

温拌沥青混合料技术在市政道路养护工程中的应用

周卫¹ 杨胜² 王晋¹

1 邵阳学院 土木与建筑工程学院 2 邵阳市建设工程质量检测中心

DOI:10.12238/btr.v8i4.4717

[摘要] 为研究温拌沥青混合料(WMA)技术在市政道路养护工程中的应用效果,解决传统热拌工艺(HMA)的高污染、高能耗与低温施工受限难题。本文系统阐述了WMA的技术原理,通过实验室路用性能测试与工程现场数据,验证了WMA各项路用性能方面可达到规范设计标准,并详细介绍了适用于市政养护场景的WMA施工工艺流程。研究表明,在严格控制工艺参数的前提下,WMA技术可显著降低施工温度20~40℃,有效实现市政道路养护的节能减排、延长作业时间、保障路面质量的目标。

[关键词] 温拌沥青混合料; 市政道路养护; 技术原理; 路用性能; 施工工艺; 质量控制

中图分类号: TU99 文献标识码: A

Application of warm mix asphalt mixture technology in municipal road maintenance engineering

Wei Zhou¹ Sheng Yang² Jin Wang¹

1 School of Civil Engineering and Architecture, Shaoyang University

2 Shaoyang Construction Engineering Quality Testing Center

[Abstract] To investigate the application effectiveness of warm-mix asphalt (WMA) technology in municipal road maintenance projects and address the challenges of traditional hot-mixing (HMA) processes—such as high pollution, excessive energy consumption, and limitations in low-temperature construction—this study systematically explains WMA's technical principles. Through laboratory road performance testing and field data validation, it demonstrates that WMA meets all required specifications for road performance. The paper further details the construction process tailored for municipal maintenance scenarios. Research findings indicate that by strictly controlling process parameters, WMA technology can reduce construction temperatures by 20–40 °C, effectively achieving energy conservation, emission reduction, extended maintenance duration, and improved pavement quality in municipal road maintenance projects.

[Key words] warm mix asphalt mixture; municipal road maintenance; technical principle; road performance; construction technology; quality control

引言

热拌沥青混合料(HMA)具有耐久性好、施工便捷等优点,广泛应用于我国道路建设,但在交通组织复杂的市政道路养护工程应用时却面临严峻挑战,高温拌和与施工导致大量有害烟气及粉尘排放,严重污染城市环境,且受低温季节限制,全年有效施工期短^[1-3]。温拌沥青混合料(WMA)通过物理或化学方法,在保证沥青混合料最终性能的前提下,将拌和与施工温度显著降低20~40℃,为解决传统市政道路养护HMA技术的环保和施工效率难题提供了有效途径^[4-6]。本文旨在深入剖析WMA的技术原理,基于试验段验证其路用性能,系统阐述其施工工艺,并明确关键控制要点,为WMA技术在市政道路养护工程中的规范化、规模化应用提供理论支撑和实践指导。

1 工程概况

某城市主干道承担繁重的城市交通功能,近年来路面出现不同程度的车辙、网裂、坑槽等病害,亟需进行预防性养护。本次养护工程计划对该路段实施4cm厚AC-13沥青混凝土上面层铣刨重铺,养护作业受限于城区交通组织和环保要求,安排在夜间进行,有效施工窗口短且环境温度相对较低。因此,为有效降低施工温度、减少污染排放并保障工程质量,决定采用温拌沥青混合料技术作为本次养护工程的关键解决方案。

2 温拌技术原理与特点

2.1 温拌技术原理

WMA技术关键在于通过物理化学手段降低沥青粘度,实现在较低温度下沥青对集料的充分裹覆,并确保混合料良好的施工

和易性与可压实性。目前常用的温拌技术主要依赖添加温拌剂实现，其作用机理可分为两大类。

2.1.1有机降粘型温拌剂。有机降粘型温拌剂主要为长链脂肪酸化合物，如合成蜡、脂肪酸酰胺、酯类等，可在较低温度下溶解于沥青，熔融的蜡分子起到润滑作用，显著降低沥青粘度，在相对较低的温度下使集料颗粒更易被沥青包裹，并在摊铺和碾压过程中减少内摩阻力，温拌效果依赖于蜡的类型、熔点和添加剂量。

