

加拿大大陆性气候地区60年路面现场 试验的经验与展望

王迪¹,李京效²,任学元²,张帆³,袁东东^{2*}

(1.加拿大渥太华大学,加拿大渥太华 ON K1N 6N5;2.长安大学公路学院,陕西西安 710064;
3.芬兰阿尔托大学,芬兰埃斯波 02150)

摘要:20世纪60年代初,加拿大日益增长的交通量促使交通部门逐渐使用硬度较高的沥青来防止沥青路面轮迹带出现早期车辙。由于硬质沥青的内部低温温度应力较高,低温抗裂韧性较差,因此采用硬质沥青的路面表面通常会出现等间隔分布的横向裂缝。围绕低温裂缝的沥青路面试验段研究证实了沥青的一致性、温度敏感性、相态均匀性和耐久性的重要影响。为了解决改性沥青的使用对现有沥青性能评价体系带来的挑战,20世纪90年代,加拿大沥青路面试验段集中研究和评估了美国的SuperpaveTM规范的可靠性,结果表明:吹制沥青的耐久性较差,聚合物改性剂只对软沥青的耐久性存在提升作用。21世纪初期,在安大略省政府的委托下,沥青路面试验段研究主要考虑了沥青的相分离、相转变和热可逆老化(凝胶化)等现象,以及聚合物和纤维对沥青耐久性的影响,进而对现有沥青性能测试规范进行改进。研究发现,对于相同的Superpave分级的不同胶体类型(溶胶,凝胶,溶凝胶)的沥青,相应沥青路面的收益/成本比最大可相差2~3倍。可通过合理评估和选择沥青的类型来延长沥青路面的使用寿命,比如阿尔伯特塔油砂沥青(溶胶型),相比于高掺量的聚合物改性沥青、氧化程度较高的再生沥青或含蜡量较高的沥青(凝胶型),其蜡含量较低,只需要配合少量的聚合物或纤维改性即可显著提升沥青路面的使用寿命。改进的沥青胶结料测试规范有助于节约成本,有效应对全球气候变化下2500万km的沥青路面养护维护需求。在总结加拿大过去60年沥青路面现场试验段研究的基础上,该文对未来的寒区道路研究内容和关键技术问题提出了新的展望和建议,可为未来的研究提供参考。

关键词:路面试验段;沥青规范;流变类型;生命周期成本分析;长寿命路面

中图分类号:U416

文献标志码:A

Lessons Learned from 60 Years of Pavement Trials in Continental Climate Regions of Canada and Future Perspective

WANG Di¹,LI Jingxiao²,REN Xueyuan²,ZHANG Fan³,YUAN Dongdong^{2*}

(1.University of Ottawa, Ottawa, ON K1N 6N5, Canada; 2. School of Highways, Chang'an University,
Xi'an, Shaanxi 710064, China; 3.Aalto University, Espoo, 02150, Finland)

Abstract: During the early 1960s, Canadian road authorities began using stiffer asphalt to address the issue of early rutting in the wheel track zone of asphalt pavements, which was caused by the growing traffic volumes. Pavements constructed with stiffer asphalt commonly exhibit evenly spaced transverse cracks due to the significant internal stresses caused by low temperatures and the inadequate resistance of the asphalt to cracking under such conditions. Research conducted on asphalt pavements with cracks caused by low temperatures has verified the significant impact of asphalt's consistency, temperature sensitivity, phase uniformity, and durability. In order to tackle the difficulties presented by the utilization of modified asphalt in the current asphalt performance evaluation system, the Canadian asphalt pavement test section during the 1990s was used

收稿日期:2024-08-13

基金项目:重庆交通大学交通土建工程材料国家地方联合工程研究中心开放基金项目(编号:TCEM-2023-02)

作者简介:王迪,男,博士,首席科学家.E-mail:dwang6@uottawa.ca

*通信作者:袁东东,男,博士,讲师.E-mail:dyy@chd.edu.cn

to examine and assess the dependability of the U.S. Superpave™ specification. The results reveal that blown asphalt exhibits inadequate durability, while polymer modifiers only improve the durability of soft asphalt. In the early 21st century, the Ontario municipality commissioned studies on asphalt pavement test sections to enhance the current asphalt performance test specifications. These studies mainly considered the occurrences of phase separation, phase transformation, and thermally reversible aging (gelation) of asphalt, as well as the impact of polymers and fibers on the durability of asphalt. The results find that using different types of colloids (sol, gel, and sol-gel) in the same Superpave level can result in asphalt pavements with benefit/cost ratios varying by up to 2–3 times. By assessing and choosing the appropriate type of asphalt, such as Alberta oil sand asphalt (sol), the service life of asphalt pavements can be prolonged. Compared with polymer-modified asphalt with high content, more oxidized recycled asphalt, or asphalt with higher wax content (gel), Alberta oil sand asphalt has lower wax content. The service life of asphalt pavements can be further improved by incorporating small quantities of polymer or fiber modification. Improved test specifications for asphalt cement will help save costs and meet the maintenance needs of 25 million km of asphalt pavements under global climate change. On the basis of summarizing the research of asphalt pavement trials in Canada in the past 60 years, new prospects and suggestions on the future research content and key technical problems of pavements in cold areas are put forward, which can provide a reference for future research.

Keywords: pavement test section; asphalt specification; rheological types; life-cycle cost analysis; long-life pavement

0 引言

沥青胶结料是沥青路面的关键组成部分^[1-3]。虽然通常只占沥青混合料(集料、填料和胶结料)总质量的4%~8%,但其质量和耐久性对实现沥青路面的长寿命至关重要^[4-7]。沥青路面在国民经济发展中具有关键作用,因此保持路面平整无害对确保道路的安全运营和国民经济的发展至关重要。然而随着全球气候变暖不断加剧,北美、欧洲和亚洲的极端天气也随之增加,在这种情况下,合理的材料选择和路面设计对实现道路的安全耐久性具有重要的意义^[8-16]。

沥青路面试验段通常用于验证沥青路面材料测试规范、改进路面设计方法或评估新的路面材料。近年来,沥青供应商通过改进生产技术,并使用多种改性剂对沥青产品进行改良,从而可以更好地满足人们对路面性能的需求。

在北美大陆、欧洲和亚洲等高海拔地区,沥青路面经常受到高温、极寒等极端天气的影响^[11-12]。例如,2021年夏天,在加拿大不列颠哥伦比亚省莱顿镇出现了有记录以来的最高气温,6月下旬的气温接近50℃,比84年来加拿大最高气温纪录高出近5℃,该高温天气导致的野火几乎烧毁了莱顿镇的全部250

栋房屋^[17-18];另一方面,在阿尔伯塔省拉蒙特(埃德蒙顿东北82 km处)和安大略省蒂明斯(多伦多以北750 km处)附近进行的沥青路面试验段监测记录显示,两处试验段分别在1991年和2003年建成后的几个月内遭遇了-50℃左右的极端低温^[19-21]。而阿尔伯塔省北部的弗米利恩堡镇和安大略省东北部的易洛魁瀑布镇的历史最低气温纪录分别为1911年1月11日的-61.1℃和1935年1月23日的-58.3℃^[17]。

本文全面总结并讨论了加拿大过去60年间各地96个沥青路面试验段研究结果,旨在为实现道路工程的经济可持续性发展和在不断变化的气候条件下设计长寿命道路提供重要参考^[16]。深入了解沥青路面试验段研究结果有助于对全球范围内约2 500万km的沥青路面建设养护提供有益的借鉴与启示。

1 背景

1.1 早期加拿大沥青路面试验段

加拿大最早的沥青路面试验段可以追溯到20世纪60年代,是加拿大最大的沥青生产商加拿大帝国石油公司和加拿大壳牌石油公司与安大略省和曼尼托巴省交通部门合作的研究项目。之后在20世纪90年代,安大略省和阿尔伯塔省政府又进行了多个沥青路面试验段的建设,目的主要是验证和改进沥青

技术规范,并对一系列新的沥青生产技术和新型沥青材料进行评估。

1.1.1 安大略省西南地区(1960年)

1960年,安大略省在西南部铺筑了3条沥青路面试验段(分别由3家沥青供应商提供了针入度等级为85/100的沥青)^[22-23]。试验段位于交通量较小、气候略有不同的3条高速公路上。试验段目的是研究沥青的温度敏感性对沥青路面开裂行为的影响,试验段的监测结果以及主要结论由McLeod分别于1972年和1978年发布^[22-23]。

该试验段每条试验路的长度为2英里(1 mile=1.609 344 km),试验路胶结料分别使用同一针入度等级(85/100)不同温度敏感性的沥青。1972年统计结果显示,试验路1、2和3的年平均日交通量(T_{AADT})分别为:900辆(卡车占10%)、1 400辆(卡车占12%)和1 500辆(卡车占18%)^[22]。到1977年,3条试验路的 T_{AADT} 已增至1 100辆(卡车占14%)、2 300辆(卡车占19%)和2 450辆(卡车占15%)^[23]。按照目前的标准,上述3条试验路的交通量均可归为低等级。

与上述3个试验路较近的安大略省伦敦机场(大致位于3个试验路的中间)的气象记录显示,1960年至1971年间的最低气温曾一度达到约 $-31.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[22]。然而,根据Superpave标准,针入度等级为85/100的沥青性能相当于PG 58-28,说明该地区的道路设计并没有合理考虑气候情况^[22-23]。1968年至1978年间,相关工作部门每年都对3条试验路的路表裂缝进行调查统计。

1.1.2 曼尼托巴省圣安妮地区(1967年)

位于曼尼托巴省温尼伯以东40 km处的圣安妮地区的试验路于1967年修建^[4,24-30]。其目的是阐明沥青路面低温开裂的机理,因此该地区采用多种设计方法应用于29个试验路段中。相关报告分别由Deme等^[24]于1968年、Young等^[25]于1969年、Deme^[26]于1969年、McLeod^[27]于1969年、Burgess等^[28-29]于1971年和1972年、Gaw等^[30]于1974年以及Deme等^[4]于1987年发布。

圣安妮试验路分别研究了基层类型(黏土和砂)、沥青标号、填料掺量、集料类型和路面结构等因素对沥青路面寿命的影响。为了监测路面内部的温度变化情况,在沥青路面内埋入温度传感器并每隔30 min记录一次温度。试验还采用一种自动量测系

