第 36 卷　第 1 期　　石家庄铁道大学学报(自然科学版)　　Vol. 36　No. 1
2023 年 3 月　Journal of Shijiazhuang Tiedao University(Natural Science Edition)　Mar. 2023

# 变温重载作用下沥青路面结构动态变形特性研究

申冲冲[1]，　司春棣[2,3]，　凡涛涛[2,3]，　张孟强[4]，　高海波[4]

(1. 石家庄铁道大学 土木工程学院，河北 石家庄　050043；2. 石家庄铁道大学 交通运输学院，河北 石家庄　050043；
3. 石家庄铁道大学 省部共建交通工程结构力学行为与系统安全国家重点实验室，河北 石家庄　050043；
4. 河北省高速公路京雄筹建处，河北 保定　071799)

**摘要：**采用 ABAQUS 软件建立沥青路面三维模型，根据某工程所在地区 7 月份 1 天代表性温度，考虑沥青路面的材料性质随温度变化的特征，进行变温重载下路面结构温度场及变形分析。改变行车速度、接地压力等，量化不同深度结构层永久变形、剪切蠕变特征。结果表明，永久变形、剪切蠕变值在整个行车道路横向范围内呈正负交替变化；慢速(20～60 km/h)时，车速增大对永久变形、剪切蠕变的减小程度均明显高于快速(80～120 km/h)，永久变形、剪切蠕变主要出现在上中面层；行车速度低于 60 km/h、接地压力大于 0.9 MPa，路面永久变形发展快速增加。在夏季高温季节应限制慢速交通和超载重载车辆，适时错峰出行和洒水降温能有效减少车辙破坏。

**关键词：**车辙；蠕变；温度场；重载；车速

**中图分类号：**U416.217　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**2095-0373(2023)01-0054-08

目前大部分高速公路采用沥青路面，其具有安全性、舒适性以及耐久性[1]。车辙是沥青路面在重复交通荷载作用下产生的永久变形[2]。随着中国经济和物流运输的不断发展，越来越多的高速公路出现车辙病害[3]。

前人[4-6]通过研究发现在模拟变形时首先要研究路面温度场，通过对路面结构加载不同荷载作用轴次，发现荷载作用超过 50 万次后路面的永久变形趋于稳定。马雪城等[7]利用 ABAQUS 计算得出连续变温下铺装车辙的计算方法比恒温下的要准确。Hussan et al[8]通过室内试验，表明温度对于流动性车辙的影响更为显著。Sun et al [9]建立沥青路面 3D 温度有限元模型，得出了路面温度变化与路面深度的关系。其他研究也表明[10-13]，路面温度场受各层材料影响较大，特别是路表的辐射吸收率、材料的热力性质、对流条件等影响因素不容忽略。超载是车辙形成的主要原因[14-15]，研究重载对车辙的影响至关重要。张兰峰[16]通过建立路面结构模型，指出道路行驶要严格控制超载问题。宋海云[17]模拟沥青混凝土面层蠕变的发展规律，发现荷载的影响程度大于速度对于车辙的影响，值得重视。郭敏锐[18]通过改变不同轴载作用，发现减小行车荷载能有效降低竖向永久变形、纵向永久变形。

综上可知，目前采用有限元分析预估车辙的研究较多，已有大量研究成果，但是对变温重载下沥青路面温度场及变形分析研究仍有较大空间，依据河北某高速公路项目所在地区 7 月份 1 天 24 h 的代表性温度，分析路面温度场，在连续变温条件下研究温度、行车速度、轴载对沥青路面结构变形特性的影响规律，为路面设计和车辙防治提供借鉴。

## 1　沥青路面结构分析模型

### 1.1　有限元模型结构参数

路面模型如图 1 所示，长 6 m×宽 8 m×高 5 m，上面层为 4 cm SBS 改性沥青 SMA-13，中面层为 8 cm

**收稿日期：**2022-11-09　　**责任编辑：**车轩玉　　DOI：10.13319/j.cnki.sjztddxxbzrb.20220339
**基金项目：**国家自然科学基金(11972237)；河北省交通运输厅科技计划项目(JD-202006，JD-202007，JX-202010)
**作者简介：**申冲冲(1997—)，男，硕士研究生，研究方向为道路与铁道工程。E-mail：s15550169756@163.com
申冲冲，司春棣，凡涛涛，等. 变温重载作用下沥青路面结构动态变形特性研究[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版)，2023，36(1)：54-60，119.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

SBS 改性沥青 AC-20,下面层为 10 cm ATB-25,基层为 40 cm CTB,底基层为 20 cm CTB,最下部为土基。各结构层材料各向同性,连续接触,单元类型为 C3D8R,边界条件底面设置为 ENCASTRE(UX=URY=URZ=0),横向两侧面设置为 XSYMM(UX=URY=URZ=0),纵向两侧面设置为 ZSYMM(UZ=URX=URY=0)。

