

# 半刚性基层沥青路面低温开裂成因研究综述

叶向前, 邹晓翎, 何虹霖, 曾涛

(重庆交通大学 土木工程学院, 重庆市 400074)

**摘要:** 半刚性基层沥青路面低温开裂一直是沥青路面的主要病害之一,也是国际学术界研究的重点内容。考虑到此种类型路面结构在中国的广泛应用,该文对半刚性基层沥青路面低温开裂的相关研究成果进行了综述,在分析路面低温开裂机理的基础上,从设计、施工、运营3个阶段分析了各因素对半刚性基层沥青路面低温开裂的影响,为预防和控制沥青路面低温开裂提供借鉴与思考。研究发现,对各阶段的影响因素进行合理的控制能够改善路面的低温抗裂能力,减少路面低温开裂病害的发生。

**关键词:** 半刚性基层; 沥青路面; 低温开裂; 机理分析; 控制因素; 细观力学行为

《2019年交通运输行业发展统计公报》显示:截至2019年底,中国公路密度达 $52.21 \text{ km}/(100 \text{ km}^2)$ ,增加 $1.73 \text{ km}/(100 \text{ km}^2)$ 。公路在交通运输行业中发挥着无可替代的作用。目前中国二级以上的公路主要采用半刚性基层沥青路面,低温开裂是主要的路面病害之一,裂缝的不断扩展导致路面结构破坏,缩短路面的使用寿命,增加维修费用的同时也影响行车舒适性。

半刚性基层沥青路面在低温环境中收缩而产生的裂缝称为温缩裂缝,形式以横缝为主,排列较为规则。沥青路面在低温环境下,应力松弛较差,当温度持续降低时,混合料的抗拉强度不足以抵抗温度降低所产生的温度应力时就会产生裂纹。此外,温度的周期性变化所产生的温度应力改变会使路面产生应力疲劳,也会导致裂纹的产生。裂纹初期对路面承载力影响很小,但随着雨水和行车荷载的不断作用,裂纹尖端的应力集中导致裂纹扩展为裂缝,在裂纹周围出现如唧泥、龟裂等衍生病害,缩短了路面结构的使用寿命。该文在总结分析半刚性基层沥青路面低温开裂机理的基础上,主要从设计、施工、运营阶段3个方面分析裂缝产生的机理及影响因素。希望能从公路建设的3个阶段对裂缝的产生与控制提供思路,提高路面的服务性能,为半刚性基层沥青路面的病害防治提供参考。

## 1 主要研究历程

路面的低温开裂一直是国际学术界研究的重点问

题。从20世纪50年代起,国外学者就开始对沥青路面低温开裂机理进行研究。60年代,加拿大的相关学者通过系统的试验研究沥青路面开裂的机理,发现温度下降导致的路面面层不均匀收缩是引起温度裂缝的主要原因,选用低温延度较好的材料能够减少横向裂缝的产生。1966年 Hills 和 Brein 提出了温度收缩应力计算公式: $\sigma_t = \alpha_t \sum_n^{t_1} S_{t-T} \cdot \Delta T$ ,为沥青混合料低温开裂温度预估提供了理论依据,但是对开裂的数量和频率无法预测。在此基础上, Finn 借助于 COLD 计算程序,定量分析路面温度梯度变化规律,考察了抗拉强度在温度梯度下的变异性。

为了进一步解释低温开裂的机理,学界运用线弹性理论和有限元方法等对该问题进行研究。1976年, Hung-Sun、Chang 和 Lytton 等运用线弹性理论计算沥青路面各层的温度应力,并通过有限元软件对裂缝尖端的强度因子进行分析,提出了温度裂缝的形成和扩展模型。Kirkner 和 Shen 等通过计算机仿真的方法模拟沥青路面开裂,分析了界面与裂缝间距之间的关系。1980年 Monismith 和 Coetzem 通过有限元理论分析了沥青路面荷载和温度耦合作用下的裂缝应力分布,并运用断裂力学理论讨论了基层开裂对温度裂缝的影响。