统对路面的裂缝进行检测^[4]。此外,试验还对抽提回收的沥青进行了性能测试和对比^[4]。

1.1.3 安大略省因尼斯菲尔市(1990年)

因尼斯菲尔试验路铺筑于1990年,具体位于400号公路南向车道,是400号公路翻修工程的一部分,其目的是评估改性沥青的高温车辙和低温开裂特性^[30]。因尼斯菲尔位于多伦多以北100 km处。试验路总长度28 km,包含7个试验段,长度从325 m到545 m不等。试验路总结报告由Ponniiah等于1996年发布^[31]。

因尼斯菲尔试验路在1998年的 T_{AADT} 高达36 000辆。7个试验段采用了来自不同供应商的5种沥青:2种弹性体改性剂改性沥青、再生聚乙烯改性沥青、吹制氧化剂改性沥青和80目橡胶粉改性沥青(基质沥青等级为85/100)。路面结构由40 mm的上面层和50 mm的下面层组成。需要注意的是,该试验段也没有根据当地的气候条件来对沥青进行合理的选择。在1994年和1995年分别对该试验路的车辙深度以及横向和纵向裂缝进行了调查,主要结果见后文详述。

1.1.4 安大略省赫斯特市(1991年)

为支持美国战略公路研究计划(SHRP),加拿大于20世纪90年代初启动了加拿大战略公路研究计划(C-SHRP),并在安大略省北部赫斯特和阿尔伯塔省北部拉蒙特附近修建了2条试验段^[32-40]。这2条试验段的主要目的是更好地了解不同油源沥青的低温开裂行为,并验证SHRP沥青规范^[34-44]。有关安大略省赫斯特试验的报告分别由Robertson^[33]于1995年、Anderson等^[36]于1999年、Iluita等^[21]于2004年以及Hesp等^[5]于2007年发布。

上述试验路位于赫斯特以西62 km处,距离631号公路2 km^[5]。该试验路由4条试验段组成,每个试验段采用了3种不同沥青(包含两种等级)。其中等级为PG 52-33的沥青是通过对加拿大西部和委内瑞拉原油进行直馏分馏来生产,而等级为PG 46-37的沥青是采用吹制氧化技术进行生产^[5,32]。

试验路设计选择的沥青等级符合SHRP沥青胶结料选择软件(LTPPBind)的要求^[43]。该试验路所在地区的气候和交通水平所需的沥青等级为PG 46-34,4条试验段所选用的3种沥青均能严格满足这一要求^[21,45]。

试验段1、2和3为单层结构,路面厚度为50 mm,试验段4为双层结构,总厚度为100 mm。试验路的 T_{AADT} 在1990年时约为300辆(卡车占25%),而到1999年增加至约600辆(卡车占29%)^[21]。

该试验路建成通车3年以后,也就是1994年初,该地区经历了一场持续的寒流。据统计,该地区试验路路表温度分别达到 $-31.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-33.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-32.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[34]。而根据美国国家公路与运输协会(AASHTO) M320标准的预测,该试验路在至少8年的服役期内不会出现低温开裂^[34,36]。其原因是该试验路严格按照当地的气候条件进行设计,路面的抗裂性可以满足当地的气候变化情况。

1.1.5 阿尔伯塔省拉蒙特地区(1991年)

拉蒙特试验路由C-SHRP项目支持,阿尔伯塔交通局进行设计建造。试验报告分别由Robertson^[33]于1995年、Dunn等^[34]于1997年、Anderson等^[35-36]于1998年和1999年、Gavin等^[19]于2003年以及Zhao等^[37]于2006年发布。Bouldin等^[38-39]于1999年和2000年、Bouldin等^[40]于2000年、Rowe等^[41]于2001年、Hesp等^[5]于2007年以及Mensching等^[42]于2016年分别发布报告对拉蒙特沥青路面试验路结果与沥青性能的关系进行了补充。

试验路地点位于埃德蒙顿东北80 km处^[32,34-36],采用双层路面结构设计,试验路分为7个长度为400~500 m的路段^[19,36]。

7个试验路段所用的沥青中有一部分的沥青等级适用于当地的气候条件,但是也有一部分沥青等级无法满足当地的气候条件^[37,43]。7种沥青中,除了2种吹制氧化沥青外,其余的5种沥青都是当地炼油厂采用阿尔伯塔原油生产的。值得注意的是,其中1种沥青含有大量天然蜡。

在试验路建成后的3年内,试验人员对冬天路表气温以及路面层内的温度进行了监测^[35]。其中气温数据来自当地的气象站,气象站记录的气温最低值为 $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[19-20,35]。此外,试验人员每年还会对试验路面的病害状况进行一次检测,该检测一直持续到2000年^[19-20]。

1.1.6 安大略省布雷斯布里奇地区(1994年)

1994年,安大略省在布雷斯布里奇以东的118号公路上修建了7个试验路段。Ponniah等^[44]于1996年、Kennepohl等^[46]于1998年以及Iliuta等^[45]于2004

年分别发表了试验路的研究结果。

2002年,1号和2号路段的 T_{AADT} 约为3450辆,其中卡车占5.8%,而其余路段的 T_{AADT} 较低,仅为1250辆,其中卡车占4.1%^[45]。依据AASHTO M320标准,试验路所用的5种改性沥青的等级差异很大,其中高温分级从 $66\text{ }^{\circ}\text{C}$ 到 $75\text{ }^{\circ}\text{C}$,低温分级从 $-29\text{ }^{\circ}\text{C}$ 到 $-38\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[44]。这5种改性沥青中使用的改性剂包括苯乙烯-丁二烯嵌段共聚物(SB)、聚乙烯和两种氧化材料^[44-46]。依据SHRP沥青胶结料选择软件(LTPPBind)的要求,在98%的置信度下,试验路所选择的沥青胶结料的等级为PG 53-32。而在50%的置信度下,试验路所选择的沥青胶结料的等级为PG 46-26^[43-46]。根据气象数据,布雷斯布里奇地区的最低气温为 $-27.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ (2003年),略高于沥青分级中PG-29等级^[45]。由此可知,所有试验路段的设计都满足当地的气候要求。

1.1.7 安大略省佩塔瓦地区(1996和1997年)

佩塔瓦地区的试验路于1996—1997年间在17号公路上进行铺筑。该试验路是美国长期路面性能(LTPP)研究计划的一部分,试验人员在佩塔瓦河西建造了6个试验路段,其中4个路段使用了满足Superpave等级要求的沥青,1个路段使用了针入度等级为85/100的沥青。相关试验报告由Iliuta等^[45]于2004年发布。

满足SHRP规范要求的沥青的PG分级分别是PG 58-40P(SBS聚合物改性沥青,马歇尔和Superpave设计方法)、PG 58-34(基质沥青,Superpave设计方法)、PG 58-34P(SBS聚合物改性沥青,Superpave设计方法)和PG 58-28(基质沥青,Superpave设计方法)^[45]。试验路在2000年时的 T_{AADT} 为6000辆,其中卡车占14%^[45]。在2003年初,试验路的最低地表温度达到了 $-26.5\sim 27.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 并持续了一个星期^[45]。由此可知,该试验路在任何时候温度都没有达到PG 58-28中的 $-31\text{ }^{\circ}\text{C}$ 等级。

1.2 近代安大略省沥青路面试验段

从2003年到2008年,安大略省交通部(MTO)委托加拿大女王大学(Queen's University Canada)进行了4次新的沥青路面试验段研究。旨在改进当前的Superpave设计规范,以更好地控制安大略省路面的开裂情况。这些试验路是针对安大略省东部和东北部在20世纪90年代采用Superpave设计规范不久后

路面出现大量过早塌陷而设计的^[6,45,47-50]。

该试验路在蒂明斯市以北的655号高速公路上,分别于2003年和2007年修建了7个和8个试验路段;于2006年在卡塞尔曼地区附近的417号高速公路东行车道上修建了7个试验路段;于2008年在多伦多的427号高速公路南边快速车道上修建了5个试验路段。这些试验路段直接暴露在各种极端气候和交通条件下。试验路段所用的沥青包括普通基质沥青、吹制氧化法制备的沥青、酸改性沥青、低聚物和高聚物改性沥青等。试验路段所用的沥青混合料是根据Superpave规范来设计的,其中一些沥青混合料使用聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)和聚丙烯(PP)纤维来进行增韧。试验路的测试报告由Hesp教授团队以及他们在安大略省交通部的合作者共同完成^[45,51-59]。

相比于前述试验路,该试验路的一个主要优点是:自2012年起,所有27个路段的自动道路分析(ARAN)数据(包括路面所有重要的性能问题)均为开放获取。由此本文依据这些获取的数据,回顾了该试验路的性能评估情况,并讨论了其结果对改进现有规范带来的启示。

1.2.1 安大略省蒂明斯市(2003年,第一阶段)

655号公路一期试验路位于蒂明斯市以北约50 km处,该试验路于2003年底建成。在2021年,该公路已达到使用寿命,因此进行了重建。重建的试验路所采用的沥青与之前具有相似的低温等级(从 -35°C 到 -37°C),高温等级从基质沥青的 52°C 到改性沥青的 58°C 、 64°C 和 70°C 不等。为达到改进Superpave规范的目的,该试验路采用较窄的低温等级范围以控制试验变量。

该试验路所有路段的施工设计完全相同。即采用50 mm下面层+40 mm上面层的路面结构,集料的最大公称粒径分别为19 mm和12.5 mm。此外,该试验路根据Superpave规范对沥青的用量进行了优化,沥青上面层的沥青用量为5%,下面层为4.8%。试验路所用沥青除了来源和等级是变量外,其余变量均被严格控制。试验期间,试验路的年 T_{AADT} 约为1 200辆,其中重型卡车占较大比例。

该试验路在投入使用的前几年内路表温度有两次达到最低设计温度(-34°C)^[21],而试验路所在地区的气温最低可达 -48°C 。试验路以南40 km处的

机场,自2003年以来有18次气温低于 -40°C ^[52],气温低于 -30°C 的天数达到了474 d^[17],其中2004年初达到了最低的 -43.6°C ^[17]。由此可以看出,该试验路所在地区属于极寒地区。

