测值。但需要注意的是, 在传统 GM(1,1) 模型中所采用的最小二乘法仍是一种近似算法, 由这样算法得到的结果仍存在一定偏差。

该文应用 GM(1,1) 模型在统计试验室老化数据的基础上结合 SHRP 相关规定对 3% 空隙率 SMA-13 沥青混合料试验室老化情况进行 ARI 值预测, 并将其与路面实际老化时长对应, ARI 的实测值与预测值如表 3 所示。

表 3 老化系数 ARI 实测值与预测值

老化时长/d	ARI 实测值	ARI 预测值
1	78.5	78.5
2	64.0	69.1
3	50.8	46.6
4	34.9	31.4
5	23.0	21.2
6	18.0	14.3
7	9.0	9.6
8	0.8	6.5

表 3 表明: 老化系数随试验室老化时长增加逐渐降低, 预测的相对误差为 0.044 9, 方差比为 0.064 1, 在 GM(1,1) 模型预测评价中等级分别为良和中。对于沥青混合料老化方面的预测而言, 由于沥青混合料老化受到诸多因素影响且这些影响因素大多难以确

定,这样的结果能够一定程度上反映出沥青路面 ARI 值的变化情况,具有一定的预测可靠性,能够为养护工作提供参考。在实际工程评价时,可认为路面老化状况较不理想,将预测值乘以一定的修正系数以做出较为安全的评价与决策。

表中预测结果满足式(3):

$$ARI = -1.272\ 18 + 114.600\ 62e^{-0.309\ 57t} \quad (3)$$

式中: ARI 为预测 ARI 值; t 为试验室老化天数。根据 SHRP 有关规定,试验室老化 4 h、2 d、5 d、8 d 分别对应实际路面使用 1 年、4 年、7.5 年、18 年。应用式(3)预测路面 ARI 值,并可应用式(2)和式(1)解出此时沥青混合料老化深度,针对这样的老化深度能够得到较为合理的铣刨深度参考值,便于管理者做出合理的养护决策。

3 实例应用

老化系数是一个新的基于纳米压痕试验结果的路面技术状况评价参数,仅仅只针对老化这一路面性能劣化因素,在实际工程中应将其与现有路面评价参数结合,共同反映出沥青路面真实使用状况。用合适的方法确定老化系数及原有参数在新的路面评价系统中的占比,得出较为准确的沥青路面评价结果,并且得出基于新路面评价结果的养护方案,建立起基于纳米压痕的道路综合评价及养护决策系统,从而有效解决上述问题。

3.1 路面评价参数占比确定

层次分析法是一种定量和定性的多目标决策方法。该方法可以将复杂的问题分解为多个层次和多个因素,对各个层次之间和各个因素之间的相对重要程度进行比较,构造判断矩阵,计算判断矩阵的最大特征值和最大特征向量即可求得不同方案(在路面使用状况指数 PQI 计算确定中为各个参数)的权重,最终可得到新的路面使用状况指数 PQI 计算方法。

为使老化系数能够应用于实际路面养护工作中,该文综合考虑老化对现有 5 大参数的影响,重新确定 5 大参数及 ARI 所占比重。沥青混合料老化与路面病害联系紧密,如车辙、裂缝等,其中车辙由 RDI (路面车辙深度指数)充分反映,因此 ARI 和 RDI 实际有重合部分;同时裂缝、龟裂等也会造成路面 PCI (路面状况指数)、 RQI (国际平整度指数)降低, SRI 升高。在确定新占比时, PCI 、 RQI 、 RDI 占比均应降低以平衡 ARI 影响,同时考虑到沥青混合料不均匀老化属于

