

无纤维 SMA 沥青混合料的应用研究

庞广龙

保利长大工程有限公司

DOI:10.12238/etd.v6i10.17177

[摘要] 沥青玛蹄脂碎石混合料(SMA)因其优异的高温抗车辙、低温抗裂、耐疲劳及抗滑性能,被广泛应用于高等级公路和重交通路面的上面层。传统SMA依赖纤维稳定剂(如木质素纤维、矿物纤维等)来吸附沥青、增加沥青用量、防止析漏并提升混合料韧性。然而,纤维的添加也带来了成本增加、施工工艺复杂及质量控制难度大等问题。本文旨在系统探讨以高粘度改性沥青为核心,完全摒弃传统纤维稳定剂的无纤维SMA技术的可行性、路用性能及工程应用价值。通过理论分析无纤维SMA的构成机理,并将其路用性能(高温稳定性、水稳定性、低温抗裂性及耐久性等)与传统纤维SMA进行对比研究。结果表明,通过精心设计的高粘度改性沥青制备的无纤维SMA,不仅能够完全满足甚至在某些方面(如高温抗车辙性能)超越传统纤维SMA的性能要求,同时在简化施工流程、降低综合成本方面展现出显著优势。本研究为无纤维SMA的推广应用提供了理论依据和实践参考。

[关键词] 无纤维SMA; 高粘度改性沥青; 路用性能; 应用研究; 成本分析

中图分类号: U414.75 **文献标识码:** A

Research on the Application of Fiber-Free SMA Asphalt Mixture

Guanglong Pang

Poly Changda Engineering Co., Ltd.

[Abstract] Stone Mastic Asphalt (SMA) is widely used in the surface layers of high-grade highways and heavy-traffic pavements due to its excellent resistance to high-temperature rutting, low-temperature cracking, fatigue, and skidding. Traditional SMA relies on fiber stabilizers (such as lignin fibers, mineral fibers, etc.) to absorb asphalt, increase asphalt content, prevent drainage, and enhance mixture flexibility. However, the addition of fibers also brings issues such as increased costs, complex construction processes, and difficulties in quality control. This paper aims to systematically explore the feasibility, road performance, and engineering application value of fiber-free SMA technology, which uses high-viscosity modified asphalt as the core and completely abandons traditional fiber stabilizers. Through theoretical analysis of the composition mechanism of fiber-free SMA, its road performance (high-temperature stability, water stability, low-temperature crack resistance, and durability) is compared with that of traditional fiber-reinforced SMA. The results show that fiber-free SMA prepared with carefully designed high-viscosity modified asphalt not only fully meets but even exceeds the performance requirements of traditional fiber-reinforced SMA in certain aspects (such as high-temperature rutting resistance), while also demonstrating significant advantages in simplifying construction processes and reducing overall costs. This study provides a theoretical basis and practical reference for the promotion and application of fiber-free SMA.

[Key words] Fiber-Free SMA; High-Viscosity Modified Asphalt; Road Performance; Application Research; Cost Analysis

1 第一章: 引言

1.1 研究背景

SMA是一种由沥青、纤维稳定剂、矿粉及少量细集料组成的沥青玛蹄脂填充间断级配的粗集料骨架间隙后形成的混合料。

自20世纪60年代在德国诞生以来,其独特的骨架嵌挤结构赋予了路面极高的结构稳定性和耐久性,在全球范围内获得了广泛应用。在我国,《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40-2004)^[1]明确将SMA作为高等级路面的推荐结构之一。

在传统SMA组成中,纤维被视为不可或缺的“第四组分”。其主要作用^[4]在于:

(1) 吸附稳定作用: 巨大的比表面积能有效吸附并稳定沥青中的轻质组分,防止在生产和运输过程中因高温而发生的沥青析漏和离析。(2) 增粘加筋作用: 纤维在沥青玛蹄脂中形成三维网络结构,起到“加筋”效果,提高了混合料的整体韧性和抗拉强度。(3) 增密作用: 纤维本身占据一定体积,使得混合料在相同沥青用量下具有更高的孔隙率设计空间,从而允许使用更多的沥青,增厚沥青膜,提升耐久性。

