

城市道路沥青路面温度场数值模拟分析

黄方,高煜

(中国市政工程中南设计研究总院有限公司,湖北武汉430010)

摘要:为了探究环境温度及沥青材料热属性参数对路面结构温度场的影响,选取4种高温情况开展沥青路面温度场模拟,分析不同高温条件、不同材料热属性参数下的路面各结构层的温度变化,主要结论如下:路面结构温度随着环境温度升高而升高,但增长幅度沿深度方向逐渐递减,路表面下0~1 m内温度受环境温度影响较大,1~3 m内受影响减小;各面层结构温度变化规律基本与环境温度相似,存在最高温度滞后现象,中面层滞后约1 h,下面层滞后约3 h;通过降低路面材料太阳辐射吸收率,能够显著降低路面温度;上面层材料比热容和热传导率对结构整体温度的影响较为显著。

关键词:城市道路;沥青路面;温度;有限元

中图分类号:U416.217

文献标志码:B

文章编号:1009-7716(2024)09-0224-04

0 引言

车辙是高温地区城市道路沥青路面的常见病害。高温导致材料的黏度、抗压强度、抗剪强度等降低,对沥青混合料的力学特性产生较大影响。高温下各层路面材料蠕变特性不同,结构内部温度等存在差异^[1],因此车辙研究时采用恒定温度是不符合实际工况的。通过开展沥青路面的温度场研究,分析环境温度、太阳辐射等因素对路面各结构层温度的影响,能够为进一步开展温度应力及荷载作用下的车辙研究提供支撑^[2]。本文结合中部地区某城市的夏季温度历史数据,开展路面结构温度场变化规律及影响因素研究。

1 有限元模型建立

1.1 沥青路面材料参数选择

采用ABAQUS有限元软件建立沥青路面3D模型,路面结构为城市道路常用的沥青路面^[3]:4 cm细粒式改性沥青混凝土AC13+6 cm中粒式沥青混凝土AC20+8 cm粗粒式沥青混凝土AC25+32 cm 5%水泥稳定碎石+15 cm级配碎石+土基。路面结构模型尺寸为4 m×4 m×3 m。各层材料热属性参数见表1。

收稿日期:2023-08-25

作者简介:黄方(1993—),男,硕士,工程师,从事城市道路路线、路基路面研究工作。

表1 道路结构层热属性参数情况

结构层类型	密度/ (kg·m ⁻³)	热传导率/ (J/m·h·℃)	热容量/ (J/kg·℃)	太阳 辐射率	路面 反射率
沥青各 面层结构	2 460	4 780	1 180	0.9	0.81
水稳碎石 基层	2 230	5 627	922	0.9	0.81
级配 碎石层	2 200	5 159	953	0.9	0.81
土基	1 850	5 627	1 050	0.9	0.81

1.2 模型温度的确定

路面内部结构的温度变化主要受上面层热能传递影响,因此模型建立时主要从热对流、热传导、太阳辐射方面模拟分析不同环境下的结构层温度场变化^[4]。为了简化模型,结构层初始温度设置为沿深度的梯度温度变化形式,水平方向的温度相同。本文以中部某省会城市气象局统计的历史温度资料为基础,确定模拟温度。该地环境高温为7~8月,最高历史温度为43℃,选取温度高于35℃的两周作为温度变化观察对象,最高温度见表2。考虑到高温集中在35~41℃,选取35、37、39、41℃作为有限元模拟温度。

2 数值模拟结果与分析

2.1 温度场随深度的变化规律

道路热量传递的累积性,仅模拟单日温度变化并不能有效反映温度场变化规律,本文在模拟过程中发现,3 d后的各结构层温度变化幅度较小(3℃以内),能够作为温度场分析的基础。因此在整个模拟试验

表 2 最高温度统计

日期	温度 /℃
7.21	35
7.22	35
7.23	36
7.24	37
7.25	38
7.26	38
7.27	39
7.28	38
7.29	40
7.30	41
7.31	40
8.10	39
8.20	40
8.30	38