微观表现难以观察,因此 ARI 占比不应过高以免为日常简要评价带来困扰。

为使最终确定的各项技术指标占比更为精确,该文将层次分析法应用于确定上述 5 个参数在新的 PQI 计算中的占比。JTG H10—2015《公路养护技术规范》规定在 PQI 计算时 PCI 、 RQI 、 RDI 、 SRI 占比分别为 0.35、0.40、0.15、0.10,据此确定该 4 项参数在准则层中两两相互重要程度,以 SRI 重要程度为 1, PCI 、 RQI 、 RDI 重要程度分别为 7、8、3。为将 ARI 纳入路面技术状况评定体系中,该文结合实例(南京市龙池路与府东路)确定 PCI 、 RQI 、 RDI 、 SRI 相对 ARI 重要程度分别为 3、2、1、8,据此构造判断矩阵进行计算。

最终确定的各指标在新的 PQI 中占比见表 4。

表 4 各指标在新 PQI 中所占比重

指标	比重	指标	比重
PCI	0.31	SRI	0.05
RQI	0.48	ARI	0.06
RDI	0.10		

新的 PQI 计算公式如式(4):

$$PQI = \omega_{PCI}PCI + \omega_{RQI}RQI + \omega_{RDI}RDI + \omega_{SRI}SRI + \omega_{ARI}ARI \quad (4)$$

式中: ω_{PCI} 、 ω_{RQI} 、 ω_{RDI} 、 ω_{SRI} 、 ω_{ARI} 分别表示 PCI 、 RQI 、 RDI 、 SRI 和 ARI 在新的 PQI 计算公式中所占比重。

3.2 ARI 评价实例

该文选取龙池路与府东路进行实例分析,采用基于纳米压痕的评价方案评价其破损状况并给出相应养护方案,评价结果与现有结果皆为中修并对其进行了补充,其 ARI 评价结果如表 5 所示。

老化系数(ARI)评价结果表明:两处道路经过多年使用均已严重超出沥青混合料老化可接受范围,路面的沥青混合料状态也已不能满足其作为城市次干道的需要。在最终 PQI 值评价中,加入新的评价参数 ARI 后 PQI 值与原值相比均有减小,这是因为该处道路经过多年使用老化现象已经非常严重,而原有的道路评价体系中未能考虑到老化,造成评价结果不够精确。针对该路面沥青混合料的老化状态,应将原路面上面层沥青混合料进行全面剥除,并重新根据新的道路技术标准重新选用合适的沥青混合料进行铺筑,与龙池路、府东路养护方案报告中所述中修方案一致。

3.3 针对性养护方案设计

该文基于 JTG H20—2015《公路技术状况评定标

表 5 龙池路、府东路 ARI 评价结果

项目	类别	长度/ m	深度/ cm	ARI	试验模 量/GPa	试验 ARI	等级	原 PQI	原等级	现 PQI	现等级
龙池路	主线	575	3	78.7	0.248 5	64.62	次	62.0	C	56.4	D
	辅道	278	3	78.7	0.165 0	77.39	中	65.3	C	61.7	C
	辅道	297	3	78.7	0.090 6	85.63	良	59.8	D	57.2	D
府东路	主线	288	3	78.7	0.320 8	53.47	差	57.3	D	52.1	D
	辅道	148	3	78.7	0.088 5	83.60	良	81.4	B	79.7	C
	辅道	436	3	78.7	0.168 0	78.79	中	64.9	C	61.8	C

准》中包含的诸多病害类型,并结合层次分析法、专家经验法提出参考性的道路养护方案。以南京市龙池路与府东路为例,当沥青路面显著病害面积相对较小,而沥青混合料的老化为沥青路面性能劣化的主要因素时,该文推荐采用铣刨的方式对路面老化沥青混合料进行处理。通过老化系数 ARI 并结合式(1)、(2)、(3)确定铣刨深度,也可应用上述 ARI 预测确定铣刨深度参考值,实现特定深度值老化沥青混合料的铣刨、铣刨料的回收再利用,降低工程造价,节约人力资源。

