

改性沥青在高寒高海拔地区的性能研究

孔令剑

中冶建工集团有限公司 重庆 404100

摘要：高寒高海拔地区气候恶劣，低温、冻融循环、强紫外线及盐蚀作用使传统沥青性能劣化。改性沥青通过添加聚合物、橡胶等材料优化性能。本文研究改性沥青技术原理与分类，从低温、抗水损害、抗紫外线老化、抗盐蚀性能方面优化，构建性能评价体系，涵盖常规测试、长期老化评价及微观结构表征，为高寒高海拔地区道路工程提供理论与技术支持。

关键词：改性沥青；高寒高海拔地区；性能优化；性能评价体系

引言：高寒高海拔地区气候独特，低温、冻融、强紫外线及盐蚀等环境因素，对沥青路面性能构成严峻挑战。传统沥青材料在此环境下易出现低温脆裂、水损害、老化加速等问题，严重影响路面使用寿命与行车安全。改性沥青作为提升沥青性能的关键手段，其技术原理、分类及在高寒高海拔地区的性能优化研究，成为解决该地区道路工程难题的重要方向。

1 高寒高海拔地区环境特征与沥青性能挑战

1.1 气候环境特征

低温环境是该地区显著气候特点，长时间维持的极端低温会改变沥青材料内部结构，使材料整体呈现脆化状态，原本具备的一定变形能力大幅减弱，抗裂性能随之下降，路面在承受车辆荷载或环境应力时更易出现裂缝^[1]。冻融循环现象频繁发生，水分在沥青路面内部孔隙渗透，当温度降至冰点以下时，水分凝结成冰体积膨胀，产生的膨胀力会破坏沥青与集料之间的结合状态，导致两者界面出现剥离，随着冻融循环次数增加，这种破坏不断累积，加速路面结构整体损坏。强紫外线辐射强度高且持续时间长，辐射能量能够穿透沥青表层，作用于内部分子，诱导沥青分子链发生断裂，破坏原有化学结构，进而加速沥青老化进程，使沥青逐渐失去黏弹性，变得僵硬易碎。盐蚀作用同样不可忽视，空气中或路面残留的盐分随水分渗透到沥青内部，盐分结晶过程中产生的压力会物理性破坏沥青结构，同时盐分与沥青化学组分发生反应，进一步破坏沥青黏弹性，导致沥青与集料之间的黏附性降低，影响路面整体稳定性。

1.2 环境-材料耦合作用机制

低温与冻融循环存在明显协同作用，低温环境下沥青路面会因温度降低而产生收缩应力，冻融循环中水分结冰产生的冻胀压力会叠加在收缩应力之上，两种应力共同作用于路面结构，使路面内部已有的微小裂缝不

断扩展，最终形成明显可见的裂缝，加剧路面损坏。紫外线与盐蚀在老化过程中相互促进，紫外线辐射使沥青表层结构变得疏松，为盐离子渗透提供更多通道，盐离子深入沥青内部后，会与沥青中的某些组分发生化学反应，同时紫外线持续作用促进沥青质氧化和分子重组，两种作用共同导致沥青老化速率加快。多种环境因素同时存在时会产生耦合效应，低温、冻融循环、强紫外线辐射、盐蚀等因素并非单独对沥青材料产生影响，而是相互作用、彼此强化，使得沥青材料性能劣化速率不再是单一因素作用下的线性变化，而是呈现非线性加速趋势，大幅缩短沥青路面使用寿命。

2 改性沥青技术原理与分类

2.1 改性沥青技术原理

改性沥青通过在沥青基质中添加特定材料实现性能优化，常用的添加材料包括聚合物、橡胶颗粒以及纳米材料。这些添加材料与沥青基质充分融合后，会在沥青内部形成三维网状结构，该结构能够有效约束沥青分子的自由运动，减少分子间的相对位移，从而改变沥青的整体性能^[2]。这种结构调整直接作用于沥青的流变性能，使沥青在不同温度条件下的性能表现更符合高寒高海拔地区的使用需求。在高温环境下，三维网状结构能增强沥青的抗变形能力，提升高温稳定性，避免路面因车辆荷载出现明显车辙；在低温环境下，该结构又能赋予沥青一定的柔韧性，减少低温脆性导致的裂缝产生，提升低温抗裂性。添加材料还能在沥青表面形成保护屏障，延缓紫外线、氧气等对沥青的侵蚀，增强抗老化能力。此外，添加材料与沥青的相互作用还能改善沥青与集料之间的界面特性，增强两者的黏附性。这种增强的黏附性可以有效抑制水分侵入沥青与集料的界面，减少水损害导致的剥离现象，同时也能降低盐蚀作用对界面结合状态的破坏，进一步提升沥青路面的整体耐久性。

