

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2016.03.015



浇筑式钢桥面铺装层推挤变形病害机理分析

山宏宇¹, 李倩¹, 秘林源², 叶青², 贾晓阳³

(1. 中国电建集团贵阳勘测设计研究院有限公司, 贵阳 550001; 2. 贵州省交通规划勘察设计研究院股份有限公司, 贵阳 550000; 3. 田纳西大学, 诺克斯维尔市 37996)

摘要:以贵州省北盘江大桥钢桥面铺装层推挤变形病害为研究背景,采用凝胶渗透色谱法(GPC)和傅里叶变换红外光谱法(FTIR),从沥青分子尺度分析钢桥面铺装产生推挤变形的原因。分析结果表明:沥青老化并不是造成钢桥面铺装层推挤变形的主要原因;从现场调查可知,第2层粘层粘结能力的降低是造成钢桥面铺装层推挤变形病害的次要原因;通过级配分析发现,造成钢桥面铺装层推挤变形的主要原因是浇筑式沥青混合料(GA)级配偏细以及GA中集料颗粒的棱角性较差所致。

关键词:钢桥面铺装;变形病害;凝胶渗透色谱法;红外光谱法;级配分析

中图分类号:U448.36 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2016)03-0104-06

Failure mechanism of shoving on steel bridge deck with gussasphalt overlay

Shan Hongyu¹, Li Qian¹, Mi Linyuan², Ye Qing², Jia Xiaoyang³

(1. Guiyang Engineering Corporation Limited, Power China, Guiyang 550001, P. R. China;

2. Guizhou Province Transportation Planning Survey and Design Institute Co., LTD, Guiyang 550000, P. R. China;

3. The University of Tennessee-Knoxville, 851 Neyland Drive, Knoxville 37996, TN, U. S. A.)

Abstract: To better understand the failure mechanism of shoving on steel bridge deck overlay and guide the maintenance actions, an investigation was conducted on the performance of Beipanjiang bridge in terms of pavement shoving in Guizhou province. The Gel permeation chromatography (GPC) and Fourier Transfer Infrared (FTIR) spectrum were employed to analyze the failure mechanism of shoving from the point of molecular scale. The results showed that the asphalt aging is not the main cause for resulting in the formation of shoving disease on steel bridge deck. In addition, the reduction of adhesive strength of the second tack coat is a secondary cause for shoving disease of the steel bridge deck from the field survey research. Further, sieve analysis was performed to investigate the shoving mechanism on steel bridge deck with Gussasphalt (GA) mixture, and the results indicated that shoving failure is due to the gradation of GA mixture and poor angularity of aggregate particle rather than aging of asphalt binder.

Keywords: Steel bridge deck; Permanent deformation; Gel permeation chromatography; Fourier transfer infrared spectrum; sieve analysis

钢桥面铺装层是保护钢桥面板的重要层次,其设计、建设、养护、维修等技术已成为钢桥面铺装技

术研究的重要内容^[1-5]。从中国目前的大跨径钢桥面沥青铺装使用情况看,总体情况良好,但局部地区

收稿日期:2015-12-10

作者简介:山宏宇(1985-),男,主要从事路面结构与材料研究,(E-mail)shanhy8@163.com。

Received:2015-12-10

Author brief:Shan Hongyu(1985-),main research interests:road structure and materials,(E-mail)shanhy8@163.com.

的一些钢桥表面沥青铺装层发生了较为严重的病害,这大大降低钢桥面铺装的服务水平,同时也对钢板防锈产生不利影响。由于钢桥面的特殊性,一旦在钢桥面铺装层出现病害,会造成养护、维修的不便,同时,对道路交通会造成巨大影响,并产生行车安全隐患^[5-7]。

