

河北省高速公路路面结构服役温度场研究

齐树平¹, 王联芳², 靳彦彪³, 王敬凌⁴

- (1. 河北交通投资集团有限公司, 石家庄 050000;
2. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804;
3. 河北省交通规划设计研究院有限公司 河北省道路智能监测与运维技术创新中心, 石家庄 050000;
4. 东南大学 交通学院, 南京 211189)

摘 要: 为明确河北省不同地区的路面结构服役温度, 将河北省高速公路划分为四类服役温区, 采用 COM-SOL 有限元软件, 计算了各温区代表性路面结构高、中、低温季节的温度场, 确定各服役温区不同层位的材料性能试验温度。结果表明: 保定以南高、中、低温季节路面结构服役温度均相对较高, 高温季节路表温度达 65 °C; 保定以北和高寒地区服役条件接近, 但高寒地区低温季节服役温度低至 -25 °C, 较保定以北低 5 °C; 沿海地区高温季节服役温度相对最低, 高温低温季节服役温度极值之差较小。四个服役温区高温性能试验温度接近, 低温性能试验温度差异较大。研究成果可为不同温区材料性能评价和结构设计提供参考。

关键词: 道路工程; 温度场; 有限元; 路面结构; 材料性能试验

中图分类号: U416 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2026) 05-0084-07

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2026.05.013

Study on Service Temperature Field of Highway Pavement Structures in Hebei Province

QI Shuping¹, WANG Lianfang², JIN Yanbiao³, WANG Jingling⁴

- (1. Hebei Transportation Investment Group Company Limited, Shijiazhuang 050000, China;
2. Road and Traffic Engineering Key Laboratory of Education Ministry, Tongji University, Shanghai 201804, China;
3. Hebei Provincial Road Intelligent Monitoring and Maintenance Technology Innovation Centre,
Hebei Provincial Communications Planning, Design and Research Institute
Co., Ltd., Shijiazhuang 050000, China;
4. School of Transportation, Southeast University, Nanjing 211189, China)

Abstract: To clarify the pavement service temperatures in different regions and to determine the test temperatures for pavement material, the highways under the jurisdiction of Hebei Transportation Investment Group were divided into four service temperature zones. COMSOL finite element software was employed to calculate the temperature fields of representative pavement structures in high, medium, and low-temperature seasons for each zone, and the material performance test temperatures for different layers in

作者简介: 齐树平 (1967—), 男, 硕士, 正高级工程师, 研究方向: 交通企业经营管理。

通信作者: 王敬凌 (1999—), 男, 博士研究生, 研究方向: 高速公路养护。

收稿日期: 2024-07-03

each service zone were determined. The results indicate that the pavement service temperatures in the high, medium, and low-temperature seasons are relatively higher in areas south of Baoding, with surface temperatures reaching up to 65 °C during the high-temperature season. The service conditions in areas north of Baoding are similar to those in high-cold zone, but the low-temperature service temperature in high-cold zone can drop to as low as -25 °C, which is 5 °C lower than in areas north of Baoding. Coastal regions exhibit the lowest high-temperature service temperatures, with a smaller difference between the extreme temperatures of the high and low-temperature seasons. The high-temperature performance test temperatures across the four service zones are relatively similar, while there are significant differences in the low-temperature performance test temperatures. The findings provide a reference for performance evaluation and structural design of materials in different temperature ranges.

Key words: road engineering; temperature field; finite element; pavement structure; material performance test

0 引言

高速公路沥青路面结构在不同气候环境下的服役温度场直接影响其路用性能,是确保路面安全与延长使用寿命的关键所在^[1]。当前中国区域气候变化趋势明显,特别是河北省夏季温度持续升高,冬季极端低温事件频发,对沥青路面材料的性能评价提出更高要求^[2]。准确确定河北省不同地区路面的服役温度场,对于制定区域性材料试验温度、优化路用材料性能指标及精细化养护策略具有重要意义。