中,本文以 4 d 为模拟时长,观察同一温度下的结构层温度场变化。图 1 为温度 41℃ 的沥青路面模拟结果。

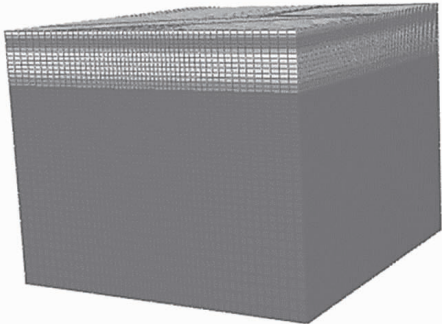
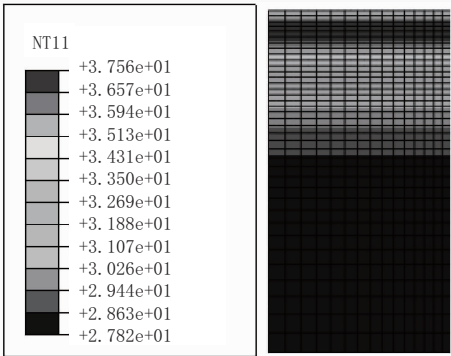


图 1 41℃下沥青路面温度场模拟图

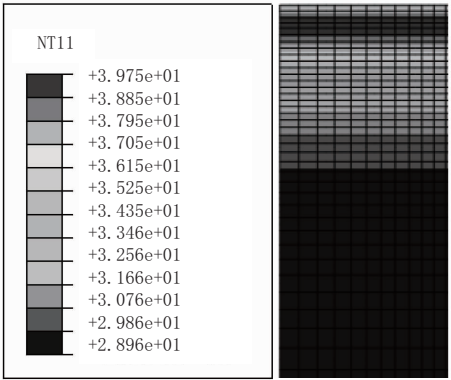
篇幅所限,图 2 仅展示温度 35℃ 与 41℃ 的结果。整体来看,相比初始温度,4 d 后的路面结构最终温度有所升高,但这一现象仅出现在路面一定范围内。路面顶面以下 0~1 m 范围内为温度变化最明显区域,1~2 m 范围内温度变化小于 2℃,2 m 以下温度基本无变化。在 1 d 时,结构最高温度位于路面表层;1 d 后,最高温度位于距离路表 20cm 的结构层附近。原因在于路表温度极易受环境温度的影响,夜间温度降低,路表温度迅速下降,而近地面处受环境温度影响相对较小,且受到表层放热影响,导致温度高于表层^[5]。

2.2 温度场随时间的变化规律

图 3 为 4 种温度下路面结构在第 4 天的温度变化情况。可以看出,5 时之前,上面层温度最低,道路结构温度沿深度方向升高,且各面层结构的温度均高于环境温度。原因在于越靠近大气的结构,受到环



(a)35℃



(b)41℃

图 2 高温持续 4 d 后路面结构温度场情况

境温度的影响越大,尤其是上面层顶部与环境直接接触,热交换迅速导致温度下降最显著。上面层顶部温度变化曲线与环境曲线基本一致,中面层顶、下面层顶、下面层底的温度极值对应的时间,相比上面层顶要滞后。中面层滞后 1 h,下面层滞后 3 h。下面层底的温度变化曲线相对其他结构层而言更为平缓,温差相对较小,表明下面层受影响相对较小;而上面层顶与中面层顶温度曲线存在明显极值,且温度变化剧烈,说明受环境温度影响较大。

2.3 路面各面层温度相关性分析

路面结构温度场的变化主要受两方面因素的影响,一是自身材料的级配、孔隙率等,二是环境温度、太阳辐射、风速等外部因素。各个因素对温度场的影响程度有所区别,同时温度场的变化存在积累性与滞后性,也导致基于上述因素建立温度场的模型较为困难。

本文主要分析环境温度与路面温度场的关系。因此对温度变化的模拟数据进行拟合分析,计算不同面层部位与环境温度的相关性,最终发现采用三次函数的拟合效果最优^[6]。其中上面层与环境温度的拟合效果最优,相关系数超过 0.95,表明具备较高的相关性,结果见表 3;而中面层顶的相关系数为 0.77,