目前,中国钢桥面沥青铺装层的常见病害类型有:裂缝类、变形类、表面损害类与桥接缝损害类。除了与传统沥青路面相似机理的典型病害,钢桥面铺装病害具有其特殊性,层间滑移与推挤是钢桥面沥青铺装层的典型病害之一。一般认为,铺装与钢板间粘结层结合强度不足,在高温及行车荷载耦合作用下,在水平方向产生相对位移过大将造成铺装脱层。而对于层间滑移问题的研究多集中于力学数值模拟与室内剪切试验(直剪与斜剪)模拟两方面。虽然上述研究能够在一定程度上揭示桥面层间推挤损害的过程,但缺少现场实际数据的支持。同时,由于缺少现场实际数据检测,也无法对桥面铺装设计与建设提供相应的指导。长期以来,由于桥面铺装的复杂性与特殊性,对桥面铺装病害的研究无法采用常规的分析方法,仅能通过外观目测推测其可能的病害发展过程,这阻碍了对桥面铺装病害问题的深入认识^[6-9]。为了克服传统方法的不足,本文采用分析化学分析方法,通过获取少量的铺装层材料分析样品,重点分析铺装材料在化学分子结构方面的变化,从分子尺度认识铺装损害过程。

1 工程概况与病害调查分析

北盘江特大桥是贵州省第一座大跨径钢桥,于2009年正式建成通车,位于镇宁至胜境关高速公路关岭县与晴隆县分界处,跨越北盘江大峡谷。大桥主跨为636 m单跨筒支钢桁加劲梁悬索桥,由钢桁架和正交异性钢桥面板两部分组成,两岸引桥采用45 m预应力混合料连续箱梁,大桥全长964 m,桥面铺装结构如图1所示。

受气候环境和行车荷载作用,钢桥面铺装层产生了一定程度的铺装推挤变形病害,铺装层推挤变形主要发生在行车道,全桥发现整体推挤变形区域2处,分别处于上、下行行车道上坡段,面积约占50 m²(长20 m,宽2.3 m)。在推挤变形严重的位置,可以看到被锈蚀的桥面钢板。从推挤变形位置钻取2个芯样发现两者厚度相差约2.5 cm,和原始设计相比,铺装推挤变形造成了某一层铺装层缺

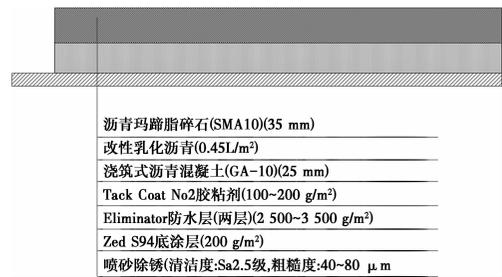


图1 钢桥面铺装结构

Fig. 1 Bridge deck overlay systems

失,经分析认为应该是浇筑式沥青混合料层缺失。同时还发现,发生铺装推移的位置芯样取出后,Eliminator(一种防水粘结材料)防水层保存完好,说明铺装推移发生在浇筑式沥青层(GA-10)和第2层粘结层(Tack Coat No. 2)间。相关现场照片如图2所示。

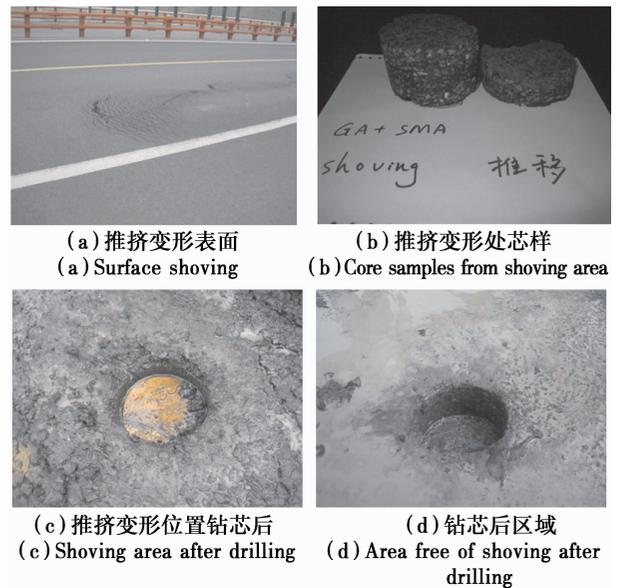


图2 相关病害照片

Fig. 2 Relevant photos of disease

2 试验与病害机理分析

2.1 试验方法

采用凝胶渗透色谱法(DPC)、傅立叶转换红外光谱法(FTIR)和级配分析对钢桥面铺装层推挤变形病害产生机理进行分析。

2.1.1 凝胶渗透色谱法(GPC) 凝胶渗透色谱技术是用于分析小分子物质的分离和鉴定并评价材料分子量分布的有效方法,同时,也可以用来分析化学性质相同、分子体积不同的高分子同系物,试验原理如图3所示。

