

煤基沥青在沥青混凝土路面中技术应用研究

王博逸, 赵斌

(甘肃省平凉公路事业发展中心华亭公路段, 甘肃 华亭 744100)

摘要: 针对甘肃平凉地区冬冷夏热的气候特征与道路建设需求, 系统探讨了以煤基沥青部分替代石油沥青的技术可行性。通过对煤基沥青与70号道路石油沥青的性能对比, 明确了煤基沥青高软化点、低针入度、低延度及高黏度的特性, 其“高沥青质与胶质、低油分”的化学组成是导致高温性能优而低温性能差的根本原因。基于AC-13级配, 通过马歇尔试验确定了不同复配比例的最佳沥青用量, 并系统评价了混合料的路用性能。结果表明, 随煤基沥青掺量增加, 混合料高温稳定性显著提升, 但低温抗裂性与水稳定性下降。确定40%为潜力掺量, 但其低温性能不满足要求。采用外掺3% SBS进行改性后, 混合料低温弯拉应变达2 600 $\mu\epsilon$, 动稳定度提升至2 500次/mm, 水稳定性同步改善, 综合性能全面达标。基于室内研究, 铺筑了试验段, 明确了适用于高黏度改性沥青的施工工艺参数。现场检测与观测表明路面状况良好。该方案材料成本与纯石油沥青混合料基本持平, 同时具有节约石油资源、消纳固废的环境效益, 为煤基沥青在寒冷地区的应用提供了技术依据。

关键词: 煤基沥青; 沥青混合料; 路用性能; SBS改性; 施工工艺

中图分类号: U416.25; TU997

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2026)05-0105-07

Research on Technical Application of Coal-Based Asphalt in Asphalt Concrete Pavement

WANG Boyi, ZHAO Bin

(Gansu Province Pingliang Highway Development Center Huating Highway Section, Huating 744100, China)

Abstract: In response to the climate characteristics of cold winters and hot summers and the needs of road construction in the Pingliang region of Gansu Province, the technical feasibility of partially replacing petroleum asphalt with coal-based asphalt is systematically discussed. Through a performance comparison between coal-based asphalt and 70# road petroleum asphalt, the characteristics of high softening point, low penetration, low ductility and high viscosity of the coal-based asphalt are clarified. Its chemical composition of “higher asphaltene and resin contents with low oil content” is identified as the fundamental reason for its superior high-temperature performance but poor low-temperature performance. Based on the AC-13 gradation, the optimal asphalt content for different blending ratios is determined via Marshall tests, and the pavement performance of the mixtures is systematically evaluated. The results indicate that as the coal-based asphalt content increases, the high-temperature stability of the mixture significantly improves, but its low-temperature crack resistance and moisture stability decline. A 40% coal-based asphalt content is identified as a potential blending ratio, although its low-temperature performance fails to meet requirements. After modification by adding 3% SBS, the low-temperature flexural tensile strain of the mixture reaches 2 600 $\mu\epsilon$, its dynamic stability is enhanced to 2 500 cycles/mm, and its moisture stability is improved simultaneously. The comprehensive performances meet all standards. Based on laboratory research, a test section is paved in order to define the construction process parameters suitable for high-viscosity modified asphalt. The field inspections and observations indicate that the pavement condition is satisfactory. The material cost of this scheme is basically comparable to that of pure petroleum asphalt mixtures, while offering environmental benefits such as conserving petroleum resources and absorbing solid waste, which provides a technical basis for the application of coal-based asphalt in cold regions.

Keywords: coal-based asphalt; asphalt mixture; pavement performance; SBS modification; construction technology

收稿日期: 2025-12-23

作者简介: 王博逸(1983—), 男, 本科, 高级工程师, 从事公路养护生产工作。

通信作者: 赵斌(1992—), 男, 本科, 注册安全工程师, 工程师, 从事公路养护安全生产工作。电子信箱: 457828715@qq.com

0 引言

沥青混凝土路面是我国高等级公路的主要形式, 其建设长期依赖石油沥青。然而, 我国石油资源对外依存度高, 国际油价波动加剧了建设成本压

力^[1]。同时,我国煤炭资源丰富,煤化工副产品煤基沥青若处置不当,易造成环境压力与资源浪费。将煤基沥青用于道路工程,替代部分石油沥青,是实现“变废为宝”、缓解资源与环保压力的有效途径,符合国家绿色低碳发展战略。