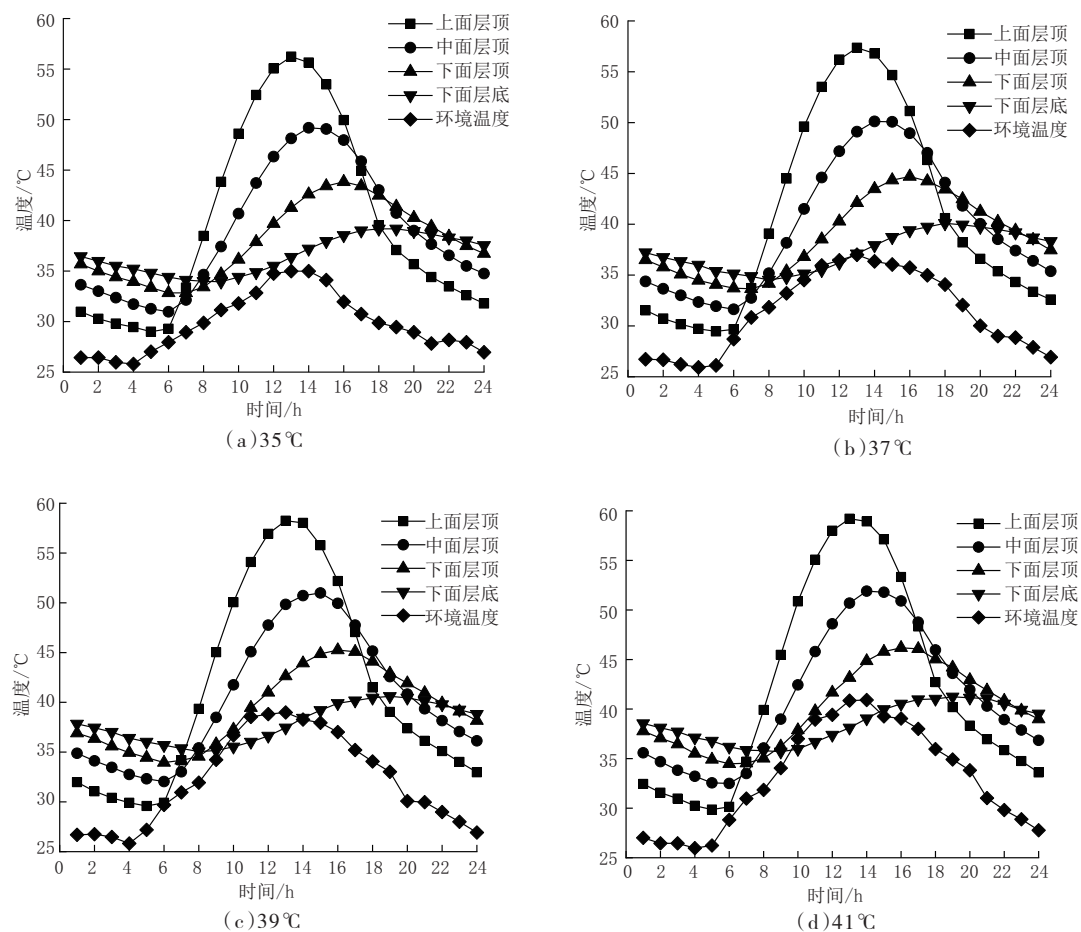


图3 不同高温下第4天的温度-时间曲线

具备一定的相关性；下面层顶及下面层底的相关性不明显。

表3 上面层温度拟合情况	
最高持续温度 /℃	温度拟合函数
35	$Y=-0.129\times3+10.93\ 3\times2-330.532\times+3\ 351.36$
37	$Y=0.031\times3-1.686\times2+47.703\times-432.132$
39	$Y=-0.004\ 6\times3+0.468\times2-13.474\times+210.261$
41	$Y=-0.002\times3-0.036\times2-0.439\times+36.851$

3 路面高温温度场影响因素分析

3.1 太阳辐射率的影响

辐射率是物体辐射能力与黑体辐射能力的比值,用于表征物体辐射能力。辐射率能够反映沥青路面反射太阳光、发散热量的能力。相关研究^[7]表明,通过改变沥青混合料的集料组成,如添加陶瓷颗粒、彩色矿粉等,可以提高路面对特定波段波长的反射能力。本文采用0.6、0.7、0.8、0.9四个太阳辐射率开展模拟计算。根据模拟结果,13时的路面温度最高,因此分析此时间段不同太阳辐射率下面层结构的温度变化情况,结果如图4所示。各结构层温度均随着太