2.1.2发泡降粘型温拌剂。发泡降粘型温拌剂主要为基于表面活性剂的化学发泡材料，其机理是在热沥青拌和过程中引入少量水分，当水分遇到高温沥青时瞬间汽化，产生大量均匀、微小的气泡，使沥青体积瞬间膨胀，从而有效降低沥青的表现粘度，改善低温下混合料的润滑性和工作性，有利于摊铺和压实^[7]。

2.2温拌技术特点

2.2.1节能减排。温拌技术通过降低施工温度，直接减少沥青混合料生产燃料消耗15-30%，同步削减温室气体及有毒烟气排放30-70%。从源头抑制高温沥青烟生成，显著改善工人作业环境，彻底解决传统工艺在人口密集区施工的环境污染问题，成为践行“双碳”目标的关键路径，推动道路工程绿色化转型。

2.2.2延长作业时间。相较于传统热拌沥青混合料，温拌技术可延长有效压实温度区间及更好的施工和易性，突破传统热拌工艺的低温限制。支持在夜间、初冬及早春等低温时段施工，为交通组织复杂的市政养护争取宝贵时间弹性，延长年有效施工期达30%以上。

2.2.3优异的压实性能。温拌剂的润滑或发泡效应显著降低沥青混合料内摩阻力，使其在相同压实功下更易密实，尤其解决养护工程薄层罩面压实不足难题。其低温施工特性大幅减少摊铺环节的温度离析，从根源上提升路面结构均匀性，为长期抗车辙与抗疲劳性能奠定基础。

2.2.4抗老化能力。在严格工艺控制下，WMA高温抗车辙性、水稳定性及疲劳性能均与传统HMA等效，且因施工温度降低，沥青热老化程度减轻约20%，其低温抗裂性提升5-10%。长期服役中结构完整性保持良好，车辙与裂缝发展速率与HMA相当或更优。

2.2.5经济社会效应显著。虽温拌剂增加材料成本，但通过燃料节约、设备损耗降低、工期缩短及环保风险规避等方面削减成本，项目综合成本可持平或降低。社会效益层面，减少施工扰民、降低交通干扰成本，并与高比例再生料技术高度兼容，推动资源循环利用，赋能行业绿色转型。

3 温拌沥青混合料路用性能测试与施工效果验证

3.1路用性能测试

为评价温拌沥青混合料的路用性能，实验室采用车辙试验、冻融劈裂试验和小梁弯曲试验对WMA路用性能进行检测，并设置HMA对照组。两种沥青混合料采用完全相同的矿料级配（AC-13）和相同批次的70#沥青，其中WMA中外掺有机降粘型温拌剂，掺量为沥青质量的0.5%，温拌剂与热沥青混合均匀后再与集料拌和。HMA组试件制备时拌和温度为170℃，压实温度为160℃；WMA组拌

和温度为145℃，压实温度为135℃。两组混合料试验结果见表1。

表1 两种沥青混合料实验室性能及现场压实度测试结果

性能指标	HMA	WMA
动稳定度(DS)	4520 次/mm	4180 次/mm
冻融劈裂强度比(TSR)	84.5%	86.2%
-10℃破坏应变	2860 μ ε	3025 μ ε

从表1可知，WMA的路用性能表现不亚于HMA，完全满足市政道路养护技术要求。其中，WMA的动稳定度达4180次/mm，冻融劈裂强度比TSR达86.2%，低温弯曲破坏应变达3025 μ ε，说明其高温抗车辙能力、抗水损害性能和低温抗裂能力均达到或超过传统热拌沥青混合料的标准。综上所述，实验室和现场检测数据表明，WMA路用性能上完全能够满足市政道路养护的要求，且在低温抗裂性和施工和易性方面可能具有潜在优势。