近年来,国内外学者对公路路面温度场的形成机制、变化规律及其对结构性能的影响进行了大量研究。在冷寒区或高原地区,路面温度梯度大且变化剧烈,被认为是引发热裂缝和冻胀沉降的主导因素^[3]。高峰等^[4]采用光纤 Bragg 光栅传感器监测了沥青路面结构的温度与应变;吴建良等^[5]基于实测数据,提出了沥青路面温度场的处理与拟合方法;Wu 等^[6]基于内蒙古地区多年的全尺寸现场监测,指出冬季的热量积累区与春季的水分迁移区高度重合,是导致路面结构早期破坏的重要因素;Zhao 等^[7]通过埋设传感器,监测了就地冷再生路面的温湿度变化以确定罩面加铺时机。

在温度场建模方面,有限元法被广泛应用于模拟路面不同层位的热传导特性和时间演变过程。Jiang 等^[8]考虑热传导、热对流与热辐射效应,建立并验证了路面结构的温度场模型;Li 等^[9]发现,温度和太阳辐射对路面温度场影响显著,面层材料的温度收缩系数和模量则在温度场控制下进一步影响路面结构温度应力的发展;范世平^[10]基于路面结构温度场有限元模型,进一步编写了力学迭代计算程序,构建了考虑温度和深度的沥青层动态模量预估模型。

在区域分区方面,近年来研究者逐步尝试基于聚类算法、典型气象参数对公路温度服役区进行划分,以提升设计代表性。Fang 等^[11]采用协同克里金插值法的温度结果与反距离权重插值法的降水结果,综合构建了中国标准气候分区系统;Yang 等^[12]使用 PCA 结合 K-means 聚类算法,综合考虑温度、降水和辐射因素,将研究区划分为 4 种典型的气候区域;Zhao 等^[13]基于 ArcGIS 平台,采用聚类分析和图层叠加法建立了内蒙古地区的服役区划,并使用路面历史性能数据验证区划的合理性。

尽管已有大量关于高原、寒区以及季节冻土区高速公路路面温度场的研究,但多数集中在典型个案、局部结构或单一季节的温度响应上,对于区域性多时段、多层位温度场的系统研究仍较匮乏。此外,各省高速公路的材料性能评价和养护决策通常采用相同标准,省内气候差异被忽视^[14-15]。相同试验温度对不同服役温度的路面材料性能进行评价将得到失真的评价结果,从而导致养护决策失误和行车安全风险。在河北省这一南北温差显著、地貌和气象复杂的省份,尚缺乏基于全省范围分区的服役温度场构建与试验温度推荐体系。

为细化不同气候服役条件的高速公路管养水平,针对性制定试验方案,采用基于气象数据的 K 均值聚类法将河北省划分为 4 个典型服役温区,采用 COMSOL 有限元软件,系统分析了不同服役温区的河北省高速公路路面结构在高、中、低温季节的温度场,提取路面各结构层位的最不利服役温度以确定路面材料性能评价试验温度,为不同温区材料性能评价和结构设计提供定量基础,优化养护决策。

1 服役温区划分与模型建立

计算 2010~2023 年河北省春季、夏季和冬季的

研究与应用

气温均值栅格数据,采用 K 均值聚类法分别对三个季节的气温对应坐标进行分类,通过共现矩阵将三个季节的聚类标签进行二次聚类,得到河北省的 4 个气温分区。基于该气温分区,将河北省高速公路根据地理位置分为四种服役温区,即保定以南、保定以北、沿海地区和高寒地区。其中,沿海地区为唐山至秦皇岛连线以南,高寒地区为涞源至承德连线以北,保定以南为保定至北京连线以南,其余部分为保定以北。

在服役温区范围内选择典型地区气象站数据作为环境参数。综合考虑地理位置、路网密度、气温条件后,选择保定市清苑区、张家口市怀来县、唐山市乐亭县和张家口市康保县作为四个服役温区的

气象数据来源站点,从四个特征气象站提取 2010 年 7 月,2011 年 1 月,和 2011 年 4 月的气温、太阳辐射和风速数据,作为模型的环境数据输入。

根据服役温区划分,统计各服役温区的路面结构类型,选择最具代表性结构为该温区路面温度场的模型,典型路面结构见表 1。各层的长宽均为 3.75 m,各结构层的材料参数见表 2。模型边界条件设置为:上表面对流和辐射传热,侧面绝热,下表面恒温 15 ℃,模型内部仅热传导。