在2012年之前,试验人员每年都会对试验路路表裂缝状况进行调查,而在2012年之后则使用ARAN车辆收集路面状况数据。分析采用病害表现指数(I_{DMI})和路面状况指数(I_{PCI})来评估每个路段的性能^[59-60]。本文对ARAN车辆的调查结果进行了综述。

1994年至2015年期间,Hesp教授团队和交通部的合作者定期发布有关路面开裂的报告^[5,7,21,51-59],其中本文首次对当前所有4项试验的 I_{PCI} 数据进行了阐述。

1.2.2 安大略省卡塞尔曼地区(2006年)

卡塞尔曼试验段于2006年在417号公路上修建。该试验路在严重开裂的旧路面上分两次铺设了7段路面,最终路面厚度(包括新加铺层)为40~46 cm。2019年,该地区的 T_{AADT} 约为26 000辆。该试验路所采用的沥青低温等级均满足PG-34等级,其中有两种沥青的等级实际上达到了PG-40。而沥青的高温等级从PG 64到PG 82不等。Togunde等^[57]于2012年发布了关于该试验段的数据。

自2006年以来,该试验路有27 d的气温低于 -30°C ^[17]。其中在2016年初,试验路所在地区达到了最低气温(-36°C),相应的地表温度约为 -27°C 。

多年研究及现场钻芯取样测试分析表明:试验路施工方未按照原设计进行沥青材料的使用。试验段施工过程中采集沥青样本显示某些沥青含有回收机油(REOB),但是现场钻芯样本分析表明所用的沥青中并不含有REOB,并且芯样发生了部分开裂。最后,芯样显示其中一个试验段改性沥青混合料的空隙含量高达10%。上述现象对后期的结果分析造成了很大的干扰和困难。

1.2.3 安大略省蒂明斯市(2007年,第二阶段)

655号公路二期试验路位于蒂明斯郊外铁路交叉口以北,建于2007年。该试验路在设计时进一步控制了变量,旨在制定更好的疲劳开裂规范。该试验路所有路段的下面层使用最大公称粒径为19 mm的集料,上面层使用最大公称粒径为12.5 mm的集料。

试验路所用沥青包括对照组(等级为PG 52-34

且掺有REOB)和另外4种使用聚合物[SBS、SB、聚磷酸(PPA)和反应性乙烯三元共聚物(RET)]改性的沥青,以及2种针入度等级为300/400的沥青(这2种沥青所制备的混合料使用了PET和PP纤维进行改性)。除对照组外,所有沥青均在阿尔伯塔省埃德蒙顿炼油厂采用真空蒸馏制得。由于该种沥青含蜡量极低,由此确保沥青热氧老化的一致性,并几乎完全消除沥青的热可逆老化现象(凝胶化)的影响^[5]。

1.2.4 安大略省多伦多市(2008年)

427号公路试验段位于多伦多市西部加拿大第二繁忙高速公路的南向快速车道,于2008年建成。这条高速公路连接皮尔逊机场和伊丽莎白女王大道。2016年,南向4条车道上的 T_{AADT} 远超过40万辆(即每条车道约10万辆)。Holt等^[59]曾于2015年对该试验路段进行过报道。

该试验路在波特兰水泥面层上铺设两层热拌沥青混合料,形成复合路面结构^[59]。下面层所采用的集料最大公称粒径为19 mm、下面层厚度为50 mm,上面层为集料最大粒径12.5 mm、厚度40 mm的沥青玛蹄脂碎石混合料(SMA),混合料设计采用Superpave设计方法。自2012年起,试验人员使用ARAN车辆来记录路面状况。但是,这次试验未对回收的沥青或混合料进行测试,因此不能排除出现与417号公路试验段相同的情况。

据报道,多伦多市自2008年以来的最低气温为 $-26\text{ }^{\circ}\text{C}$ (2016年),相应的路表温度约为 $-19\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。而该市气温低于 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的次数约为36次^[17]。因此,该试验路所对应的沥青等级为PG 64-28。

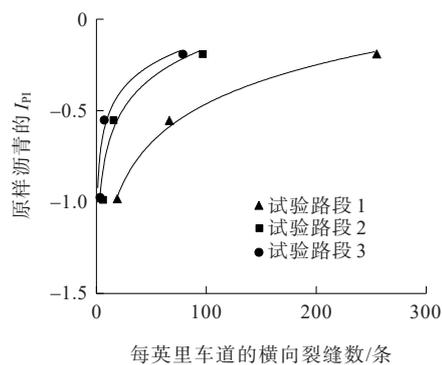
2 讨论

2.1 早期加拿大沥青路面试验段

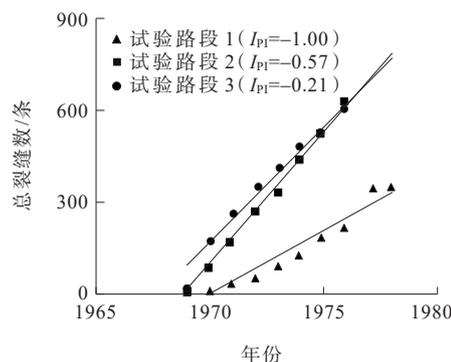
2.1.1 早期研究(1960年)

1960年在安大略省西南部建造的3个试验项目是为了探究沥青的温度敏感性与沥青路面开裂行为之间的关系。1969年,McLeod对原始沥青和使用9年后再回收的沥青分别进行了测试,并且对试验路段进行了裂缝调查,在6年之后即1975年也进行了同样的测试和调查^[22-23]。McLeod得到结论是,沥青的温度敏感性对路面开裂有很大影响(图1),但对老化后的沥青影响较小^[23]。此外,使用较软的沥青可以有效控制路面的开裂。但是由于试验路段对气候

条件的考虑不足,关于沥青温度敏感性和硬度对沥青路面抗裂性能的影响的结论存在一定的经验性,还需进一步进行验证。



(a) 1969年关于3个试验段的报告



(b) 截至1978年试验路段中横向裂缝的总数

图1 以针入度指数(I_{PI})衡量的温度敏感性对安大略省西南部试验路横向裂缝的影响^[22-23]

Figure 1 Impact of temperature sensitivity measured by penetration index (I_{PI}) on transverse cracks in southwestern Ontario pavement test section^[22-23]

针入度指数(I_{PI})是通过在两个不同温度下测量针入度得出的温度敏感性的评价指标,在该试验路研究中首次采用针入度指数来验证室内试验研究中的结论,即凝胶型沥青(针入度指数高的沥青胶结料)性能差,而溶胶型沥青(即针入度指数低的沥青胶结料)在使用中开裂较少^[61-72]。这一事实被20世纪80年代在北美广泛使用的Superpave规范所忽视^[49]。

1969年,Young等^[25]在圣安妮地区的试验路完工2年后,首次发布了关于该试验路的报告。报告指出沥青的用量和集料对路面裂缝的影响不大。然而,路面结构类型和交通量对路面裂缝的演变有一定的影响。此外,研究发现,沥青本身的特性对路面的抗裂性能有着重要影响,这一结论与McLeod的研究结果一致^[22-23]。

沥青研究领域的许多学者多年来一直忽视了圣

安妮地区试验路的一个重要观测结果,而Deme等^[4]于1987年对该观测结果进行了详细讨论。结果发现:回收的沥青在早期会迅速老化,但随着时间的推移沥青会达到一定的老化水平。与此相反,从试验路提取的芯样会随着服役时间的增加而继续变硬,相关的裂缝也会随着时间的推移不断增加。由此,沥青逐渐的“老化硬化”或“结构硬化”(即热可逆老化)对路面的长期开裂具有重要影响。这是研究人员首次报告实际路面中随时间变化的热可逆老化现象。

2.1.2 改性沥青和Superpave(1990年)

1990年,在安大略省因尼斯菲尔市附近的400号高速公路上进行的试验路研究,主要涉及一些改性沥青的性能测试。Ponniiah等^[31]于1996年报道了关于这些沥青性能的测试结果。

由于该地区靠近格鲁吉亚湾,从而为冷空气提供了一条由南部向北极的通道,使得该地区经常受到极端天气的影响。Ponniiah等^[31]的一项研究发现,吹制氧化的沥青会过早并且过度开裂。相比于控制组的85/100基质沥青,采用吹制氧化沥青的路面的裂缝数量高达10倍以上。第二项发现,与直接使用85/100基质沥青相比,聚合物改性剂并未在性能方面起到增强作用。第三项发现,使用再生聚乙烯路段的裂缝是对照组的3倍。这些发现在很大程度上与Traxler等^[61-63]对溶胶型和凝胶型沥青的早期研究以及McLeod^[22-23]关于 I_{PI} 对路面开裂的影响的看法一致,其主要原因是吹制氧化的沥青易于凝胶化,导致 I_{PI} 的增加。过多的聚合物会破坏沥青胶体结构,并通过凝胶化、热可逆老化和渗出老化引发过度开裂。

1991年在阿尔伯塔省拉蒙特市和安大略省赫斯特市进行的两项C-SHRP试验路的研究结论近乎一致,即含蜡和吹制氧化的沥青在低温开裂方面表现不佳。用优质(均质)的加拿大原油炼制成的沥青表现优异^[19-20,36]。关于蜡对沥青开裂的影响研究已持续多年,蜡与高含量的沥青质结合,特别容易形成胶凝体,从而诱发开裂^[5,61-63,72-77]。然而,该过程具有显著的时间依赖性和热可逆特性。因此,沥青低温性能测试前的保温时间不同,得到的低温性能测试结果可能存在显著差别。此外,热可逆老化对沥青中蜡含量的测试结果可能会产生影响^[5,73-75]。

为了说明这一点,图2提供了来自Zhao等^[37]的数据,对经过3d低温养护后的Lamont试验路沥青进

行了常规的Superpave测试和改进后的测试。三角形代表依据AASHTO M320确定的低温连续分级结果,代表沥青经过1h低温保温后测得的蠕变劲度模量主曲线斜率达到0.3时对应的温度值,该数据来自Gavin等^[19]。圆形代表沥青试件经过72h低温保温后所得的 m 值达到0.35时对应的温度,该数据来自Zhao等^[37]。值得注意的是,2号试验路段和7号试验路段的数据未包含在内,主要原因是7号试验路段从未发生裂缝,而2号试验路段由于裂缝检测仪器损坏、路面厚度较小和空隙率较高等因素导致裂缝数据较为异常^[37]。结果显示:性能较差的含蜡和吹制氧化的沥青的低温等级变化接近 28°C ,而优质的Cold Lake胶结料的低温等级变化约为 4°C ,对应的试验路在12年的使用后仍未开裂。由于沥青在温度每降低 6°C 硬度会增加1倍, 24°C (4个等级)的低温分级损失相当于16倍的硬度差异。从而解释了在Superpave标准下相同低温等级的沥青实际抗裂性能存在显著差异的原因。

