

高粘高弹改性沥青双层SMA在钢桥面铺装的应用

庞广龙

保利长大工程有限公司 广东 广州 510620

摘要: 钢桥面铺装层是桥梁行车体系的重要组成部分,其长期服役性能直接关系到桥梁结构安全、行车舒适性与耐久性。针对传统铺装材料易出现的车辙、推移、疲劳开裂及与钢板脱粘等典型病害,本文提出并系统论述了采用高粘高弹改性沥青(High-Viscosity High-Elasticity Modified Asphalt, HVHE)作为结合料的双层SMA(Stone Mastic Asphalt, 沥青玛蹄脂碎石)铺装体系。文章详细阐述了HVHE改性沥青的技术优势、双层SMA混合料的设计方法、关键施工工艺(包括防水粘结层施工、混合料拌和、摊铺与碾压质量控制),并结合某大跨径钢箱梁桥的实体工程案例,通过对施工过程监控和竣工后长期性能跟踪检测(包括平整度、构造深度、摩擦系数及病害调查),综合评估了该技术的应用效果。结果表明, HVHE-双层SMA铺装体系显著提升了铺装层的高温稳定性、低温抗裂性、抗疲劳性能及与钢桥面板的协同工作能力,有效克服了传统铺装易发生的车辙、脱层和开裂等早期病害,延长了钢桥面铺装的使用寿命,为同类工程提供了有价值的参考和借鉴。

关键词: 钢桥面铺装; 高粘高弹改性沥青; SMA; 双层摊铺; 疲劳性能

1 引言

随着我国交通基础设施建设的飞速发展,大跨径钢结构桥梁因其跨越能力强、施工周期短、结构轻盈等优点得到了广泛应用。作为其重要组成部分,钢桥面铺装直接承受车辆荷载、环境气候变化的综合作用,工作环境远苛刻于普通路基路面。钢桥面板具有柔度大、变形显著、导热性强、易锈蚀等特点,这对铺装材料的各项性能提出了极高要求^[1]。

长期以来,钢桥面铺装是世界性的技术难题。常见铺装方案如环氧沥青混凝土、浇注式沥青混凝土(Gussasphalt)等虽各有优势,但也存在施工条件苛刻、造价高昂、维修困难等局限性。而采用普通改性沥青的SMA铺装,在重载、高温、大变形条件下,易出现永久变形(车辙)、疲劳开裂和层间脱离等早期病害,导致使用寿命缩短,频繁养护不仅增大了经济成本,也对社会交通造成严重干扰^[2]。

为解决上述问题,一种兼具高粘结性和高弹性的新型改性沥青——高粘高弹改性沥青(HVHE)被开发出来,并将其与SMA结构相结合,形成双层SMA铺装体系。该体系上层侧重于抗滑、耐磨和耐久,下层侧重于柔韧、抗裂和追随钢板变形,通过一个性能优异的防水粘结层系统与钢面板牢固结合,共同构成一个复合受力整体^[3]。本文基于笔者多年的工程实践经验,系统总结该技术在钢桥面铺装中的应用,旨在为提升我国钢桥面铺装技术水平提供实践依据,并为同行提供参考。

2 高粘高弹改性沥青及 SMA 混合料的技术优势

2.1 高粘高弹改性沥青(HVHE)的特性

高粘高弹改性沥青是通过在优质基质沥青中参加高剂量的SBS改性剂(通常不低于6%),并配合相容剂、稳定剂、塑性地等多种添加剂,经过高速剪切、发育等工艺制成的特种改性沥青。其技术优势主要体现在:

(1) 优异的粘结性能:其60℃绝对粘度可达50,000 Pa·s以上,远高于普通SBS改性沥青($\geq 8000 \text{ Pa} \cdot \text{s}$)。高粘度赋予了混合料极高的沥青膜厚度和集料间粘结力,能有效抵抗水损害和集料剥落,大幅提升混合料的耐久性^[4]。

(2) 卓越的高温稳定性:高粘度特性使得沥青混合料在高温环境下具有更强的抗剪切变形能力,软化点通常超过90℃,能有效抵抗重载车辆反复作用下的塑性流动,从而显著抑制车辙的产生。

(3) 杰出的弹性和抗疲劳性能:其弹性恢复率可达95%以上。在车辆荷载作用下,铺装层发生变形后,高弹沥青能产生更大的恢复变形,有效降低残余应变积累,延缓疲劳裂缝的萌生与发展,延长铺装层的疲劳寿命^[5]。

(4) 良好的低温抗裂性:在低温条件下,其良好的柔韧性使铺装层能够适应钢桥面板的收缩变形,应力松弛能力强,降低了低温收缩开裂的风险。

2.2 双层SMA结构的设计理念

双层SMA铺装体系通常设计为下层+上层的复合结构,总厚度一般在60-80mm之间。

(1) 下层SMA-10:采用较细的级配(公称最大粒径9.5mm或13.2mm),其设计核心是“高柔性、高密集、

抗疲劳”。较薄的沥青膜和细集料构成的结构使其具有更好的变形追随性,能更好地与钢桥面板协同变形,并将荷载应力分散。同时,其高密实度起到了辅助防水的作用。

(2) 上层SMA-13:采用较粗的级配(公称最大粒径13.2mm),其设计核心是“抗车辙、抗滑、耐磨、耐久”。粗骨料形成了紧密的骨架嵌挤结构,承担了主要的荷载传递和抵抗车轮磨损的作用,提供了良好的表面功能。

