

极端天气下公路与城市道路路面抗滑性能提升技术研究

张春燕

天津市通建建筑工程有限公司, 天津 300450

DOI:10.61369/ETQM.2025080032

摘要： 极端天气（如暴雨、暴雪、冰冻等）对公路与城市道路路面抗滑性能的负面影响显著，直接威胁行车安全。本文通过分析极端天气对路面抗滑性能的作用机制，系统梳理表面处治、刻槽、防滑涂层等提升技术的原理与应用特点，结合工程案例探讨技术适配性，并展望智能化、环保化的发展趋势，旨在为极端天气下道路交通安全保障提供技术参考。

关键词： 极端天气；公路与城市道路；路面抗滑性能；提升技术；交通安全

Research on Improving the Anti-slip Performance of Highway and Urban Road Pavement under Extreme Weather Conditions

Zhang Chunyan

Tianjin Tongjian Construction Engineering Co., Ltd. Tianjin 300450

Abstract： Extreme weather conditions (such as heavy rain, heavy snow, freezing, etc.) have a significant negative impact on the anti-slip performance of highway and urban road surfaces, directly threatening driving safety. This article analyzes the mechanism of extreme weather on the anti-slip performance of road surfaces, systematically summarizes the principles and application characteristics of improvement techniques such as surface treatment, grooving, and anti-slip coatings. Combining engineering cases to explore the suitability of the technology, and looking forward to the development trend of intelligence and environmental protection, the aim is to provide technical reference for road traffic safety under extreme weather conditions.

Keywords： extreme weather; highways and urban roads; pavement anti-slip performance; improvement technology; traffic safety

引言

公路与城市道路行车安全的核心要素为路面抗滑性能，路面抗滑性能的优劣程度与制动距离、操控稳定性及事故发生率密切相关，受全球气候变化影响，极端天气事件频发，路面水膜因暴雨形成，积雪结冰由暴雪引起，摩擦系数急剧减少至临界值，大幅增加车辆滑移及追尾事故的几率。雨天气象下，路面交通事故发生率显著增加，超出晴朗天气逾三倍，面对冰雪天气，交通事故发生率可膨胀至5至8倍，针对极端气候属性，采纳高效的路面抗滑性能改进方案，对降低交通事故频次与维护交通顺畅性具有迫切现实意义，本文专研极端气候中公路及城市道路的防滑需求，对技术根本、应用实施与未来趋势进行综合考察，理论及技术支撑矩阵支撑道路养护与安全管理。

一、极端天气对路面抗滑性能的影响机制

（一）雨天对路面抗滑性能的影响

路面在雨天抗滑性能下降的根本原因可归结为水膜效应和路面纹理的阻塞，在降雨量超出路面排水极限的节点，路面表层将聚积一层薄水层，轮胎与地面的接触界域缩窄，摩擦力随之降低，易发生水漂效应之高速行驶，易造成车辆失控，雨滴冲刷着路面的表层，促成沥青层剥落及集料棱角的磨损，在长期作用下，路面纹理（宏观纹理诸如车辙、坑槽，微观纹理诸如集料表

面粗糙度）发生退化，抗滑性能明显下降，雨季油污及泥沙等污染成分混搭，填充路面纹理的裂隙，生成润滑面层，增强路面抗滑性能的退化趋势。

（二）冰雪天气对路面抗滑性能的影响

冰雪天气对路面抗滑性能的负面影响更为明显，积雪覆盖路面时，轮胎与路面间的接触形态从“橡胶-集料”过渡至“橡胶-冰雪”形态，干燥路面摩擦系数降至0.1-0.2，较之0.6-0.8水平显著下降，积雪层变硬，碾压后的积雪，密实化生成冰层，冰层摩擦系数极低（仅为0.05-0.1），致制动距离显著增加5至

10倍，横向滑移倾向明显。路面结构损伤的加剧与冻融循环效应紧密相连：路面缝隙中水分子侵入后，迅速结冰膨胀，引起集料松散及沥青裂缝现象，加剧路面纹理的退化，引发“抗滑性能减弱与结构损伤恶化”的恶性循环态势^[1]。