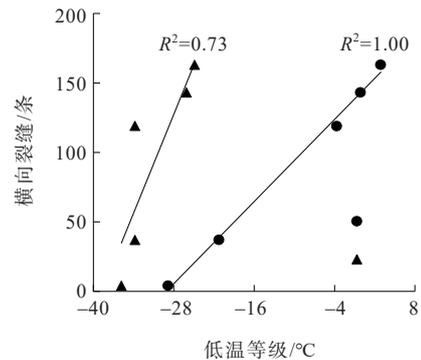


图2 低温性能指标和保温时间对低温分级结果的影响

Figure 2 Impact of low temperature performance index and holding time on classification results at low temperatures

赫斯特市的C-SHRP试验路的结果与吹制氧化的沥青的过度开裂较为相似,相比Superpave设计方法预测的开裂时间要早^[21]。

在安大略省布雷斯布里奇地区1994年修建的试验路段和佩塔瓦地区1996至1997年修建的试验路段存在的一些问题对其结果的分析造成了一定的困难。例如,118号公路上的交通分流,沥青分级范围过宽,以及17号公路在上面层未铺筑时下面层经历了一整个冬天。然而,通过对几个试验路段混合料进行抽提回收并测试发现,实际的沥青的临界开裂温度比Superpave规范预测的要高^[45]。118号公路和

17号公路试验路段沥青的低温临界分级温度测试结果如图3所示。在图3中,虚线表示记录的最低温度。左侧数据按 Superpave 规范测试所得,右侧数据按 EBBR 试验(72 h 低温处理)测试所得。在路表病害调查时,只有118号公路和4号公路试验段没有病害^[21]。图3结果显示:这两个试验路中的5个路段沥青的开裂温度范围为3.7~7.0℃,比试验中测试的等级要高。因此,这证明了热可逆老化(凝胶化)是BBR试验中的一个重要影响因素,但这个问题很容易得到解决,只需通过在测试前将样品保温足够长的时间使沥青试件达到平衡状态。

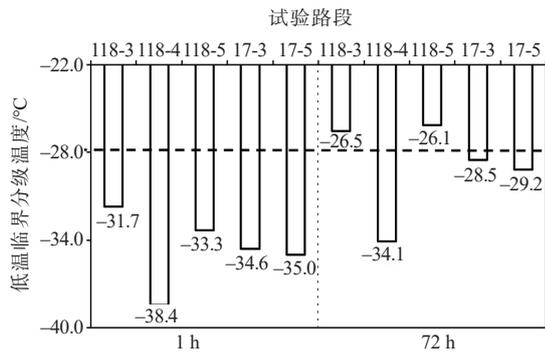


图3 118号公路和17号公路试验路段沥青的低温临界分级温度测试结果

Figure 3 Test results of critical classification temperatures of asphalt at low temperatures in test sections of Highway 118 and Highway 17

2.2 近代安大略省的试验

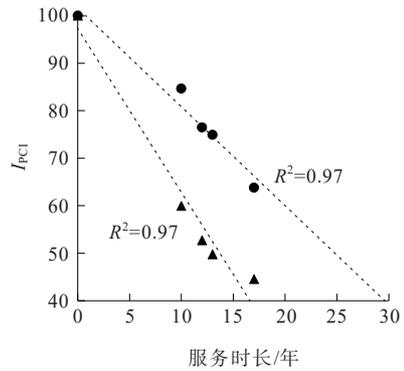
为了改善接近16 700 km(中心线)公路网的路面设计和材料选择,并为气候变化可能带来的影响做好准备,安大略省交通运输部(MTO)在21世纪初期委托进行了安大略省的沥青路面试验路研究。这27个试验路段为研发和验证改进的沥青测试方法和验收标准提供了大量数据^[21,5-7,51-59]。主要的性能结果,包括所有路面病害状态,主要采用路面状况指数 I_{PCI} 来评价。在分析性能变化之后,进行生命周期成本分析(LCCA)。

2.2.1 蒂明斯,安大略省(2003年,第一阶段)

蒂明斯第一阶段的试验路在第一个冬天受到-48℃的低温影响,并在随后的几年中暴露在一40℃以下的寒冷天气中^[51]。2004年,路面有两次接近-34℃的设计值,随后几年有几次降至-30℃以下。虽然所有路段都按照 Superpave 提供的指南来进行

设计,但路面早期开裂情况却因沥青的不同而有所差异。具体而言,使用轻度改性的阿尔伯塔沥青的试验路段几乎不存在开裂情况;而对于所有其他改性沥青,包括聚合物、氧化残留物、酸、REOB以及其他未知改性剂改性沥青,相应的试验路面均存在不同程度的早期开裂。

在投入使用不到5年的时间内,其中几个试验路段出现了严重开裂^[52]。与 Zhao 等^[37]对 Lamont 试验材料的研究一致,该结果清楚地表明 Superpave 规范在寒区应用存在较大的缺陷而且成本高昂。4号路段和5号路段中使用了相同SBS掺量的沥青,但却表现出截然不同的性能,主要原因是4号路段中的沥青还加入了REOB(回收精制机油底)。因此,该结果表明使用聚合物改性剂能够提高路面的使用寿命的传统固有观念存在一定的问题,尤其是在寒冷地区。此外,使用轻度改性沥青的1号路段在18年服役过程中表现出较好的性能,如果该路段在2021年的试验中没有重建,可能还能继续使用7~8年。图4显示了1号路段(表现最佳)和4号路段(表现最差)的 I_{PCI} 与服务年限的关系,以及于2019年拍摄的代表性照片。



(a) 1号试验路段(最佳性能,圆形符号)和4号路段(最差性能,三角形符号)的 I_{PCI} 与服务时长



(b) 2019年1号试验路段(左)与4号试验路段(右)

图4 蒂明斯第一阶段试验的路面性能

Figure 4 Pavement performance of phase I trial in Timmins

显然,对于这7种材料中的6种,其性能与令人“满意”的 Superpave 沥青规范中所期望的不一致。

数据还显示了长期监测路面的价值,这是因为如果实施改进后的沥青测试规范,就可以凸显沥青测试规范和评价标准对路面寿命的影响。4号路段在使用14年后达到了其生命周期的终点,该生命周期定义为 I_{PCI} 衰减至50,该临界值一般用于低交通量道路。相比之下,1号路段预计在25~30年后将达到其寿命的终点。

人们一度担心,4号路段的寿命大幅缩短将成为21世纪初安大略省道路的常态^[6,47-50]。安大略省交通运输部(MTO)的及时干预,避免了这种情况的发生。然而,对于许多尚未解决沥青规范问题的北美其他用户来说,路面使用寿命缩短约50%已成为事实。

对蒂明斯第一阶段的试验路不同阶段的沥青进行采集分析,并与路面的裂缝密度进行相关性分析。如图5所示,图中正方形标志是根据AASHTO M320标准试验测得的低温分级;菱形标志是使用8年后抽提回收的沥青,并根据标准BBR试验进行低温分级;圆形标志是采用EBBR试验(扩展的弯曲梁流变试验)对抽提回收沥青进行低温分级测试的结果。从沥青厂储罐中取样的沥青在经历实验室长期老化处理(标准PAV)后按照AASHTO M320规范进行低温分级测试,结果如系列1所示。对于现场服役后钻芯取样抽提回收的沥青,在低温下保温1 h(系列2)和72 h(系列3)后进行低温连续分级测试,发现72 h低温保温后的沥青的低温连续分级温度与相应的裂缝密度之间的相关性最大,且拟合误差最小。在此发现的基础上,提出了EBBR试验,充分考虑了沥青的热可逆老化^[7,21,37,45,48,51-58]。该方法于2006年在安大略省发布,并于2016年被AASHTO采纳为临时标准。

EBBR试验方法已在所有安大略省的道路铺装合同中用于沥青的验收。随着对提取和回收沥青进行测试的推广和实施,沥青路面开裂病害显著减少,路面使用寿命周期也开始满足并超过其设计值。

EBBR试验方法的一个缺点是对同一种沥青,需要制备12个沥青小梁并进行36次测试,总耗时长达3 d。为了解决该问题,以加拿大女王大学Hesp教授团队为代表的沥青研究人员目前在寻求使用相位角测试来替代EBBR分级,以减少测试时间和沥青用量^[49]。早在20世纪90年代就有报告提出,沥青路面冻融温度范围的相位角与裂缝病害高度相关^[78-79]。当在较高温度下测试沥青时,热可逆老化现象的影

响可能不大,主要原因是沥青在温度较高时能够快速达到平衡状态。此外,相位角直接与沥青中的固体含量(沥青质和蜡)相关,因此,相位角是用于评价抗开裂性能的重要参数^[80]。研究发现,相位角与损失模量和存储模量之比相关, $\tan \delta = G'/G''$,因此具有较高的重复性和再现性^[81],能够满足规范对于准确度和精度的要求。

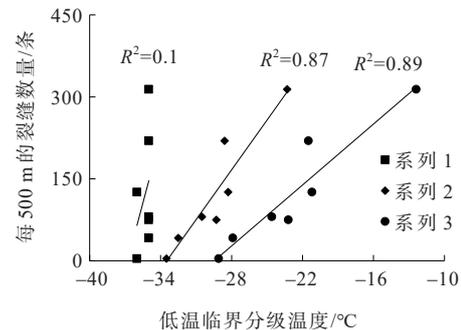


图5 热氧老化和热可逆老化对标准BBR和EBBR试验中沥青低温分级结果的影响

Figure 5 Impact of thermally oxidative aging and thermally reversible aging on results of asphalt classification at low temperatures in standard BBR and EBBR trials

2.2.2 卡塞尔曼,安大略省(2006年)