中国对于沥青路面低温开裂的研究始于20世纪70年代,在对中国主要城市的沥青路面裂缝病害调查分析后,认为非荷载性的温缩裂缝及半刚性基层所引

起的反射性裂缝是普遍存在的问题。1982年,周继业通过分析沥青路面低温开裂机理,提出了温度下降时沥青路面内部温度应力的计算公式,进而提出预估开裂温度和横缝间距的方法;1992年张起森等通过对半刚性基层沥青路面的断裂应力分析和光弹试验验证,指出温差应力是半刚性基层沥青路面温度裂缝产生的主要原因,横向裂缝是其主要病害形式;2001年沙庆林根据半刚性基层沥青路面裂缝调查结果,研究了开裂机理和降低非荷载型裂纹数量的方法,并提出了预防此类病害的措施;2003年钱国平等指出了传统沥青路面温度应力计算方法的局限性,通过广义Maxwell模型模拟沥青混合料的黏弹性,提出了低温环境条件下沥青路面的温度应力场有限元计算方法;2006年,孙立军等通过对气象资料及路面实测温度数据的回归分析,建立了沥青路面温度场的预估模型,并论证了模型的合理性;2013年王晓英等基于黏结开裂模型,利用界面元方法,分析路面内部温度分布、应力分布、应变分布及位移分布,对温度裂缝产生及发展的规律进行了研究;2018年,孙雅珍等从细观角度,运用PFC2D颗粒流软件对沥青混合料的开裂行为进行了数值模拟,分析了骨料对沥青混合料宏观力学性质的影响,为细观尺度下的沥青混合料开裂行为研究提供了理论基础。

综上,半刚性基层沥青路面低温开裂的主要形式是横缝,沥青的低温延度、路面的温度梯度、温度应力及温度应力循环产生的疲劳、半刚性基层产生的反射裂缝等都会导致半刚性基层沥青路面低温开裂,关于此类病害的研究方法也从最初的宏观层面转向细观力学层面。

## 2 形成机理及影响因素

半刚性基层沥青路面低温开裂机理主要分为以下4个方面:① 单次降温引起路面产生的收缩应力超出材料的极限抗拉强度引起的路面开裂;② 受季节性温度循环和昼夜温度循环作用,面层内部的温度应力表现为周期性增减造成温度疲劳裂缝的出现;③ 半刚性基层材料内部开裂,在车辆荷载的作用下传递至面层引起的路面开裂;④ 施工质量问题引起的半刚性基层沥青路面低温开裂。

沥青路面的修建过程包含设计、施工、运营3个阶段,这3个阶段共同决定了沥青路面的低温抗裂性。在设计阶段,影响因素包括沥青种类、粉胶比、材料模量及收缩量、面层厚度、路面结构组合等。施工阶段则

需考虑压实温度、次数和油石比等因素。在运营阶段,温度和温度-荷载耦合作用则对路面低温开裂有直接的影响。该文将从设计、施工、运营3个阶段阐述各阶段半刚性基层沥青路面低温开裂的控制因素(图1)。

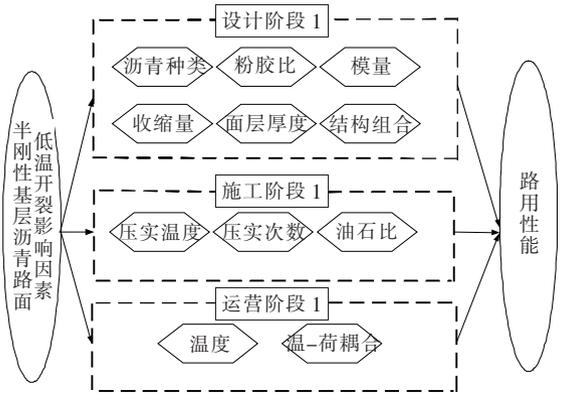


图1 半刚性基层沥青路面低温开裂影响因素

### 2.1 设计阶段控制因素

半刚性基层沥青路面的设计阶段包含混合料设计和路面结构组合设计两部分。混合料设计决定了各层材料抵抗低温开裂的能力,而路面结构组合设计则是各层材料低温抗裂能力的综合反映,对设计阶段的控制因素进行研究能从根本上改善路面的低温抗裂能力。