(3) 协同工作机制:下层柔韧,吸收和分散应力;上层刚强,提供承载力与表面功能。二者通过热粘接形成整体,共同工作,实现了功能与性能的完美结合。

3 双层 SMA 铺装关键技术

3.1 混合料配合比设计

配合比设计是成功的关键。采用马歇尔设计方法,但需更注重功能验证。

(1) 材料选择:粗集料必须采用坚硬、耐磨、棱角性好的玄武岩或辉绿岩,与HVHE沥青的粘附性等级不低于5级。细集料宜采用同母岩机制砂。矿物填料推荐采用石灰岩磨细的矿粉,可增强与沥青的粘附性。纤维稳定剂宜采用颗粒状木质素纤维或聚合物纤维。

(2) 级配设计:严格遵循SMA的“三多一少”(粗集料多、矿粉多、沥青多、细集料少)原则。下层SMA-10的级配应适当调细,靠近级配范围中值偏下,以增强密实性和柔性。上层SMA-13的级配应保证充分的骨架嵌挤结构。

(3) 体积参数控制:设计空隙率是关键指标,一般控制在3.5%~4.5%。VMA(矿料间隙率)应大于17%,VFA(沥青饱和度)控制在75%~85%。马歇尔稳定度及流值作为参考指标,更重要的验证是通过车辙试验(动稳定度应 ≥ 8000 次/mm)、低温弯曲试验(破坏应变 $\geq 3500\mu\epsilon$)、浸水马歇尔试验(残留稳定度 $\geq 90\%$)和冻融劈裂试验(TSR $\geq 85\%$)等来进行性能检验^[6]。

3.2 防水粘结层系统

防水粘结层是确保铺装层与钢板协同工作的“生命线”。本体系采用“环氧富锌漆+反应性防水粘结层”的双层体系。

(1) 钢板除锈与防腐:对钢桥面板进行喷砂除锈,达到Sa2.5级,清洁度要求高。随即喷涂环氧富锌底漆,干膜厚度 $\geq 80\mu\text{m}$,起到长效防腐和增加基层粗糙度的作用。

(2) 喷涂反应性防水粘结层:在环氧富锌漆固化后,喷涂高分子反应型防水粘结材料(如甲基丙烯酸

类)。该材料能渗透至环氧富锌漆的微观孔隙中,发生化学反应,形成“铆钉”效应,并与上层沥青混合料产生极强的化学粘结力。采用机械化精确喷涂,喷涂量需精确控制(如 $0.8\sim 1.2\text{ kg/m}^2$),形成一层连续、均匀、富集的粘结膜。

3.3 施工工艺与控制要点

(1) 拌和与运输:采用4000型以上间歇式拌和楼。HVHE沥青加热温度控制在 $170\sim 175^\circ\text{C}$,集料加热温度 $200\sim 210^\circ\text{C}$,混合料出料温度应介于 $180\sim 190^\circ\text{C}$ 。拌和时间较普通SMA延长5~10s,确保沥青完全裹覆集料,无花白料。料车装料时,采用分层多次装料的方式,避免混合料在车厢内出现离析现象。运输途中,车辆必须全程严密覆盖保温。

(2) 摊铺作业:采用两台摊铺机呈梯队并行作业,这是实现双层SMA“热接热”的关键。下层摊铺后,不待其冷却,立即在其上进行上层摊铺。两台摊铺机前后距离宜控制在5~10m,重叠宽度5~10cm。

下层摊铺:松铺系数约1.18,摊铺温度 $\geq 170^\circ\text{C}$,摊铺速度 $2.5\sim 3.5\text{ km/h}$ 。

上层摊铺:松铺系数约1.20,摊铺温度 $\geq 175^\circ\text{C}$,摊铺速度 $2.5\sim 3.5\text{ km/h}$ 。

“热接热”工艺使上下层在高温下一次性碾压成型,层间结合极为紧密,近乎一个整体,彻底避免了传统分层摊铺可能存在的层间薄弱问题。

(3) 碾压成型:碾压是成型的关键。采用“紧跟、慢压、高频、低幅”的原则。

初压:采用11~13t双钢轮压路机静压1~2遍,速度 $\leq 3\text{ km/h}$ 。

复压:采用13~15t双钢轮压路机振压4~6遍,频率45~50Hz,振幅0.3~0.5mm,速度 $\leq 3\sim 5\text{ km/h}$ 。

终压:采用双钢轮压路机静压收面1~2遍,消除轮迹,碾压终了温度不应低于 130°C 。

(4) 养生与开放交通:碾压完成后,待路表温度自然冷却至低于 50°C (与环境温差 $\leq 15^\circ\text{C}$)后方可开放交通,避免产生内伤。