卡塞尔曼的试验路段比蒂明斯第一阶段试验的效果稍好,因为当地气候不那么寒冷,而且路面结构要厚得多。图6显示了路段1(表现最佳)和路段6(表现最差)的服务年份与 I_{PCI} 之间的关系。可以发现:除了Superpave等级不足外,其他因素也对结果分析造成了一定的影响。其中路段6的空隙率为10%,而其他路段的空隙率为4%~7%,主要原因是路段6施工过程中沥青混合料的压实不足。此外,路段4和5受到未知污染物的污染。ARAN数据显示,对于蜡含量较低的产自加拿大西部的优质沥青(路段1和路段2),即使是位于渥太华东部横贯加拿大的公路交通流量较高的道路,且在2006年经历了路面基层严重受损情况下,也能够达到预期效果。

图6中线性拟合结果表明:卡塞尔曼的1号路段表现明显优于蒂明斯的1号路段,两者均采用相同的Lloydminster基质沥青和相同分级PG 64-34。这种差异可能是由于蒂明斯比卡塞尔曼的气温更低(-30°C以下天数分别为474 d和27 d),以及卡塞尔曼的路面结构更厚导致的。卡塞尔曼的1号路段使用了在Lloydminster基质沥青掺入3%~4% SBS的

改性沥青(PG 66-37分级范围为103℃),与使用了在Lloydminster基质沥青掺入6%~7% SBS的改性沥青的2号路段(PG 72-38分级范围为110℃)表现出相似的性能。

相比之下,两者的寿命比使用在Cold Lake基质沥青中掺入6% SBS的改性沥青的3号路段(PG 83-40分级范围为123℃)约高50%。因此,该结果再次证明了在寒冷气候中使用SBS聚合物对基质沥青进行改性时,并不总是越多越好。3号路段使用的沥青中会有较多的胶凝物形成,这意味着冬季时沥青中出现热收缩应力的可能性和持续时间会增加,从而增加沥青路面的开裂可能性。

6号路段的路表状况衰减速度比1号路段快了2.5倍以上。然而,目前尚不清楚这种差异有多少是由于沥青生产过程中的过度加热、路面摊铺过程中过高的空隙含量或其他未知因素所致。

尽管卡塞尔曼试验路存在种种局限性,但它取得了一些难以从实验室测试中预测的发现,再次证明了路面性能长期监测的价值。

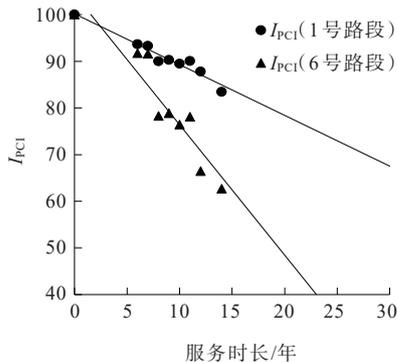


图6 卡塞尔曼试验路面性能:1号试验路段(圆形,表现最佳)和6号试验路段(三角形,表现最差)的 I_{PCI} 与服务年份(为减少混杂,其余5个路段略)

Figure 6 Casselman pavement performance: I_{PCI} versus service year for test sections No. 1 (circular, best performer) and No. 6 (triangular, worst performer) (remaining five sections are left out to reduce clutter)

2.2.3 蒂明斯,安大略省(2007年)

蒂明斯第二阶段的试验路段于2007年建成,位于与第一阶段试验相同的高速公路上,距离I期的试验路段往南约30 km。该试验路的唯一变量是沥青的改性剂类型和改性剂含量,因为除对照组以外的所有基质沥青都是Cold Lake基质沥青。

蒂明斯第二阶段试验路数据如图7所示,其规律

与图4和图6类似。有趣的是,与蒂明斯第二阶段试验相比,所有路段的路面性能衰减速度都显著降低。然而,值得注意的是,不同路段的性能存在较大差异。9号路段和14号路段的性能优于15号路段对照组,因为后者使用REOB改性,因此可能存在热可逆老化和不可逆老化(氧化)的影响。

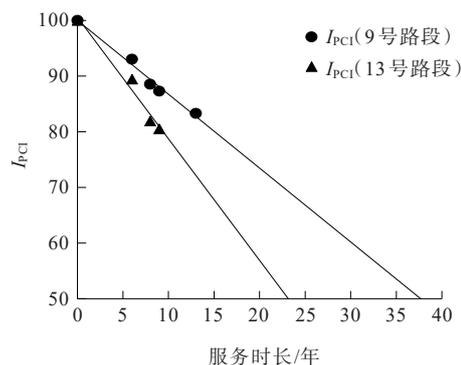


图7 蒂明斯第二阶段试验路性能:9号试验路段(圆形,混合料中加入0.3% PET纤维,表现最佳)和13号试验路段(三角形,加入7% SBS改性剂,表现最差)的 I_{PCI} 与服务年限(为减少混杂,其余5个路段略)

Figure 7 Timmins pavement performance in Phase II: I_{PCI} versus service year for test sections No. 9 (circular, best performer with 0.3% PET fiber on the mix) and No. 13 (triangular, worst performer with 7% SBS modifier) (remaining five sections are left out to reduce clutter)

使用低掺量SBS改性沥青(掺量3.5%)的14号路段的性能明显优于高掺量SBS改性(掺量7%)的11号路段和高掺量SBS改性(掺量7%)的13号路段。13号路段的预期寿命不到23年,比9号和14号路段估计的38年低36%。其中,9号路段使用了0.3% PET纤维改性的沥青混合料,14号路段使用了3.5% SBS改性的沥青。这些差异可能与高聚合物改性沥青凝胶的程度有关。凝胶的形成会降低应力松弛能力,并会在一定时间内不可避免地增加在寒冷气候中出现的低温开裂病害的可能性,从而降低 I_{PCI} 。

8号路段(聚丙烯纤维改性)的表现比9号路段(聚酯纤维改性)差,可能是因为前者在生产过程中过度加热,并在铺装之前热存储时间过长。混合料从加热的卡车中倒出来时温度达到了160℃,意味着聚丙烯纤维在生产过程中可能已经熔化,并且沥青也发生了过度老化。

这些发现与早期试验路结果一致,但提供了一个额外且重要的结论。上述数据反映的路面使用性能衰减速度在第二阶段比第一阶段明显降低,这可

能意味着基质沥青的真正低温等级的影响更加重要,而改性剂的影响次之。

2.2.4 多伦多,安大略省(2008年)

试验路在加拿大第二“繁忙”的公路——427号公路上铺筑,试验路段就建造在427号公路南边边界的快速车道上,它也是全北美最繁忙的路段之一。道路铺装工作在夜间进行并持续数日。沥青未进行纯度或成分测试。因此,获得的沥青数据来自于实验室样品,以及施工后沥青厂的储罐样品。这些试验的局限性在分析和考虑性能的差异时是不可忽视的。

图8展示了与图4、6、7相同的数据。在路面性能损失率方面,使用了3.5% SBS改性沥青的4号路段(PG 76-30分级范围为106℃)表现得最为明显。其次是使用了2.5% RET改性沥青的3号路段(PG 75-30分级范围为105℃)。对于掺入纤维素的对照组1号路段(PG 67-28分级范围为95℃),以及含有6% SBS改性沥青的5号路段(PG 78-24分级范围为102℃),均表现中等水平。表现最佳的是在混合料中掺入0.3%的18 mm PET纤维的2号路段(PG 67-28分级范围为95℃),使路面的抗裂性能得到了极大的提升。

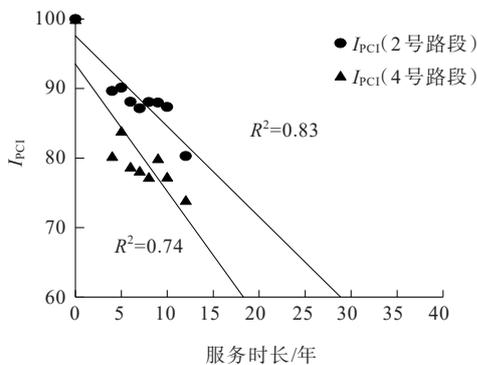


图8 多伦多试验路段的路面性能:试验路段2(圆形,对照混合物中使用0.3% PET纤维,性能最佳)和试验路段4(三角形, Cold Lake 基质沥青中掺入3.5% SBS改性剂,性能最差)的 I_{PCI} 与服务年限(为减少混杂,其余5个路段略)

Figure 8 Toronto pavement performance: I_{PCI} versus service year for test sections No. 2 (circular, best performer with 0.3% PET fiber on control mix) and No. 4 (triangular, worst performer with 3.5% SBS modifier on the Cold Lake matrix asphalt) (remaining five sections are left out to reduce clutter)

不同路段的服务性能损失率有着明显差异,进而会对全寿命周期成本产生影响。然而,并不能完全确定2号路段的表现是否明显优于第3~5号路段,

因为这些路段的分级范围存在差异。尽管如此,对后者来说,更大的分级范围很可能再次导致了过多的凝胶形成,从而增加了路面开裂,并减少了开裂后愈合的能力。 I_{PCI} 图中的点更加分散,这可能与记录的 ARAN 数据的变异性有关,可能来源于沥青混合料面层下的水泥混凝土基层的开裂^[59]。

2.3 生命周期成本分析

生命周期成本分析(LCCA)用以确定基于审查使用寿命和处理成本的最经济的路面策略。LCCA的传统方法是设定一个终止日期(例如,30年),并在假定的生命周期内包括所有初始建设成本以及相应的维修和养护成本。有时也会包括使用者延误成本,但这种成本涉及许多不确定性和假设,因此在MTO中并不常用。

在本文分析中使用了不包括使用者延误成本的30年LCCA,以说明最具成本效益的路面策略。执行LCCA需要每个路段的3个信息:初始使用寿命、相应成本以及30年维护和修复模型^[60]。计算细节将在下文提供。