阳辐射率的增大而下降,太阳辐射率从0.5增大至0.9,上面层顶温度下降3.7℃,幅度5.97%;中面层顶下降2.6℃,幅度4.95%;下面层顶下降2.1℃,幅度4.66%;下面层底下降1.8℃,幅度4.54%。表明上面层温度受太阳辐射率影响较大,但是整体温度-辐射率曲线较为平缓。因此,提高表层反射率能够防止路面温度升高,但是效果有限。

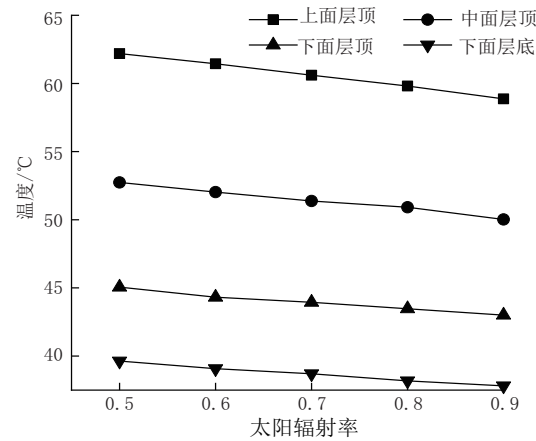


图4 各结构层最高温度与太阳辐射率的关系

3.2 太阳辐射吸收率的影响

太阳辐射吸收率能够表征物体对太阳辐射能力的吸收能力。相关研究^[7]表明,沥青混合料的太阳辐

射吸收率为 0.6~0.8,因此本文选择 0.5、0.6、0.7、0.8、0.9 五个辐射吸收率进行研究。图 5 为不同吸收率下各面层结构的温度变化曲线。可以看出,各结构层的温度均随着太阳辐射吸收率的增大而增大,吸收率从 0.5 增至 0.9,上面层顶、中面层顶、下面层顶、下面层底的温度分别上升 13.6、9.7、7.7、6.3℃,幅度较大。因此,采取措施降低路面材料的太阳辐射吸收率,对于降低路面温度具有显著效果。

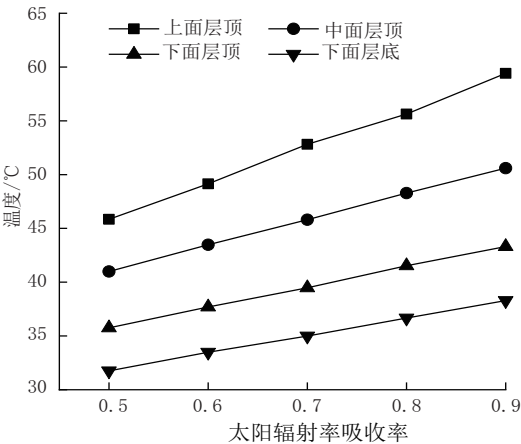


图 5 各结构层最高温度与辐射吸收率的关系

3.3 材料热容量的影响

热容量是指材料升高温度需要的热量,热容量大则材料升温的能量需求高,温度状态改变较难^[8]。本文选择 500、1 000、1 500、2 000 J/kg·℃ 四个沥青混合料比热容进行研究,分析各面层结构受比热容的影响,结果如图 6 所示。整体来看,随着混合料比热容的增大,各面层结构的温度均有所降低,但下降幅度较小。比热容从 500 J/kg·℃ 增至 2 000 J/kg·℃,上面层顶、中面层顶、下面层顶、下面层底的温度分别下降 3.0、1.6、1.5、1.5℃,上面层温度受比热容影响最明显。因此,增大上面层材料比热容,其温度升高所需能量增大,能够减少上面层热量向下部结构的传递,有利于路面结构的整体降温。