4 工程应用实例与效果分析

4.1 工程概况

某长江大桥为主跨380m的双塔双索面钢箱梁斜拉桥,双向六车道,设计车速 100 km/h ,日交通量超4万辆,重载车比例高。原桥面铺装为普通SBS改性SMA,运营5年后出现严重车辙和网裂。经多方论证,大修采用“高粘高弹改性沥青双层SMA(40mm下层SMA-10+40mm上层SMA-13)”铺装方案。

4.2 施工过程质量控制

施工过程中,对原材料、混合料性能、施工温度、摊铺厚度及压实度进行了全程监控。

(1) HVHE沥青、集料、纤维等原材料各项指标均满足设计要求。

(2) SMA-10和SMA-13混合料的体积指标和性能指标(车辙动稳定度平均值为10200次/mm,低温弯曲应变平均值为3850 $\mu\epsilon$)均优于规范要求。

(3) 施工温度控制严格,摊铺面平整、均匀。

(4) 采用无损检测(核子密度仪)与取芯检测相结合,压实度平均值达99.2%,芯样完整,层间结合良好。

4.3 竣工后性能跟踪检测

该桥通车后,每半年进行一次定期检测,持续三年。检测内容包括:

(1) 平整度(IRI):国际平整度指数IRI维持在1.2 m/km以下,远优于规范要求(≤ 2.0 m/km),行车舒适性极佳。

(2) 抗滑性能:构造深度(TD)保持在0.8~1.0mm,横向力系数(SFC)保持在65以上,表明表面宏观和微观构造丰富,抗滑性能持久稳定。

(3) 外观调查:经过三个冬夏循环和重载交通考验,桥面铺装未出现任何可见的车辙、推移、拥包、裂缝及层间脱粘等病害。仅在个别紧急刹车处有轻微磨损,整体状况优良。

4.4 技术经济性分析

与传统的环氧沥青和浇注式沥青铺装相比,HVHE-双层SMA体系展现出显著优势:

(1) 施工便捷性:施工设备和工艺与常规沥青混合料相通,无需特殊设备,施工窗口宽,质量控制更易把握。

(2) 可维修性:局部损坏后,可采用热补或铣刨重铺工艺进行快速维修,对交通影响小,维修成本低。而环氧沥青和浇注式沥青维修极其困难。

(3) 经济性:虽然高粘高弹改性沥青材料单价比普通改性沥青高,但其单价较环氧沥青低,而且其优异的耐久性大大延长了使用寿命和大修周期,综合全寿命周期成本(LCC)来看,具有显著的经济效益。

5 结论

本文通过理论分析和工程实践,系统论证了高粘高弹改性沥青双层SMA铺装技术在钢桥面应用中的可行性与优越性,主要结论如下:

(1) 性能卓越:HVHE改性沥青赋予SMA混合料超高的粘结强度、弹性恢复能力和抗疲劳性能,使其能够完美适应钢桥面板的大变形特性,从根本上克服了传统铺装的早期病害难题。

(2) 结构合理:双层SMA“热接热”摊铺工艺形成了上下功能互补、层间紧密结合的复合结构体系,整体力学性能优异。

(3) 工艺成熟:该技术施工工艺成熟,质量控制标准明确,易于在现有施工条件下推广应用,且后期养护维修便捷。

(4) 效益显著:实体工程三年跟踪监测表明,该铺装体系路用性能优异,耐久性突出,全寿命周期经济和社会效益显著,是重载、大跨径钢桥面铺装的理想选择之一。

6 工程应用建议

展望未来,随着材料科学的进步,为实现钢桥面铺装从“被动维修”到“主动预防”的智慧化管理,持续推动我国桥梁施工维护技术的进步,未来可进一步做以下方面的研究:

(1) HVHE改性沥青长期老化后的性能演化规律。

(2) 建立基于中大跨径钢桥特点的铺装设计理论与方法。

(3) 开发铺装层智能化施工与在线监控技术,进一步提升工程质量的可控性与可靠性。

参考文献

- [1] 中华人民共和国交通运输部.公路钢桥面铺装设计与施工技术规范:JTG/T 3364-02—2019[S].北京:人民交通出版社,2019.
- [2] 张华,王民.大跨径钢桥面铺装技术现状与发展趋势[J].中外公路,2020,40(4): 65-70.
- [3] 刘红坡,李立寒.高粘沥青及其混合料性能研究[J].建筑材料学报,2018,21(2): 278-283.
- [4] 郝增恒,盛兴跃,王民.高粘度改性沥青及其混合料路用性能研究[J].公路交通科技,2017,34(11): 1-7.
- [5] 叶群山,郝培文.改性沥青弹性恢复性能对混合料抗裂性能的影响[J].长安大学学报(自然科学版),2019,39(1): 1-10.
- [6] 中华人民共和国行业标准.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.