甘肃平凉地区属中温带半干旱大陆性季风气候,冬季寒冷、夏季炎热,对沥青路面高低温性能要求较高。该地区煤炭资源丰富,为煤基沥青利用提供了条件。但煤基沥青在化学组成和结构上与石油沥青差异显著,通常表现为高黏度、高软化点,但延度低、低温脆性大^[3],直接应用于严酷气候地区易诱发早期病害。因此,本文开展针对性的应用技术研究,通过复配、改性与工艺控制弥补其缺陷,形成可靠技术体系,对推动固废高值化利用、促进交通基础设施绿色转型具有重要价值。

1 国内外研究现状

1.1 国外研究现状

欧美国家早期曾广泛使用煤焦油沥青,后因环保问题逐渐被石油沥青替代。近年来,随着资源紧张与废弃物资源化需求,煤基沥青重新受到关注。美国、澳大利亚、加拿大等国研究表明,煤直接液化残渣(CLR, coal direct liquefaction residue)可部分替代石油沥青,显著提升高温性能,但损害低温延展性,掺量多控制在20%~30%,并常需借助SBS等改善低温性能。研究还关注其抗车辙、抗疲劳性能及环保风险

1.2 国内研究现状

国内研究证实,煤基沥青可显著提高沥青高温稳定性,但掺量超过30%~40%时低温延度急剧下降。研究重点集中于采用SBS、橡胶粉等改性剂改善低温性能,并通过工艺优化提升稳定性。混合料性能评价证实其高温抗车辙能力突出,但低温与水稳定性需进一步验证。此外,煤基沥青在高值化利用方面也取得进展^[4]。然而,针对西北寒冷地区全链条的系统性工程应用研究,尤其是施工工艺与综合效益分析仍显不足。

1.3 主要研究内容与技术路线

研究旨在解决煤基沥青在平凉地区应用的低温性能缺陷与工艺适配难题。研究遵循“基础性能解析—复合设计—性能评价—改性优化—工程验证—效益评估”的技术路线,主要内容包括:(1)材料性能表征;(2)复合体系设计与最佳用量确定;(3)路用性

能系统评价与合理掺量确定;(4)低温性能改性技术研究;(5)试验段铺筑与工艺验证;(6)技术经济与环境效益分析,具体如图1所示。

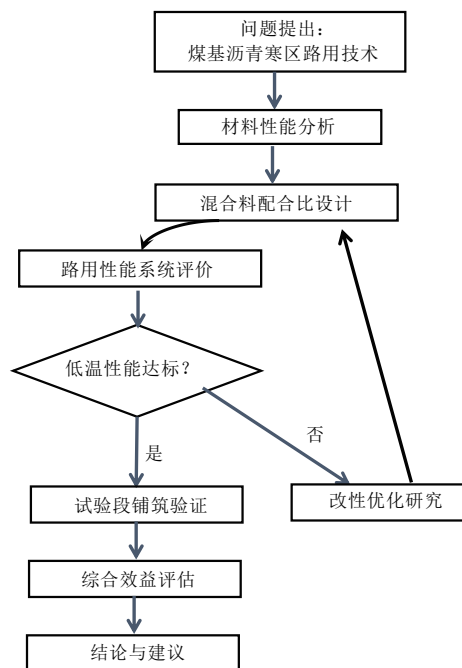


图1 技术路线图

2 煤基沥青与石油沥青基本性能对比

2.1 试验材料

煤基沥青:样品取自甘肃平凉市某煤化工企业的煤直接液化装置残渣。该残渣经过减压蒸馏工艺处理,脱除部分轻质组分,得到软化点适宜的固态煤基沥青,其外观呈黑色光泽固体,断面呈亮黑色。

石油沥青:选用市场常用的SK-70号A级道路石油沥青作为基准对比材料,其各项指标均符合《公路沥青路面施工技术规范》(JTGF40—2004)的要求^[5]。

2.2 试验方法

所有试验均严格按照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)执行^[6]。主要测试项目及方法如前所述。

