

高寒山区抽水蓄能电站场内桥梁抗冻设计研究

雷笑鸽 李馨悦 李禹萱

中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司 陕西 西安 710000

摘 要：高寒山区抽水蓄能电站场内桥梁长期承受低温冻融、高湿交替与运营荷载的多重环境耦合作用，结构冻害问题突出。本文梳理了高寒山区气候特征与场内桥梁服役工况的特殊性，剖析了冻融循环下混凝土结构损伤的演化机理及多因素耦合致损规律。在此基础上，从材料选型、主体结构构造优化、细部节点防冻防渗及桥面附属防护等层面归纳抗冻设计技术要点，并提出表层防护体系构建、内部密实度提升、排水防冻优化及长效抗冻设计等策略，为高寒山区电站场内桥梁的抗冻设计提供技术参考。

关键词：高寒山区；抽水蓄能电站；场内桥梁；抗冻设计；冻融损伤

引言：高寒山区气候条件严苛，低温周期漫长、昼夜温差剧烈、空气湿度偏高，抽水蓄能电站场内桥梁因临近水域且承担特殊运维通行荷载，服役环境较普通公路桥梁更为复杂。冻融循环、干湿交替与往复荷载的多场耦合持续削弱结构耐久性，传统抗冻设计方法难以完全适配。围绕场内桥梁冻害机理与抗冻设计技术要点展开探讨，对提升电站桥梁长期服役稳定性具有现实意义。

1 高寒山区抽水蓄能电站桥梁服役环境与病害机理

1.1 高寒山区特殊气候环境特征

高寒山区整体气候条件相较于普通区域存在明显特殊性，整体气候状态长期处于低温阴冷的状态。年度温度浮动区间较大，西北场区年均温在 $-6.2^{\circ}\text{C}\sim-4.8^{\circ}\text{C}$ 之间，极端最低温度录得 -41.5°C （青海格尔木区域），低温覆盖周期长达7~9个月，昼夜温差变化幅度可达 $22\sim 28^{\circ}\text{C}$ ，大气层温度的频繁波动会持续作用于外露工程结构^[1]。山区空气湿度维持较高水平，年平均相对湿度约为65%~78%，冬春季节常伴有5~7级大风，水汽蓄积条件充足，为结构表层结霜结冰提供基础环境。高海拔区域的空气流动特性更强，风速常达7~10m/s，风力作用会加速结构表层温度散失，延长低温作用时长。频繁的温度升降与水汽交替变化，构成高寒地区独有的气候作用体系，为各类工程结构冻害问题的产生提供环境基础。

1.2 抽水蓄能电站场区桥梁服役工况特征

抽水蓄能电站场内桥梁主要服务于电站日常运维与施工通行，服役工况区别于普通公路桥梁。通行荷载以工程车辆与运维设备荷载为主，荷载作用频次与荷载幅值具备固定的行业特征。场区紧邻水库与输水建筑，空气水汽含量更高，结构表层长期处于偏潮湿的附着状态。电站水域存在水位周期性变化，带动周边区域湿度环境持续波动，让桥梁结构频繁处于干湿交替的状态。结构

长期暴露在露天山区环境中，直接承受低温、大风与水汽侵蚀的持续作用，整体服役环境更为复杂严苛。

1.3 低温冻融作用对桥梁结构的侵蚀机制

桥梁混凝土结构内部存在细微孔隙与微观缝隙，潮湿环境下水汽会逐步渗入结构内部孔隙之中。低温环境会让孔隙内部水分发生冻结膨胀，对孔壁产生挤压作用，促使内部微观缝隙逐步拓展延伸。温度回升后冻结水体发生融化，孔隙压力逐步消散，结构内部出现应力松弛的状态。反复的冻结与融化循环会持续破坏混凝土内部集料与胶结材料的结合状态，弱化结构内部整体性。长期循环作用会让微观损伤不断积累，逐步形成表层剥落、内部疏松的结构缺陷，持续降低桥梁结构的整体耐久性能。