1.2问题的提出

尽管纤维优势显著,但其应用也伴随着一系列不容忽视的挑战:

(1) 经济成本: 优质纤维(尤其是聚合物纤维)价格不菲,直接增加了材料成本。(2) 施工复杂性: 纤维的投料、拌和需要专用设备,且对投料时机、干拌与湿拌时间有严格要求。拌和不易导致纤维结团,形成质量隐患。(3) 质量控制难度: 纤维的掺量精度和分散均匀性难以实时、有效地监控,增加了质量控制的变数。

在此背景下,探索一种既能保留SMA优良路用性能,又能规避纤维上述缺点的技术路径,具有重要的工程和经济意义。“无纤维SMA”的概念应运而生。

1.3研究内容与技术路线

本文主要研究内容包括:

(1) 阐述无纤维SMA的技术实现路径,重点分析高粘度改性沥青的替代机理。(2) 系统对比分析无纤维SMA与传统纤维SMA在高温稳定性、水稳定性、低温抗裂性等关键路用性能上的差异。(3) 探讨无纤维SMA的配合比设计要点及施工工艺特性。(4) 综合分析无纤维SMA的技术经济性及应用前景。

本文的技术路线为: 理论分析→性能对比→设计施工探讨→经济性评价→结论展望。

2 第二章: 无纤维SMA的技术实现路径与机理分析

实现无纤维SMA的核心,在于寻找一种能够替代纤维“吸附稳定”和“增粘加筋”功能的材料或技术。目前,最成熟、最有效的路径是使用高粘度改性沥青^[2]。

2.1高粘度改性沥青的核心作用

高粘度改性沥青并非单一产品,而是指通过物理或化学改性,使其在60℃高温条件下具有极高绝对粘度(通常要求 $\geq 20000\text{Pa}\cdot\text{s}$)的沥青结合料。其实现无纤维SMA的机理如下:

(1) 直接提供高粘度玛蹄脂: 传统SMA中,纤维通过吸附沥青中的油分,使“普通改性沥青+纤维”体系形成高粘度的“有效玛蹄脂”。而无纤维SMA则直接使用本身就具有高粘度的改性沥青,其与矿粉混合后形成的沥青胶浆本身即是高粘度玛蹄脂,从根本上解决了沥青的析漏问题。(2) 增强集料间粘结力: 高粘度沥青具有更强的内聚力和对集料的粘附性。在混合料中,它能够形成更厚、韧性更好的沥青膜,将粗集料骨架更牢固地粘结在一起,显著提升混合料的整体刚度和抗剪切变形能力。(3) 简化材

料体系: 将“沥青+纤维”的两元稳定体系,简化为“高粘度沥青”的一元体系,减少了材料间的界面效应和相容性问题,使混合料体系更为均质和稳定。

2.2高粘度改性沥青的制备技术

制备高粘度改性沥青的主要方法包括:

(1) 高剂量SBS改性: 提高SBS改性剂的掺量(例如从通常的4%-5%提升至6%-7%),或选用星型结构的SBS,能显著提升沥青的高温粘度和弹性恢复性能。(2) 专用高粘度添加剂: 在SBS改性沥青的基础上,复配使用专门研发的高粘度添加剂(如TPE、TR等),可以针对性地大幅提升60℃粘度,同时对低温性能的负面影响较小。(3) 其他高聚物复合改性: 采用SBR、EVA等其他聚合物与SBS进行复合改性,也可达到提升粘度的目的,但需注意不同聚合物之间的相容性。