（三）极端温度对路面抗滑性能的影响

高温天气下，沥青铺设面软化易发，轮胎压实效应令路面纹理变浅，集料结合力降低，尤其是经重载车辆长期反复作用，车辙变形引发路表排水障碍，间接引发雨天水膜效应的加剧，低温天气则会使沥青材料脆性增加，路面表层频繁遭遇龟裂困扰，集料与沥青的粘结力下降，在车辆荷载与冰雪冻融作用下，集料易于剥落，导致路面抗滑性能退化。

二、路面抗滑性能提升技术的核心原理

（一）增强路面纹理构造

路面纹理构成摩擦力之核心要素，涉猎宏观纹理，宏观纹理借助排水与储水，显著减少水膜厚度，微观纹理借助轮胎与集料表面的机械咬合，实现摩擦力的产生，技术发展需同步兼顾两个层面：实施雕刻、磨削技术以扩大宏观纹理的深度与间隔，选用表面粗糙、棱角丰富的集料（如玄武岩、花岗岩），保留微观纹理，确保轮胎与路面达成有效贴合。

（二）优化路面材料性能

材料自身性能是抗滑性能的基础。对于沥青路面，需选用高粘度沥青、改性沥青等，提高集料与沥青的粘结力，抵抗雨水冲刷与冰雪冻融的侵蚀；对于水泥混凝土路面，需控制水灰比、优化集料级配，增强表层强度与耐磨性，减少集料脱落。此外，通过添加防滑添加剂（如橡胶颗粒、钢纤维），可提升材料表面粗糙度与摩擦系数，延长抗滑性能衰减周期。

（三）主动应对极端天气的功能设计

针对冰雪天气，应纳入融雪及去冰功能：于路面材料中掺杂蓄盐改性剂，采纳盐类低温融雪特性，降低冰雪融解的起始温度，阻制冰壳的发育；需强化排水设计，引入透水性路面材料，诸如大孔隙沥青混合料，提高路面水分渗透速度，减少路面水分积聚现象，辅以排水沟槽及路缘石开口，有效导流路面积水^[2]。

三、极端天气下路面抗滑性能提升技术实践

（一）表面处治技术

采用路面表层敷设功能薄层材料的技术，迅速提升路面抗滑系数，适用于预防性维护与应急修复实施，1. 精表处技术：实施环氧改性沥青胶结料与特制集料的融合，强力渗透作用下，形成了紧密的防护壳体，纹理深度拓展至1.5至2毫米，滑移阻力系数BPN数值逾65，且具备出色的抗水冲刷与耐磨特性。在暴雨频发地区应用时，该产品在排水与防滑方面的效果预计维持3至5年，尤其匹配城市主干道与高速公路之下坡区域，2. 超薄磨损层技术——NovaChip：实施断级配混合料，同步施工改性乳化沥青防水粘结层与磨损层，层厚为2至3毫米之极。采用大孔隙结构加速

排水过程，减轻水膜效应的干扰，集料紧密锁合，该技术滑动摩擦系数值上限突破60，施工效率超群，适于多雨季节及高交通流量的城市快速路，3. CAP抗滑翻新封层技术：该混合剂由沥青还原剂及抗磨砂配伍，本还原剂可恢复沥青的老化特性，抗磨砂借助粘附和嵌锁机制，塑造出粗糙的表层，滑阻系数提升30%以上水平，施工进度迅猛，每日施工面积突破千平方米，中小型桥梁与县道的抗滑修复适宜性分析。