#### 2.1.1 沥青种类

沥青的低温性质是决定沥青路面低温抗裂性的关键因素,沥青低温针入度越大,低温感温比越小,以及沥青低温的流变指数越小,混合料的低温抗裂性越好。耿韩等选用断裂能指标对7种不同种类沥青的低温抗裂性进行评价,结果如图2所示。由图2可以看出:PRM改性沥青的断裂能最大,为 $32.7 \text{ J/m}^2$ ,低温抗裂性能显著优于其他6种沥青,其次13.5%掺量的SBS改性沥青相比于4.0%掺量的SBS改性沥青断裂

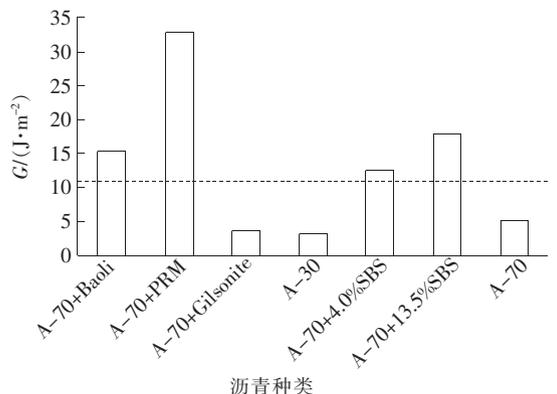


图2 沥青种类对混合料断裂能大小的影响

能提升了  $5.4 \text{ J/m}^2$ , 未掺加改性剂的基质沥青断裂能明显小于改性沥青, 且基质沥青标号越高断裂能越大。

通过分析不同种类改性沥青及基质沥青断裂能的差别, 可知在高寒地区选用高模量的改性沥青是提升沥青路面低温抗裂性的有效途径, 不同的改性剂对低温抗裂性的提升不同。张东等选用 J 积分、断裂能、破坏应变 3 个指标分析了沥青种类对沥青混合料 AC-13F 低温抗裂性的影响, 得出了类似结论。因此, 在设计阶段, 根据沥青路面可能遇到的低温工作环境, 合理选用沥青种类是非常重要的, 同时具有良好低温性能的改性沥青开发也是未来沥青路面低温抗裂研究的一个方向。

### 2.1.2 粉胶比

文献[18]指出: 沥青胶结料的性能对沥青路面的低温抗裂能力贡献率达 90%, 不同填料形成的沥青胶浆具有不同的流变特性, 沥青的黏结作用和填料在沥青混合料中的分散作用共同构成了混合料的强度基础。基于此, 不同学者采用不同的试验方法考察粉胶比对沥青混合料低温抗裂能力的影响。张争奇等通过弯曲梁流变仪测定不同粉胶比混合料的低温性能, 结果如图 3 所示。

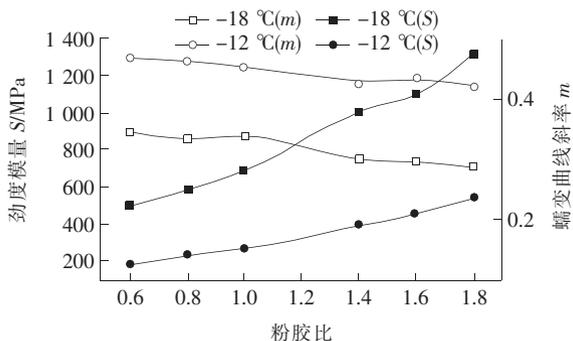


图 3 粉胶比对混合料劲度模量及蠕变曲线斜率的影响

由图 3 可以看出, 粉胶比与蠕变曲线斜率  $m$  呈较强的正相关关系, 与劲度模量  $S$  呈较强的负相关关系, 且粉胶比在低温条件下对蠕变模量及蠕变曲线斜率  $m$  的影响更加明显。粉胶比的增大降低了沥青胶浆的流动性, 宏观表现为混合料的模量增大, 斜率  $m$  减小, 低温柔性和抗裂性降低。申爱琴等研究则发现粉胶比在  $-10 \text{ }^\circ\text{C}$  时对混合料的变形有较大影响。因此, 在沥青混合料设计阶段限制混合料的粉胶比范围对提升沥青路面抗裂性是有益的。