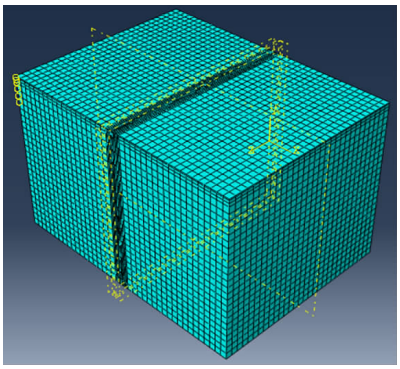

图 1　沥青路面三维模型

### 1.2　材料参数

采用时间硬化蠕变模型,路面材料的蠕变变形 $\varepsilon_{cr}$ 可表示为温度 $T$、应力 $q$ 以及时间 $t$ 的函数为

$$\dot{\varepsilon}_{cr}=Aq^{n}t^{m} \tag{1}$$

式中,$\dot{\varepsilon}_{cr}$ 为单轴等效蠕变应变率;$A$、$n$、$m$ 为模型参数。沥青路面材料参数见表 1 和表 2[19-21]。

表 1　材料热属性参数

| 参数 | 热传导率 $k$/(J·(m·h·℃)$^{-1}$) | 密度 $\rho$/(kg·m$^{-3}$) | 热容量 $C$/(J·(kg·℃)$^{-1}$) | 太阳辐射吸收率 $\alpha_s$ | 路面发射率 $\varepsilon$ | Stefan-Boltzmann 常数 $\sigma$/(J·(h·m$^2$·K$^4$)$^{-1}$) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| SMA-13 | 4 680 | 2 400 | 980 | | | |
| AC-20 | 5 040 | 2 400 | 900 | | | |
| ATB-25 | 4 320 | 2 400 | 815 | 0.9 | 0.81 | 2.041 092E-4 |
| CTB | 5 616 | 2 300 | 911.7 | | | |
| 土基 | 5 616 | 1 800 | 1 040 | | | |

表 2　材料力学参数

| 路面材料 | 温度/℃ | 动态模量 $E$/MPa | 泊松比 $\mu$ | $A$ | $n$ | $m$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| SMA-13 | 20 | 7 985.0 | 0.25 | 5.79E-011 | 0.937 | −0.592 |
| | 30 | 4 269.5 | 0.30 | 2.64E-009 | 0.862 | −0.587 |
| | 40 | 2 054.0 | 0.35 | 1.26E-008 | 0.792 | −0.577 |
| | 50 | 1 081.5 | 0.40 | 6.57E-007 | 0.414 | −0.525 |
| | 60 | 812.0 | 0.45 | 4.86E-006 | 0.336 | −0.502 |
| AC-20 | 20 | 11 717.0 | 0.30 | 5.53E-011 | 0.945 | −0.594 |
| | 30 | 6 834.0 | 0.30 | 2.15E-009 | 0.798 | −0.587 |
| | 40 | 3 732.0 | 0.35 | 3.24E-008 | 0.775 | −0.572 |
| | 50 | 1 978.0 | 0.40 | 4.13E-007 | 0.589 | −0.535 |
| | 60 | 1 106.0 | 0.45 | 3.77E-006 | 0.382 | −0.439 |
| ATB-25 | 20 | 10 225.0 | 0.30 | 4.25E-011 | 0.922 | −0.581 |
| | 30 | 6 870.0 | 0.30 | 3.13E-009 | 0.849 | −0.575 |
| | 40 | 3 980.0 | 0.35 | 1.69E-008 | 0.831 | −0.564 |
| | 50 | 2 103.0 | 0.40 | 2.38E-007 | 0.322 | −0.542 |
| | 60 | 1 240.0 | 0.45 | 3.33E-006 | 0.211 | −0.448 |
| CTB | — | 1 400.0 | 0.25 | — | — | — |
| 土基 | — | 400.0 | 0.40 | — | — | — |

### 1.3　荷载参数

为了简化计算并考虑适用性,采用矩形荷载等效车辆荷载[22],如图 2 所示。设置 0.9、1.1、1.3 MPa 荷载分别对应超载 29%、57%和 86%的情况。计算荷载参数见表 3。

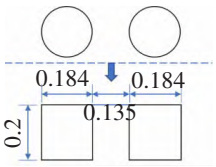


图 2　矩形荷载(单位:m)

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表 3 计算荷载参数

| 轮胎接地长度 $L$/m | 行车速度 $v$/(km·h$^{-1}$) | 一次加载作用时间/s | 轮载作用次数 $N$/万次 | 累计荷载作用时间 $t$/s |
|---|---|---|---|---|
| 0.2 | 80 | 0.009 | 50 | 4 500 |