1.4 复杂环境耦合下桥梁结构损伤演化规律

高寒山区桥梁结构损伤并非单一冻融因素造成，而是温度、湿度、风力与荷载多类环境因素共同作用的结果。低温冻融引发的内部结构损伤会持续削弱结构自身防护能力，让外部水汽与侵蚀介质更易渗入结构深层。车辆荷载的反复作用会加剧已有微观裂缝的拓展速度，推动细小缺陷逐步发展为宏观结构病害。各类环境因素的叠加作用会加速结构性能衰减进程，让桥梁损伤从表层细微缺陷逐步向结构内部延伸扩散，形成持续性的结构劣化过程，逐步影响桥梁整体承载能力与服役稳定性。

2 高寒山区电站场内桥梁结构冻害影响因素分析

2.1 环境温湿度循环变化的影响机制

高寒山区气候环境存在显著的周期性波动，温度与湿度的交替变化持续对桥梁结构产生往复作用。西北场区日均温度循环幅度约为 $18\sim 26^{\circ}\text{C}$ ，年温度循环幅度可达 $58\sim 75^{\circ}\text{C}$ ，大范围的气温升降会改变混凝土结构表层与内部的温度场分布，引发结构体积的收缩与膨胀形变。空气湿度的起伏变化会调整结构表层含水率，促使孔隙水

体含量持续发生改变。温度降低阶段孔隙水体固化膨胀,挤压结构内部微观界面,诱发初始细微裂隙。温度回升阶段水体融化渗透,进一步拓宽裂隙延展范围。长期往复的温湿度交替作用不断累积结构内部损伤,逐步削弱混凝土结构致密程度,加速各类冻害问题的滋生与发展。

2.2 桥梁混凝土材料抗冻耐久特性影响因素

混凝土材料自身的组成配比与内部孔隙结构,直接决定桥梁抵御冻融破坏的基础能力。骨料级配、胶结材料密实度以及拌合水灰比例,都会改变材料内部孔隙的分布形态与连通程度。孔隙结构过于松散会提升水体渗透效率,增加冻融循环对结构内部的破坏力度^[2]。材料硬化成型后的密实状态会影响整体抗渗透与抗低温能力,孔隙率偏高的混凝土更容易积累冻融损伤。材料内部粘结界面的稳定状态,决定结构在反复冻融环境中的抗剥落与抗开裂能力,直接把控桥梁材料层面的耐久性能上限。

2.3 桥梁结构构造形式对冻害抵御的影响

不同桥梁构造布局与结构形态表现出差异化的冻害抵御能力,构造设计细节决定低温侵蚀的作用路径。整体式结构具备更强的整体性,内部应力传递更为均衡,能够弱化冻融形变带来的结构撕裂作用。装配式拼接结构存在多处连接缝隙,接缝宽度通常在10~30mm,缝隙位置容易滞留水汽与积水,成为冻融破坏的薄弱区域。结构悬挑部位、边角区域与外露构件接触外界环境的面积更大,受低温与水汽侵蚀的作用更为充分。排水构造与封闭防护设计的完善程度,能够调整结构积水滞留状态,间接改变冻害累积的发展速度。

2.4 电站特殊运营荷载对冻损累积的作用规律

抽水蓄能电站场内桥梁长期承受工程运输与运维作业带来的往复荷载作用,荷载运动会改变冻损的累积节奏。持续的荷载挤压会让混凝土内部微观裂隙处于开合变动状态,松动内部集料与胶结层的粘结关系。冻融环境产生的初始损伤会在荷载持续作用下不断拓展,裂隙延展范围与结构破损程度持续加深。荷载往复作用会打乱结构内部应力平衡,弱化结构抵抗低温形变的基础性能。长期耦合作用会加快结构耐久性能衰减速度,让冻损从微观缺陷逐步发展为稳定的结构性损伤,持续降低桥梁整体服役质量。