不同季节的模型均模拟该月份 1 日 0 时至 30 日 0 时的温度场变化,模拟步长为 0.5 h。面层结构各层位中心的顶部、中部、底部设置探针监测温度变化。

表 1 服役温区典型路面结构
Table 1 Typical pavement structures in service temperature zones

路面结构	保定以南		保定以北		沿海地区		高寒地区	
	材料	层厚/cm	材料	层厚/cm	材料	层厚/cm	材料	层厚/cm
上面层	SMA-13	4	SMA-13	4	AC-13	4	AC-13	4
中面层	ARHM-20	6	ARHM-20	6	AC-20	6	AC-20	6
下面层	ARHM-20	6	ATB-25	12	AC-25	8	ATB-25	10
上基层	稳定碎石	18	稳定碎石	18	稳定碎石	18	级配碎石	18
下基层	稳定碎石	18	稳定碎石	18	稳定碎石	18	稳定碎石	18
底基层	稳定碎石	18	稳定碎石	18	稳定土	18	稳定碎石	16
土基	压实土	9 300	压实土	9 300	压实土	9 300	压实土	9 300

表 2 结构层材料参数
Table 2 Material parameters of structural layer

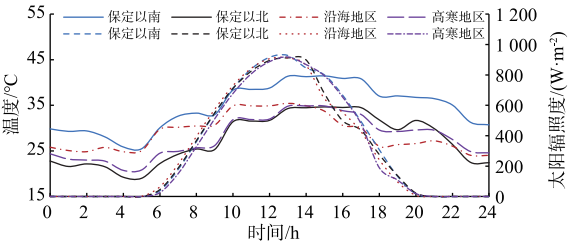
材料参数	密度 /[(kg/m ³)]	导热系数 /[W/(m · K)]	恒压热容 /[J/(kg · K)]
SMA-13	2 560	1.79	1 015
AC-13	2 500	1.86	1 073
ARHM-20	2 400	1.88	1 262
AC-20	2 480	1.88	1 067
AC-25	2 465	1.73	1 026
ATB-25	2 300	1.30	800
稳定碎石	2 200	1.10	830
稳定土	2 100	1.11	800
级配碎石	2 300	1.20	600
土基	1 800	1.30	860

2 路面结构层服役温度场

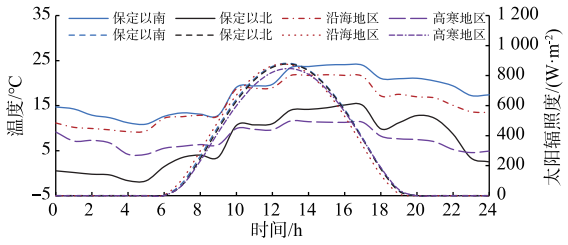
2.1 服役温区代表时段气象

根据模拟季节的气象数据,选择具有代表性的时段分析服役温度。图 1 为各季节对应计算月份中代表时段的气温和太阳辐射度。高温季节各地气温在 15~45 ℃ 之间波动,保定以南气温较高,保定以北和高寒地区较保定以南低约 7 ℃,四个服役温区太阳辐射度状况几乎相同。中温季节各地气温处于 0~

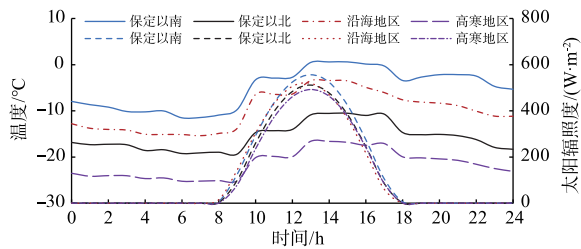
25 ℃ 区间,保定以南和沿海地区气温相对较高。低温季节四个服役温区气温差异显著,高寒地区气温最低至-25 ℃,保定以南气温最低仅-12 ℃。四个服役温区在三个季节均呈现保定以南>沿海地区>保定以北>高寒地区的温度趋势。