组分分析:采用经典的四组分分析法(SARA, saturates, aromatics, resins, asphaltenes),分析其化学组成特征。

2.3 基本物理性能测试结果与分析

煤基沥青与70号石油沥青的基本性能测试结果对比如表1所示。

2.3.1 稠度与硬度特性

煤基沥青在25℃下的针入度仅为15(0.1 mm),显著低于石油沥青的70(0.1 mm)。这表明其在常温

表 1 煤基沥青与石油沥青基本性能对比

指标	煤基 沥青	石油沥青 (70 号)	试验 方法
针入度(25 ℃)/0.1 mm	15	70	T0604
软化点/℃	85	46	T0606
延度(15 ℃)/cm	2.0	>100	T0605
运动黏度(135 ℃)/(Pa·s)	2.5	0.5	T0625
闪点/℃	280	260	T0611
溶解度(三氯乙烯)/%	99.5	99.8	T0607
密度(15 ℃)/(g·cm ⁻³)	1.18	1.03	T0603

状态下稠度极大、硬度极高,属于典型的硬质沥青。这种特性主要源于其化学组成中高分子量组分(沥青质)含量较高^[7]。

2.3.2 高低温性能呈现显著矛盾

高温性能突出:煤基沥青的软化点高达 85 ℃,远超石油沥青的 46 ℃。作为衡量材料高温稳定性的关键指标,这一结果预示其用于沥青混合料可能具备卓越的抗车辙变形能力^[8]。

低温性能堪忧:在 15 ℃条件下,煤基沥青的延度仅为 2.0 cm,延展性极差,呈现显著脆性^[3]。这与延度大于 100 cm、塑性良好的石油沥青形成鲜明对比。极低的延度表明其低温变形能力严重不足,若直接应用于寒冷地区路面,存在极高的低温收缩开裂风险^[9]。

2.3.3 施工和易性面临挑战

在 135 ℃的标准测试温度下,煤基沥青的运动黏度达 2.5 Pa·s,是石油沥青的 5 倍。这一高黏度特性意味着在实际施工中,其流动性差,泵送、拌和及摊铺阻力大。为保障施工可操作性,必须相应提高拌和与压实温度,这对施工能耗和设备提出了更高要求。

2.3.4 安全性与基础纯度符合要求

煤基沥青的闪点为 280 ℃,高于石油沥青,表明其在高温加工时的着火敏感性较低,施工安全性较好。同时,两者在三氯乙烯中的溶解度均超过 99%,证明杂质含量极少,材料纯度满足道路工程的基本要求^[10]。

综上所述,煤基沥青是一种高硬度、高高温稳定性但低低温延性、高黏度的特殊沥青材料。其性能特征决定了它不适合直接替代常规石油沥青用于道路工程,尤其在寒冷地区。然而,其突出的高温性能极具应用价值。因此,通过复配(与石油沥青混合)及改性(如添加聚合物)等技术手段,弥补其低温与施工性能短板,从而发挥其高温性能优势,是将其成

功应用于路面工程的关键研究方向^[11]。

2.4 化学组分分析结果与讨论

沥青的宏观性能由其微观化学组成决定。四组分分析结果如表 2 所示。

表 2 沥青四组分分析结果(质量分数) 单位:%

组分	煤基沥青	石油沥青(70 号)
饱和分(S)	5.2	15.3
芳香分(Ar)	25.6	42.1
胶质(R)	38.7	30.5
沥青质(A)	30.5	12.1
(胶质+沥青质)	69.2	42.6
(饱和分+芳香分)	30.8	57.4

煤基沥青的胶质与沥青质总含量高达 69.2%,远高于石油沥青(42.6%)。沥青质作为三维网络骨架,其含量高直接赋予煤基沥青高硬度、高软化点与高黏度的特性^[10];胶质则起胶溶稳定作用。

相反,煤基沥青的油分(饱和分与芳香分)含量仅为 30.8%,显著低于石油沥青(57.4%)。油分是重要的分散介质,其中芳香分对胶质与沥青质具有溶解作用。油分相对不足导致煤基沥青胶溶体系不稳定,沥青质易聚集,进而表现出脆硬特性与较差的低温延展性。

