

雪灾频发区桥梁伸缩装置抗冰除雪一体化设计研究

孙元峰

新疆交投工程技术发展有限责任公司 新疆乌鲁木齐

【摘要】雪灾频发地区桥梁的运行安全和通行能力易受低温冰雪环境的严重影响，伸缩装置常因冰雪堵塞、冻胀和磨损而失效，导致桥梁结构损伤及交通事故风险增加。为解决这一问题，研究提出一种桥梁伸缩装置抗冰除雪一体化设计方法。通过分析雪灾环境下伸缩装置的受力特征与热传导规律，结合高效融雪材料、低温防冻结构及主动加热系统，实现抗冰与除雪的同步协作。该设计不仅提升伸缩装置在极端气候下的可靠性和耐久性，还降低养护频率和运行成本，为寒区桥梁安全提供有效技术支撑。

【关键词】桥梁伸缩装置；抗冰；除雪；一体化设计；雪灾地区

【收稿日期】2025 年 7 月 16 日

【出刊日期】2025 年 8 月 15 日

【DOI】10.12208/j.jer.20250377

Study on integrated design of ice and snow removal for bridge expansion device in frequent snow disaster area

Yuanfeng Sun

Xinjiang JiaoTou Engineering Technology Development Co., Ltd. Urumqi, Xinjiang

【Abstract】In regions prone to frequent snow disasters, the operational safety and traffic capacity of bridges are significantly affected by low-temperature ice conditions. Expansion joints often fail due to ice blockage, frost heave, and wear, leading to structural damage and increased traffic accident risks. To address this issue, this study proposes an integrated design method for ice resistance and snow removal in bridge expansion devices. By analyzing the stress characteristics and heat conduction patterns of expansion joints under snowy conditions, combined with high-efficiency de-icing materials, low-temperature anti-freezing structures, and active heating systems, the design achieves synchronized collaboration between ice resistance and snow removal. This approach not only enhances the reliability and durability of expansion joints in extreme climates but also reduces maintenance frequency and operational costs, providing effective technical support for bridge safety in cold regions.

【Keywords】Bridge expansion joints; Ice resistance; Snow removal; Integrated design; Snow disaster-prone areas

引言

寒冷地区桥梁在冬季频繁遭遇冰雪侵袭，伸缩装置极易因积雪结冰导致卡阻、失效甚至损坏，严重威胁结构安全与交通畅通。传统的除雪与防冰措施多依赖外部清理或单一功能设计，难以应对极端低温与持续降雪的复杂工况。随着交通网络对安全性和高效性的要求不断提高，亟需研发兼具防冰与除雪功能的一体化伸缩装置设计方案，以提升桥梁在严寒环境下的运行稳定性和耐久性能。

1 雪灾频发区桥梁伸缩装置面临的主要问题与挑战

雪灾频发地区桥梁在冬季运行过程中，低温、降雪和结冰等极端气候条件对伸缩装置的稳定性与耐久性造成显著威胁。伸缩装置作为桥梁上部结构与下部结

构之间的连接关键部件，需要满足大位移适应性和反复变形要求。在持续低温与反复冻融作用下，装置内积雪和冰层容易堵塞缝隙，使其失去自由伸缩能力，导致温度应力无法有效释放^[1]。这种情况下，桥梁梁体与支座之间会产生不均匀变形和应力集中，进而引发结构疲劳、裂缝扩展甚至构件破坏。低温环境使橡胶密封材料性能衰减，金属部件韧性降低，进一步加剧了伸缩装置的失效风险。

积雪和结冰不仅导致结构性问题，还对交通安全形成重大隐患。伸缩装置表面结冰会造成轮胎与桥面之间的附着系数下降，车辆通过时易发生侧滑、失控甚至连环碰撞，严重影响冬季通行能力。伸缩缝被冰雪堵塞后，车辆碾压时会引发局部冲击振动，导致螺栓松动、锚固构件脱落等次生损伤，缩短装置使用寿命。传统的

人工清理、机械铲雪和化学融雪措施在恶劣天气下效率低下且维护成本高昂,化学融雪剂的长期使用还会腐蚀金属表面与混凝土基座,使伸缩装置耐久性能显著下降。对于长大桥梁和高架道路而言,频繁的封闭养护不仅增加管理负担,还会对区域交通运行造成严重干扰。