(a) 高温季节



(b) 中温季节



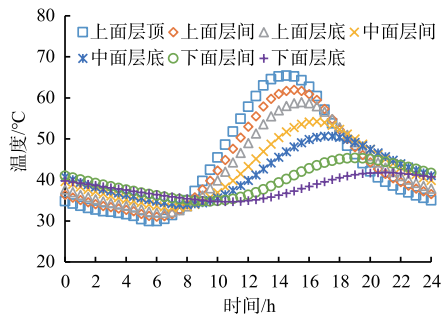
(c) 低温季节

图 1 气温和太阳辐照度

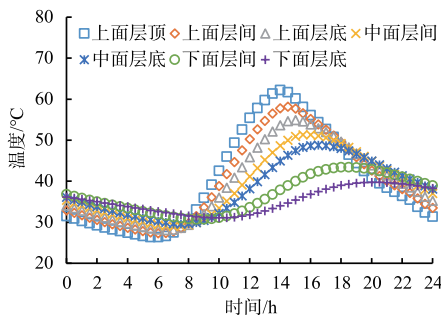
Fig. 1 Temperature and solar irradiance

2.2 高温季节

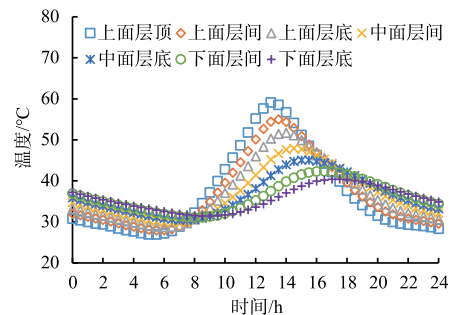
图 2 为四个服役温区高温季节代表时段路面结构温度场变化规律。随着路面深度增加，温度降低且波动平缓。保定以南和保定以北路面各结构层间温差较大，沿海地区和高寒地区路面各结构层间温差相对较小。将各服役温区的路面温度场随时间变化数据降维为当日平均温度，结果如图 3 (a) 所示。从平均温度上看，保定以南各结构层温度显著高于其他三个服役温区，沿海地区气温最低。定义各探针点位最高温为最不利服役温度，获得路面各结构层的最不利温度如图 3 (b) 所示。尽管各服役温区路面平均温度差异较大，但最不利温度差异较小。保定以南最高温为 65 °C，沿海地区路面最高温为 59 °C。



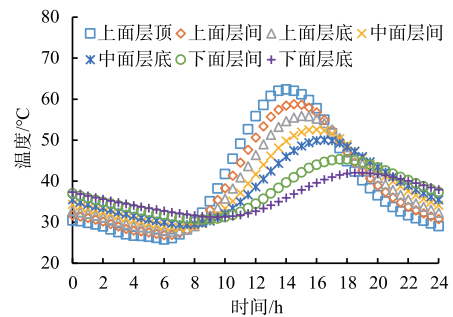
(a) 保定以南



(b) 保定以北



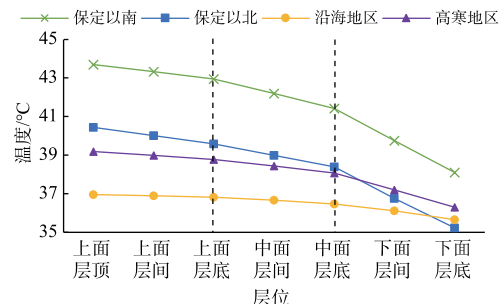
(c) 沿海地区



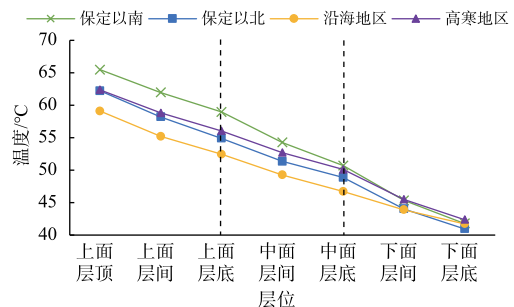
(d) 高寒地区

图 2 高温季节路面结构温度场

Fig. 2 Pavement structure temperature field in high-temperature season



(a) 各结构层平均温度



(b) 各结构层最不利服役温度

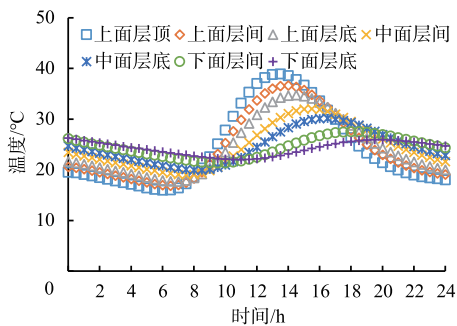
图 3 高温季节路面结构温度变化规律

Fig. 3 Variation rule of pavement structure temperature field in high-temperature season