## 2 沥青路面温度场模型建立与分析

表 4 数据来源于中国自然资源数据库。7 月份路面温度场结果如图 3 所示。

表 4 7 月份气象参数

| 月份 | 日最高气温/℃ | 日最低气温/℃ | 日照时间/h | 日太阳辐射总量/(MJ·m$^{-2}$) | 日均风速/(m·s$^{-1}$) |
|---|---|---|---|---|---|
| 7 | 36.1 | 21.8 | 12 | 24.6 | 2.8 |

由图 3 知,各结构层温度变化表现出明显的时间滞后性。面层受温度影响较大,随着一天中气温变化而呈现出由低到高再到低的变化趋势,敏感性强。基层和土基维持在恒定水平。7:00—17:00 时,深度越大,温度越低。1:00—6:00,深度越大,该层温度越高,从而也表明距离路表面越近,气温影响越大。上中下面层峰值分别为 54.45、46.12、35.42 ℃,依次递减,在 12:00—16:00 达到最高温度,与气温最高时间相吻合,路面温度甚至略高于 55 ℃,在重载和大交通量的共同作用下,极易发生较大的永久变形,宜控制慢速重载车辆行驶。

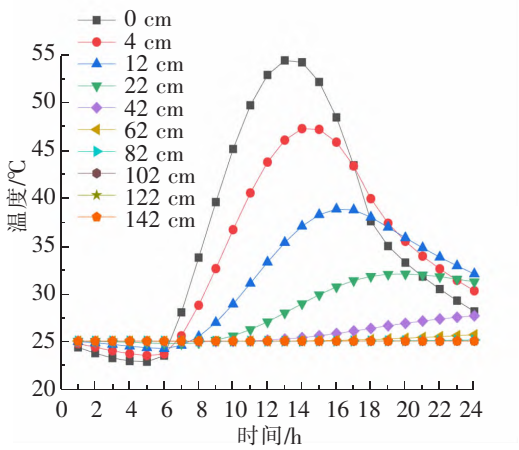


图 3 不同深度结构层温度变化

## 3 沥青路面结构的有限元结果分析

### 3.1 温度对永久变形的影响

3.1.1 连续变温下永久变形分析

标准轴载 0.7 MPa 以 80 km/h 作用路面 50 万次,提取双轮荷载轮隙、轮迹中心点变形如图 4、图 5 所示。

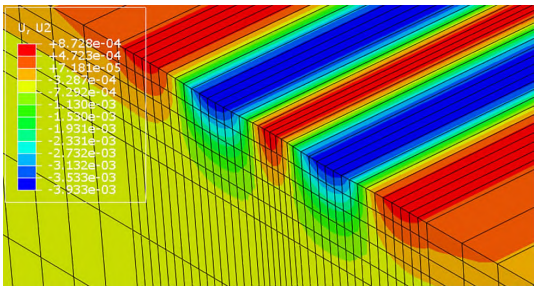

图 4 累计作用 20 h 变形云图

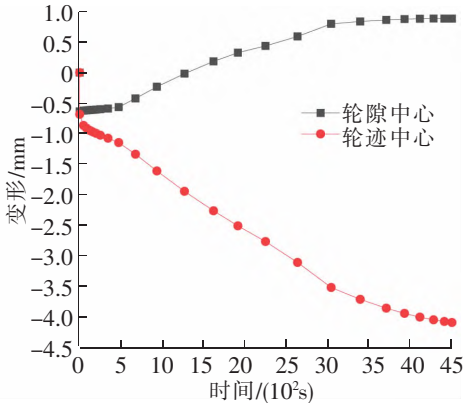


图 5 轮迹和轮隙中心点变形

荷载作用瞬时,路面发生弹性变形,轮隙、轮迹中心处均发生下沉,分别为 0.63、0.68 mm,大小接近。行车荷载不断作用下,轮迹处受荷载挤压作用继续下沉。轮隙处受反力作用慢慢隆起,在 1 500 s 接近于 0,由负值变为正值。轴载累计作用 50 万次,轮迹处凹陷值远大于轮隙处隆起值,分别为 −4.08、0.88 mm,约为其 4.6 倍。

3.1.2 恒温下永久变形分析

接地压力分别为 0.7、0.9、1.1、1.3 MPa,在 60 ℃恒温下作用 50 万次。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

如表 5 所示，0.7、0.9、1.1、1.3 MPa 荷载作用下，连续变温条件下车辙为 4.963、5.956、6.867、7.746 mm，恒温条件下为 10.632、11.169、12.138、13.019 mm，恒温时车辙量约为连续变温时的 2 倍。连续变温下陷高度为隆起高度的 4.63 倍、5.16 倍、5.70 倍、6.23 倍，恒温下陷高度为隆起高度的 2.16 倍、2.08 倍、2.14 倍、2.20 倍，恒温条件下隆起高度在车辙中所占比例更大。车辆实际行驶中，路面温度不断变化，因此采用连续变温的计算方法得到的路面永久变形量与行驶路况更接近。