2.3.1 初始寿命估计

每个路段的初始使用寿命是基于 I_{PCI} 的路表状况的线性拟合来估算的。 I_{PCI} 是一个综合指数,代表了整体路面状况,范围为0~100,100表示建成后即为最佳状态。 I_{PCI} 包含了车辙、裂缝、剥落和水损害等病害的指标。当 I_{PCI} 衰减至较差时,路面达到其使用寿命的终点,需要进行重建。评定 I_{PCI} 为较差的依据是随着道路类型而变化的。例如,对于高速公路, I_{PCI} 较差对应的值是65;而对于干线道路,对应的 I_{PCI} = 55。本研究中,对于655号公路使用了 I_{PCI} = 50作为寿命终止临界值,而对于417号公路和427号公路相应的 I_{PCI} 临界值为65。因此,基于多年来 I_{PCI} 的实际变化,可以通过最佳的拟合曲线(即线性拟合)来预测使用寿命。 I_{PCI} 数据的线性拟合示例可在图4(a)和图6~8中找到。所有路段的预估寿命列在表1中,该表代表了每个路段的初始生命周期。

2.3.2 初步工程造价估算

在成本方面,分析中的所有27个路段假设热拌沥青的基础成本为100 \$/t,不含添加剂。表1中所示的额外成本是根据混合料中使用的改性剂类型和掺量进行估算的。当使用REOB等改性剂时,额外成本为负,表示相应的热拌沥青混合料的基础成本

表1 当前试验路段设计的生命周期成本分析
Table 1 Life cycle cost analysis for current test section designs

路段	改性剂和 Superpave 分级	成本 (\$/HMA)	生命周 期/年	30年LCC/ (\$·km ⁻¹)	LCC节 约/%	R _{BCR} (×100)	E _{MCE} (×100)	
655号公路的蒂明斯 第一阶段试验路段 (T _{AADT} =1 200 辆, 限制 I _{PCI} =50)	1	1%RET+0.25%PPA,PG 65-35	5	25	111 577	9.4	0.50	0.19
	2	吹制氧化+2%SBS,PG 65-36	5	18	135 746	-10.2	0.30	-0.01
	3	3%SBS,PG 65-36	5	17	141 185	-14.6	0.27	-0.04
	4	4%SBS+REOB,PG 67-35	-4	14	143 044	-16.2	0.22	-0.09
	5	4%SBS,PG 66-35	6	21	118 491	3.8	0.40	0.09
	6	吹制氧化+PPA,PG 59-35	5	17	141 185	-14.6	0.27	-0.04
	7	对照组+REOB,PG 54-35	-10	17	123 153	0.0	0.31	0.00
417号公路的卡塞尔 曼试验路段 (T _{AADT} =26 000 辆, 限制 I _{PCI} =65)	1	3.5%SBS,PG 64-34	10	32	108 590	20.0	0.52	0.28
	2	6%SBS,PG 70-34	16	32	113 588	16.3	0.49	0.26
	3	6%SBS,PG 82-40	16	21	128 915	5.0	0.29	0.05
	4	2%RET+0.25%PPA,PG 70-34	10	19	136 266	-0.4	0.24	0.01
	5	2%RET+0.25%PPA,PG 64-40	10	16	147 254	-8.5	0.19	-0.04
	6*	3%SBS,PG 76-34	5	14	155 378	-14.5	0.16	-0.07
	7	对照组,PG 64-34	5	18	135 746	0.0	0.23	0.00
655号公路的蒂明斯 第二阶段试验路段 (T _{AADT} =1 200 辆, 限制 I _{PCI} =50)	8	针入度 300/400+0.3%PP,PG 52-37	12	30	112 089	-10.0	0.60	0.12
	9	针入度 300/400+0.3%PET,PG 52-37	12	38	105 914	-4.0	0.81	0.32
	10	1%PPA+2%SBS,PG 67-34	5	25	111 577	-9.5	0.50	0.02
	11	7%SB,PG 76-37	18	29	112 435	-10.4	0.58	0.09
	12	2.5%RET,PG 67-37	10	28	107 373	-5.4	0.59	0.10
	13	7%SBS,PG 82-40	18	23	130 723	-28.3	0.40	-0.09
	14	3.5%SBS,PG 64-37	10	36	105 589	-3.6	0.77	0.28
15	对照组+REOB,PG 55-34	-10	22	101 882	0.0	0.49	0.00	
427号公路的多伦多 试验路段 (T _{AADT} =400 000 辆,限制 I _{PCI} =65)	1	对照组+纤维素,PG 70-26	5	20	132 054	0.0	0.27	0.00
	2	对照组+0.3%PET,PG 70-26	12	25	118 049	10.6	0.37	0.11
	3	2.5%RET+0.3%PET,PG 74-30	18	17	157 774	-19.5	0.19	-0.08
	4	3%SBS+0.3%PET,PG 76-30	18	16	162 073	-22.7	0.17	-0.09
	5	6%SBS+0.3%PET,PG 79-25	24	20	153 339	-16.1	0.23	-0.04

注:卡塞尔曼试验中的6号路段空隙率较高;蒂明斯第二阶段试验的8号路段热拌沥青在生产过程中过热;PP为9.5 mm聚丙丙烯纤维;PET为9.5 mm或18 mm聚对苯二甲酸乙二醇酯纤维;SB为苯乙烯-丁二烯二嵌段共聚物;SBS为苯乙烯-丁二烯-苯乙烯三嵌段共聚物;RET为反应性乙烯三元共聚物;PPA为聚磷酸;REOB为回收精制机油底;R_{BCR}为效益成本比;E_{MCE}为边际成本效益。

减少。通过确定每个路段的热拌沥青混合料成本,可以确定路面结构为40 mm上面层+50 mm下面层的1 km单车道的初始施工成本。

2.3.3 30年LCCA模型

采用一个包括后续维修养护活动的30年生命周期成本分析模型,计算每个路段的生命周期成本。该生命周期成本分析模型与MTO发布的文件^[60]密切相关,唯一的区别是采用了30年而不是50年的生命周期。该生命周期成本分析模型根据每个路段的初始寿命进行定制,并假设在后面修复过程中使用的是相同类型的混合料,并且其初始生命周期会减

去1年。例如,655号公路第一阶段的1号路段初始生命周期为25年,修复后的生命周期为24年。

一旦确定了维修养护活动,就可以计算相关成本。残值也是根据最后一次修复活动来计算。将所有未来的维护和修复活动以及残值折现率为4.5%,将它们转换为现值成本。30年生命周期成本显示在表1中。此外,将生命周期成本进一步计算为生命周期成本百分比,以显示每个路段相对于控制组路段的成本节约情况。

2.3.4 效益成本比和边际成本效益

在MTO路面管理系统(PMS-2)中,优化使用效

益成本比(R_{BCR})和边际成本效益(E_{MCE})来评估设计策略是否有效。 R_{BCR} 通过将效益除以成本计算得出,数字越高代表成本效益越好,效益通过计算路面 I_{PCI} 曲线下的面积来定义,成本则为该路段的30年生命周期成本。此外, E_{MCE} 用于将相对效益与基准控制路段进行比较,其方法为:将每种策略的 R_{BCR} 减去基准控制路段的 R_{BCR} ($E_{MCE}=R_{BCR}$ 路段1- R_{BCR} 控制路段7= $0.005\ 0-0.003\ 1=0.001\ 9$)。 R_{BCR} 和 E_{MCE} 结果见表1。

总的来说,通过LCCA、 R_{BCR} 和 E_{MCE} ,可以明显看出越多的改性剂并不一定会使得路面的生命周期更长,或者产生了更高的成本效益。因此,研究生命周期成本和合理利用适量的改性剂来达到最佳效果非常重要。上述LCCA存在一些局限性。首先,前期成本在一定程度上取决于供应商提供的材料价格。虽然沥青的价格相对稳定,但SBS改性剂的价格这些年来波动很大。此外,因为供应商不愿意提供信息,导致REOB的价格是未知的。沥青混合料价格统一为100 \$/t,但根据当地市场情况,价格差异很大;第二个局限性是使用者的延误成本以及与环境有关的成本。这些成本很难估算,如果它们被纳入评估,可能会影响不同沥青的差异,而对性能更好的沥青材料是有利的。多伦多地区的高速公路交通繁忙,这可能导致巨大的延误成本,使上述简化评估对真实效益和成本的反映不够准确;第三个局限性在于本文的分析是一项回顾性分析,因此用户机构仍将依赖于准确和精确的沥青规范,期待通过沥青性能测试规范优选耐久性较好的沥青,提升沥青路面的使用寿命。

值得注意的是,当前试验中的所有差异都可以通过材料性质来解释,并且通过略微改变测试条件,基于动态剪切流变仪(DSR)、扩展的弯曲梁流变仪(EBBR)和双边开口拉伸试验(DENT)能够进一步提升沥青性能,并将路面生命周期效益/成本比提升至所需水平。通过限制相位角主曲线的形状可能会鉴别过度改性沥青,例如蒂明斯第二阶段试验中的13号路段中使用的沥青。最终的性能还将取决于针对特定气候地区采用的实际验收标准。本文的结论适用于气候条件为夏季高温和冬季低温的大陆性气候区,因此可能会与更温和的沿海气候区情况有所不同。

最后一个有趣的现象是,在655号公路的1号路段,417号公路的第1和2号路段,以及655号公路的第9和14号路段的性能表现优异,它们都采用了含

蜡量较低的阿尔伯塔沥青^[76-77],且通过少量改性剂进行了改性,给予沥青在寒冷气候中较好的流动性,结合合适级配的骨料以抵抗夏季高温车辙,因此路面耐久性较好。这些结论早在很久以前就被大量研究人员得出,并且今天仍然成立^[22-23,61-73]。对加拿大试验路性能的调查为自2006年以来开发的改进的沥青测试规范提供了有力支持^[82-85],并且预示着阿尔伯塔油砂沥青的广阔应用前景。

3 主要结论

改进的沥青规范测试和验收标准是在2005年左右制定的,这是先前试验以及蒂明斯第一阶段试验的直接结果。这些方法通过EBBR试验^[82]测量沥青在冷冻处理1 h、24 h和72 h后的低温分级温度,并在DENT试验^[83]中在约束条件下进行拉伸。DENT和EBBR试验于2006年和2007年首次发布,并从2010年开始在安大略省的多个合同路段中实施,直到2017年才全面实施。这两种方法于2015年^[84]和2016年^[85]被美国国家公路与运输协会(AASHTO)采用为临时标准,并正在由几个州交通部门评估其准确性和精度。安大略省的努力在很大程度上取得了成功,因为改进的沥青测试和验收标准使路面再次满足或者超过设计使用寿命。