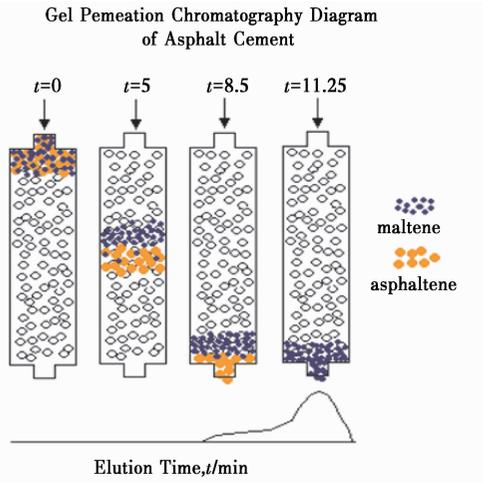


图 3 凝胶色谱渗透仪测定分子量原理

Fig. 3 The test principle of GPC

根据不同分子质量的淋洗时间(Elution Time)不同,从而将不同分子区分开来,相对分子质量大的淋洗时间短,相对分子质量小的淋洗时间长。当仪器和实验条件确定后,溶质的淋出体积与其分子量有关,分子量愈大,其淋出体积愈小^[10-13]。

研究认为,沥青质的分子质量通常大于 3 000 Dalton,而非沥青质的范围为 200~3 000 Dalton 之间^[10-13]。沥青中的大分子质量与沥青材料路用性能之间具有良好的关系,如老化性能、低温性能、高稳定性等。通过定义沥青中大分子质量含量(Large Molecule Size, LMS)可以将沥青微观结构与宏观力学性能联系,得到量化结论^[10-13],定义为

$$LMS = \frac{\text{Curve Area(Larger than 3 000)}}{\text{Total Curve Area(From beginning to 200)}} \quad (1)$$

式中:Curve Area (Larger than 3 000)为淋洗曲线中分子量大于 3 000 的曲线面积;Total Curve Area (From beginning to 200)为淋洗曲线中分子量大于 200 的曲线总面积。

2.1.2 傅立叶转换红外光谱(FTIR) 傅立叶转换红外光谱(FTIR)仪是通过测定、分析物质对红外光的吸收量,从而确定物质中不同分子间振动过程进而获得物质分子组成的一种分析化学手段。其原理如图 4 所示。

羟基是评价沥青微观结构变化的重要官能团,对于一般沥青包括聚合物改性沥青,酸羟基是表征老化的重要指标^[12-15]。

由此定义的酯羟基指数和老化指数如式(2)、式(3)所示。

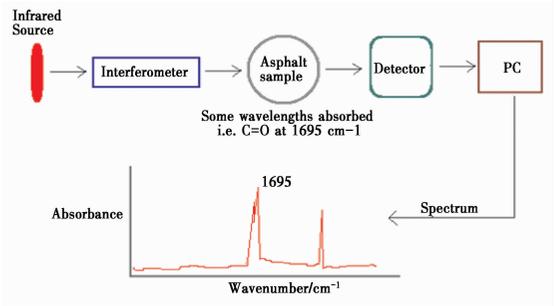


图 4 红外光谱分析原理

Fig. 4 The analysis principle of FTIR

酯羟基指数 =

$$\frac{\text{Area of carbonyl}(1\ 695\ \text{cm}^{-1})}{\text{Area of C-C stretch}(1\ 455\ \text{cm}^{-1})} \times 100 \quad (2)$$

老化指数 =

$$\frac{\text{Area of carbonyl}(1\ 695\ \text{cm}^{-1})}{\text{Area of C-C stretch}(1\ 455\ \text{cm}^{-1})} \times 100 \quad (3)$$

式中:Area of carbonyl (1 695 cm⁻¹)为在 1 695 cm⁻¹峰值处的曲线面积;Area of C-C stretch (1 455 cm⁻¹)为在 1 455 cm⁻¹峰值处的曲线面积。

2.1.3 级配分析 将芯样进行抽提筛分,比较发生推挤位置与无推挤位置铺装材料级配的差异,以判断级配病害产生的影响。

2.1.4 采样、制样过程 在现场按层次、位置取代表性沥青混合料样品,总共测定 4 组 GA+SMA 铺装层,芯样的位置和描述如表 1 所示。

表 1 芯样位置与描述

Table 1 Core samples and description

编号	铺装结构	位置	描述
1	GA+SMA	行车道	推挤变形
2	GA+SMA	行车道	推挤变形
3	双层 GA	路肩	控制组
4	GA+SMA	行车道	控制组