**表 5　恒温与连续变温永久变形对比**

| 接地压力/MPa | 7 月连续变温下车辙深度/mm | | | 恒温下车辙深度/mm | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 隆起高度 | 下陷高度 | 车辙深度 RD | 隆起高度 | 下陷高度 | 车辙深度 RD |
| 0.7 | 0.881 | 4.082 | 4.963 | 3.364 | 7.268 | 10.632 |
| 0.9 | 0.967 | 4.989 | 5.956 | 3.623 | 7.546 | 11.169 |
| 1.1 | 1.025 | 5.842 | 6.867 | 3.865 | 8.273 | 12.138 |
| 1.3 | 1.071 | 6.675 | 7.746 | 4.071 | 8.948 | 13.019 |

### 3.2　行车速度对变形的影响分析

速度为 20、40、60、80、100、120 km/h，标准荷载作用 50 万次进行研究。提取双轮荷载作用区域左右各 1 m 范围内变形数据。

#### 3.2.1　竖向永久变形分析

由图 6 可知：

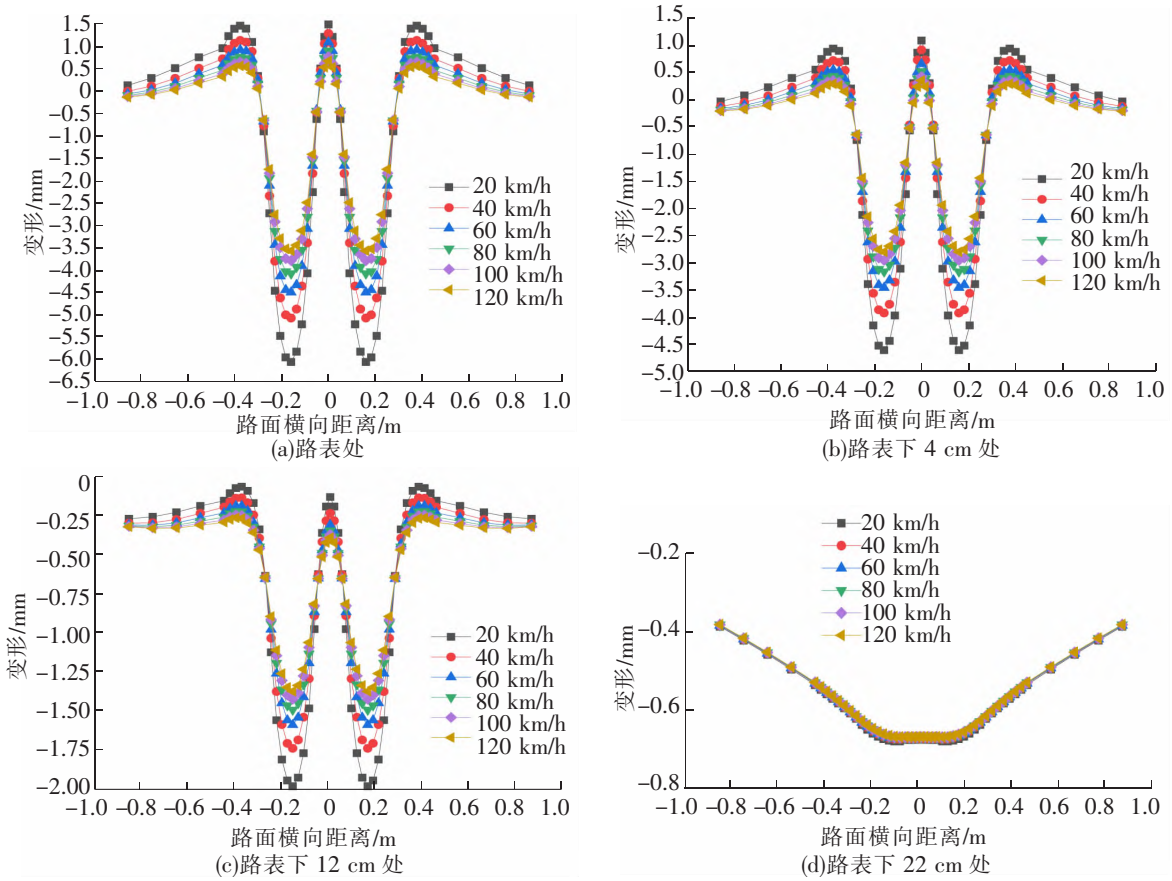


**图 6　0.7 MPa 荷载作用 50 万次路面不同深度的永久变形**

(1)50 万次轴载作用下，沥青面层不同层位永久变形均呈现轮迹处下凹、轮隙处上凸的“W”型，沥青路面发生塑性变形在道路横向的影响范围接近 1 m。永久变形主要发生在面层，竖向变形主要出现在路面结构上面层(路表面、路表面以下 4 cm 范围内)，中面层次之，下面层最小。