（二）刻槽技术

路面经机械切割，显现出有序槽迹，增强路面宏观纹理结构，尤其适用于水泥混凝土路面，1. 混凝土路面槽形切割：普遍采用梯形槽形，深度区间设定为2至4毫米，距离设定为15至25毫米，纵向刻槽技术显著降低了车辆横向侧滑的风险系数，采用横向刻槽设计，制动距离显著缩短，冰雪天气下，缩短比例可达20%–30%，针对陡峭坡面与弯曲道路等高风险区域，横向刻槽应优先部署。刻槽深度须均等化，维护基层完整性，刻槽后需及时清理碎屑，2. 路面沥青刻痕处理：针对沥青路面车辙、纹理变浅问题，采用特制铣刨机械进行槽道刻划，铣刨深度介于0.001米与0.002米，可形成连续沟槽，增强雨天排水与防滑性能水平，必须调整刻槽的间隔与密度，防止切割过深引起路面结构强度下降。

（三）防滑涂层技术

于路面表层实施高摩擦材料层，实施短期与长期抗滑工程，适用于应急抗滑用途及特定区域，1. MMA彩色防滑涂层：采用甲基丙烯酸甲酯作为基质，掺杂陶瓷微细颗粒，滑阻指数超80，赋予自融冰特性，在-30℃至0℃环境下，冰雪冻结进程受阻，冻结效果减弱，大雪易于脱落，服务周期为3至5年，适用于北方城市的人行道与公交站台铺设，2. 抛丸+防滑涂层复合技术：运用高速钢丸抛射技术，清除路面浮浆与油污，表面处理实现均匀粗糙，摩擦系数提升至原值的1.5倍，敷设聚氨酯防滑涂层，双防护机制，适宜于积水频繁的桥梁与隧道进出口地带。

（四）功能性材料技术

1. 蓄盐类自融冰材料：将表面处理后的氯盐型改性剂（氯化钙微胶囊等）混入沥青及混凝土结构，逐步释放盐分，实现冰点降低，阻绝冰壳生成，中等降雪地带，路面冰雪冻结温度降低，降低区间为5至8摄氏度，融雪剂撒布量减半以上，成功阻绝了传统蓄盐材料的吸潮及腐蚀状况。2. 透水性路面材料：实施20%–25%空隙率的开级配沥青混合料与透水混凝土组合，直接渗透至地壳，减少路面水分沉积，集料界面粗糙度较高，摩擦系数（BPN）超出60级，需依托地下排水体系，阻隔水分侵入路基层，适宜于城市广场、次级道路等低负荷交通地带。

四、工程应用案例分析

（一）高速公路长下坡路段抗滑改造

山区高速路段坡度设定为3%至5%，暴雨天气事故频次急剧上升，实施精表处技术优化项目，路面抗滑等级由45提升至70，纹理深度实现1.8毫米，雨时水膜厚度减少60%，经过半年的观察，事故发生率降低了75%，路面磨损未留下明显痕迹，证实了

该技术具备卓越的极端雨季抗滑特性。

（二）北方城市主干道冰雪天气抗滑处理

该北方城市核心道路，面对冬季的冰雪天气，必须频繁投放融雪药剂，仍存在结冰隐患，采用 MMA 自融冰防滑涂层后，滑阻系数高达 85，-10℃ 环境下路面冰雪冻结时间延迟 3-4 小时，融雪剂消耗量削减 60%，显著提升了夜间行车安全系数，冬季交通事故发生率降低 58% 以上。

（三）水泥混凝土桥面抗滑修复

该城市跨越江河，采用水泥混凝土桥面结构的大桥，因长期雨水冲刷导致抗滑值降至 35，存在安全结构缺陷，执行横向刻槽（深度 3mm，间距 20mm）并实施抛丸作业，滑动阻力等级提升至 65，雨天制动行程缩短至原长的 75%，且槽纹与路面牢固镶嵌，两年车辆碾压实验中，剥落现象未出现，效果稳定。

五、技术应用中的关键问题与优化策略

（一）技术适配性选择

不同技术的适用场景存在差异，应依据气候条件、道路类别及交通压力进行综合考量，多雨地带应优先实施排水技术，诸如 NovaChip 和透水路面，冰雪地区侧重融冰抗滑技术（如 MMA 自融冰涂层、蓄盐材料）；高速公路与主干道应优先采用长效技术措施，次级道路与人行道适宜采用成本效益高的防滑层，应杜绝技术误用之弊病，过度雕刻沥青路面或引发结构破坏，施工参数必须严密监管。