2.2 改性沥青分类

聚合物改性沥青是应用较广泛的类型，其中以SBS为典型代表。SBS自身具有独特的结构特性，与沥青结合后能使沥青同时具备良好的弹性和热稳定性，在温度变化较大的环境中仍能保持较好的性能状态。橡胶改性沥青主要利用废旧轮胎橡胶粉，将其融入沥青后，橡胶粉的弹性特质能显著提升沥青的抗裂性能，减少路面裂缝的产生，同时橡胶材料还能起到一定的降噪作用，改善道路使用环境。复合改性沥青通过SBS与CR共混形成体系，结合了两种材料的优势。聚合物SBS带来的弹性可提升沥青的变形恢复能力，橡胶CR的韧性则能增强沥青的抗冲击性能，使改性沥青在复杂环境下的适应能力更强。纳米改性沥青借助纳米二氧化硅、层状双氢氧化物等纳米材料，纳米级别的颗粒能均匀分散在沥青中，形成致密的防护结构，有效阻挡紫外线的穿透，减少紫外线对沥青的老化作用，同时也能增强沥青的防水性能，降低水分渗透对路面的损害。

3 改性沥青在高寒高海拔地区的性能优化研究

3.1 低温性能优化

低温性能优化是改性沥青适应高寒高海拔环境的核心需求。SBS改性沥青依靠自身形成的交联网络结构发挥关键作用，该结构能够有效吸收低温环境下沥青路面产生的收缩应力，通过应力分散减轻局部应力集中现象，从而延缓裂缝的形成与扩展，让沥青路面在低温条件下保持结构完整性^[3]。橡胶颗粒改性沥青则通过柔性链段的特性实现低温性能提升，橡胶颗粒中的柔性链段可在低温环境下保持一定的活动能力，降低沥青整体的脆化温度，使沥青在较低温度下仍能具备良好的延展性，减少因低温脆性导致的路面开裂问题，提升路面在低温环境下的抗损坏能力。复合改性沥青在极端低温环境中展现出更优的适应能力，即使在-30℃的严苛条件下，仍能保持较高的弯曲应变，这种出色的应变能力使其能够更好地适应极端低温下路面的收缩与变形，避免因应变不足导致的路面断裂，为高寒高海拔地区冬季道路通行提供稳定保障。

3.2 抗水损害性能优化

抗水损害性能优化从多个维度提升改性沥青路面的耐久性，该地区雨雪天气后水分易渗透路面，且常伴随冻融循环加剧损害。聚合物改性沥青借助化学键合作用，显著增强沥青与集料之间的界面结合力，这种强结合力能够有效抵抗水分的侵入与破坏，抑制水剥离现象的发生，避免因水分作用导致沥青与集料分离，进而引发路面松散、坑槽等病害，保障路面在潮湿环境下的结

构强度。孔隙结构控制通过优化级配设计实现，合理的级配能够减少沥青混合料中的连通孔隙，缩短水分在混合料内部的渗透路径，降低水分渗透速率与渗透量，从结构层面阻断水分对沥青路面的损害通道，提升路面整体的抗水渗透能力，减少水分滞留引发的内部结构破坏。憎水性改性依靠纳米材料表面修饰技术完成，经过修饰的纳米材料能够赋予沥青良好的憎水特性，使水分在沥青表面难以附着和渗透，同时阻碍盐溶液通过沥青表层侵入内部结构，减少水与盐分共同作用对沥青路面的侵蚀，进一步提升路面抗水损害性能，延长路面在复杂水文环境下的使用寿命。

3.3 抗紫外线老化性能优化

抗紫外线老化性能优化通过多重防护手段延缓沥青老化进程，高寒高海拔地区空气稀薄，紫外线穿透性强，对沥青的老化破坏更为直接。光稳定剂添加是重要防护措施，紫外线吸收剂如受阻胺类物质能够吸收紫外线能量，减少紫外线对沥青分子的破坏，自由基捕获剂则可捕获紫外线照射产生的自由基，阻止自由基引发的分子链断裂反应，共同减缓沥青的光老化速度，维持沥青长期使用性能。抗氧化体系的构建为沥青提供额外保护，酚类抗氧化剂能够有效抑制沥青质的氧化反应，减少氧化产物的生成，维持沥青材料原有的柔韧性与黏弹性，避免沥青因氧化变得僵硬、脆化，延长沥青路面的使用寿命，确保路面在长期紫外线照射下仍能保持良好的使用状态。表层保护技术通过同步碎石封层实现，封层形成的物理屏障能够直接阻挡紫外线对沥青路面表层的直接照射，减少紫外线与沥青表层的接触，降低紫外线对表层沥青的老化作用，封层还能增强路面表层的耐磨性与抗冲刷能力，实现多重防护效果，提升路面整体抗老化与抗损坏的综合能力。