(2)路表以下 4 cm 层位正最大竖向变形均出现在轮隙中心处，略大于两轮外侧边缘处。路表以下 12 cm 层位正最大竖向变形出现在两轮外侧边缘处，略大于轮隙中心处。路表面、路表以下 4 cm、路表以下

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

12 cm 层位最大负竖向变形均出现在轮迹中心处。路表以下 22 cm 处变形不再呈现“W”型分布,接近于“V”型分布。路表面以下 22 cm 处竖向变形均为负值。

由图 7 可知,随着行车速度增大,不同深度处变形均减小,路表处与路表下 4 cm 受车速影响较为明显,而对于路表下 12、22 cm 则不明显。行车速度为 20～60 km/h 时容易产生较大的车辙变形,速度增大车辙变形减小速率远大于 80～120 km/h。速度从 120 km/h 降低到 20 km/h,路表处变形正、负极值分别增大 124.88%、69.30%,路表下 4 cm 变形正、负极值分别增大 221.45%、64.19%,路表下 12 cm 变形负极值增大 43.94%,路表下 22 cm 变形负极值增大 1.68%。可知保持一定的快速交通对预防车辙是有利的。

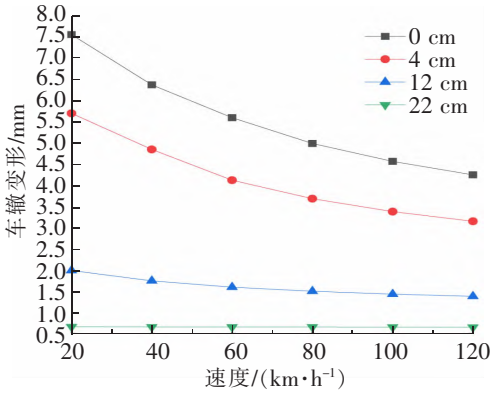


**图 7 车辙与速度变形关系曲线**

3.2.2 剪切蠕变分析

由图 8 可知,剪切蠕变不同层位均呈正负交替变化,随着行车速度增加而减小。剪切蠕变随深度增加依次减小,路表处正、负剪切蠕变极值出现在 2 个轮迹内侧边缘,路表下 4 cm、路表下 12 cm、路表下 22 cm 路表正、负最大剪切蠕变出现在轮迹外侧边缘,轮隙中心处的剪切蠕变近似为 0。速度变化对路表及以下 4、12 cm 处的剪切蠕变极值影响程度较大,对路表以下 22 cm 处影响很小。车速为 20～40 km/h 时,剪切蠕变增大最为明显,剪切蠕变极值的影响程度明显高于 60～120 km/h。即速度在增加过程中,对剪切蠕变极值的影响逐渐降低。