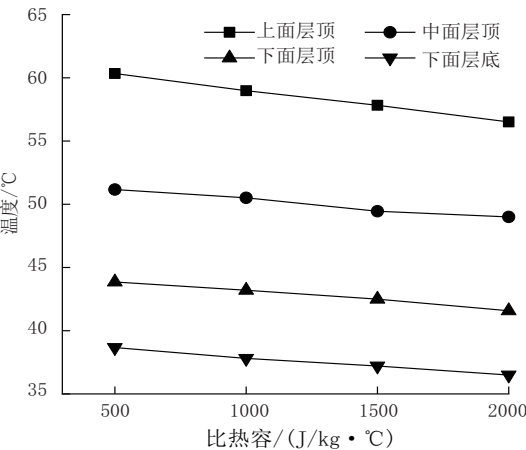


图 6 各结构层最高温度与比热容的关系

3.4 上面层热传导率的影响

热传导率反映材料在一定条件下传递热量的效率,传导率越大,材料的传热性能越强。本文选取 2 000、4 000、6 000、8 000、10 000 J/m·h·℃ 五种上面层传导率,模拟研究各面层结构温度随传导率的变化,结果如图 7 所示。可以看出,热传导率从 2 000 J/m·h·℃ 增至 10 000 J/m·h·℃,上面层顶、中面层顶、下面层顶、下面层底的温度分别为下降 4.4℃、上升 9℃、上升 6.9℃、上升 5.4℃。随着热传导率的升高,上面层温度下降的速率逐渐增大,同时中、下面层温度上升速率增大,表明材料的热传导率对结构整体温度的影响较为明显,对中面层的温度影响最显著。

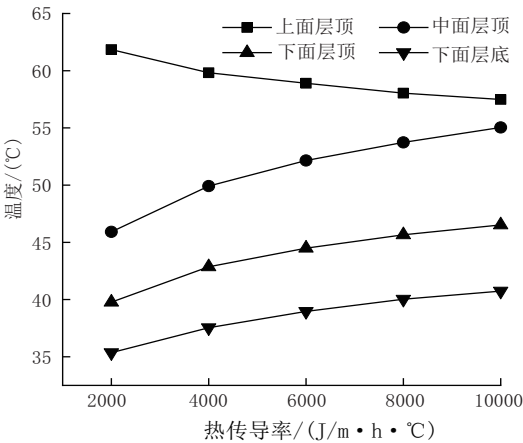


图 7 各结构层最高温度与热传导率的关系

4 结 论

本文选取了 35、37、39、41℃ 四种高温情况开展沥青路面温度场模拟,分析持续高温条件下路面各结构层的温度变化,同时探究太阳辐射率、太阳辐射吸收率、材料热容量、上面层热传导率等因素对路面温度场的影响,主要结论如下:

- (1)路面结构温度随着环境温度升高而升高,但增长幅度沿深度方向逐渐递减,路表面下 0~1 m 范围温度受环境温度影响较大,1~3 m 范围内受环境温度影响减小。
- (2)各面层结构温度变化规律基本与环境温度相似,存在最高温度滞后现象。上面层基本无滞后,中面层滞后约 1 h,下面层滞后约 3 h。
- (3)随着太阳辐射率的增大,各结构层温度均下降,但是整体温度-辐射率曲线较为平缓。因此,通过提高表层反射率能够防止路面温度升高,但是效果有限。
- (4)随着太阳辐射吸收率的增大,各结构层的温

(下转第 231 页)

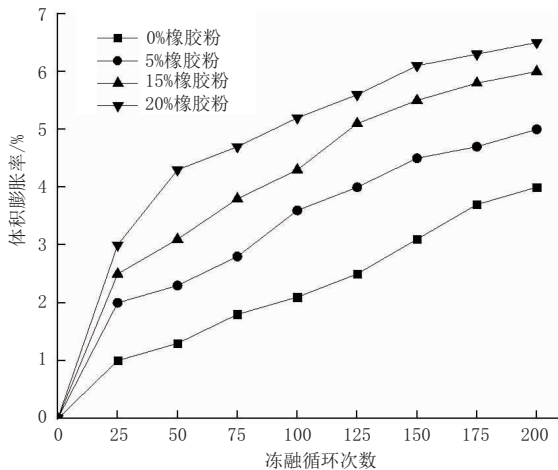


图 8 3 d 龄期不同橡胶粉掺量体积膨胀率

材料体积膨胀率最大为 6.5%。

(2)通过增加橡胶粉的掺量,可提高试件的体积膨胀率。当橡胶粉掺量增加至 20%时,其体积膨胀率均控制在 3%以内。这表明橡胶水泥类压浆材料在冻融循环作用下,不仅体积膨胀率较好,而且稳定性较高。