3.4 抗盐蚀性能优化

抗盐蚀性能优化针对高寒高海拔地区盐分对路面的侵蚀问题展开。层状双氢氧化物具有出色的离子交换能力，能够与侵入沥青内部的氯离子发生离子交换反应，将氯离子固定在自身结构中，减少游离氯离子的数量，从而抑制盐结晶过程中产生的结晶压力，避免结晶压力对沥青结构造成的破坏。聚烯烃弹性体改性沥青通过提升化学稳定性抵抗盐蚀，聚烯烃弹性体能够增强沥青对盐溶液的化学稳定性，减少盐溶液与沥青化学组分之间的化学反应，维持沥青原有的黏弹性，避免沥青因化学侵蚀导致性能劣化，确保路面在盐环境下仍能保持良好的使用性能。表面能调控通过特定技术降低沥青表面自由能，低表面能使盐分在沥青表面的吸附能力减弱，

减少盐分在沥青表层的附着量，同时抑制盐结晶在沥青表面的生长与附着，降低盐分结晶对沥青表层结构的物理破坏，从表面特性层面提升沥青路面的抗盐蚀能力。

4 改性沥青性能评价体系与方法

4.1 常规性能测试

常规性能测试是判断改性沥青基础性能是否达标的环节。针对高温性能，车辙试验通过模拟路面在高温条件下的受力状态，评价改性沥青的动稳定性，动稳定性数值越高，表明材料抵抗高温车辙变形的能力越强；软化点测试则通过监测沥青受热软化到特定状态时的温度，直观表征材料的热稳定性，软化点越高，材料在高温环境下保持结构稳定的能力越优。在低温性能评价中，弯曲梁流变仪通过测定改性沥青在低温下的蠕变刚度与m值，反映材料在低温受力时的变形能力与抗裂潜力，蠕变刚度越小、m值越大，材料低温抗裂性能越佳；延度试验通过测量沥青在低温拉伸条件下的最大延伸长度，直接评估材料的低温延展性，延度越长，材料低温下抵抗断裂的能力越强^[4]。水稳定性评价方面，浸水马歇尔试验与冻融劈裂试验通过分别测定沥青混合料在浸水前后、冻融循环前后的稳定度与劈裂强度，计算残留稳定度与劈裂强度比，以此衡量材料在水分作用下的性能保持能力，比值越高，材料抗水损害性能越突出。

4.2 长期老化性能评价

长期老化性能评价旨在模拟改性沥青在高寒高海拔地区长期服役过程中的性能衰减规律。紫外线加速老化通过QUV试验箱模拟该地区强烈的紫外线辐射环境，通过测定老化前后沥青的质量损失与流变参数变化，分析紫外线对沥青化学组成与力学性能的破坏程度，质量损失越小、流变参数变化越平缓，材料抗紫外线老化性能越优。冻融循环老化通过快速冻融试验模拟该地区频繁的冻融交替过程，重点评估冻融与盐蚀耦合作用下沥青混合料的性能衰减情况，通过对老化前后的力学指标，判断材料在复杂环境下的长期稳定性。多因素耦合老化则利用环境模拟箱综合控制温度、湿度、紫外线强度与盐溶液浓度，精准复现改性沥青在实际服役过程中面临的多重环境作用，通过长期监测材料性能变化，全面评估材料的长期老化抵抗能力，为预测沥青路面使用

寿命提供关键依据。

4.3 微观结构表征

微观结构表征通过先进测试技术揭示改性沥青性能变化的微观机制。红外光谱通过分析沥青在不同波数下的特征吸收峰，识别沥青内部官能团的种类与数量变化，进而量化沥青的氧化程度，氧化过程中产生的羰基、亚砜基等官能团吸收峰强度变化，可直接反映沥青的老化程度。荧光显微镜利用聚合物与沥青基体在荧光特性上的差异，清晰观察改性剂在沥青中的分散状态与分布均匀性，同时判断改性剂与沥青基体的相容性，分散越均匀、相容性越好，改性沥青的宏观性能越稳定。原子力显微镜通过探测沥青表面的微小形貌起伏与力学响应，表征沥青表面的微观形貌特征与黏弹性分布规律，不同区域的黏弹性差异可反映沥青内部结构的均匀性，为理解改性沥青宏观力学性能的不均匀性提供微观解释，同时为优化改性剂配方与制备工艺提供微观层面的指导。

结束语

改性沥青在高寒高海拔地区的性能研究，通过技术原理探索、分类应用及多维度性能优化，有效提升了沥青材料对极端环境的适应性。构建的性能评价体系，从宏观到微观全面评估了改性沥青的性能，为工程实践提供了科学依据。未来，随着材料科学与道路工程技术的不断进步，改性沥青将在高寒高海拔地区发挥更大作用，推动道路建设高质量发展。

参考文献

- [1]李东钊,龚演,严二虎,等.基于PG分级的高寒高海拔地区沥青结合料性能与适应性[J].公路交通科技,2024,41(8):78-85.
- [2]马峰,王正,傅珍,等.紫外吸收剂/环烷油对高寒区SBS沥青路面的性能影响[J].应用化工,2024,53(1):58-62.
- [3]李闯玉.高寒高海拔地区沥青路面病害机理与防治技术探微[J].房地产导刊,2025(2):18-20.
- [4]王争军,高仁和,雷宇,等.高寒高海拔地区大温差、紫外辐射对沥青性能的影响研究[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2025,44(2):43-52.