

不同气候区沥青混合料性能适应性对比研究

赵林建

云南交投公建工程养护有限公司 云南 昆明 650000

摘要：沥青混合料作为现代道路工程中最主要的路面结构材料，其性能直接关系到道路的使用品质、服役寿命与养护成本。我国地域辽阔，气候条件复杂多样，从高温多雨的南方湿热区到严寒干燥的北方寒区，不同气候环境对沥青混合料提出了差异化的性能要求。本文系统梳理了我国典型气候分区（包括夏热冬暖区、夏热冬冷区、温和地区、寒冷区及严寒区）的气候特征及其对沥青路面的主要影响机制；在此基础上，对比分析了不同气候区对沥青混合料高温稳定性、低温抗裂性、水稳定性及耐久性的性能需求差异；进一步探讨了适用于各气候区的沥青材料选择（如基质沥青标号、改性沥青类型）、级配设计（如AC、SMA、OGFC等）及性能评价指标的优化策略；最后，结合工程案例与试验数据，验证了气候适应性设计理念在提升沥青路面综合性能方面的有效性。研究表明：沥青混合料的设计必须充分考虑区域气候特征，实施“因地制宜、因气候制宜”的差异化设计策略，方能实现沥青路面长寿命、低维护的目标。

关键词：沥青混合料；气候分区；高温稳定性；低温抗裂性；水稳定性

引言：随着我国交通基础设施建设的持续发展，高等级公路网日益完善，对路面材料的性能要求也不断提高。沥青路面因其行车舒适性好、施工便捷、可再生利用等优点，在我国公路建设中占据主导地位。然而，沥青作为一种典型的温度敏感性粘弹性材料，其力学性能极易受到环境温度、湿度、紫外线辐射等气候因素的影响。在我国广袤的国土上，气候条件呈现出显著的区域性差异：华南地区夏季高温高湿，易导致沥青路面车辙、泛油；东北及西北高寒地区冬季严寒漫长，沥青路面易产生低温开裂；西南多雨地区则面临严峻的水损害风险。若采用“一刀切”的混合料设计方法，难以兼顾不同气候区的特殊需求，往往导致路面早期病害频发，缩短使用寿命，增加养护成本。因此，开展不同气候区沥青混合料性能适应性研究，建立与区域气候特征相匹配的材料选择、配合比设计及性能评价体系，具有重要的理论价值与工程意义。本文旨在系统分析我国主要气候分区对沥青混合料性能的影响机制，对比不同气候区对混合料关键性能指标的要求差异，并提出针对性的设计优化策略，为实现沥青路面的气候适应性设计提供理论支撑与实践指导。

1 我国典型气候分区及其对沥青路面的影响

1.1 气候分区依据

我国现行《公路沥青路面施工技术规范》（JTGF40-2004）根据沥青路面使用时的气候条件，将全国划分为7个气候分区，主要依据两个指标：高温气候区（以最热月平均最高气温划分）和低温气候区（以年极端最低气温划分），并结合雨量划分为潮湿区、湿润区、半干区和干旱区。为便于研究，本文将气候分区简化为以下五

类典型区域：

- 1.1.1 夏热冬暖区（如广东、广西、海南）
夏季炎热漫长（最高气温常超35℃），冬季温暖（极端低温>-2℃），降雨丰沛。
- 1.1.2 夏热冬冷区（如长江中下游地区）
夏季炎热（最高气温30-35℃），冬季寒冷（极端低温-2℃至-9℃），雨量较多。
- 1.1.3 温和地区（如四川盆地、云贵高原部分区域）
四季温差较小，夏季不太热，冬季不太冷（极端低温-9℃至-18℃），但部分地区雨季集中。
- 1.1.4 寒冷区（如华北、东北南部）
夏季温和，冬季寒冷漫长（极端低温-18℃至-26℃），干燥少雨。
- 1.1.5 严寒区（如东北北部、内蒙古、新疆北部）
冬季极端严寒（极端低温<-26℃），持续时间长，夏季短暂。

1.2 气候因素对沥青路面的主要影响机制

1.2.1 高温影响

高温使沥青胶结料软化，粘度急剧下降，导致混合料抗剪切能力减弱，在重载交通作用下易产生永久变形（车辙）和泛油。

1.2.2 低温影响

低温下沥青变硬变脆，应力松弛能力下降。当温度骤降或收缩受阻时，混合料内部产生的温度应力超过其抗拉强度，即引发低温开裂^[1]。

1.2.3 水的影响

雨水通过路面孔隙或裂缝渗入，在行车荷载的动水

压力作用下，会削弱沥青与集料的粘附力（剥离），导致松散、坑槽等水损害。

1.2.4 冻融循环

在寒冷及严寒区，渗入路面的水分反复冻结膨胀、融化收缩，对混合料结构造成疲劳损伤，加速开裂与松散。

1.2.5 紫外线（UV）老化

长期暴露在阳光下，沥青中的轻质组分挥发，胶质向沥青质转化，导致沥青硬化、脆化，降低混合料的柔韧性与耐久性。

2 不同气候区对沥青混合料性能的需求差异

2.1 高温稳定性

高温稳定性是抵抗车辙变形的能力，主要评价指标为动稳定度（DS）。在夏热冬暖区和夏热冬冷区，高温稳定性是首要控制指标。规范要求这些区域的动稳定度标准显著高于其他区域。例如，对于高速公路，夏热区的动稳定度要求通常 ≥ 2400 次/mm，而寒冷区可能只需 ≥ 1000 次/mm。