由此可见,“高沥青质、高胶质、低油分”的组成特征直接决定了煤基沥青“高软化点、低针入度、低延度、高黏度”的性能表现。作为道路沥青,其高温性能优越,但低温性能严重不足。因此,本研究重点在于通过复配与改性,在保留其高温优势的同时提升低温性能。该组成特点也提示,可进一步拓展其在碳材料等高附加值领域的应用,以实现资源的高效利用。

3 煤基沥青混合料配合比设计及路用性能研究

3.1 原材料与矿料级配设计

集料与填料:粗、细集料均选用质地坚硬、耐磨耗、棱角性好的石灰岩碎石,其物理力学指标符合规范要求^[5]。填料为石灰石磨细得到的矿粉。所有矿料均经筛分与性能检验,确保质量稳定。

沥青结合料:按煤基沥青占复合沥青总质量的 0%(纯石油沥青)、20%、40%、60%、80%、100%(纯煤基沥青)6 种比例,在 170~180 ℃下通过高速剪切机搅拌 30 min,制备成均匀的复合沥青。

级配设计:选用 AC-13 型密级配沥青混凝土作为研究对象。依据规范中 AC-13 的级配范围^[5],以中值作为设计目标,合成级配如表 3 所示。

表3 AC-13 目标矿料级配(通过率) 单位: %

筛孔尺寸/ mm	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
规范中值	100	95	76.5	53	37	26.5	19	13.5	10	6
设计级配	100	95.2	76.8	52.6	37.3	26.8	19.2	13.6	9.8	5.9

3.2 确定最佳沥青用量(OAC)

采用马歇尔试验方法确定不同煤基沥青掺量下混合料的最佳沥青用量。油石比以预估值为中值,按 0.5% 的间隔变化,共选取 5 个油石比。依据规范要求^[6]制作标准马歇尔试件,测定其体积参数与力学指标。

以目标空隙率 4.0% 为主要控制指标,结合 VMA、VFA、稳定度与流值的规范要求,确定各掺量下混合料的最佳沥青用量(OAC),结果如表 4 所示。

表4 不同煤基沥青掺量混合料的最佳沥青用量(OAC) 单位: %

煤基沥青掺量	0	20	40	60	80	100
OAC	4.8	4.9	5.0	5.1	5.2	5.3

随着煤基沥青掺量的增加,混合料的最佳沥青用量呈小幅上升趋势。这主要归因于煤基沥青较高的密度与黏度:较高密度导致相同质量下体积减少;较高黏度削弱了对集料的润湿与裹覆效率。OAC 的增加幅度(从 4.8% 到 5.3%)在合理范围内,不会对工程造价造成显著影响。

3.3 高温稳定性试验与结果分析

采用车辙试验评价混合料的高温抗永久变形能力^[6]。按各掺量的 OAC 成型 300 mm×300 mm×50 mm 的车辙试件。试验温度 60 ℃,轮压 0.7 MPa。规范对夏热区普通沥青混合料 DS 要求不小于 1 000 次/mm。试验结果如表 5 所示。

表5 不同煤基沥青掺量混合料的车辙试验结果

煤基沥青掺量/%	0	20	40	60	80	100
动稳定度 DS/(次·mm ⁻¹)	1 200	1 500	1 800	2 200	2 600	3 000

所有掺量的混合料 DS 均满足规范基本要求^[5]。煤基沥青的掺入对提高混合料高温稳定性的效果极为显著^[8],DS 随掺量增加近乎线性增长。纯煤基沥青混合料的 DS 达到 3 000 次/mm,是纯石油沥青混合料的 2.5 倍。

机理分析:这主要得益于煤基沥青自身高软化点与高黏度带来的高内聚强度。在混合料中,高劲度的煤基沥青作为胶结料,增强了集料间的黏结力,提高了混合料在高温下的抗剪切流动变形能力,从而表现出卓越的抗车辙能力。

3.4 低温抗裂性试验与结果分析

采用低温弯曲梁试验评价混合料的低温抗裂性能。在-10 ℃条件下测试试件的破坏弯拉应变 ϵB 。通常要求寒区沥青混合料的 ϵB 不小于 2 500 $\mu\epsilon$ 。试验结果如表 6 所示。