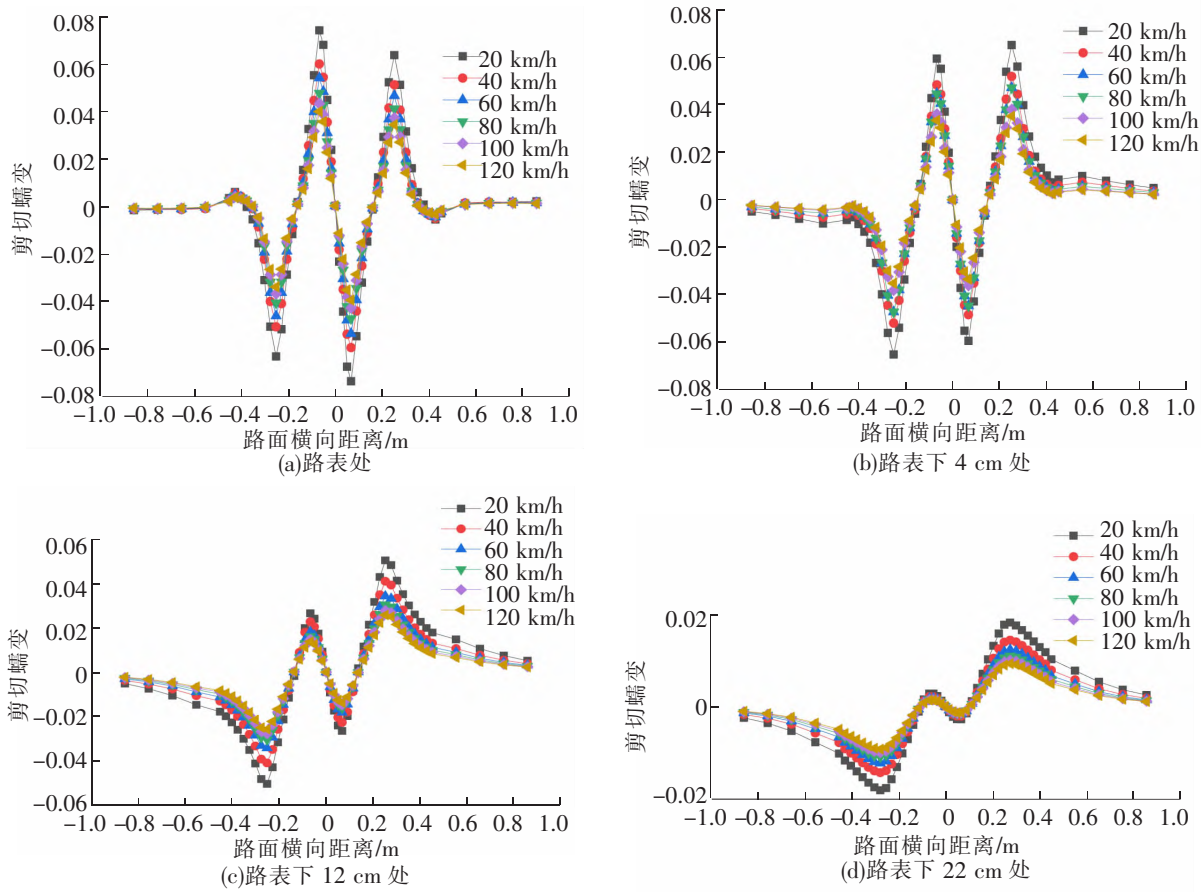


**图 8 0.7 MPa 荷载作用 50 万次路面不同深度的剪切蠕变**

速度从 120 km/h 降低到 20 km/h,路表处正、负蠕变极值增大 86.11%,路表下 4 cm 正、负蠕变极值增大 85.19%,路表下 12 cm 正、负蠕变极值增大 95.35%,路表下 22 cm 正、负蠕变极值增大 96.14%。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

可以看出，保持一定的快速交通对预防剪切蠕变变形是有利的。

### 3.3　接地压力对变形的影响分析

选取速度 60 km/h，接地压力分别为 0.7、0.9、1.1、1.3 MPa，作用 50 万次。

#### 3.3.1　竖向永久变形分析

由图 9 可知，沥青路面竖向变形与接地压力呈正相关。竖向变形负极值远大于正极值，超载时产生的车辙量远大于标准轴载，但增长速率变化不大。竖向变形正、负极值出现在路表面层。荷载从 0.7 MPa 增加到 1.3 MPa，路表处变形正、负极值分别增大 16.48%、60.96%，路表下 4 cm 变形正、负极值分别增大 29.94%、66.48%，路表下 12 cm 变形负极值增大 75.05%，路表下 22 cm 变形负极值增大 44.93%。可见接地压力变化对路表变形负极值的影响是正极值的 2 倍甚至更多。

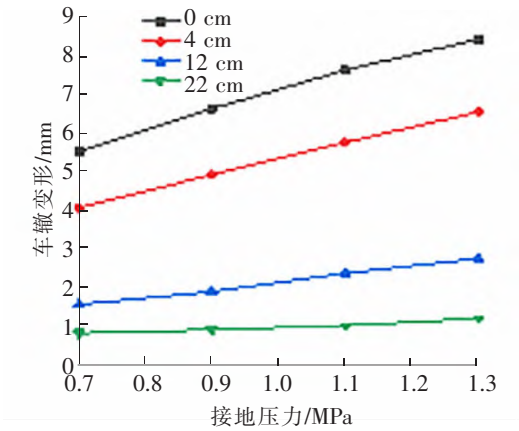


**图 9　车辙与接地压力变形关系曲线**

#### 3.3.2　剪切蠕变分析

由表 6 可知，接地压力从 0.7 MPa 增加到 1.3 MPa，路表处正、负蠕变极值均增大 43.39%，路表下 4 cm 正、负蠕变极值均增大 42.04%，路表下 12 cm 正、负蠕变极值均增大 62.10%，路表下 22 cm 正、负蠕变极值均增大 66.94%。接地压力对路表正、负剪切蠕变的影响程度是 1.5 倍甚至更多。不同于永久变形和压缩蠕变，接地压力对路表正、负剪切蠕变极值的影响一致。