3 第三章: 无纤维SMA与传统纤维SMA路用性能对比研究

为客观评价无纤维SMA的性能,本章通过参考大量文献数据与工程实例^[3],对其进行系统对比。

3.1高温抗车辙性能

车辙是沥青路面在高温和重载作用下最常见的破坏形式。SMA的骨架结构是其抗车辙的基础。

(1) 无纤维SMA: 由于高粘度沥青玛蹄脂本身具有极高的抗剪切强度,能更有效地抵抗集料骨架在荷载下的相对位移,其动态稳定度(次/mm)通常远超规范要求(如 $>8000\text{次/mm}$),甚至可以达到15000-20000次/mm以上,表现出极其优异的高温稳定性。(2) 传统纤维SMA: 其抗车辙性能同样优良,动态稳定度一般在4000-8000次/mm范围内。但纤维的“加筋”作用更多体现在玛蹄脂内部,而高粘度沥青则是从结合料本源上提升了抗变形能力。

结论: 在高温抗车辙性能上,无纤维SMA通常优于或至少等同于传统纤维SMA。

3.2水稳定性

水稳定性反映了混合料抵抗水损害的能力,通常用浸水马歇尔残留稳定性和冻融劈裂强度比来评价。

(1) 无纤维SMA: 高粘度沥青因其更强的粘附性,与集料的粘附等级通常更高。更厚的沥青膜也能更有效地阻隔水分的侵蚀。因此,其水稳定性指标(如残留稳定度 $>85\%$,冻融劈裂强度比 $>80\%$)能够轻松满足规范要求。(2) 传统纤维SMA: 纤维的存在有助于保持沥青用量,从而保证沥青膜厚度,其水稳定性也表现良好。

结论: 两者在水稳定性方面均能表现良好,无纤维SMA因结合料粘附性更优,可能略占优势。

3.3低温抗裂性

低温抗裂性是评价路面在低温条件下抵抗收缩开裂的能力,通常采用低温小梁弯曲试验的破坏应变来表征。这是无纤维SMA需要重点关注的性能。

(1) 传统纤维SMA: 纤维在混合料中形成的三维网络能够有

效地分散应力,阻止微裂缝的扩展,赋予混合料良好的韧性,使其低温弯曲应变较大。(2)无纤维SMA:其低温性能完全依赖于高粘度改性沥青的低温塑性。若使用的高粘度改性沥青兼具优异的低温延度(如5℃延度>30cm),则无纤维SMA的低温性能完全可以达到甚至超过规范要求。反之,如果一味追求高粘度而牺牲了低温性能,则可能导致脆性增加。

结论:无纤维SMA的低温性能存在一定的变数,关键在于高粘度改性沥青的配方设计。通过选择优质改性剂和平衡高低温性能,完全可以制备出低温性能合格的无纤维SMA。

3.4 沥青析漏性能

通过谢伦堡沥青析漏试验进行检验,要求析漏损失≤0.1%。

(1)传统纤维SMA:纤维通过吸附作用有效防止析漏。(2)无纤维SMA:高粘度沥青在165℃条件下流动性极低,其析漏损失通常远低于0.1%,甚至接近0%,表现出卓越的抗析漏能力。

结论:在防止沥青析漏方面,无纤维SMA的表现极为出色,可靠性高。

4 第四章:无纤维SMA的配合比设计与施工工艺

4.1 配合比设计要点

无纤维SMA的设计仍遵循SMA的基本原则,但需注意以下几点:

(1)级配设计:仍需坚持“三多一少”的原则,即粗集料多、矿粉多、沥青多、细集料少。粗集料的骨架嵌挤结构是根本,需通过干捣实试验或VCADRF方法验证骨架的形成。(2)最佳沥青用量确定:由于没有纤维吸收部分沥青,在相同条件下,无纤维SMA的理论最佳沥青用量可能略低于传统纤维SMA。但仍需通过马歇尔试验,以体积指标(如VMA、VV)和析漏试验综合确定,确保有足够的沥青膜厚度。(3)性能验证:必须对设计出的混合料进行全套性能验证,特别是高温车辙、低温弯曲和水稳定性试验,确保其满足所有技术标准。