### 2.1.3 材料模量及收缩量

沥青路面承受车辆荷载的直接作用, 必须具备一定的强度和刚度。面层及半刚性基层材料的模量是决

定沥青路面刚度的关键因素。模量较低的材料在低温环境中产生的温度应力较小, 在气温骤降时, 材料模量急剧增大, 材料内部的温度应力超过了产生开裂的极限劲度, 便产生开裂。

此外, 降低材料的收缩量能够有效地防止反射裂缝的产生。Geroge 通过试验发现: 在水泥稳定土混合料中, 用粉煤灰替代 25% 的水泥能够有效阻止材料的干缩。通过掺加减水剂、减缩剂等可以降低材料中水的表面张力, 也能提升半刚性基层材料的收缩性能。黄煜镔等研究了减水剂、粉煤灰等对水泥稳定碎石基层抗裂性能的影响, 结果如图 4 所示。

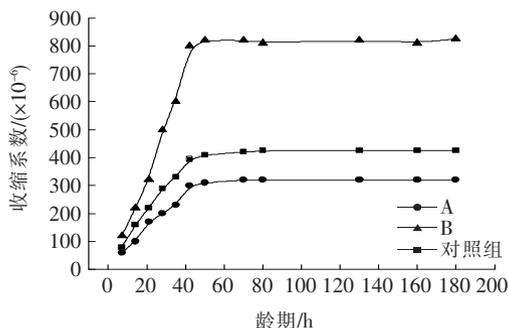


图 4 粉煤灰水泥砂浆收缩随龄期的变化

图 4 中, 对照组、A、B 组的粉煤灰掺量分别为 0、15%、50%, 图 4 表明: 粉煤灰掺量小于 15% 时, 材料的收缩量减少明显, 但是粉煤灰的比例超过某一掺量后, 收缩将随粉煤灰掺量的增大而增大。

图 5 中对照组、A、B 组的 SP8N 型高效减水剂掺量分别为 0、1.5%、3.0%, 由图 5 可知: 减水剂掺量对材料收缩性能的影响效果与粉煤灰类似。

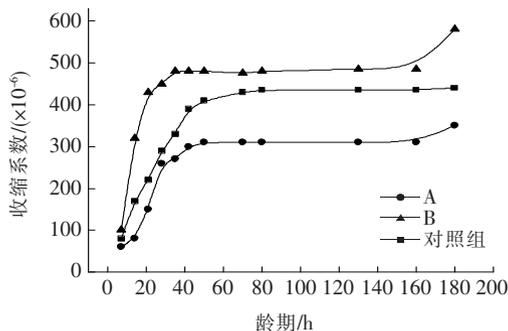


图 5 减水剂水泥砂浆收缩随龄期的变化

### 2.1.4 沥青面层厚度

中国的沥青路面设计大多采用“强基薄面”的设计理念。在沥青路面设计阶段, 选择合理的沥青面层厚度不仅能保证沥青路面的路用性能和预防早期病害, 也能节约成本, 提高工程经济效益。王晓英等通过控制试件半径、裂缝深度、支座间距与直径的比值等参