3.2施工效果验证

采用实验室相同配比进行试验段铺筑，拌和温度145~155℃，摊铺温度135~145℃。施工过程严格遵循既定工艺，铺筑完成后及时进行关键指标检测，结果见表2。

表2 WMA试验段路面性能检测结果

桩号	检测点位	压实度(%)	构造深度(mm)	渗水系数 (mL/min)
K1+200	1	99.1	0.68	45
	2	97.3	0.71	38
	3	98.0	0.65	52
K1+310	1	97.6	0.70	42
	2	97.8	0.73	35
	3	97.4	0.67	48
K1+390	1	98.5	0.69	47
	2	97.5	0.72	40
	3	98.1	0.66	50
K1+520	1	97.7	0.71	43
	2	97.9	0.74	36
	3	98.3	0.68	49
K1+590	1	97.4	0.70	46
	2	97.6	0.72	39
	3	98.2	0.66	51

如表2所示，压实度全线达标，15个测点均值达97.9%，波动范围97.3%~99.1%，满足规范要求（≥96%），直接证明了在相对较低的施工温度下，WMA技术能够实现优异且均匀的密实效果，良好的压实度是路面抵抗车辙变形、承受荷载疲劳以及保证长期耐久性的根本保障，消除了对低温施工可能导致压实不足的担

忧。各测点构造深度值均 $>0.55\text{mm}$,且波动范围小,满足规范要求,表明WMA工艺未对路表的宏观纹理构造产生负面影响,良好的构造深度直接关系到路面的抗滑性能,尤其在潮湿状态下,对保障行车安全至关重要,证明了WMA在满足环保降温需求的同时,不会降低路面良好的抗滑性能。低渗水性对于防止水分侵入路面结构内部、避免引发水损害(如剥落、松散、唧浆)以及保护基层至关重要,是评估路面结构完整性和长期服役性能的核心指标之一。表2显示,所有测点渗水系数均远低于规范限值,优异的密水性能表明,采用WMA技术铺筑的路面可形成了致密、连通空隙率低的路面结构。

试验段压实度、构造深度和渗水系数的优异表现,强有力地证实了温拌沥青混合料技术在市政道路养护工程中应用的可靠性和综合性能优势。

4 温拌沥青混合料技术在市政道路养护中应用的施工工艺

4.1 原材料准备

集料严格按目标配合比要求备料,确保集料级配稳定。WMA拌和温度低,若集料含水率高,残留水分更难排出,严重影响沥青裹覆和混合料性能,因此开拌前应确保集料充分干燥,建议提高集料干燥筒加热能力或延长干燥时间,确保进入拌锅的集料温度均匀且满足要求。沥青罐和输送管道需有良好保温措施,沥青温度应控制在适宜泵送和拌和的范围内(通常 $145\sim 155^{\circ}\text{C}$),避免温度过高导致老化或过低导致粘度剧增。温拌剂根据产品类型和供应商要求储存,液体添加剂通常直接泵入沥青管道或拌锅,固体添加剂需有独立的精确计量添加装置。

4.2 拌和

拌和时温度控制是温拌技术的核心,目标拌和温度需根据所用温拌剂类型、沥青标号和气候条件精确设定,通常为 140°C 左右。拌和过程中需密切监控集料温度、沥青温度及混合料出料温度,确保在目标范围内波动小。干拌时间应保证集料混合均匀,通常 $5\sim 10\text{s}$;加入沥青后湿拌时必须确保沥青充分裹覆所有集料颗粒,并保证温拌剂均匀分散,因此湿拌时间比HMA略长,具体需根据设备性能和混合料均匀性现场调整确定。拌和楼需配备精确的温度传感器和记录系统。