面对雪灾频发区复杂的气候条件和高频交通需求,传统伸缩装置设计理念已难以满足安全性与可靠性要求。现有装置在抗低温、防冰雪堵塞以及承载冲击等方面存在显著短板,缺乏针对极寒环境的综合防护能力^[2]。在结构设计中亟需引入抗冰、防雪和快速排水等多维度性能的集成化方案,通过优化装置缝隙结构、选用高韧性低温材料、引入主动加热或融雪技术,提升伸缩装置在极端气候下的适应性和运行稳定性。结合实际交通场景的功能设计与环境适应性分析,对于实现桥梁全寿命周期安全管控具有重要的工程意义。

2 冰雪环境下伸缩装置受力特征与损伤机理分析

在冰雪环境中,桥梁伸缩装置的受力特征表现出明显的复杂性和非线性特征。低温条件下,装置内部的橡胶密封件与金属部件力学性能显著衰减,材料弹性模量升高而延展性降低,使装置在温度应力作用下更易产生脆性损伤。由于降雪和结冰造成装置缝隙被堵塞,原本设计用于自由伸缩的运动空间受到限制,当桥面结构发生热胀冷缩变形时,装置内部会出现高水平的附加应力和局部应力集中,导致金属部件屈曲、焊缝疲劳开裂或锚固体系松弛失效^[3]。在持续低温与车辆荷载共同作用下,反复的交变应力会加速疲劳累积,使伸缩装置的寿命显著缩短。

积雪和冰层还改变了伸缩装置的受力边界条件,导致动力响应特性发生显著变化。装置表面附着的冰层增加了结构自重,使得在车辆荷载作用下的冲击效应被放大,产生更高的动应力峰值。当装置缝隙内的冰雪未能及时清理,车辆通过时会引起局部强烈冲击,导致锚固螺栓松动、橡胶止水带撕裂以及钢梁端部局部屈曲等损伤模式。冰雪堵塞造成的排水不畅会在装置内部形成融雪水滞留,当温度再次下降时,反复冻融循环使内部裂缝扩展,密封件剥离、金属构件表面剥蚀等损伤问题更加突出,显著降低装置的整体抗疲劳性能。

在复杂冰雪环境下,伸缩装置的损伤机理往往呈现多因素耦合特征。低温脆化、冻胀压力、冰雪堵塞和车辆荷载共同作用,形成热-力-水多场耦合损伤模式,导致装置长期处于高风险运行状态。结构局部的微裂纹会在低温环境下迅速扩展,而积雪结冰形成的额外

约束使得局部构件在重复荷载作用下更易产生失稳破坏^[4]。深入研究冰雪环境中伸缩装置的受力分布规律、损伤演化路径及失效模式,对于后续一体化抗冰除雪设计方案的提出具有关键意义,也为优化结构安全性和延长使用寿命提供了理论依据。

3 抗冰与除雪一体化伸缩装置的结构设计与关键技术

抗冰与除雪一体化伸缩装置的结构设计需要在充分考虑低温环境特性和桥梁动态性能的基础上实现功能集成与性能优化。针对雪灾频发地区伸缩装置易受冰雪堵塞、温度应力及疲劳损伤等问题,设计方案应在结构布局、材料选择及功能配置上实现系统化协调^[5]。装置整体采用多层复合结构,通过优化缝隙断面形状与排水通道布置,确保冰雪在自然状态下能够快速排出,降低积雪结冰风险。结合温度分布特征与热传导机理,利用高韧性低温弹性材料与耐腐蚀高强钢材协同设计,使装置在低温下仍能保持良好的变形能力与承载性能,避免因低温脆化导致的断裂失效。通过在关键受力构件表面施加防冰涂层,可有效降低冰层附着力,提高表面疏水性和抗冻性能,从源头减轻积雪结冰的危害。

一体化设计中主动融雪技术是核心创新环节。结合高效电加热膜、导热合金及相变储能材料,实现对伸缩装置关键部位的局部加热与温控管理。通过对桥面温度与积雪厚度的实时监测,智能控制系统能够根据环境参数自动调节加热功率,使装置在低温高湿条件下保持热平衡状态,避免形成大面积冰层。在极端冰雪环境下,辅助配置低腐蚀性的高效融雪剂喷射系统,通过微孔管道精准喷洒融雪液体,降低局部冻结温度,快速分解冰雪结构,实现多技术协同的防冰除雪功能。此外,设计中综合考虑能源利用效率与养护成本,通过智能化管理平台对加热、融雪、排水等多系统进行统一控制,提高能耗利用率并降低后期维护压力。

为保障一体化伸缩装置的稳定运行与长寿命性能,关键技术研究还需聚焦于多因素耦合环境下的性能评价与安全监测。基于热-力-水耦合分析方法,对装置在低温、车辆荷载、冻融循环及冰雪堆积等综合工况下的受力状态进行精细化模拟,优化设计参数与构造细节。引入嵌入式应变计、温度传感器及物联网监测系统,对装置内部应力、温度及冰雪状态进行实时感知与动态预警,为结构健康管理提供数据支持^[6]。在大数据与人工智能算法的辅助下,实现对伸缩装置工作状态的预测性维护,显著提升抗冰与除雪一体化设计的可靠性