4 结 语

(1)在盐-冻融循环作用下,橡胶水泥类压浆材料各项力学指标具有明显的优势。这表明橡胶粉的掺入,使压浆材料的力学性能得到显著提升。其提升效果由优到劣依次为动弹性模量、抗压强度、抗折强度。

(2)对于城市主干路而言,应优先选择增加橡胶粉掺量,以确保注浆完成后,路面结构具有较高承载

能力。对于交通量较小的城市次干路及以下道路,应优先考虑增加养生时间。

(3)随着橡胶粉掺量的增加,试件的抗盐-冻融能力逐渐增强。但当橡胶粉掺量达到一定数值后,其抗盐-冻融效果趋于平缓。因此,在工程实践中,建议将橡胶粉掺量控制在 12%,以获得最大效果。

(4)试件体积膨胀率均控制在 3%以内,表明材料体积膨胀率较好,且稳定性较高。

参考文献:

- [1] 朱洪洲,张瑞,吴小军,等.不同基层类型水泥混凝土路面温度应力的差异[J].公路交通科技,2023,40(3):8-16.
- [2] J ALEXANDRE BOGAS, J DE BRITO, DUARTE RAMOS. Freeze-thaw resistance of concrete produced with fine recycled concrete aggregates[J].Journal of Cleaner Production, 2016(115):294-306.
- [3] 范晓燕,侯忠非,台电仓.基于复合路面板底脱空对路面弯沉影响分析研究[J].公路,2022(3):65-70.
- [4] 张一奔,徐飞,郑山锁.冻融损伤混凝土研究综述[J].混凝土,2021(3):10-13.
- [5] 肖力光,李正鹏.混凝土耐久性的影响因素及研究进展[J].混凝土,2022(12):1-5,16.
- [6] 宁喜亮,韩丰.混凝土渗透性试验方法研究进展[J].混凝土,2023(3):12-18.
- [7] 徐存东,李智睿,李欣达,等.盐冻循环下混凝土结构的寿命预测[J].混凝土,2021(11):29-32,37.
- [8] 冯琦,王宇斌.粉煤灰再生混凝土在干湿循环-抗硫酸盐侵蚀耦合条件下的耐久性研究[J].混凝土,2021(5):42-45,50.
- [9] 王晓强,王乾.无机水泥类脱空修补材料冻融损伤试验研究[J].混凝土,2018(3):75-78.

(上接第 227 页)

度均增大,且增长幅度明显。因此,通过降低路面材料太阳辐射吸收率,能够显著降低路面温度。

(5)随着混合料比热容的增大,各面层结构的温度均有所降低,上面层温度受比热容影响最明显,但整体下降幅度较小。

(6)随着热传导率的增大,上面层温度明显下降,中面层、下面层温度明显上升,且速率逐渐增大,表明上面层材料热传导率对结构整体温度的影响较为显著。

参考文献:

- [1] 王骏飞,骆卫忠,袁飞.温度场下城市沥青路面车辙成因力学机理分析[J].工程技术研究,2023,8(9):22-24.

- [2] 赵玉璧,吴玉,林家琛.基于温度场的 BRT 沥青路面结构永久变形特性分析[J].交通科技,2022(6):6-10.
- [3] 李文克,武书华.严酷气候条件下 SBS 改性沥青路面结构温度场研究[J].北方交通,2022(7):57-61.
- [4] 郭学东,孙明志,韩硕,等.沥青混凝土温度应力影响因素分析[J].公路,2015,60(11):31-37.
- [5] 康晓革,郑耀,张慧梅.基于连续变温的沥青路面温度场与应力场有限元分析[J].公路,2020,65(1):191-195.
- [6] 梁学文.沥青路面温度场分布规律的回归分析[J].交通世界,2016(12):38-39.
- [7] 邱欣,陶珏强,施俊庆,等.热夹层条件下沥青路面温度梯度分布特征研究[J].浙江师范大学学报(自然科学版),2017,40(2):221-227.
- [8] 游思增,王金昌.大粒径沥青碎石基层道路温度场实测研究[J].低温建筑技术,2016,38(8):11-13,23.