3 高寒山区抽水蓄能电站桥梁抗冻结构设计要点

3.1 适配高寒环境的桥梁材料选型设计

高寒山区特殊的气候条件对桥梁工程用材提出严苛标准,科学的材料选型是提升结构抗冻耐久性能的核心基础。高寒区域长期存在低温冻融与高湿风沙环境,用材筛选工作需要充分适配这类特殊环境条件。混凝土配

置环节需要优化骨料级配与胶结组分,抗冻等级不应低于F300,严控内部孔隙生成,提升基体整体密实度,削弱水分渗透留存的基础条件。各类金属用材需要具备稳定的低温力学属性,屈服强度在-40℃环境下衰减不超过15%,抵御低温环境带来的性能衰减与结构形变。表层防护用材需要具备良好的抗渗与耐低温能力,能够长期抵御外界环境侵蚀。合理搭配各类工程用材可以从物理层面强化结构抗冻属性,适配电站场区长期复杂的野外服役条件。

3.2 桥梁主体结构抗冻构造设计优化

桥梁主体结构的构造布局直接决定低温损伤的传播与累积程度,针对性的结构优化可以有效弱化冻融破坏带来的负面影响。结构设计工作需要结合高寒区域温度形变特征,调整整体受力体系与空间布局,让结构应力分布更加均匀稳定。适度优化梁板构件的截面规格,合理缩减大面积薄壁外露结构的布设范围,减少外界低温与湿气的直接作用面积。通过科学化的结构形态调整,缓解温度形变产生的附加应力作用,减少微观裂隙的萌生与拓展。合理的构造优化能够强化主体结构整体性,提升结构抵御冻融循环破坏的综合能力。

3.3 桥梁细部节点防冻防渗设计方式

桥梁拼接衔接、支座交接、结构转折等细部节点,属于整体结构中抗冻能力偏弱的位置,极易积蓄水分并诱发冻害问题。细部设计工作需要聚焦各类节点薄弱区域,开展精细化的防渗与防冻构造优化。通过精细化封堵与密封构造设计,节点缝隙宽度控制在5mm以内,缩减节点缝隙的连通通道,阻断水汽向结构内部渗透扩散。搭配科学的局部排水构造设计,快速疏导节点区域滞留积水,减少水分冻融循环的作用频次。持续强化节点区域的结构密实度与防护等级,补齐细部结构的抗冻短板,遏制细微损伤持续发育,维持桥梁整体结构的完整状态。

3.4 桥面附属结构抗冻防护设计内容

桥面各类附属结构直接接触外部大气环境,受冻融干湿交替作用最为频繁,需要落实专项抗冻防护设计。桥面铺装体系需要选用耐低温、高密实度的铺装材料,铺装层厚度不宜小于80mm,优化分层铺装构造,强化表层防渗阻水能力,阻隔水汽侵入铺装内部结构。桥面排水体系需要结合高寒环境特点优化布设形式,合理设置排水坡度与排水构件,提升积水排泄效率,规避积水结冰引发的结构损伤^[3]。伸缩缝、护栏等附属构件需要优化安装构造与密封工艺,提升构件衔接位置的密闭性与低温稳定性,全方位完善桥梁表层抗冻防护体系,提升整体服役耐久性。

4 高寒山区电站场内桥梁抗冻防护与优化设计策略

4.1 桥梁表层抗冻防护体系构建

高寒山区桥梁结构长期暴露在低温高湿的野外环境中,表层结构会持续承受冻融循环与风力侵蚀的叠加作用,逐步出现表层起砂、剥落与开裂等病害。系统化的表层防护体系能够阻断外界侵蚀介质与结构基体的接触路径,从外部弱化冻害发育条件。施工设计阶段需要选取耐低温、抗渗透以及抗老化性能优异的防护材料,适配山区复杂的气候变换节奏。防护涂层厚度宜控制在1.5~2.5mm,抗渗透压力不低于1.2MPa,针对桥面、墩身、梁体外露面以及结构边角等易受损区域开展全覆盖防护处理,填补结构表层细微孔隙。通过多层防护结构的搭配布设,提升表层整体致密程度与耐磨性能,延缓外界环境因素对混凝土结构的侵蚀速度,维持桥梁表层结构的完整与稳定。