**表 6　60 km/h 不同荷载作用剪切蠕变**

| 深度/cm | 极值 | 接地压力 | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | 0.7 MPa | 0.9 MPa | 1.1 MPa | 1.3 MPa |
| 0 | 正值 | 0.053 7 | 0.064 4 | 0.071 8 | 0.077 0 |
| | 负值 | −0.053 7 | −0.064 4 | −0.071 8 | −0.077 0 |
| 4 | 正值 | 0.047 1 | 0.055 9 | 0.062 9 | 0.066 9 |
| | 负值 | −0.04 71 | −0.055 9 | −0.062 9 | −0.066 9 |
| 12 | 正值 | 0.034 3 | 0.041 6 | 0.048 6 | 0.055 6 |
| | 负值 | −0.034 3 | −0.041 6 | −0.048 6 | −0.055 6 |
| 22 | 正值 | 0.012 4 | 0.015 3 | 0.018 1 | 0.020 7 |
| | 负值 | −0.012 4 | −0.015 3 | −0.018 1 | −0.020 7 |

## 4　结论

采用 ABAQUS 有限元方法建立半刚性基层沥青路面三维模型，引入连续变温的路面温度场进行不同速度、重载下车辙模拟。主要结论如下：

(1)不同结构层温度变化趋势呈现由低到高再到低的变化趋势，在 12:00—15:00 达到最高，此时间段要限制慢速重载车辆的行驶。11:00—18:00 为高温和交通量大的时间段，易产生车辙变形，可采取洒水降温或错峰出行等措施减少车辙病害，必要时可规定重载车辆夜间出行。

(2)慢速(20～60 km/h)时增大车速对竖向永久变形、剪切蠕变的减小程度均明显高于快速(80～120 km/h)。路面结构的上、中面层为剪切蠕变值较大的范围，提高上、中面层的抗变形性能会有效减小车辙发生。速度的影响也随着路面深度增加而减小，慢速行驶车辆可引起更大的车辙损伤，在高速道路上要限制慢速车辆的行驶。确保行车稳定舒适时，在高速公路上可以合理地规定最低行车速度的下限。

(3)接地压力的变化对路表和路表下 4 cm 处永久变形量影响是正值的 2 倍甚至更多，路表下 12 cm 和路表下 22 cm 影响接近，对路表正负剪切蠕变的影响是 1.5 倍甚至更多。超载重载时产生的车辙量远大于标准荷载，因此保持较低的行车荷载对预防车辙是有利的，在高温时间段有必要限制重载超载车辆。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

## 参 考 文 献

[1]张兰峰.连续变温沥青路面车辙变形数值模拟[J].公路交通科技,2018,35(2):15-24.

[2]Chen L L, Liu G, Qian Z D, et al. Determination of allowable rutting depth based on driving safety analysis [J]. Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements,2020, 146(2):1-16.

[3]刘刚,陈磊磊,钱振东,等.车辙深度对沥青路面结构性能影响性分析[J].振动与冲击,2021,40(24):36-40.

[4]陈磊磊,陈道燮,陈超录,等.基于沥青路面结构力学行为的车辙深度控制标准[J].交通运输工程学报,2020,20(6):62-70.

[5]王民,肖丽,胡德勇,等.钢桥面浇注式+SMA组合结构车辙变形深度预估[J].中国公路学报,2021,34(6):10-18.

[6]李喜,王选仓,房娜仁,等.基于温度与荷载实际耦合的沥青路面车辙预估[J].长安大学学报(自然科学版),2018,38(5):67-75.

[7]马雪城,李国芬,赵康.钢桥面铺装车辙预估有限元分析[J].森林工程,2018,34(5):78-83.

[8]Hussan S, Kamal M A, Hafeez I, et al. Statistical evaluation of factors affecting the laboratory rutting susceptibility of asphalt mixtures[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2019, 20(4): 402-416.

[9]Sun Y, Gu B, Gao L, et al. Viscoelastic mechanical responses of HMAP under moving load[J]. Materials, 2018, 11(12): 2490.

[10]Rushing J F, Darabi M K, Rahmani E, et al. Comparing rutting of airfield pavements to simulations using pavement analysis using nonlinear damage approach (PANDA)[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2017, 18(2): 138-159.

[11]Chang J R, Chao S J. Development of a rutting prediction model through accelerated pavement testing using group method of data handling (GMDH)[C]//2009 Fifth International Conference on Natural Computation. [S. l.]: IEEE, 2009: 367-371.

[12]Du J, Shen D. Development of pavement permanent deformation prediction model by grey modelling method[J]. Civil Engineering and Environmental Systems, 2005, 22(2): 109-121.

[13]Assogba O C, Sun Z, Tan Y, et al. Finite-element simulation of instrumented asphalt pavement response under moving vehicular load[J]. International Journal of Geomechanics, 2020, 20(3):1-19.

[14]Han D, Zhu G, Hu H, et al. Dynamic simulation analysis of the tire-pavement system considering temperature fields [J]. Construction and Building Materials, 2018, 171: 261-272.

[15]李伊,刘黎萍,孙立军.沥青面层不同深度车辙等效温度预估模型[J].吉林大学学报(工学版),2018,48(6):1703-1711.