1 号和 2 号为推挤变形位置,3 号为双层 GA 路肩作为控制组,4 号为行车道轮迹带无病害处,作为控制组。

2.2 试验结论

2.2.1 凝胶渗透色谱法 图 5 表示了不同位置和层次的 LMS。可见,铺装层表面的 LMS 大于底面的 LMS,说明铺装表面受到的老化程度最为严重。同时发现 1 号和 2 号试件层底的 LMS 略高于控制组层底的 LMS,1 号和 2 号试件表面的 LMS 与控制组表面的 LMS 基本相同,说明铺装发生推挤区

域的老化程度与未发生区域基本相同。而 1 号和 2 号的 LMS 略大可能是由于发生推挤后水分和空气进入铺装内部进一步老化所致。因此,通过 GPC 分析结果,初步认为沥青不是铺装层发生推挤的主要原因。

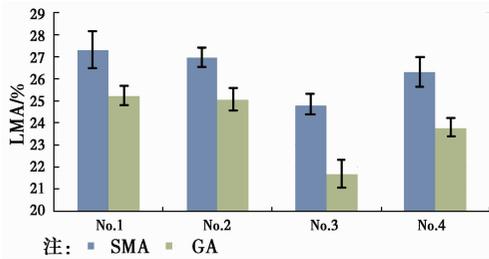


图 5 GPC 测试结果

Fig. 5 Test results of GPC

2.2.2 傅立叶转换红外光谱法 在采用 FTIR 分析 GA+SMA 时,发现 GA 下面层抽提回收物的红外光谱极不稳定,同时,一些特征峰值被覆盖。主要原因是 GA 下面层含有大量来自于防水粘结层的物质,这些物质的出现将影响到沥青的特征峰值分析,同时也难以通过化学手段有效分离沥青与防水粘结层材料。因此,仅比较了 SMA 层表面、内部以及 GA 内部的老化指数。

SMA 层表面、内部的红外光谱如图 6 所示。可见,在铺装层表面,酸羟基的吸收峰值较为明显,而在铺装层内部,酸羟基的吸收峰值却非常小。酸羟基产生的主要原因是,沥青在使用过程中的氧化老化所致。沥青中的碳分子与空气中的氧分子发生氧化反应,生成了以羟基振动为特征的大分子,力学表现为沥青的脆化、硬化。图 6 所示铺装层内部回收沥青微弱的羟基吸收峰值可能是由于沥青混合物在拌合过程中的老化所致。

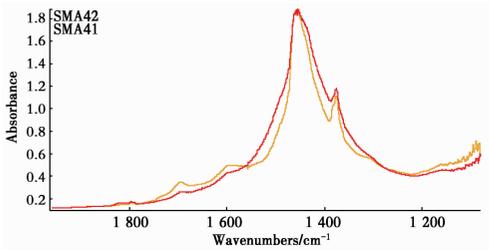


图 6 SMA 表面与内部的改性沥青红外光谱

Fig. 6 Infrared spectra for modified asphalt surface and interior of SMA

对比 SMA 表面和 GA 层的回收沥青老化指数,如图 7 所示。发现试件 1、4 的铺装层 SMA 表面

的老化指数明显高于 GA 层的老化指数。这主要是由于铺装层受到交通荷载和紫外线等外界作用加速了老化过程,试件 3 作为控制组取自双层 GA 路肩,很少受到交通荷载的作用,其表面层 GA 的老化指数代表了用于 GA 的改性沥青混合物在自然条件下的老化水平。可见在自然老化(紫外线光老化)条件下,用于 GA 的改性沥青的抗老化能力尚好,仅比铺装层内沥青的老化指数略高。试件 1、2 和 4 分别取自发生铺装推移的位置和无病害的行车道,相比可知,发生推移区域的 SMA 表面的老化指数略高于正常区域,但 GA 层回收沥青的老化指数却基本相同,说明即使发生了桥面铺装推移的区域,其下面层 GA 的改性沥青性能仍与正常路段一致,这与图 5 得到的结论一致。说明铺装 GA 层的沥青结合料应该不是造成铺装发生推挤的直接原因。而发生推挤区域表面层 SMA 的老化指数略高于正常路段也可能是由于发生滑移以后,水分进入铺装层,并在交通荷载作用下加速老化所致。