4.2 结构内部抗冻耐久性能提升方式

桥梁整体抗冻水平依托结构内部基体性能作为核心支撑,内部孔隙分布与材料粘结状态直接决定冻损累积的快慢程度。内部性能提升工作主要围绕材料配比优化与结构基体改良展开,通过科学调整混凝土拌合组分,降低内部孔隙连通概率,提升基体整体密实度。规范混凝土浇筑与养护作业流程,减少结构成型阶段产生的原生缺陷,强化骨料与胶结材料的粘结强度。针对结构受力集中区域优化内部构造设计,提升基体抵御低温形变应力的能力,抑制微观裂隙在冻融循环作用下的拓展延伸。持续改善结构内部整体稳定性,可以有效减缓耐久性能衰减速率,筑牢桥梁抗冻的内部基础。

4.3 高寒环境桥梁排水防冻体系优化

水体滞留与反复冻融是引发桥梁各类冻害问题的重要诱因,完善的排水防冻体系能够从源头削减冻融破坏的作用条件。结合高寒山区雨雪充沛、低温持续时间长的环境特点,对桥梁原有排水布局开展精细化优化调整。合理调整桥面纵横坡设计参数,优化泄水构件的布设间

距与安装高度,提升地表积水的排泄效率,最大程度缩短水体滞留时间。梳理整体排水通道,清除容易造成积水淤积的结构死角,保障水流排泄路径通畅无阻。对梁端缝隙、支座顶部、墩台衔接位置增设导水构造,规避隐蔽区域长期积水结冰,全面降低各类位置冻损发生概率。

4.4 适配电站工况的桥梁长效抗冻设计优化

抽水蓄能电站场内桥梁的服役模式区别于普通民用桥梁,长期承受工程运输荷载与山区极端气候的耦合作用,对抗冻耐久性能有着更高的建设标准。长效抗冻设计需要结合场区实际服役工况开展针对性调整,兼顾结构承载稳定性与长期抗冻适配能力。根据电站运维与施工通行的荷载特征,优化结构薄弱部位的强化设计,提升结构在荷载与冻融耦合作用下的抵抗能力。结合山区年度气候变换规律调整防护构造细节,适配结构长期服役过程中的性能衰减特征。通过多维度的设计改良适配特殊工况需求,延缓结构冻损老化进程,保障桥梁在全服役周期内保持稳定的工作状态。

结束语

高寒山区抽水蓄能电站场内桥梁的抗冻设计需兼顾材料选型、结构构造、细部节点与桥面附属等多个层面,表层防护体系的构建、内部密实度的提升以及排水防冻系统的优化,共同构成抵御冻融损伤的技术屏障。结合电站往复荷载与低温环境的耦合特征开展长效设计优化,能够延缓结构性能衰减,保障场内桥梁在复杂气候条件下的服役稳定性,为同类工程的抗冻设计提供可借鉴的技术路径。

参考文献

- [1]石杨,赵庆,黎康平,等.严寒地区抽水蓄能电站混凝土面板防冻抗渗研究[J].江淮水利科技,2025(4):5-10.
- [2]张宇,于士涛,王舒,等.高寒地区抽水蓄能构造物强震损伤分析[J].东北石油大学学报,2023,47(5):101-110.
- [3]赵庆,白兴平,门利利,等.严寒地区面板混凝土气泡参数特征及其抗冻耐久性研究[J].水力发电,2025,51(9):121-125.