表6 不同煤基沥青掺量混合料的低温弯曲试验结果(-10 ℃)

煤基沥青掺量/%	0	20	40	60	80	100
破坏弯拉应变 $\epsilon B(\mu\epsilon)$	2 800	2 500	2 200	1 800	1 500	1 200

纯石油沥青混合料的低温弯拉应变满足寒区要求。随着煤基沥青掺量的增加,混合料低温性能呈规律性下降:掺量 20% 时,应变值处于规范下限;掺量 40% 时,应变值已不满足规范要求。这直接印证了煤基沥青自身低温脆性对混合料性能的负面影响。

从破坏机理看,煤基沥青低温延度低、脆性高,其掺入提高了复合沥青的玻璃化转变温度与脆化点,并削弱了胶结料的低温应力松弛能力。在温度收缩应力作用下,沥青胶结料难以通过充分的黏弹性变形来消散应力,从而导致混合料内部应力集中,使混合料在较小应变下发生脆性破坏^[15]。

3.5 水稳定性试验与结果分析

采用浸水马歇尔试验与冻融劈裂试验综合评价混合料的水稳定性^[6]。试验结果如表 7 所示。

表7 不同煤基沥青掺量混合料的水稳定性试验结果 单位: %

煤基沥青掺量	0	20	40	60	80	100
浸水残留稳定度 MS_0	85	83	80	78	75	72
冻融劈裂强度比 TSR	84	81	79	76	73	70

纯石油沥青混合料的水稳定性良好。随着煤基沥青掺量增加,两项指标均呈下降趋势:掺量 40% 时,指标刚好满足规范($MS_0 \geq 80\%$, $TSR \geq 75\%$);掺量 60% 时, MS_0 已不满足要求。

机理上,稳定性下降与煤基沥青的化学性质有关。其高含量的极性胶质和沥青质虽有利于初期与碱性集料黏附,但其分子结构刚硬、柔韧性不足,且高黏度易导致沥青膜分布不均,在长期水浸或冻融作用下,水分更易侵入界面薄弱处,引发剥落。

3.6 综合性能分析与初步掺量确定

综合高温、低温及水稳定 3 项关键路用性能的试验结果可知:

在高温稳定性方面,煤基沥青贡献显著,掺量越高,性能越优;

在低温抗裂性方面,煤基沥青产生负面影响,掺量超过 20% 即难以满足寒区要求;

在水稳定性方面,随煤基沥青掺量增加而降低,掺量超过 40% 后,该性能成为制约因素。

针对甘肃平凉“冬冷夏热”的气候特点,在保证低温抗裂性达标的前提下,优先追求高温性能的显著提升与经济性的优化。据此,对两种关键掺量分析如下。

(1)20% 掺量方案:其低温性能仅达规范下限,水稳定性良好,但高温性能提升幅度有限,未能充分发挥材料潜力。

(2)40% 掺量方案:高温性能(DS=1 800)提升显著,水稳定性(MS₀=80%,TSR=79%)满足要求,且经济性更优。但其低温性能(2 200μ ϵ)明显不足,成为主要短板。

综上,40% 掺量方案在高温性能及经济性上优势突出,但其低温性能短板必须克服。因此,本文研究确定以 40% 煤基沥青与 60% 石油沥青的复合沥青作为基础体系,后续将聚焦于对其进行低温性能改性。

4 煤基沥青混合料改性研究

4.1 改性方案与制备工艺

针对 40% 掺量煤基沥青混合料低温性能不足的问题,选用 2 种常用的聚合物改性剂进行改性研究。

SBS 改性剂:线型 YH-791,一种热塑性弹性体,能显著提高沥青的高低温性能和弹性^[12-13]。设计掺量(占复合沥青总质量)为 3%、5%、8%。

橡胶粉改性剂:40 目废轮胎橡胶粉,既可改善低温性能,又能实现固体废物利用^[14]。设计掺量(占复合沥青总质量)为 15%、20%、25%。

改性沥青制备工艺:

SBS 改性沥青:将 40% 煤基沥青与 60% 石油沥青在 180 ℃下混合均匀,加入预定比例的 SBS 颗粒。在 180 ℃、5 000 r/min 的高速剪切机中剪切 45 min,使 SBS 充分分散、溶胀、降解。随后在 170 ℃下低速搅