2.2 低温抗裂性

低温抗裂性是抵抗低温开裂的能力，主要评价指标为弯曲破坏应变或断裂能。在寒冷区和严寒区，这是核心性能要求。规范对这些区域的低温弯曲试验温度要求更低（如-20℃、-25℃甚至-30℃），且对破坏应变的要求更高。相比之下，夏热冬暖区对此性能要求较低。

2.3 水稳定性

水稳定性是抵抗水损害的能力，主要评价指标为浸水马歇尔残留稳定度（MS₀）和冻融劈裂强度比（TSR）。在夏热冬暖区、夏热冬冷区及温和地区等多雨潮湿区域，水稳定性至关重要^[2]。规范对这些区域的TSR要求通常 $\geq 80\%$ ，而在干旱的寒冷、严寒区，要求可适当放宽（如 $\geq 75\%$ ）。

2.4 耐久性与抗老化性

在所有气候区，耐久性都是长期性能的保障，但在夏热冬暖区，由于高温和强紫外线的共同作用，沥青的老化速率更快，因此对沥青的抗老化性能（如TFOT/RTFOT后的质量损失、针入度比、延度保留率）要求更高。

3 适应不同气候区的沥青混合料设计策略

3.1 沥青胶结料的选择

夏热冬暖区：应选用高粘度、高软化点的沥青。通常采用70#或50#基质沥青，并必须使用改性沥青，如SBS（苯乙烯-丁二烯-苯乙烯嵌段共聚物）改性沥青，以显著提升高温性能和弹性恢复能力。对于重载交通路段，可考虑使用高模量沥青或复合改性沥青。夏热冬冷区：需兼顾高低温性能。通常选用70#基质沥青，并推荐使用

SBS改性沥青。SBS改性剂能同时改善高温稳定性和低温延展性，是该区域的理想选择。温和地区：气候条件相对温和，可选用70#或90#基质沥青。是否使用改性沥青需根据交通荷载和具体项目要求决定。对于一般交通，优质70#基质沥青即可满足要求。寒冷区：低温性能是关键。应选用90#或110#基质沥青，其针入度较大，低温延展性更好。改性沥青方面，可选用低温性能优异的SBS改性沥青，或考虑添加橡胶粉等改善低温性能的改性剂。应避免使用过度提高高温性能而牺牲低温性能的改性方案^[3]。严寒区：对低温性能要求极为苛刻。必须选用110#甚至更高标号的基质沥青，并强烈推荐使用专为低温设计的SBS改性沥青（如高SBS掺量、特定分子结构）。有时还需在混合料中添加抗剥落剂以弥补因使用高标号沥青可能导致的粘附性下降。

3.2 混合料级配类型的选择

夏热冬暖区/夏热冬冷区：为抵抗车辙，宜选用骨架密实型结构，如SMA（沥青玛蹄脂碎石混合料）或AC-C（粗型密级配沥青混凝土）。SMA以其粗集料形成的骨架结构和高沥青玛蹄脂含量，提供了卓越的高温稳定性和耐久性。对于需要排水的路段，可选用OGFC（升级配抗滑磨耗层），但需注意其水稳定性问题。温和地区：选择较为灵活，AC（密级配沥青混凝土）系列即可满足大部分需求。可根据交通量和功能需求在AC-13、AC-16、AC-20等类型中选择。寒冷区/严寒区：为提高低温抗裂性，可适当选用悬浮密实型或细型密级配（如AC-F），这类结构应力分布更均匀，对应力集中不敏感。但需严格控制空隙率，避免过大空隙率在冻融循环下加剧破坏。近年来，柔性基层或应力吸收层的应用也为解决低温开裂问题提供了新思路。

3.3 性能评价体系的优化

传统的马歇尔设计法已难以全面反映混合料在复杂气候下的综合性能。应推广采用性能导向型（Performance-Graded, PG）的沥青分级体系和Superpave混合料设计方法。

3.3.1 PG分级

根据项目所在地的气候数据（最高路面设计温度和最低路面设计温度）来选择沥青等级^[4]。例如，广州可能选用PG76-22，而哈尔滨则需选用PG64-34。这确保了沥青胶结料本身的性能与气候需求精准匹配。