目前的研究重点是寻找更实用的测试方法,因为DENT试验和EBBR试验需要大量的材料且测试时间较长,尤其是当评价抽提回收沥青时的测试成本更高。

高掺量的聚合物改性剂导致更高水平的凝胶形成,这些凝胶会更长时间地保留温度收缩应力,从而增加开裂并减少裂缝愈合^[86]。接下来的研究重心应该放在如何调整验收标准上,因为根据上述分析,高掺量聚合物改性沥青可能并不总是对用户增加的成本提供积极回报。特别是使用了回收材料,如REOB(655号公路上的4号路段)、RAP或RAS等,这些问题很难事先预测。

从目前27个试验路段的研究结果可以看出:长寿命路面性能极为复杂,沥青测试验收规范的改进应随着市场上新型沥青的应用不断更新,用户机构应继续评估并实施准确、精确和敏感性较高的沥青材料性能测试和验收规范,而生产商则应努力设计最佳方案、选择最佳材料并进行质量控制,进而减少早期损害。

4 未来展望

随着电动汽车的快速普及,石油化工产业将迎来新的变革,这无疑会对沥青道路提出新的挑战。首先,电动汽车自重一般是传统燃油车的2倍,且车身重量分布与燃油车辆有显著不同,传统道路结构设计需进行相应调整。再者,从燃油车到电动汽车的转变并未改变汽车对路面的功能要求,如表面平整无病害和足够的抗滑性能。然而,电动汽车起步加速远远快于传统燃油车,对沥青道路表面材料性能无疑是巨大的挑战。其次,这一转变必然会影响到石油产业结构。汽油车的减少会降低市场对汽油的需求,迫使石油冶炼企业通过改变冶炼技术,增加高等级汽油产品如航空煤油以及副产品沥青的产出比例。这通常会增加沥青生产成本,进而提高沥青路面的建设成本。另一方面,未来道路的建设养护对沥青的需求仍然很大。在此宏观背景下,结合加拿大过去60年来沥青路面试验段研究的经验教训,对未来的沥青路面研究提出以下建议和展望:

由于再生沥青混合料的中低温抗裂和抗水损性能不足,加拿大等寒冷地区的再生沥青混合料使用比例相对较低(例如安大略省RAP最大掺量仅为30%),且仅限于下面层。未来研究需要进一步提高再生沥青混合料的使用比例,并将其应用范围扩大至路面的整个面层结构。研究需从材料、结构、测试方法和施工技术等方面进行深入探讨。材料研究的核心在于开发高效的再生剂,而结构设计重点在于提出适用于不同气候和交通条件的路面结构组合和厚度。对于再生沥青路面,还需要提出或改进沥青及混合料测试规范,并通过试验段进行验证。施工技术的重点在于施工机械的改进和升级,例如实现100%就地热再生。

目前,替代沥青或部分替代沥青的技术主要包括生物沥青、废旧塑料和废旧轮胎橡胶等。尽管相关研究和产品应用已持续多年,但大规模应用的目标仍未实现。主要原因包括原材料在特定地区的可获得性及运输成本等。再者,不同地区的气候和交通状况差异显著,导致可应用的材料类型和用量存在差异。各地区需因地制宜,选择最适合的沥青替代材料,并通过试验段研究论证现有沥青和混合料试验方法的可行性,必要时提出新的规范,以提高路面的耐久性。

(本文特别感谢加拿大女王大学马建民为本文的撰写提供的帮助与指导。)

参考文献:

References:

- [1] BARRINGTON-LEIGH C, MILLARD-BALL A. The world's user-generated road map is more than 80% complete[J]. PLoS One, 2017, 12(8): e0180698.
- [2] BUNCHE M. What percentage of our roads are asphalt? [J]. A Systematic and Objective Way to Measure. Asphalt, Magazine of the Asphalt Institute, 2020, 34(1): 7-11.
- [3] MEISEN A. Bitumen Beyond Combustion (BBC) project phase 1 report[R]. Alberta Innovates, 2017.
- [4] DEME I, YOUNG F S. Anne test road revisited twenty years later[C]//Canadian Technical Asphalt Association, Proceeding. Canada: Polyscience Publications INC, 1987, 32: 254-283.
- [5] HESP S A M, ILIUTA S, SHIROKOFF J W. Reversible aging in asphalt binders[J]. Energy & Fuels, 2007, 21(2): 1112-1121.
- [6] HESP S A M, SOLEIMANI A, SUBRAMANI S, et al. Asphalt pavement cracking: Analysis of extraordinary life cycle variability in eastern and northeastern Ontario[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2009, 10(3): 209-227.
- [7] RIGG A, DUFF A, NIE Y H, et al. Non-isothermal kinetic analysis of reversible ageing in asphalt cements[J]. Road Materials and Pavement Design, 2017, 18(sup 4): 185-210.
- [8] WARREN F, LULHAM N. Canada in a changing climate: National issues report[M]. Ottawa, Government of Canada, 2021: 734.
- [9] DANIEL J S. Roadways in a rut[J]. Nature Climate Change, 2017, 7: 694-695.
- [10] UNDERWOOD B S, GUIDO Z, GUDIPUDI P, et al. Increased costs to US pavement infrastructure from future temperature rise[J]. Nature Climate Change, 2017, 7: 704-707.
- [11] COHEN J, PFEIFFER K, FRANCIS J A. Warm arctic episodes linked with increased frequency of extreme winter weather in the United States[J]. Nature Communications, 2018, 9: 869.
- [12] COHEN J, ZHANG X, FRANCIS J, et al. Divergent consensus on arctic amplification influence on midlatitude severe winter weather[J]. Nature Climate Change, 2020, 10: 20-29.
- [13] FUSO NERINI F, SOVACCOOL B, HUGHES N, et al.

- Connecting climate action with other sustainable development goals[J].*Nature Sustainability*,2019,2:674-680.
- [14] KIRCHAIN J R, GREGORY J, OLIVETTI E. Environmental life-cycle assessment[J].*Nature Materials*, 2017,16(7):693-697.
- [15] HABERT G, MILLER S A, JOHN V M, et al. Environmental impacts and decarbonization strategies in the cement and concrete industries[J].*Nature Reviews Earth & Environment*,2020,1:559-573.
- [16] Editorial Board.Raw materials for a truly green future[J].*Nature Reviews Materials*,2021,6:455.
- [17] Government of Canada, National & Regional Climate Services Offices. Environment Canada[EB/OL]. (2021-10-09) [2024-06-05].www.climate.weather.goc.ca.
- [18] BBC News.Canada Heatwave: Wildfires spread in British Columbia after lightning strikes[EB/OL]. (2021-07-04) [2024-06-05].www.bbc.com.
- [19] GAVIN J, DUNN L, JUHÁSZ M. The lamont test road-twelve years of performance monitoring[C]//Canadian Technical Asphalt Association, Proceeding. Canada: Polyscience Publications INC,2003,48: 355-376.
- [20] GAVIN J,DUNN L, JUHASZ M. Annual conference of the transportation association of Canada, april, 2003[C]// Annual Conference & Exhibition of the Transportation Association of Canada,2003.
- [21] ILIUTA S, ANDRIESCU A, HESP S, et al. Improved approach to low temperature and fatigue fracture performance grading of asphalt cements[C]//Canadian Technical Asphalt Association, Proceeding. Canada: Polyscience Publications INC,2004,49: 123-158.
- [22] MCLEOD N. A 4-year survey of low temperature transverse pavement cracking on three Ontario test roads with discussion and closure[C]//Association of Asphalt Paving Technologists Proc,1972,41: 424-493.
- [23] MCLEOD N. Test data from three Ontario test roads after 15 years of service[C]//Canadian Technical Asphalt Association, Proceeding. Canada: Polyscience Publications INC,1978,23: 72.
- [24] DEME I, FISHER D. A field study of transverse crack development in asphalt pavement and test road instrumentation[C]//Canadian Technical Asphalt Association, Proceeding. Canada: Polyscience Publications INC, 1968, 13:305-350.
- [25] YOUNG F D, DEME I, BURGESS R, et al. Ste. Anne test road: Construction summary and performance after two years' service[C]//Canadian Technical Asphalt Association, Proceeding. Canada: Polyscience Publications INC,1969,14:50-109.
- [26] DEME I. A study of transverse cracking of asphalt pavements in Manitoba[D]. Winnipeg: University of Manitoba, 1969.
- [27] MCLEOD N W. Discussion of paper on Ste. Anne test road [C]//Canadian Technical Asphalt Association, Proceeding. Canada: Polyscience Publications INC,1969,14: 110-131.
- [28] BURGESS R, KOPVILLEM O, YOUNG F D, et al. Ste. Anne test road- relationships between predicted fracture temperatures and low temperature field performance with discussion and closure[C]//Canadian Technical Asphalt Association, Proceeding. Canada: Polyscience Publications INC,1971,40:148-193.
- [29] BURGESS R, KOPVILLEM O, YOUNG F D, et al. Ste. Anne test road-flexible pavement design to resist low temperature cracking[C]//Third International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements. London, England,1972,1:27-40.
- [30] GAW W, BURGESS R, YOUNG F D. Road performance after five years and laboratory predictions of low temperature performance[C]//Canadian Technical Asphalt Association, Proceeding. Canada: Polyscience Publications INC,1974,19: 45-98.
- [31] PONNIAH J, KENNEPOHL G. Polymer-modified asphalt pavements in Ontario: Performance and cost-effectiveness [J]. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*,1996,1545(1):151-160.
- [32] EBA Engineering Consultants Ltd. Performance correlation for quality paving asphalts: Test roads construction report [R]. Canadian Strategic Highway Research Program, Transportation Association of Canada, Ottawa,1994.
- [33] ROBERTSON W. Using the SHRP specification to select asphalt binders for low temperature service[C]//Canadian Technical Asphalt Association, Proceeding. Canada: Polyscience Publications INC,1995,40: 170-195.
- [34] DUNN L, GAVIN J. The C-SHRP lamont test road: Five years of performance monitoring[C]//Eighth International Conference on Asphalt Pavements. Washington, 1997, 1: 487-506.
- [35] ANDERSON D, CHRISTISON K O, BAI J, et al. Conference of Canadian technical asphalt association,1998 [C]//Canada:Polyscience Publications INC,1998.
- [36] ANDERSON K O, CHRISTISON T J, JOHNSTON C. Annual conference of the transportation association of Canada[C]//Annual Conference & Exhibition of the