拌发育 2 h,促进 SBS 网络结构的形成。

橡胶粉改性沥青:将复合沥青加热至 180 ℃,加入预定比例的橡胶粉,先低速机械搅拌溶胀 1 h。然后在 180 ℃、4 000 r/min 下剪切 30 min。发育过程同 SBS 改性。

4.2 改性沥青性能测试

对未改性和不同改性方案下的复合沥青进行基本性能测试,结果如表 8 所示。

表 8 改性沥青基本性能测试(基质沥青为 40% 煤基+60% 石油沥青)

改性类型与掺量	针入度(25 ℃, 0.1 mm)	软化点/℃	5 ℃延度/cm	弹性恢复(25 ℃)/%
未改性	15	85	2.0	8
+3%SBS	28	92	35	85
+5%SBS	25	96	40	88
+8%SBS	22	100	45	90
+15% 橡胶粉	13	90	12	35
+20% 橡胶粉	11	94	15	45

SBS 改性效果:SBS 的加入使沥青的针入度增大(变软),软化点进一步提高,5 ℃延度得到巨大改善,从 2 cm 提升至 35 cm 以上,同时弹性恢复率很高^[15]。这表明 SBS 在沥青中形成了三维弹性网络,显著增强了沥青的柔韧性、弹性和低温变形能力。

橡胶粉改性效果:橡胶粉的加入使沥青针入度减小(变硬),软化点提高,5 ℃延度也有所改善,但改善幅度(12~18 cm)远小于 SBS 改性(35~45 cm)。橡胶粉主要依靠溶胀后形成的弹性胶粒来提高沥青的黏弹性和低温性能,但其与沥青的相容性和分散均匀性通常不如 SBS^[14]。

4.3 改性混合料路用性能测试

在重新确定的各改性混合料最佳沥青用量(OAC)条件下,对改性后的混合料进行路用性能测试。OAC 因改性剂类型与掺量影响,在 4.9%~5.2% 浮动,均接近基准配比的 5.0%。关键性能测试结果结果如表 9 所示。

表 9 改性混合料路用性能测试结果(基质为 40% 煤基沥青混合料)

改性类型与掺量	建议 OAC/%	动稳定度 DS/(次·mm ⁻¹)	破坏应变 ϵ_B (-10 ℃, μ ϵ)	残留稳定度 MS ₀ /%	冻融劈裂强度比 TSR /%
未改性	5.0	1 800	2 200	80	79
+3%SBS	5.1	2 500	2 600	86	85
+5%SBS	5.2	2 800	2 800	88	87
+8%SBS	5.2	3 000	2 900	89	88
+15% 橡胶粉	5.0	2 000	2 350	82	80
+20% 橡胶粉	5.1	2 200	2 450	83	81

低温抗裂性:SBS对低温性能的改善极为显著^[12]。仅添加3%,低温弯拉应变即从2 200 $\mu\epsilon$ 提升至2 600 $\mu\epsilon$,完全满足并超过寒区要求($\geq 2\ 500\ \mu\epsilon$);5%和8%掺量下性能更优。橡胶粉改性虽有一定效果,但需高达25%的掺量才能使应变达到2500 $\mu\epsilon$ 的临界值,这与改性沥青的延度测试结果趋势一致^[11]。

高温稳定性:两种改性方式均进一步提升了动稳定度。经SBS改性后,DS从1 800次/mm显著提高至2 500~3 000次/mm,达到了改性沥青混合料的性能水平^[15]。

水稳定性:改性后,MS₀和TSR均有提升。SBS因能形成更致密、弹性更好的沥青膜,增强了与集料的黏结及抗水侵蚀能力,提升效果更为明显。

综合比选橡胶粉改性和SBS改性性能如下。

橡胶粉改性:需要高掺量($\geq 25\%$)才能勉强满足低温要求,且其制备工艺对温度和时间敏感,储存稳定性较差,不利于大面积施工的质量控制。

SBS改性:仅需低掺量(3%)即可显著、稳定地改善低温性能,并全面提升其他性能。尽管SBS成本较高,但其综合改性效果优异,工艺成熟,更便于工程推广应用^[12]。