（二）成本与效益平衡

抗滑技术的实施应兼顾经济层面的平衡：初期投资成本较低，针对预防性养护技术，其耐用性相对有限，仅为 1 至 2 年，适宜于预算约束较小的中小型道路；初期资本投入显著的长效技术，整体生命周期成本表现卓越，符合高流量及高安全标准要求的路段，采用技术集成策略以实现成本削减，实施“抛丸处理与简易防滑涂层”组合措施以临时提升抗滑能力，同步短期需求与长远效益的匹配^[1]。

（三）施工质量控制

施工工艺直接影响抗滑效果：表面处理材料需实现均匀分布，杜绝材料分离与鼓胀情形；刻槽需严格控制深度与间距，维持纹理连贯性；涂层厚度必须达到既定标准线，防止涂层出现气泡与剥落点，施工完成后，应迅速对滑移阻力指标（如 BPN、SFC）及纹理深度进行质量评估，对不合格路段实施返工，确保技术性能契合规范要求。

六、技术发展趋势与展望

（一）智能化与精准化

未来将结合物联网技术平台，实施采用传感器技术的路面抗滑性能实时监测系统构建，借助大数据分析预测路面抗滑性能的退化动态，实现“按需养护”，智能化施工机械（诸如自动刻槽机、精确喷涂机器人）显著提升技术实施精度，降低人为操作误差，AI 视觉技术赋能的路面检测车辆可自动识别纹理退化带，引导铣刨机精准刻槽，升级抗滑修复的效率水平。

（二）环保与可持续化

开展生态材料创新，生物降解防滑涂层、由工业废弃物加工而成的防滑集料，降低环境冲击；倡导再生技术采纳，将废旧轮胎橡胶颗粒与沥青相掺，显著增强路面抓地力，实现资源循环再利用的成果，通过采用长效抗滑技术（如自修复涂层），维护频率得以大幅减少，实现成本全生命周期节约，路面结构采用微胶囊修复剂，微裂缝一旦出现，修复剂便自动释放，增强抗滑性能的持久效力。

（三）多功能一体化

推进抗滑、融雪、降噪及自洁技术融合的综合技术路径，该“防滑涂层 + 光伏融雪”系统利用涂层吸收太阳能并实现热能转换，消融积雪、采用透水路面与抗滑纹理结合方案，满足极端气候多样性挑战的多元需求，实施“大孔隙沥青 + 蓄盐改性剂”组合式技术的路段，雨后排水效率增长 40 个百分点，冰雪天融冰速度加快 30%，噪音降低 5 至 8 分贝量级，综合效应实现协同进步。

七、结语

极端天气下路面抗滑性能提升技术的核心是通过增强纹理构造、优化材料性能、融入功能设计，针对性应对水膜、冰雪等不利因素。表面处治、刻槽、防滑涂层等技术各有优势：表面处治适合长效抗滑与排水，刻槽适用于水泥路面纹理恢复，防滑涂层适合应急与特殊路段。工程实践表明，根据气候特点、道路类型合理选择技术，可显著提升极端天气下的行车安全性。

技术应用中需注重适配性选择、成本效益平衡与施工质量控制，避免盲目应用。未来，随着智能化、环保化、多功能化技术的发展，路面抗滑性能提升将更加精准、高效、可持续。道路管理部门应结合实际需求，建立“监测 - 评估 - 养护”一体化体系，推动技术落地应用，为极端天气下的道路交通安全提供坚实保障。

参考文献

- [1] 彭维弟. 公路混凝土路面抗滑性能提升策略 [J]. 中国水泥, 2025, (06): 86-88.
- [2] 任仲山, 张武兴, 马辉, 等. 高速公路路面抗滑性能衰减规律及提升策略研究 [J]. 市政技术, 2024, 42(11): 92-98.
- [3] 郝旭东. 雨天路面抗滑性能提升的微表处技术应用研究 [J]. 水上安全, 2024, (07): 178-180.