3.3.2 Superpave设计

通过旋转压实仪（SGC）模拟现场压实过程，并引入车辙因子G/sin δ （高温）、疲劳因子G \cdot sin δ （中温）和低温蠕变劲度m值等流变学指标，对混合料进行全温域

性能评价，实现了从“经验法”向“性能法”的转变。

4 工程案例与试验验证

4.1 案例一：华南高速公路（夏热冬暖区）

某广东高速公路项目，原设计采用70#基质沥青AC-13上面层，在通车两年后出现严重车辙（深度 > 25mm）。改造方案采用SBS改性沥青（PG76-22）SMA-13。经室内试验，新方案动稳定性高达6500次/mm，远超规范要求；水稳定性（TSR）达92%。通车五年后，路面平整如新，无明显车辙。

4.2 案例二：东北高速公路（严寒区）

某黑龙江高速公路，采用90#基质沥青AC-16，在首个冬季即出现大量横向温缩裂缝。后续项目改用110#基质沥青+SBS改性剂（PG64-34）的AC-13，并在基层顶面增设SAMI应力吸收层。室内低温弯曲试验（-30℃）破坏应变从原方案的1800 $\mu\epsilon$ 提升至2800 $\mu\epsilon$ 。跟踪观测三年，低温开裂现象显著减少。

4.3 试验对比：不同沥青在不同气候模拟下的性能

表1 不同混合料在模拟气候下的性能保留率（%）

性能指标	气候模拟类型	M1 (70#AC)	M2 (SBSSMA)	M3 (橡胶沥青)
动稳定性保留率	高温老化	78.2	92.5	85.1
TSR保留率	冻融循环	74.8	87.6	90.3
低温应变保留率	冻融循环	68.5	89.2	82.7
马歇尔稳定度保留率	湿热老化	71.3	88.9	83.4

4.3.3 分析与讨论

高温环境下，SBS改性沥青因聚合物网络结构有效抑制沥青流动，高温性能衰减最小，验证其在夏热区的优越性。冻融循环下，橡胶沥青凭借其高弹性与强粘附性，在水稳定性方面表现最佳；而SBS改性沥青在保持低温延展性方面更具优势，更适合严寒区防裂需求。湿热老化对所有材料均有显著劣化作用，但改性沥青体系因抗氧化能力更强，性能保留率明显高于基质沥青。该试验从机理层面证实：没有“万能”的沥青混合料，只有“最适合特定气候”的材料组合。性能适应性设计的本质，是在明确区域主导病害机制的前提下，选择能最大化抵抗该机制的材料与结构。

结语：本文系统研究不同气候区沥青混合料性能适应性，得出重要结论：气候是沥青混合料设计核心约束，我国复杂气候使路面病害具区域性，要摒弃“通用型”设计思维；不同气候区性能需求差异大，夏热区重高温稳定、寒区重低温抗裂、潮湿区重水稳定；差异化设计策略是关键，应依气候分区选沥青标号与改性类型、确定级配结构，用先进设计方法实现精准对接；工

衰减

为系统量化不同材料在模拟气候环境下的性能演变，本研究在实验室构建了三组气候模拟条件，并对三种典型混合料进行加速老化与性能测试。

4.3.1 试验设计

(1) 材料类型

M1：70#基质沥青+AC-13C

M2：SBS改性沥青（PG76-22）+SMA-13

M3：橡胶沥青（20%胶粉）+AR-AC-13

(2) 气候模拟方案

高温老化组：RTFOT+PAV老化，模拟华南10年老化效应。

冻融循环组：按T0729进行4次冻融循环（-18℃冻结16h, 60℃水中融化24h），模拟东北5年冻融作用。

湿热老化组：60℃、95%湿度环境下老化7天，模拟西南湿热环境。

4.3.2 关键结果（见表1）

程实践证明适应性设计有效，能提升路面综合性能与使用寿命。展望未来，研究可深入三个方向，一是利用大数据和人工智能建立精细化气候-路面性能模型；二是系统评估再生沥青等新型环保材料在不同气候区的长期性能；三是开展全寿命周期成本分析，综合比选气候适应性设计的初期与长期养护成本，为决策提供经济依据。

参考文献

[1]李亚非.基于不同气候分区的天然沥青改性沥青研发及应用技术研究.北京市,交通运输部科学研究院,2022-05-06.

[2]申乐强.高温多雨气候条件下复合改性沥青混合料耐久性研究[J].交通世界,2025,(14):22-25.

[3]张晓凤,曹鹏.极端气候条件下沥青路面病害机理与预防性养护技术[C]//广西网络安全和信息化联合会.2025年第三届工程领域数字化转型与新质生产力发展研究学术交流会论文集.陕西交通控股集团有限公司西延分公司;陕西交通控股集团有限公司西宝分公司;,2025:400-402.

[4]朱澧华.气候变化对湖南省公路沥青路面性能的影响分析[D].湖南大学,2023.