因此,本研究确定的最优方案为:采用40%煤基沥青与60%石油沥青复合,并外掺复合沥青总质量3%的SBS进行改性。该方案下混合料的最终路用性能指标为:DS=2 500次/mm, $\epsilon B=2600\ \mu\epsilon$, MS₀=86%, TSR=85%,全面满足并优于《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40—2004)规范^[5]对夏热冬冷地区高等级路面的要求。

5 试验段铺筑与施工工艺

为验证室内研究成果的工程可行性,本章开展了试验段铺筑,重点阐述了针对高黏度SBS改性煤基沥青混合料的施工关键技术参数与控制要点。

5.1 工程概况

在甘肃省平凉市G344线二级公路铺筑了200 m试验段。路面结构为:上面层4 cm AC-13(40%煤基+3%SBS改性沥青混合料),下面层为5 cm AC-20普通石油沥青混合料。

5.2 施工关键技术参数确定

基于该改性沥青高黏度的特性,通过黏温曲线确定了较普通SBS改性沥青提高10~15℃的施工温度控制体系^[16]。关键温度控制点如下:沥青加热温度175~185℃;集料加热温度190~200℃;混合料

拌和温度170~180℃;摊铺温度不低于160℃;初压温度150~160℃,终压温度不低于90℃。

碾压工艺:遵循“紧跟、慢压、高频、低幅”原则^[12]。初压采用双钢轮压路机静振结合;复压采用轮胎压路机充分揉搓;终压采用双钢轮压路机消除轮迹。

5.3 施工过程质量控制

拌和时延长干拌与湿拌时间,确保沥青均匀裹覆;运输中加强保温;摊铺保证匀速连续;碾压严格按既定工艺与遍数执行,确保压实度与均匀性。

5.4 现场检测与长期观测

施工后检测显示:压实度平均98.2%,平整度、渗水系数、构造深度均符合要求。

通车运营1年后观测显示,路面平整密实,未出现明显车辙、裂缝等病害,为系统评估材料耐久性,建立定期观测机制,验证了该材料与工艺的短期适用性。

持续跟踪至近期(通车2~3年)表明:路面整体性能保持稳定,关键病害指标(如车辙深度、裂缝率)未出现显著发展,路面结构完整,表面功能良好。与一年期状态相比,性能衰减缓慢,显示出优异的长期耐久性。后续将继续开展长期性能监测,以获取更全面的耐久性数据。

6 技术经济与环境效益分析

6.1 技术效益

确定了“40%煤基沥青+60%石油沥青+3%SBS”的最佳复合改性方案。综合路用性能优良,制定了相应的施工工艺与质量控制参数,为工程实施提供了明确指导^[16]。

6.2 经济效益分析

以AC-13混合料为例,进行初步成本分析,本次分析在考虑沥青材料成本的基础上,进一步纳入了因施工温度差异可能产生的拌和能耗成本。

方案A(纯70号石油沥青):油石比4.8%,沥青材料成本为240元/t混合料。

采用业内广泛参考的经验值,即混合料出料温度每提高10℃,则估算增加的能耗成本为:(15℃/10℃)×(1.5~2.5元/t)≈2.25~3.75元/t混合料。为便于比较,取中值3.0元/t混合料作为估算增量。

方案B(40%煤基沥青+60%石油沥青+3%SBS):复合改性沥青估算单价约为4 300元/t,油石比5.0%,对应沥青材料成本为215元/t混合料,沥青材

料成本(215元/t)+预估能耗增加(约3元/t)=约218元/t混合料。

结论:在考虑沥青材料成本及估算的施工能耗增加后,方案B的综合直接成本仍略低于方案A,两者总体处于基本持平或方案B稍有优势的水平。方案B在高温抗车辙等路用性能上的显著优势^[8],全生命周期成本预计更具优势。

6.3 环境与社会效益

该复合改性沥青方案具有以下环境与社会效益^[18]。

资源节约:每吨应用可替代0.4t石油沥青,降低对不可再生石油资源的依赖;固废资源化:有效消纳煤化工固体副产品,减少堆存带来的土地占用与环境污染;产业协同:为当地煤炭及煤化工副产品提供稳定的高附加值出路,促进区域产业发展;碳减排潜力:煤炭组分转化为道路材料可实现固碳,并减少石油沥青远程运输的碳排放。