根据龙池路与府东路养护方案报告中数据,以府东路 AK0+000~AK0+288 路段为例,其沥青路面病害面积相对较小,沥青混合料老化为沥青路面的性能劣化的主要因素。根据现有路面行驶状况指数(PQI)得分,该段道路养护方案为中修,实施的养护方案铣刨深度参考值为 20 cm,实际铣刨数量为 453.667 m³,铣刨深度为 118 mm;基于纳米压痕的路面评价体系,由式(1)、(2)、(3)反解得该路段铣刨深度推荐值为 43.362 mm,并且该值与路面取样纳米压痕试验评价老化模量结果(38.229 mm)相近。与现行方案相比新方案减少了 63.12%铣刨数量,大大降低了工程量,提高了道路养护经济效益;对于铣刨后的沥青混合料进行沥青再生等方式处理,提高材料重复利用率,为实现集约型道路养护决策提供方向。

基于铣刨深度参考值,该文得出府东路 AK0+000~AK0+288 路段新路面养护方案。府东路上行 AK0+000~AK0+288 养护方案如下:

轻度及中度龟裂:① 铣刨沥青面层 43.3 mm;② 清除杂物及尘土;③ 喷洒改性黏层油分层回填 AC-20C 沥青混凝土+AC-13C(改、玄)至原路面平。

纵向裂缝:① 铣刨沥青面层 43.3 mm;② 清除缝中杂物及尘土;③ 采用热沥青灌缝,灌入深度要求<缝深的 2/3;④ 将溢出的沥青清除后铺设 50 cm 宽聚酯纤维抗裂贴;⑤ 喷洒改性黏层油分层回填 AC-

20C 沥青混凝土+AC-13C(改、玄)至原路面平。

轻度松散:① 铣刨沥青面层 43.3 mm;② 收集路面上已松动的矿料;③ 喷洒改性黏层油分层回填 AC-20C 沥青混凝土+AC-13C(改、玄)至原路面平;④ 均匀撒布 3~6 mm 石屑或粗砂并用轻型压路机压实。

重度松散:① 铣刨沥青面层 43.3 mm;② 收集路面上已松动的矿料;③ 清除表面杂物及尘土;④ 清扫干净后回填 C20 水泥混凝土;⑤ 采用热沥青对四周灌缝,灌入深度要求<缝深的 2/3。将溢出的沥青清除后铺设 50 cm 宽聚酯纤维抗裂贴;⑥ 喷洒改性黏层油分层回填 AC-20C 沥青混凝土+AC-13C(改、玄)至原路面平。

4 系统开发

实际路面养护工作量大且相对枯燥,需要大量人工调查并根据路面损坏状况做出相应的养护方案,这些工作需要消耗大量人力物力且工作效率低下。该文为提高路面养护决策效率、降低人工成本和决策时间,基于微观老化表征的沥青路面养护与决策系统进行系统可视化,把该系统含有内容编入 MFC 程序“道路综合评价及养护决策系统”中。该程序具有数据读取功能,能够直接读取文件中既有路面评定数据和养护方案并对其进行补充;此外该程序也能以文本文档形式输出程序计算结果,具体包括各项指标计算值和相应养护方案。

通过数据输入或者文本存储功能,该程序能自动计算沥青路面技术状况各项指标,包括 DR、PCI、PSSI、RQI、SRI、ARI、PQI 的计算。其中 PCI、PSSI、RQI、SRI 按 JTG H20-2015《公路技术状况评定标准》中规定计算方法计算,PCI 计算有输入路面各种病害面积计算和输入 DR 直接计算两种方法,在计算 PCI 时还应注意输入被评定路面总面积以让程序正

常运行。3%空隙率 SMA 沥青混合料 ARI 按式(1)、(2)计算,其余空隙率和级配沥青混合料的 ARI 计算该程序仅按经验法确定,在使用该程序时应注意区分。 PQI 计算按式(4)进行。同时该程序能根据路面具体破损状况显示出相应的养护方案大纲,并直接输出文件以便使用人员针对实际路面情况进行修改完善。应用该程序对府东路 $K0+000\sim K0+288$ 路面进行养护评价并做出的养护决策如图 3 所示。