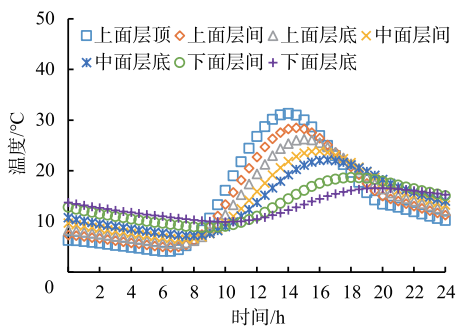
研究与应用

2.3 中温季节

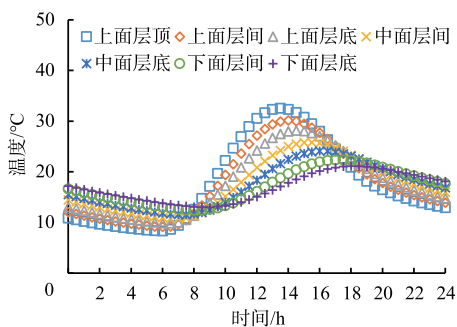
由图 4 可知，保定以北路面各结构层间极值温差相对较大，沿海和高寒地区较小。沥青路面的疲劳裂缝通常发生在温度适中且时间占比较长的中温季节。由图 5 可知，中温季节路面各结构层平均服役温度相同，各服役温区之间差异较大。保定以南服役温度较高，接近 25℃。保定以北和高寒地区服役温度接近，均为 15℃。尽管保定以南和沿海地区的气温和太阳辐照状况接近，但服役温度并不相同，不能简单地依据气温和太阳辐照来确定路面结构层内的温度状况。



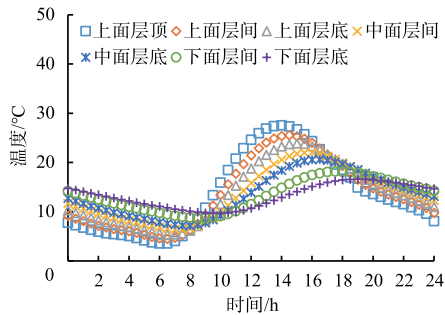
(a) 保定以南



(b) 保定以北



(c) 沿海地区



(d) 高寒地区

图 4 中温季节路面结构温度场

Fig. 4 Pavement structure temperature field in mid-temperature season

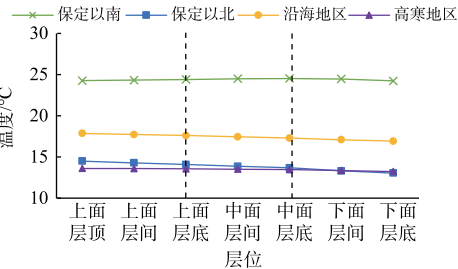
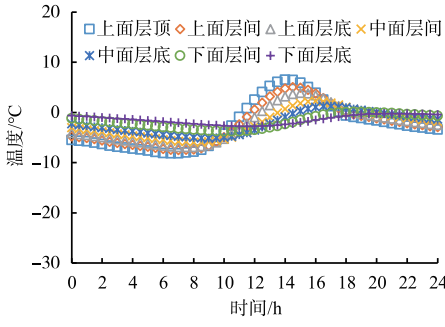