- Transportation Association of Canada,1999.
- [37] ZHAO Michael Ou,HESP S A M.Performance grading of the lamont,alberta C-SHRP pavement trial binders[J]. International Journal of Pavement Engineering,2006,7(3): 199-211.
- [38] BOULDIN M G,DONGRE R,SHARROCK M J,et al.A comprehensive evaluation of the binders and mixtures placed on the lamont test sections:Report for the federal highway administration binder ETG[R].FHWA,1999.
- [39] BOULDIN M,DONGRE R,ROW G M,et al.Predicting thermal cracking of pavements from binder properties: Theoretical basis and field validation[C]//Association of Asphalt Paving Technologists Proc,2000,69: 455-496.
- [40] BOULDIN M,DONGRE R.Implications of the new low temperature specification on PG grading and testing of asphalt binders[C]//Proceedings of the Papers Submitted for Review at 2nd Eurasphalt and Eurobitume Congress, Spain.Transport Research Laboratory, 2000,212-219.
- [41] ROWE G,SHARROCK M,BOULDIN M,et al.Advanced techniques to develop asphalt master curves from the bending beam rheometer[J].Petroleum and Coal,2001,43(1): 54-59.
- [42] MENSCHING D J,JACQUES C D,DANIEL J S.Applying the Glover-Rowe parameter to evaluate low-temperature performance of hot mix asphalt LTPP sections[J]. Journal of Materials in Civil Engineering,2016,28(10):04016096.
- [43] DRUMM E,MEIER R. LTPP data analysis: Daily and seasonal variations in insitu material properties[C]// Transportation Research Board, National Research Council,Washington,2003,707.
- [44] PONNIAH J E,HESP S A M.Use of fracture energy in performance-based specifications of asphalt binders[C]// Canadian Technical Asphalt Association,Proceeding. Canada: Polyscience Publications INC,1996:127-144.
- [45] ILIUTA S,HESP S A M,MARASTEANU M O,et al.Field validation study of low-temperature performance grading tests for asphalt binders[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2004,1875(1): 14-21.
- [46] KENNEPOHL G, PONNIAH J. E. Comparison of laboratory test results with field performance of polymer-modified asphalt pavements[C]//Canadian Technical Asphalt Association, Proceeding. Canada: Polyscience Publications INC,1998:336-354.
- [47] ANDRIESCU A,HESP S,YOUTCHEFF J.Essential and plastic works of ductile fracture in asphalt binders[C]// Canadian Technical Asphalt Association, Proceeding. Canada:Polyscience Publications INC,2004:93-121.
- [48] YEE P,AIDA B,HESP S,et al.Analysis of premature low-temperature cracking in three Ontario, Canada, pavements [J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board,2006,1962: 44-51.
- [49] SOLEIMANI A,WALSH S,HESP S A M.Asphalt cement loss tangent as surrogate performance indicator for control of thermal cracking[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board,2009,2126 (1):39-46.
- [50] HESP S A M, SHURVELL H F. X-ray fluorescence detection of waste engine oil residue in asphalt and its effect on cracking in service[J]. International Journal of Pavement Engineering,2010,11(6): 541-553.
- [51] BODLEY T, ANDRIESCU A, HESP S, et al. Comparison between binder and hot mix asphalt properties and early top-down wheel path cracking in a northern Ontario pavement trial (with discussion and closure) [C]//2007 Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists: From the Proceedings of the Technical Sessions, United States: Association of Asphalt Paving Technologists (AAPT),2007: 345-389.
- [52] SHURVELL H, SUBRAMANI S, HESP S, et al. Five year performance review of a northern Ontario pavement trial: Validation of Ontario's double-edge-notched tension (DENT) and extended bending beam rheometer (BRR) test methods [C]//Canadian Technical Asphalt Association, Proceeding. Canada:Polyscience Publications INC,2009: 99-126.
- [53] HESP S,KODRAT I,SCAFE D,et al.Rheological testing of asphalt cements recovered from an Ontario pavement trial [C]//Sixth International Conference on Maintenance and Rehabilitation of Pavements and Technological Control, Italy,2009: 84-93.
- [54] EVANS M, MARCHILDON R, HESP S A M. Effects of physical hardening on stress relaxation in asphalt cements [J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board,2011,2207(1): 34-42.
- [55] WRIGHT L G, KANABAR A, MOULT E M, et al. Oxidative aging of asphalt cements from an Ontario pavement trial[J]. International Journal of Pavement Research and Technology,2011,4(5):259-267.
- [56] ERSKINE J A, HESP S A, KAVEH F. 5th Eurasphalt & eurobitume congress, june 13-15, 2012[C]//The TRIS and ITRD database, 2012.
- [57] TOGUNDE OP, HESP S A M, et al. Physical hardening in asphalt mixtures[J]. International Journal of Pavement

- Research and Technology,2012,5(1):46-53.
- [58] FREESTON J L, GILLESPIE G, HESP S A M, et al. Physical hardening in asphalt[C]//Canadian Technical Asphalt Association, Proceeding. Canada: Polyscience Publications INC,2015: 53-81.
- [59] HOLT A,JOHNSON C,MARKS P.Six-year performance of Ontario's freeway fibre and polymer modifier trial project [C]//Canadian Technical Asphalt Association, Proceeding. Canada: Polyscience Publications INC,2015:379-394.
- [60] LANE B,KAZMIEROWSKI T.Guidelines for the use of life cycle cost analysis on MTO freeway projects:MERO-18[R]. Toronto,Canada,Ontario Ministry of Transportation,2005.
- [61] TRAXLER R N, COOMBS C E. The colloidal nature of asphalt as shown by its flow properties[J]. The Journal of Physical Chemistry,1936,40(9): 1133-1147.
- [62] TRAXLER R N, SCHWEYER H E. Increase in viscosity of asphalts with time[R]. Philadelphia, Pennsylvania, USA: Proceedings of the American Society for Testing and Materials,1936:544-551.
- [63] TRAXLER R N, COOMBS C E. Development of internal structure in asphalts[R]. Philadelphia, Pennsylvania, USA: Proceedings of the American Society for Testing and Materials,1937:549-555.
- [64] NELLENSTEYN F J. Bereiding en constitutie van asphalt [D]. Netherlands:Delft University,1923.
- [65] NELLENSTEYN F J. The constitution of asphalt[J]. Journal of Petroleum Technology,1924,10:311-325.
- [66] NELLENSTEYN F J. Relation of the micelle to the medium in asphalt[J]. Journal of Petroleum Technology, 1928,14:134-138.
- [67] MACK C. Colloid chemistry of asphalts[J]. The Journal of Physical Chemistry,2002,36(12):2901-2914.
- [68] MACK C. Physico-chemical aspects of asphalts[C]// Association of Asphalt Paving Technologists, Proceeding, 1933:40-52.
- [69] MACK C. Colloid chemistry of asphalts[J]. The Journal of Physical Chemistry,1932,36(12):2901-2914.
- [70] PFEIFFER J P, VAN DOORMAAL P M. The rheological properties of asphaltic bitumen[J]. Journal of Petroleum Technology,1936,22:414-440.
- [71] SAAL R, HEUKELOM W, BLOKKER P, et al. Physical constants of asphaltic bitumens: Part 1[J]. Journal of Petroleum Technology,1939,26:29-39.
- [72] PFEIFFER J P, VAN DOORMAAL P M. The rheological properties of asphaltic bitumen [J]. Journal of Petroleum Technology,1936,22:414-440.
- [73] ROMBERG J W, NESMITH S D, TRAXLER R N. Some chemical aspects of the components of asphalt[J]. Journal of Chemical & Engineering Data,1959,4(2): 159-161.
- [74] OMARI I, AGGARWAL V, HESP S. Investigation of two warm mix asphalt additives[J]. International Journal of Pavement Research and Technology,2016,9(2):83-88.
- [75] DING H B, LIU H, QIU Y J, et al. Effects of crystalline wax and asphaltene on thermoreversible aging of asphalt binder [J]. International Journal of Pavement Engineering,2022,23 (11): 3997-4006.
- [76] DING H B, HESP S A M. Another look at the use of modulated differential scanning calorimetry to study thermoreversible aging phenomena in asphalt binders[J]. Construction and Building Materials,2021,267:121787.
- [77] DING H B, HESP S A M. Variable-temperature fourier-transform infrared spectroscopy study of asphalt binders from the SHRP Materials Reference Library[J]. Fuel,2021, 298:120819.
- [78] MIGLIORI F, RAMOND G, BALLIE M, et al. Proceeding of eurobitume workshop on performance related properties for bituminous binders may 3-6, 1999[C]// Transport Research Board,1999.
- [79] BUTTON J W, HASTINGS C P, LITTLE D N. Effects of asphalt additives on pavement performance: Report No FHWA/TX-97/187-26[R]. Texas:Transportation Institute,1996.
- [80] KRIZ P, NOËL J A, QUDDUS M R, et al. 7th euraspalt & eurobitume congress, june 15-17, 2021[C]//The Proceedings of 7th Euraspalt & Eurobitume Congress,2021.
- [81] Ministry of Transportation of Ontario. Recovered asphalt cement testing correlation program[R]. MTO,2019.
- [82] Ministry of Transportation of Ontario. LS-308 determination of performance grade of physically aged asphalt using EBBR method[R]. MTO,2006.
- [83] Ministry of Transportation of Ontario. LS-299 method of test for asphalt cement's resistance to fatigue fracture using double-edge-notched tension test (DENT)[R]. MTO,2007.
- [84] American Association of State Highway and Transportation Officials. Determination of asphalt binder resistance to ductile failure using the double-edge-notched tension (DENT) test: TP 113-15[S]. Washington, D.C., 2018.
- [85] American Association of State Highway and Transportation Officials. Determination of performance grade of physically aged asphalt binder using the extended bending beam rheometer (BBR) method: TP 122-16[S]. Washington, D.C., 2020:3
- [86] DING H, FONG S, HESP S A M. 7th euraspalt & eurobitume congress, June 15-17, 2021[C]//The Proceedings of 7th Euraspalt & Eurobitume Congress,2021.