7 结 语

本研究系统评价了煤基沥青的路用性能,并提出了适用于寒冷地区的复合改性方案与施工工艺:

(1)平凉煤基沥青具有高软化点(85℃)、低针入度(150.1mm)、低延度(2.0cm)及高黏度(135℃,2.5Pa·s)的特点。其“高沥青质、高胶质、低油分”的化学组成是高温性能优越而低温性能不足的根本原因。

(2)随着煤基沥青掺量增加,AC-13混合料的高温稳定性显著提升,但低温抗裂性与水稳定性逐步下降,最佳沥青用量亦小幅增加。

(3)40%煤基沥青与60%石油沥青复配,并外掺3%SBS改性后,混合料低温弯拉应变达2600μ ϵ ,动稳定度达2500次/mm,水稳定性同步改善,全面满足夏热冬冷地区高等级路面规范要求。

(4)针对改性后混合料高黏度特性,明确了提高

10~15℃的施工温度控制范围及相应的碾压工艺。试验段应用表明,该工艺可行,路面质量合格。

(5)该方案在材料成本上与纯石油沥青混合料基本持平,同时具有节约石油资源、消纳煤基固废和潜在碳减排等环境效益。

参考文献:

- [1] 罗兵, 国省干线公路建设成本控制研究. 运输经理世界[J], 2025(4):16-18.
- [2] 陈锰寰, 邹帅, 王辛欣, 等. 煤基中间相沥青研究进展及产业化发展[J]. 煤化工, 2024, 52(5):8-15.
- [3] 高齐. 煤直接液化残渣复合改性沥青性能研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2022.
- [4] 李重, 吴聪, 张舸, 等. 两种煤基沥青的分子结构及其各向同性沥青基碳纤维力学性能研究[J]. 煤炭转化, 2025, 48(4):48-58.
- [5] JTG F40—2004 公路沥青路面施工技术规范[S].
- [6] JTG E20—2011 公路工程沥青及沥青混合料试验规程[S].
- [7] 范宇. 干法SBS改性沥青微观结构及其混合料路用性能研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2020.
- [8] 赵鹏, 冯雷, 刘盖等. 煤液化残渣在道路沥青混凝土中的应用研究[J]. 筑路机械与施工机械化, 2016, 33(2):61-64.
- [9] 李重, 吴聪, 张舸, 等. 两种煤基沥青的分子结构及其各向同性沥青基碳纤维力学性能研究[J]. 煤炭转化, 2025, 48(4):48-58.
- [10] 王梅. 高模量沥青混合料试验研究与应用. 城市道桥与防洪, 2025(8):98-101.
- [11] 岳峰, 王秉兴, 王大伟, 等. 不同制备工艺对煤直接液化残渣改性沥青混合料性能的影响[J]. 中国公路, 2022(18):140-141.
- [12] 冯亮. SBS改性沥青路面施工技术在公路工程中的应用[J]. 交通世界, 2021(32):113-114.
- [13] 陈超, 李伟, 张宏斌. SBS改性沥青老化机理及再生技术研究[J]. 公路交通科技, 2018, 35(12):45-52.
- [14] 邱文利, 徐飞翔, 冯雷, 等. 高掺量橡胶改性沥青性能研究及优选[J]. 城市道桥与防洪, 2023(4):194-198.
- [15] 肖宏宇, 朱崇政, 赖志钦, 等. 干法SBS改性剂对沥青流变性能、化学结构及其混合料路用性能的影响[J]. 公路工程, 2025, 50(5):192-198.
- [16] 王雷. 公路工程沥青路面施工现场试验检测技术研究[J]. 交通建设与管理, 2024(1):74-76.
- [17] 何亮辉. 沥青混合料试验检测技术[J]. 运输经理世界, 2023(31):158-160.
- [18] 翁士晓, 王火明, 徐周聪, 等. 高掺量RAP厂拌热再生AC-13沥青混合料路用性能研究[J]. 城市道桥与防洪, 2020(12):169-171.