图 5 中温季节各结构层平均温度

Fig. 5 Average temperature for each structural layer in mid-temperature season

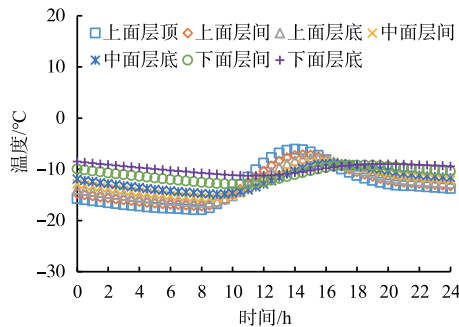
2.4 低温季节

由图 6 可知，相较于高温和中温季节，低温季节路面各结构层内温度波动平缓，结构层间温差较小。如图 7 (a) 所示，不同服役温区间的结构层平均温度，随着路面深度增加，结构层温度上升。保定以南和沿海区域低温季节路面结构层平均温度在 -10℃ 以上，保定以北和高寒地区温度则较低。路面各结构层最不利服役温度如图 7 (b) 所示。高寒地区上面层顶最不利时刻低于 -25℃，保定以南和沿海地区最不利服役温度为 -10℃。

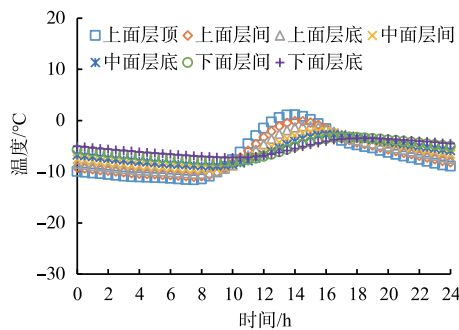


(a) 保定以南

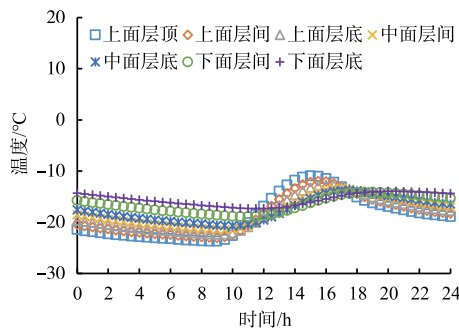
研究与应用



(b) 保定以北

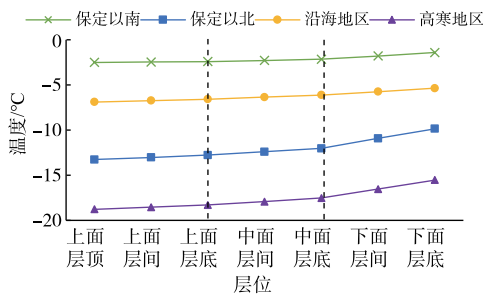


(c) 沿海地区

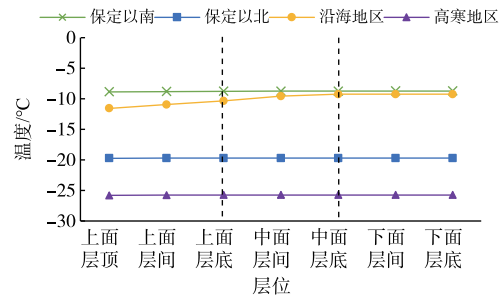


(d) 高寒地区

图 6 低温季节路面结构温度场
Fig. 6 Pavement structure temperature field in low-temperature season



(a) 各结构层平均温度



(b) 各结构层最不利服役温度

图 7 低温季节路面结构温度变化规律

Fig. 7 Variation rule of pavement structure temperature field in low-temperature season

3 材料性能试验温度

路面芯样材料性能评价试验能够把握高速公路服役性能，利于科学决策、精准养护的贯彻实施。确定材料性能的试验温度对提高评价精度，提高养护效益具有重要意义。基于各服役温区高、中、低温季节路面温度场的计算，取路面各结构层层间极值温度作为试验温度，取均值温度作为中温耐久试验的试验温度，见表 3。由于高温季节最不利温度在深度方向上存在梯度差异，路面上面层试验温度最高至 62 ℃，同一服役温区各层的中低试验温度相同，高寒地区低温性能试验温度低至 -25 ℃。

表 3 各结构层材料性能试验温度

Table 3 Material performance test temperature for each structural layer

温区	高温稳定性试验			中温耐久性试验			低温抗裂性试验		
	上	中	下	上	中	下	上	中	下
保定以南	62	54	45	25	25	25	-10	-10	-10
保定以北	59	52	45	15	15	15	-20	-20	-20
沿海	55	50	45	18	18	18	-10	-10	-10
高寒	59	52	45	15	15	15	-25	-25	-25