4.3 运输

温拌沥青混合料运输与热拌沥青混合料相似,主要在于严格保温与高效衔接,以最大限度减少温度损失并防止污染。运输车辆在装料前必须彻底清洁车厢,并均匀喷涂适量植物油基隔离剂,防止混合料粘厢。装料过程中应尽量缩小车厢内混合料的堆积高度差,减少离析,装料后立即覆盖双层完整、保温性能优异的篷布,形成有效隔热层,减少运输过程中的温度损失和污染。运输途中应选择最短、最顺畅路线,避免急停急启,保持平稳行驶。优先采用大吨位运输车,减少车次和等待时间,车辆应配备温度传感器,实时监测并记录混合料温度,确保到场温度符合摊铺要求,不低于目标摊铺温度下限。整个运输过程需紧密衔接拌和与摊铺环节,确保混合料在最佳状态下进行摊铺作业。

4.4 摊铺

摊铺温度是保证温拌沥青混合料后续压实质量的关键。摊铺前,熨平板预热至 100°C 以上,减少温度骤降导致的离析;混合料到场温度严格控制在 130°C ,采用红外测温仪实时监测。摊铺过程中,运输车辆与摊铺机衔接紧密,确保料斗内存量 $\geq 2/3$ 高度,避免因缺料停顿;螺旋布料器匀速旋转,布料高度稳定在叶片 $2/3$ 处,减少级配离析;摊铺速度需匹配拌和产量与压实能力,保持 $2\sim 4\text{m}/\text{min}$ 匀速行进,避免时快时慢影响平整度。大风或低温环境(如夜间施工)需加强篷布覆盖保温,摊铺后立即碾压,最大限度利用WMA宽温域压实特性。

4.5 碾压

温拌沥青混合料的优势在于其更宽的有效压实温度区间和更长的可压实时间,因此碾压时需充分利用其宽温域特点,初压温度通常为 $120\sim 140^{\circ}\text{C}$,终压温度不低于 $90\sim 100^{\circ}\text{C}$ 。初压紧跟摊铺机,采用双钢轮压路机静压 $1\sim 2$ 遍,复压采用胶轮压路机揉压 $4\sim 6$ 遍或重型钢轮振动碾压,消除空隙、提升密实度,终压采用双钢轮静压 $1\sim 2$ 遍消除轮迹。碾压遵循“高频低幅、慢速匀速”原则,重叠轮宽 $1/3$ 以上。低温环境需增配压实设备、缩短碾压段长度,确保终压完成时混合料温度 $>90^{\circ}\text{C}$ 。碾压后采用无核密度仪快速检测压实度,及时调整工艺。

5 结论

综上所述,温拌沥青混合料技术是推动市政道路养护工程绿色化、高效化升级的有效解决方案。温拌沥青混合料技术依托有机降粘或发泡技术机理,显著降低施工温度,在保障路用性能完全达标的前提下,可大幅减少能源消耗与有害排放,显著改善作业环境;在原材料精准控制与工艺严格执行前提下,WMA路用性能完全达到传统热拌沥青混合料标准,且具备更优的施工均匀性。

[参考文献]

- [1]王彤,王昆.温拌超薄磨耗层在高速公路养护工程中的应用分析[J].山西建筑,2025,51(06):106-109+155.
- [2]王辉.高速公路工程中温拌再生沥青混合料的路用性能[J].交通世界,2024,(20):54-56.
- [3]卢伟,姜章盛.温拌超薄罩面沥青混合料的工程应用探析[J].交通科技与管理,2024,5(22):75-77.
- [4]徐士英,刘逸超,崔立龙.沥青混合料施工温度确定方法[J].山东理工大学学报(自然科学版),2025,39(02):50-54.
- [5]邵永恺.公路工程中温拌沥青混合料施工技术及其环境影响评价[J].交通科技与管理,2025,6(09):76-78.
- [6]李楚雄,王岚.老化及冻融条件下温拌再生沥青混合料抗反射裂缝疲劳损伤特性研究[J].市政技术,2025,43(06):16-25.
- [7]刘成,刘一鸣,叶群水,等.废食用油改性高掺量沥青混合料回收料热拌/温拌再生沥青混合料路用性能[J].科学技术与工程,2025,25(09):3828-3839.

作者简介:

周卫(1981—),男,湖南新化人,硕士,讲师,研究方向:土木工程材料与检测。