数,改变试件的厚度,采用有限元软件模拟半圆弯曲试验,分析模型厚度对裂缝尖端应力强度因子的影响,并用 AASHTO 解析解进行验证,结果见图 6。

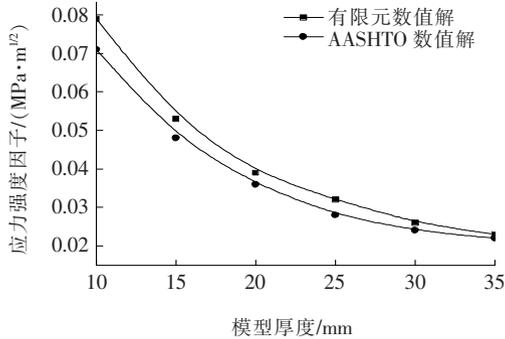


图 6 沥青面层厚度与应力强度因子的关系

由图 6 可知:应力强度因子随着模型厚度的增加而近似二次曲线降低。当模型厚度由 10 mm 增加到 20 mm 时,应力强度因子减少了约 50%,厚度由 20 mm 增加到 30 mm 时,应力强度因子减少了 16.25%,且有限元数值解和 AASHTO 解析解的变化趋势一致,两者互为验证。美国华盛顿州交通部通过对 24 条道路钻芯取样也得到了类似的结果。

可以发现,随着沥青面层厚度的增加,应力强度因子降低,路面的抗裂性能提升,但是超过一定阈值后,厚度的增加对路面抗裂性的提升效果便不再显著,因此选择合理的沥青面层厚度,不仅能够提升路面抗裂性,同时也能缩减工程成本。

### 2.1.5 路面结构组合

除了单一的面层厚度外,不同路面结构组合的低温抗裂性也有所差异。为了探究不同路面结构组合沥青路面在低温环境下的温度应力响应,艾长发等对 5 种不同路面结构的沥青路面温度行为特性进行了分析,其中各类型路面总厚度均为 54 cm,上下面层分别为 AC-13(4 cm)、AC-16(5 cm)。5 种路面基层类型和结果如表 1、2 所示。

表 1 各类型基层结构组合

组合 1	组合 2	组合 3	组合 4	组合 5
水泥稳定碎石 22.5cm	沥青砂 2.5 cm+水泥稳定碎石 20 cm	沥青稳定碎石 22.5 cm	级配碎石+2%水泥 22.5 cm	级配碎石 22.5 cm

表 2 各结构层顶面温度应力

层位	各组合路面类型顶面温度应力/MPa				
	组合 1	组合 2	组合 3	组合 4	组合 5
面层	3.389	3.391	3.389	3.391	3.392
基层	0.415	0.353	0.912	0.064	0.031

由表 2 可知:不同路面结构组合的沥青面层的温度拉应力值大致相同,约为 3.390 MPa,说明路面结构组合类型不影响环境温度对沥青面层的作用;而不同组合基层温度拉应力则区别很大,可以看出组合 3 > 组合 1 > 组合 2 > 组合 4 > 组合 5。对于组合 4、5 基层应力值约为 0,说明低温环境对没有掺加或少量掺加水剂量的级配碎石基层几乎无破坏作用,这也减少了沥青面层出现反射裂缝的可能;组合 3 基层温度应力达到了 0.912 MPa,但是依然小于该材料的低温抗拉强度,不会产生低温开裂,且沥青稳定碎石不会产生干缩和开裂,是一种理想的基层材料。

## 2.2 施工阶段控制因素

高质量的沥青路面施工是提升沥青路面抗低温开裂性能的保障,施工过程中要对压实温度、压实次数、油石比等关键因素进行控制。经压实后沥青混合料的体积参数发生了变化,混合料颗粒在集料间内摩阻力和黏聚力作用下重新排列,形成新的结构体系。压实温度和压实次数直接决定了沥青混合料压实度的大小,压实度不同,沥青路面的低温抗裂性亦不同。

### 2.2.1 压实温度

艾长发等研究了压实温度对沥青混合料路用性能的影响,试验结果见表 3。

表 3 压实温度对沥青混合料低温抗裂性的影响

压实温度/ ℃	-10℃劈裂 强度 $R_T$ / MPa	-10℃抗弯 拉强度 $R_B$ / MPa	-10℃最大 弯拉应变 $\epsilon_B/\mu\epsilon$	线收缩 系数 $C$ / ( $\times 10^{-5}$ )
170	3.40	13.60	5 441	0.769
160	3.23	13.32	5 360	0.780
150	3.21	12.83	5 109	0.824
140	2.81	11.43	4 887	1.054
130	2.65	11.20	4 712	1.063
120	2.44	10.59	4 557	1.294