和适应性。通过结构优化、主动防护与智能控制的有机结合,能够在复杂冰雪环境中有效提升伸缩装置的安全性、耐久性与运行性能。

4 一体化设计对桥梁安全与运行性能的综合提升效果

抗冰与除雪一体化伸缩装置的应用显著改善了雪灾频发地区桥梁的运行安全性与结构稳定性。通过在结构中集成防冰、除雪和排水多重功能,该装置能够在低温高湿环境下保持伸缩缝的畅通,避免因积雪结冰造成的装置卡阻和失效问题。温度应力在设计中得到了有效释放,结构因受约束导致的应力集中显著降低,桥梁上部结构与支座体系的协同工作性能得到增强^[7]。对于长期处于反复冻融和高交通荷载环境的桥梁而言,该装置显著减少了疲劳损伤的累积速率,提高了关键部位的承载能力与变形适应性,延缓了结构老化与损伤的发展过程。

在交通安全方面,一体化设计通过主动防冰与快速除雪功能提升了桥面与车辆的附着性能,显著降低了低温冰雪条件下的打滑、失控和交通事故风险。通过电加热、融雪剂喷射及排水通道相结合的协同防护机制,桥面及伸缩装置表面能够保持干燥状态,车辆通过时的冲击振动和附加动荷载得到有效控制。实时监测系统在积雪初期即可发出预警并启动除雪功能,为冬季桥梁交通提供可靠保障。由于装置具备自动化与智能化特性,养护人员对冰雪处理的依赖性显著降低,减少了人工清理和机械铲雪的频率,避免了二次损伤对伸缩装置及桥面结构的破坏。

在桥梁运行管理层面,一体化伸缩装置的应用实现了安全性、耐久性与经济性的综合提升。装置通过传感技术与物联网平台进行全周期监测和数据采集,形成基于大数据的健康管理体系,为养护决策提供科学依据^[8]。融雪能源利用效率得到优化,维护成本显著降低,长期运营状态更加稳定可靠。该设计不仅提升了桥梁在复杂冰雪环境下的适应性和韧性,也在减少交通封闭次数、提高通行效率和保障公共安全方面展现了显著优势,为寒区桥梁的长期稳定运行提供了高效可

行的技术支撑。

5 结语

抗冰与除雪一体化伸缩装置的研究与应用为雪灾频发地区桥梁的安全运行提供了有效技术支撑。该设计在结构优化、材料选用和功能集成等方面实现协同创新,显著提升了装置在低温、积雪和冻融循环等复杂环境下的适应能力。结合主动加热、融雪剂喷射与高效排水等多项关键技术,装置在防止冰雪堵塞、释放温度应力和降低疲劳损伤方面表现出显著优势。依托智能监测与大数据分析,装置运行状态得到实时掌控,养护效率与管理水平明显提高。该技术的推广应用不仅增强了桥梁结构的稳定性与耐久性,还有效保障冬季交通安全,为寒区桥梁工程的高质量建设与长期运营提供了可靠的技术保障。

参考文献

- [1] 邓林峰,易雨时.大跨桥梁弹性伸缩装置服役性能研究[J].交通科技与管理,2025,6(01):100-102.
- [2] 范磊,王刚,甄治国,等.不同工况下桥梁无缝伸缩装置力学特性有限元分析[J].交通科技,2025,(01):60-65.
- [3] 叶丽宏,宋世刚,张雨惠.新型桥梁隐形无缝伸缩装置研究与应用[J].浙江建筑,2024,41(04):36-39.
- [4] 曹劲飞,陈晶.多工况下桥梁伸缩装置的动态特性及噪声评估[J].机械设计与制造,2024,(10):215-220.
- [5] 陈嵘,薛旻,张浩然,等.大跨度高速铁路桥梁端伸缩装置区段车轨动力响应[J].铁道建筑,2024,64(07):38-44.
- [6] 朱亚飞,李海滨,李瑶,等.公路桥梁梳齿板伸缩装置的优化设计[J].机械设计与制造,2024,(08):249-253.
- [7] 范善智.公路桥梁模数式伸缩装置型式检验设备研制及方法改进[J].科学技术创新,2023,(13):193-196.
- [8] 娟子.我国桥梁伸缩装置创新性技术突破[J].交通建设与管理,2022,(02):64-67.

版权声明: ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