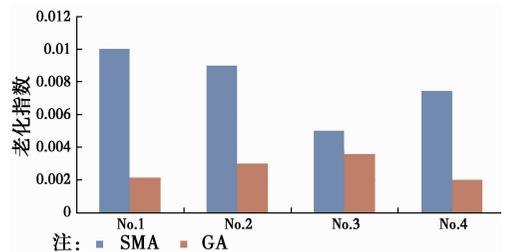


图 7 不同层次沥青老化指标对比

Fig. 7 Asphalt aging indicators of SMA and GA

2.2.3 级配分析 根据《公路工程沥青及沥青混合物试验规程》(JTG E20—2011)中 T0725—2000(沥青混合料的矿料级配检验方法),将试件进行抽提筛分^[15],比较发生推挤位置与无推挤位置铺装材料级配的差异,如图 8 所示。“up” and “down” 代表每个试件的铺装上层(SMA)和下层(GA),由于试件 2 有一层缺失,无法找到两层的分界线,因此,未对试件 2 进行切割。由图 8 可知,1 号试件下层和控制组(4 号)试件下层的级配存在明显差异,1 号的 GA 级配偏细,而 2 号试件偏向与控制组的上层(SMA)级配,这表明发生推挤位置主要是由于 GA 层在荷载高温作用下剪切失稳,造成推移,而级配偏细则是发生 GA 失稳的主要原因。

对于浇筑式沥青混合物,其施工和易性和高温稳定性之间存在矛盾,为了提高施工和易性,可能会偏好应用细级配及棱角性较差的颗粒作为浇筑式沥

青混合料的级配和集料,但这样的级配和集料对浇筑式沥青混合料的高温稳定性能不利。综合分析沥青、集料等方面的因素后认为,在采用浇筑式沥青混合料(GA)时,需要增加对其高温稳定性能的技术要求。目前,规范要求的配比设计方法^[16]主要从流动度指标对施工和易性角度进行考虑,虽然在目标配比设计中考虑了高温性能,但在实际生产、摊铺过程中并未有直接的控制指标。因而造成了施工过程中过分追求摊铺流动性能而牺牲高温性能的情况。而日本等国家在建设桥面铺装浇筑式沥青混合料时也引入了动稳定度等指标评价其高温性能,因此,值得我们借鉴。在采用浇筑式沥青混合料(GA)时应增加对其高温稳定性能的技术要求,根据目前工程经验,动稳定度的建议值应大于 300 次/mm。

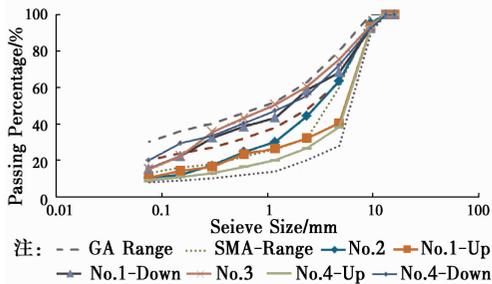


图 8 级配分析曲线图

Fig. 8 Gradation analysis graph

3 结 论

1) 运用 GPC 和 FTIR 分析手段,目的是从沥青分子尺度分析产生推挤变形病害的原因,通过分析可知,沥青老化并不是造成钢桥面铺装层推挤变形病害的主要原因。

2) 通过级配分析可知,造成钢桥面铺装层推挤变形的主要原因是 GA 级配偏细以及 GA 中集料颗粒的棱角性较差所致。

3) 采用浇筑式沥青混合料(GA)应增加对其高温稳定性能的技术要求,根据目前工程经验动稳定度的建议值应大于 300 次/mm。

4) 从现场调查可知,第 2 层粘层粘结能力的降低是造成钢桥面铺装层推挤变形病害的次要原因。

参考文献:

[1] 张力,陈仕周. 钢桥面铺装技术的研究与发展[J]. 公路, 2001(1):1-5.
ZHANG L, CHEN S Z. Research and development of

steel deck pavement technology [J]. Highway, 2001 (1):1-5. (in Chinese)