$R_T$ 、 $R_B$  及  $\epsilon_B$  反映的是沥青与集料间的吸附力和黏结力,其值越大表明低温抗裂性能越好,线收缩系数  $C$  则与空隙率相关。由表 3 可以看出:对于  $R_T$  和  $R_B$ ,当压实温度由 170℃ 降为 150℃ 时,两项指标降低量约为 5.6%,压实温度降为 130℃ 时,两项指标分别减少 22.1% 和 17.6%, $R_T$  和  $R_B$  的变化趋势为缓慢降低到急剧降低。而经过线性拟合, $\epsilon_B$  与压实温度的线性相关性显著( $R=0.994$ ),压实温度从 170℃ 变为 120℃ 时, $\epsilon_B$  下降速率为 17.68  $\mu\epsilon/^\circ\text{C}$ 。线性收缩系数的变化趋势与  $R_T$ 、 $R_B$  相同。因此,为了获得良

好的低温抗裂能力必须对沥青混合料的现场压实温度进行控制,严禁在低温临界温度以下进行压实。

### 2.2.2 压实次数及油石比

为了研究压实次数对沥青抗裂性能的影响,岳阳等分别测定了不同油石比、不同碾压次数下混合料的断裂能,结果如图 7 所示。从图 7 可知:油石比和碾压次数同时达到最大值时,断裂能达到最大,在较小的油石比下,增加碾压次数能够有效提升断裂能,油石比增大后则效果不明显。文献[16]、[20]研究表明,控制碾压次数能够有效提升沥青混合料的低温抗裂性。

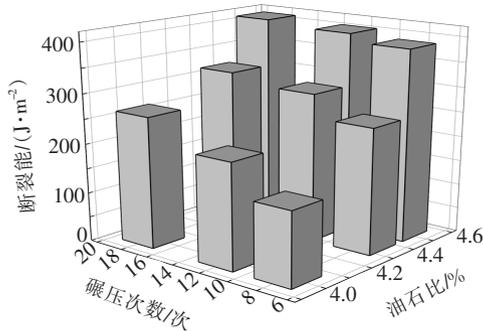


图 7 压实次数及油石比与混合料断裂能之间的关系

## 2.3 运营阶段影响因素

沥青路面投入运营后,在交通荷载和低温环境影响下,混合料易老化,导致路面的低温抗裂性能下降,需要进行后期维护。运营阶段半刚性基层沥青路面的低温抗裂性主要受温度变化及温度交通荷载耦合作用影响。

### 2.3.1 温度

在运营阶段,半刚性基层沥青路面的低温开裂主要有两种原因:① 单次降温周期内大温差引起的路面温度应力超过了材料的极限抗拉强度引起的开裂;② 循环降温条件下产生的温度疲劳应力引起的开裂。郝培文等研究了半刚性基层沥青路面在一个连续变化低温周期内路面温度应力的变化情况,比较了不同日温状况下沥青路面温度应力差别,结果见图 8、9。

由图 8、9 可以看出:在一个变温周期内路面各层结构温度应力变化呈现出正弦式变化,极差最大为 0.65 MPa,周期性的温度应力对路面低温抗裂性能不利;同时 T1 工况(日均气温 -6.08 °C)、T2 工况(日均气温 -15.75 °C)、T3 工况(日均气温 -24.75 °C)3 种温度工况下,T3 工况(高寒)下的路面各层温度应力均为最大,说明降温会导致路面各层温度应力增大,增加路面开裂的风险。张兰峰研究表明:温度下降导致沥青混合料的劲度和低温拉应力增大,超过混合料的极限抗拉强度时,裂缝产生,且气温变化主要对路表以下