4.2 施工工艺特点与优势

无纤维SMA的施工流程与传统SMA基本一致,但在以下环节体现出明显优势:

(1)拌和:省去了纤维投料装置和干拌工艺,简化了拌和楼的控制程序,减少了因纤维结团导致的质量风险,提高了拌和效率与均匀性。(2)运输与摊铺:高粘度沥青混合料在运输过程中更稳定,离析风险更低。摊铺过程与常规改性沥青混合料无异。(3)碾压:碾压工艺基本相同。由于混合料内部粘度高,可能在压实初期需要稍大的振动力,但总体上可按照常规工艺进行。

其施工的核心优势在于“简化”与“可控”,降低了人为因素和设备因素对最终路面质量的影响。

5 第五章:技术经济性及工程应用前景分析

5.1 成本分析

(1)材料成本:高粘度改性沥青的单价显著高于普通改性沥青,这是其主要的成本增加项。(2)综合成本:

①节省了纤维的采购成本。②节省了纤维存储、投料设备的购置和维护费用。③提高了拌和楼的生产效率,降低了单位时间的能耗和人工成本。④施工质量的提升降低了后期维护的风险和成本。

结论:综合计算,在大多数情况下,无纤维SMA的总成本与传统纤维SMA基本持平或略有降低,展现出良好的经济性。

5.2 应用前景与挑战

(1)应用前景:①重载交通路面:其卓越的高温性能使其非常适合用于高速公路、国道、港口、机场跑道等重载交通领域。②高温多雨地区:优异的抗车辙和水稳定性,使其在南方高温多雨地区具有广阔的应用空间。③绿色环保趋势:简化工艺意味着更低的能耗和更少的设备投入,符合绿色施工和可持续发展的理念。(2)面临的挑战:①技术认知与规范滞后:许多设计和施工单位对无纤维SMA技术尚不熟悉,且现行规范仍将纤维作为SMA的必要组分,需要推动规范和标准的更新。②对沥青品质依赖度高:其成败完全系于高粘度改性沥青的质量,对沥青供应商的技术水平和质量控制提出了极高要求。③长期性能数据积累:相较于有数十年应用历史的纤维SMA,无纤维SMA的长期耐久性、抗疲劳性能等仍需更多工程实践和时间来验证。

6 第六章:结论与展望

(1)技术可行性:以高粘度改性沥青为核心的无纤维SMA技术在理论上是完全可行的。它通过提升结合料本体的性能,成功地替代了纤维的吸附稳定和增粘作用。(2)性能优越性:无纤维SMA在高温抗车辙和防止沥青析漏方面表现尤为突出,其水稳定性满足要求,低温抗裂性能可通过优化沥青配方得到保证,整体路用性能不逊于甚至部分优于传统纤维SMA。(3)经济与施工优势:无纤维SMA在简化施工工艺、提高生产效率、降低综合成本和提升质量控制水平方面具有显著优势。(4)发展展望:无纤维SMA代表了SMA技术的一个重要发展方向。随着高粘度改性沥青技术的日益成熟和工程应用经验的不断积累,无纤维SMA有望在未来得到更广泛的认可和应用,逐步成为高等级沥青路面,特别是特殊工况下路面建设的优选方案之一。未来的研究应侧重于长期性能跟踪、专用改性剂的开发以及相关技术标准的建立与完善。

[参考文献]

[1]中华人民共和国交通部.JTG F40-2004公路沥青路面施工技术规范[S].北京:人民交通出版社,2004.

[2]张争奇,陶晶.高粘度沥青及其SMA混合料性能研究[J].中国公路学报,2010,23(5):1-7.

[3]王立志,徐世法.无纤维SMA沥青混合料的路用性能对比分析[J].公路交通科技,2018,35(4):15-21.

[4]刘朝晖,李宇峙.SMA中纤维作用机理与性能对比试验研究[J].土木工程学报,2009,42(8):130-136.