图 3 程序应用展示

5 结论

(1) 该文基于纳米压痕试验结果,分析拟合沥青混合料老化梯度,得到了 3%空隙率 SMA 沥青混合料老化梯度模型。基于该模型总结得出了新的路面技术状况评价参数——老化系数 ARI ,并提出了 ARI 的预测方法,将 ARI 和预测方法应用于实际工程中将有利于做出考虑老化的更合理的养护决策。

(2) 为使 ARI 能够应用于实际工程中,该文应用层次分析法将 ARI 与现有标准相结合,并提出了老化为路面主要性能劣化因素路段养护方案(主要为铣刨)的参考值,在实例分析中取得了理想的成果,为改善粗放型道路评价方式及养护决策提供了改进方向。

(3) 该文将考虑到老化的路面评价及养护决策系统进行程序可视化编写,大大降低了决策人工成本和决策时间,便于道路工作者对路面损坏带来的影响进行预知和预防,有利于做出针对性强的决策,提高道路工作者决策效率、提升道路使用者的体验,让路面养护工作朝着高效、节约方向发展。

对更多种级配和空隙率的沥青混合料试验结果进

行探究将有助于得出不同沥青混合料 ARI 计算普适方法,进一步提高道路评价及养护决策准确性。此外,针对路面老化的养护方案更多应基于实际工程经验,采用更准确数据分析方法,充分利用老化系数提出更多更为合理的养护方案。而在程序中加入更多种类沥青混合料计算数据并进行更多案例分析,将为进一步改善粗放型道路养护决策提供可能。此外使用更高级编程语言实现如实时计算、数据分析等功能,这将极大简化路面养护工作并提高工作精度。

参考文献:

- [1] 交通运输部.“十三五”公路养护管理指导方针[Z],2016.
- [2] 李洪印. 沥青路面大中修工程结构及设计方法研究[D]. 长安大学硕士学位论文,2008.
- [3] 马庆伟,高荣,张娟,等. 沥青老化对沥青及沥青混合料性能的影响分析[J]. 公路交通科技(应用技术版),2012(3).
- [4] Fernándezgómez W D, Quintana H A R, Reyesliscano F. A Review of Asphalt and Asphalt Mixture Aging[J]. Ingeniería E Investigación, 2012, 33(1):5-12.
- [5] 蒋泽中,谢涛. 可拓评价方法在路面使用性能分析中的应用[J]. 辽宁工程技术大学学报,2005(6).
- [6] 胡建荣,江慧娟. 沥青路面使用性能综合评价指标研究[J]. 筑路机械与施工机械化,2007(5).
- [7] Tarefder R A, Zaman A M, Uddin W. Determining Hardness and Elastic Modulus of Asphalt by Nanoindentation[J]. International Journal of Geomechanics, 2010, 10(3):106-116.
- [8] Oliver W C, Pharr G M J. Improved Technique for Determining Hardness and Elastic Modulus Using Load and Displacement Sensing Indentation Experiments[J]. Journal of Materials Research, 1992,7(6):1 564-1 583.
- [9] Arifuzzaman M. Nano - Scale Evaluation of Moisture Damage in Asphalt[D]. The University of New Mexico, Albuquerque, New Mexico, 2010.
- [10] Khorasani S, Masad E, Kassem E, et al. Nano - Mechanical Characterization of Mastic, Aggregate, and Interfacial Zone in Asphalt Composites[J]. Journal of Testing & Evaluation, 2013, 41(6):924-932.
- [11] Zheng Y, Jun Yang, Zihan M, et al. Nanoindentation Characterization of Aging Gradient in Asphalt Mixtures [J]. Construction & Building Materials, 2019,214:187-195.
- [12] 李正中,田克,柴东然,等. 不同热再生拌和工艺对混合料再生效果的影响研究[J]. 中外公路,2019(2).