18 cm 范围内的温度应力影响较大,对于路基和土基的影响较小。

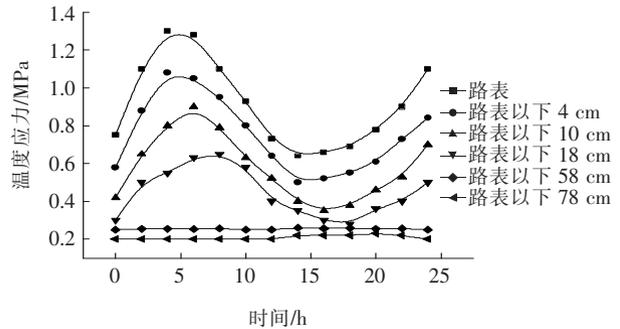


图 8 路面各层冬季低温 24 h 温度应力变化

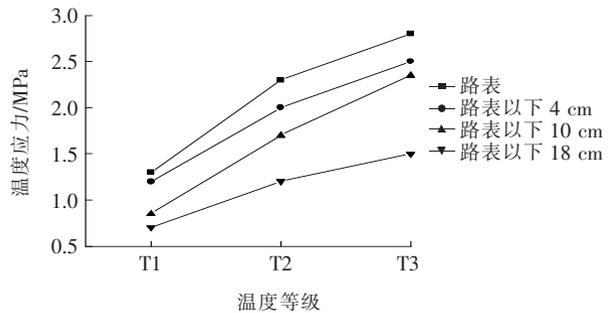


图 9 不同温度条件下各层最大温度应力

### 2.3.2 温度与荷载耦合作用

霍典等分析了水平荷载、垂直荷载、温度荷载以及相互耦合作用对沥青路面的力学响应,发现水平荷载对沥青路面内剪应力和拉应力影响最大,温度荷载次之,当降温速度为 10 °C/h 时,最大温度拉应力达 0.281 47 MPa,路面在只有均布垂直荷载作用下,面层内部最大剪应力为 0.116 73 MPa,无拉应力。因此,水平荷载与温度应力的耦合作用是影响路面低温开裂的主要因素。

## 3 现状评述

### 3.1 缺乏对沥青混合料热黏弹性和低温老化的考虑

对于沥青路面低温开裂行为的研究,目前主要依据线弹性断裂力学理论。在不考虑沥青混合料老化效应和热黏弹性特性的条件下,沥青混凝土材料在低温及快速荷载耦合作用条件下的力学行为是近似符合线弹性断裂力学假设的。但在实际情况下,沥青胶结料存在老化,混合料的热黏特性使得路面裂纹的产生和扩展与线弹性断裂力学的假设有一定的差异。因此,需对沥青路面的黏弹性断裂行为力学特性进行深入研究,为全面掌握沥青路面低温开裂机理和扩展行为提

供理论依据。

### 3.2 缺乏对裂缝率与路用性能相关性研究

从前文可以看出,影响沥青路面低温开裂的因素众多,在裂纹产生后,路面裂纹率与沥青路面路用性能的相关关系需要进一步的研究,应合理地定义裂纹率,从设计、施工、运营3个方面研究各阶段控制因素与裂纹率的关系,并在此基础上研究沥青路面的路用性能,为减少裂纹产生提供更好的方法。

## 4 结论

(1) 半刚性基层沥青路面的设计、施工、运营均会对路面抗低温开裂性能产生影响。

(2) 设计阶段影响因素包括沥青种类、粉胶比、材料模量及收缩量、面层厚度、路面结构组合等,选择合理的路面材料及结构能够有效地预防半刚性基层沥青路面低温开裂病害的发生。

(3) 在施工阶段对压实次数、压实温度、油石比等进行控制是提升半刚性基层沥青路面低温抗裂性的有效措施。

(4) 在运营阶段,温度与荷载的耦合作用是导致半刚性基层沥青路面低温开裂的主要因素。

### 参考文献:

[1] 薛爱新,王洁光,王海军,等.高速公路沥青路面裂缝发展对路面结构性能的影响研究[J].中外公路,2019(3).

[2] 贾敬鹏.高性能沥青混合料低温抗裂性能研究[D].重庆交通大学硕士学位论文,2008.