4 结论

根据气象特征对河北省高速公路进行分区，研究了各服役温区在高、中、低温季节的路面结构服役温度场，确定了对应的材料性能试验温度。主要结论如下：

(1) 采用 K 均值聚类法对河北省进行温度分区，确定了高速公路的四个服役温区：保定以南、保定以北、沿海地区和高寒地区。

(2) 高温季节，保定以南路面结构平均服役温

研究与应用

度较高,沿海地区相对较低。四个服役温区路面结构的最不利服役温度差异较小;中温季节,河北省高速的疲劳性能服役温度在 $15\sim 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间,保定以南最高,高寒地区和保定以北相对较低;低温季节,四个服役温区的低温平均服役温度差距较大,保定以南和沿海地区的最不利服役温度接近 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$,高寒地区低至 $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

(3) 使用各结构层层间最不利温度确定了性能评价试验温度。高温性能试验中,同服役温区不同结构层的试验温度呈现梯度变化,不同服役温区间的试验温度差异较小;中低温性能试验中,同服役温区不同层位的试验温度相同,不同服役温区间的试验温度差异较大。

参 考 文 献

- [1] 陈昕. 沥青路面横缝发展对路面结构性能的影响研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2020, 34 (1): 134-140.
- [2] 张颖森, 高颖, 郭庆林, 等. 老化前后沥青与沥青混合料指标相关性分析 [J]. 河北工程大学学报 (自然科学版), 2022, 39 (3): 70-76.
- [3] Tabesh M, Mahmoudzadeh A, Arezoumand S. A reliability - base method for thermal cracking prediction in asphalt concrete [J]. Construction and Building Materials, 2023, 409: 133912.
- [4] 高峰, 鲁洁, 周若零, 等. FBG 传感器在沥青路面中的应用研究进展 [J]. 传感器与微系统, 2024, 43 (11): 164-168.
- [5] 吴建良, 孙立军. 温度场实测温度数据的处理研究 [J]. 交通科技, 2012 (4): 91-93.
- [6] Wu Di, Jin Long, Leng Yanqiu, et al. A full-scale field experiment to study the hydrothermal behavior of the multilayer asphalt concrete pavement in cold regions [J]. Construction and Building Materials, 2021, 267: 121855.
- [7] Zhao Zili, Jiang Jiwang, Chen Zongwu, et al. Moisture migration of bitumen emulsion - based cold in - place recycling pavement after compaction: Real-time field measurement and laboratory investigation [J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 360: 132213.
- [8] Jiang Jiwang, Wang Jingling, Zhao Zili, et al. Drying behavior modeling of bitumen emulsion - based cold in - place recycling pavement considering heat-moisture coupling effects [J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 429: 139634.
- [9] Li Bin, Xie Yadong, Bi Yanqiu, et al. Modeling and assessment of temperature and thermal stress field of asphalt pavement on the tibetan plateau [J]. Buildings, 2024, 14 (7): 2196.
- [10] 范世平. 基于温度场/模量场的沥青路面热-力学响应与温度疲劳损伤分析 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2024.
- [11] Fang Naren, Chang Huanyu, Hu Shiqiang, et al. Climate zoning of asphalt pavement based on spatial interpolation and Fuzzy C-Means algorithm [J]. International Journal of Pavement Engineering, 2023, 24 (2): 2072498.
- [12] Yang Yanhai, Qian Baitong, Xu Qicheng, et al. Climate regionalization of asphalt pavement based on the k - means clustering algorithm [J]. Advances in Civil Engineering, 2020, 2020 (1): 6917243.
- [13] Zhao Kaiwen, Ma Xianying, Zhang Hongwei, et al. Performance zoning method of asphalt pavement in cold regions based on climate indexes: A case study of Inner Mongolia, China [J]. Construction and Building Materials, 2022, 361: 129650.
- [14] 杨洋. 基于材料性能的高速公路路用性能评价与养护决策研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2020.
- [15] 周岚. 高速公路沥青路面使用性能评价及预测研究 [D]. 南京: 东南大学, 2015.

网址: www.fmhzhly.com