- [2] BOCCI E, CANESTRARI F. Analysis of structural compatibility at interface between asphalt concrete pavements and orthotropic steel deck surfaces [J]. Journal of the Transportation Research Board, 2012, 2293:1-7. Doi: 10.3141/2293-01.
- [3] LIAO M C, HUANG C C, CHEN J S. Evaluation of guss asphalt applied to steel deck surfacing [C]// Process Transportation and Development Institute Congress, Chicago, Illinois, U. S., 2011:462-71. Doi: 10.1061/41167(398)64.
- [4] European Asphalt Pavement Association (EAPA). Asphalt pavements on bridge decks [C]//EAPA Position Paper, European Asphalt Pavement Association, Belgium, 2013.
- [5] 黄海涛. 钢桥面铺装层使用性能评价及养护决策研究 [D]. 南京:东南大学, 2008.
HUANG H T. Performance evaluation and maintenance decision-making research on steel deck pavement [D]. Nanjing: Southeast University, 2008. (in Chinese)
- [6] 王金生. 钢桥面浇注式沥青混合料铺装病害分析及对策 [D]. 南京:东南大学, 2005.
WANG J S. Methods and research on deterioration of steel deck guss asphalt concrete pavement [D]. Nanjing: Southeast University, 2005. (in Chinese)
- [7] 关永胜, 迟占华, 宗海. 大跨径钢桥桥面铺装早期病害分析及对策 [J]. 中外公路, 2005, 25(6):99-102.
GUAN Y S, CHI Z H, ZONG H. Analysis and countermeasure for early disease on long-span steel bridge [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2005, 25(6):99-102. (in Chinese)
- [8] 邓学钧. 中国江阴长江大桥桥面沥青铺装层高温稳定性 [J]. 交通运输工程学报, 2002(2):1-7.
DENG X J. Asphalt pavement stability at high-temperature for the Jiangyin bridge in China [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2002(2):1-7. (in Chinese)
- [9] 傅栋梁, 钱振东. 钢桥面铺装预防性养护对策分析 [J]. 公路, 2010(1):201-206.
FU D L, QIAN Z D. Analysis of preventive maintenance countermeasures for steel deck pavement [J]. Highway, 2010(1):201-206. (in Chinese)
- [10] NEGULESCU S, BALAMURUGAN S. Implementation of GPC characterization of asphalt binders at louisiana materials laboratory [C]//FHWA/LA. 13/505, U. S. Department of Transportation,

- Federal Highway Administration, 2013.
- [11] 耿九光,张倩,戴经梁. 基于凝胶渗透色谱法的改性沥青 SBS 降解行为研究[J]. 新型建筑材料, 2011(5): 87-90.
GENG J G, ZHANG Q, DAI J L. Degradation process of SBS in modified asphalt based on gel permeation chromatography analysis [J]. New Building Materials, 2011(5):87-90. (in Chinese)
- [12] 李闯民,李元元,邬镇伦,等. 改性沥青 SBS 含量检测方法对比[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2015, 9(3):14-20.
LI C M, LI Y Y, WU Z L, et al. Contrast of methods for testing the content of SBS in SBS modified asphalt [J]. Journal of Changsha University of Science and Technology (Natural Science), 2015, 9(3):14-20. (in Chinese)
- [13] 郝增恒,张肖宁,盛兴跃,等. 超热老化条件下改性沥青的老化机理[J]. 建筑材料学报, 2009, 12(4):433-437.
HAO Z H, ZHANG X N, SHENG X Y, et al. Aging mechanism of modified asphalt under epithermal conditions [J]. Journal of Building Materials, 2009, 12(4):433-437. (in Chinese)
- [14] 景彦平. 沥青组分划分方法[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2005, 5(3):33-36.
JING Y P. Asphalt component methodology [J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2005, 5(3):33-36. (in Chinese)
- [15] 公路工程沥青及沥青混合料试验规程:JTG E20—2011 [S]. 北京:人民交通出版社, 2011.
Standard test methods of bitumen and bituminous mixtures for highway engineering: JTG E20—2011[S]. Beijing: China Communications Press, 2011. (in Chinese)
- [16] 重庆交通科研设计院. 公路钢箱梁桥面铺装设计与施工技术指南[S]. 北京:人民交通出版社, 2006.

(编辑 王秀玲)