[3] Freddy L. Roberts, Prithwi S. Kandhal Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design and Construction[M]. National Center for Asphalt Technology, 1996.

[4] A. Kumar and W. H. Goetz, Asphalt Hardening as Affected by Film Thickness, Voids and Perm Eability in Asphaltic Mixtures[M]. Proceeding s, AAPT, 1977(46).

[5] Shen W, Kirkner D J. Distributed Thermal Cracking of AC Pavement with Frictional Constraint[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1999(5).

[6] WEN H. Fatigue Performance Evaluation of West Track Asphalt Mixtures Based on Viscoelastic Analysis of Indictor Tensile Test[D]. North Carolina State University Master's thesis, 2001.

[7] 沙庆林,等.高速公路沥青路面早期破坏现象及预防[M].北京:人民交通出版社,2001.

[8] 周继业.沥青路面低温开裂的分析研究[J].华东公路, 1982(3).

[9] 张起森,郑健龙,刘益河.半刚性基层沥青路面的开裂机理[J].土木工程学报,1992(2).

[10] 钱国平,郭忠印,郑健龙,等.环境条件下沥青路面热粘弹性温度应力计算[J].同济大学学报(自然科学版), 2003(2).

[11] 孙立军,秦健.沥青路面温度场的预估模型[J].同济大学学报(自然科学版),2006(4).

[12] 王晓英.半刚性基层沥青路面低温开裂机理的研究[D].山东建筑大学硕士学位论文,2016.

[13] 孙雅珍,郭学南,程圆圆,等.细观尺度下基于非均匀性研究沥青混合料的开裂行为[J].中外公路,2018(5).

[14] 霍典.温度与荷载耦合作用下的沥青路面开裂机理研究[D].重庆交通大学硕士学位论文,2015.

[15] 贾敬鹏.高性能沥青混合料低温抗裂性能研究[D].重庆交通大学硕士学位论文,2008.

[16] 耿韩,李立寒,张磊,等.高模量沥青低温抗裂性能的评价指标[J].建筑材料学报,2018(1).

[17] 张东,黄晓明,赵永利.沥青混合料抗裂性能评价指标对比研究[J].建筑材料学报,2012(2).

[18] 袁迎捷.基于 Superpave 的沥青胶浆流变特性与级配优化研究[D].长安大学硕士学位论文,2004.

[19] 张争奇,张卫平,李平.沥青混合料粉胶比[J].长安大学学报(自然科学版),2004(5).

[20] 申爱琴,蒋庆华.沥青混合料低温抗裂性能评价及影响因素[J].长安大学学报(自然科学版),2004(5).

[21] 毛成.沥青路面裂纹形成机理及扩展行为研究[D].西南交通大学博士学位论文,2004.

[22] 沙庆林.高等级公路半刚性基层沥青路面[M].北京:人民交通出版社,1998.

[23] 黄煜斌,吕伟民,徐建达,等.水泥稳定碎石基层收缩裂缝综合防治试验[J].重庆大学学报(自然科学版),2006(11).

[24] Uhlmeier, J. S., K. Willoughby, L. M. Pierce and J. M et al. Top-Down Cracking in Washington State Asphalt Concrete Wearing Courses. Issues in Pavement Design and Rehabilitation[R]. Transportation Research Record No. 1730. Transportation Research Board, Washington D. C., 2000.

[25] 艾长发,邱延峻,毛成,等.不同沥青混凝土路面结构的大温差温度行为分析[J].公路,2008(4).

[26] 艾长发,邝习东,陈炯,等.低温压实对沥青混合料路用性能的影响[J].公路交通科技,2008(6).

[27] 岳阳.厂拌热再生沥青混合料低温性能研究[D].东南大学硕士学位论文,2018.

[28] 郝培文,张兰峰.基于连续变温的沥青路面温度应力分析[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版),2018(2).

[29] 张兰峰.基于移动荷载和连续变温条件下沥青路面结构力学响应研究[D].长安大学博士学位论文,2018.