[16]张兰峰.持续高温重载条件下车辙发展规律[J].山西建筑,2018,44(35):108-111.

[17]宋海云.基于Abaqus蠕变本构的重载路面车辙分析[J].结构工程师,2018,34(3):86-91.

[18]郭敏锐.复杂重荷载作用下沥青路面结构力学行为研究[D].武汉:武汉科技大学,2021.

[19]马涛,廖公云,黄晓明. Abaqus有限元软件在道路工程中的应用[M].3版.南京:东南大学出版社,2021.

[20]刘超. 基于多尺度试件的沥青混合料动态模量研究[D].济南:山东建筑大学,2020.

[21]谢来斌. 基于温度场和动态模量的沥青混合料车辙预估模型研究[D].西安:西安建筑科技大学,2013.

[22]曹秋华. 基于温度场的沥青路面车辙影响因素分析[D].石家庄:石家庄铁道大学,2020.

# Dynamic Deformation Characteristics of Asphalt Pavement Structure Under Variable Temperature and Heavy Duty

**Shen Chongchong**[1], **Si Chundi**[2,3], **Fan Taotao**[2,3], **Zhang Mengqiang**[4], **Gao Haibo**[4]

(1. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;
2. School of Traffic and Transportation, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;
3. State Key Laboratory of Mechanical Behavior and System Safety of Traffic Engineering Structures, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;
4. Jing-Xiong Expressway Preparatory and Construction Office of Hebei Expressway Group Ltd., Baoding 071799, China)

(下转第119页)

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

[14]李洪涛，贺亚鹏，朱晓华，等. 基于谱分析的稳健自适应波束形成算法[J]. 电波科学学报，2012，27(1)：147-151.
[15]李洪涛. 自适应数字波束形成关键技术研究[D]. 南京：南京理工大学，2013.
[16]Boyd S，Vandenberghe L. Convex optimization[M]. Cambridge，UK：Cambridge University Press，2004.
[17]Grant M，Boyd S. CVX：Matlab software for disciplined convex programming，version 2.0 beta[EB/OL]. [2013-09-01] http://cvxr.com/cvx.
[18]Grant M，Boyd S. Graph implementations for nonsmooth convex programs[J]. Lecture Notes in Control and Information Sciences，2008(1)：95-110.

# Robust Transmit Beam Control Technology for the Detection of Low-Altitude and Slow-Speed Small Targets

**Jin Songpo**[1]，　**Zhuang Shanna**[2]，　**Wei Xiaofeng**[3]，　**Wang Pengyi**[1]

(1. China Electronics Technology Group Corp 54th Resrarch Institute，Shijiazhuang 050081，China；
2. School of Information Science and Technology，Shijiazhuang Tiedao University，Shijiazhuang 050043，China；
3. Satellite Application Division of China Academy of Space Technology，Beijing 100094，China)

**Abstract**：Aiming at the problem that the detection of low-altitude and slow-speed small targets is easily affected by ground moving targets or strong ground object clutter，a robust transmit beam-forming algorithm was proposed to suppress the influence of near-ground clutter on the detection of low-slow and small targets. The echoes of moving targets or strong ground clutter in the ground side area could be reduced，by constraining the side lobe level on the ground side of the transmit beam. The algorithm took beam robustness as the objective function and optimizes the transmit energy utilization with the peak-to-average ratio constraint. The optimization problem could be converted into a Second-Order Cone Programming (SOCP) problem and solved. The simulation results show that the algorithm can effectively reduce the transmission power of the near-earth side sidelobe and improve the robustness of the transmission beam while maintaining the transmission efficiency.

**Key words**：low-altitude and slow-speed small targets；beam-forming；target detection；second-order cone optimization

(上接第 60 页)

**Abstract**：The three-dimensional model of asphalt pavement was established by ABAQUS software. According to the typical temperature of a day in July in some project area，the temperature field and deformation of pavement structure under variable temperature and heavy duty were analyzed considering the characteristics of material properties of asphalt pavement changing with temperature. The permanent deformation and shear creep characteristics of structural layers at different depths were quantified by changing the driving speed and ground stress. The results show that the vertical deformation and shear creep value change alternately in the transverse range of the whole driving road. At slow speed (20～60 km/h)，the decrease of vertical deformation and shear creep with the increase of vehicle speed is significantly higher than that of fast speed (80～120 km/h). Permanent deformation and shear creep mainly appear in the upper and middle layers. When the driving speed is lower than 60 km/h and the ground pressure is greater than 0.9 MPa，the development of permanent deformation of pavement increases rapidly. In summer high temperature seasons，slow traffic and overloaded vehicles should be limited. Timely peak shifting travel and sprinkler cooling can effectively reduce rutting damage.

**Key words**：rutting；creep；temperature field；heavy duty；driving speed

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net