

雪堆积的问题尤为突出、积雪会对风机叶片的转动产生阻碍,降低发电效率,严重时还可能引发设备故障。如图1所示。



图1 风能发电

### 3 寒冷地区绿色低碳建筑可再生能源耦合利用的经济性与环境效益分析

#### 3.1 项目概况

本项目位于寒冷地区,是一处以办公、商业及公寓式住宅为主的综合绿色低碳建筑示范工程,总建筑面积约5万余平方米。项目地冬季气温偏低、采暖季时间长,为实现建筑整体运行的低碳化、本项目从被动式节能设计、主动式能源系统优化、可再生能源综合利用及智慧能源管理四个方面开展绿色低碳系统构建。

本项目重点采用地源热泵系统、屋面光伏发电系统以及BIPV光伏幕墙等多能源耦合形式,构建低碳高效的可再生能源供应体系。其中,地源热泵承担全年冷热源需求;屋面光伏及立面光伏幕墙为建筑供电提供绿色电力补充,实现建筑能源自给率提升与碳排放削减。

#### 3.2 本项目绿色低碳技术体系构成

根据本项目寒冷地区全年采暖需求量大、能源消耗强度高特点,建筑能源系统采用了地源热泵、屋面光伏、BIPV光伏幕墙以及智慧能源管理平台等多技术协同的绿色低碳体系。其中,地源热泵系统利用地下恒温特性实现高效换热,作为建筑主要冷热源,可显著降低运行能耗并减少碳排放;屋面光伏发电系统通过单晶硅组件向建筑提供绿色电力,可直接补偿地源热泵及辅助设备用电,提升可再生能源利用率;建筑南向立面的BIPV光伏幕墙将发电功能与围护结构深度融合,在满足立面遮阳与美观需求的同时实现稳定的太阳能发电收益;此外,项目配置建筑智慧能源管理系统,对地源热泵、水泵群、光伏系统及末端设备进行实时监控与能效优化,通过智能调度与多能源协同控制进一步提升系统整体运行效率,实现建筑全年能源低碳化运行目标。

#### 3.3 经济性分析

综合计算,项目总投资约为1,602万元,其中可再生能

源系统投资占总建筑机电投资的约28%。按照当地电价0.75元/kWh、供热价格40元/GJ计算,系统年运行节能费用约135万元,预计投资回收期为11.5年。地源热泵系统虽一次性投资较高,但其运行费用远低于燃气锅炉与传统冷水机组,综合运行成本降低约35%。屋面光伏系统的发电量基本可满足办公区公共照明与电梯运行用电需求,而BIPV系统除发电功能外,还能起到遮阳与降温的辅助作用,有助于降低建筑空调能耗。若叠加地方政府绿色建筑专项补贴(约200元/m<sup>2</sup>建筑面积的绿色化激励资金),回收期可进一步缩短至约9年。

#### 3.4 环境效益分析

根据系统年节能量与减排系数测算,项目每年可节约标准煤约910吨,减少二氧化碳排放约2,400吨,同时减少SO<sub>2</sub>排放6.5吨、NO<sub>x</sub>排放4.2吨,对改善区域空气质量具有显著作用。地源热泵系统运行过程中无燃烧排放,噪声低、可实现分区独立控制,适应复杂建筑功能需求。光伏系统在使用期内几乎零碳排放,且可与智能楼宇管理系统(BEMS)联动,实现“自发自用、余电上网”的能量管理模式。

综合来看,该项目通过地源热泵与光伏系统的协同应用,实现了寒冷地区建筑能源利用从“单源供能”向“多能互补”的转变,兼顾了经济可行性与环境友好性,为寒冷地区绿色低碳建筑的可再生能源耦合设计提供了典型示范与可复制经验。

### 4 结语

寒冷地区绿色低碳建筑所采用的可再生能源耦合利用技术,不仅切实解决了寒冷地区建筑能耗偏高的问题,还为建筑领域的可持续发展提供了助力。借助对太阳能、地热能与风能等可再生能源的综合运用,建筑在节能、减排以及提升能源利用效率方面取得了显著成效、经济性分析结果显示,尽管该类系统前期投入成本较高,但长期使用过程中所产生的节能效果与低碳效益十分突出,具备良好的投资回报能力、随着相关技术的不断进步与优化,寒冷地区建筑中可再生能源的耦合利用将朝着更高效、更经济的方向发展,为实现低碳城市建设与可持续发展目标发挥重要作用。

#### 参考文献

- [1] 郑然,李志昊.寒冷地区公共建筑绿色低碳改造设计关键技术实施路径[J].绿色建筑,2025,17(02):2-7+14.
- [2] 金国辉,史雅婕,史智婕.基于改进LSSVM-NSGA-III的内蒙古西部绿色低碳农宅多目标优化研究[J].干旱区资源与环境,2024,38(12):107-117.DOI:10.13448/j.cnki.jalre.2024.248.
- [3] 王英明,王振兴.浅析干旱寒冷地区近零能耗建筑关键技术融合集成应用[J].建筑,2023,(02):134-136.
- [4] 时元元,王萌,付素娟,等.严寒寒冷地区既有居住建筑超低能耗绿色低碳改造无热桥节点研究[J].新城建科技,2024,33(10):7-11.

# Discussion on the Application of Freeze-Thaw Resistance Technology for Concrete in Substation Structures in Cold Regions

Zhenguo Zhang

China Energy Engineering Group Xinjiang Electric Power Design Institute Co., Ltd., Urumqi, Xinjiang, 830000, China

## Abstract

In the vast high-altitude and cold regions of our country, special climatic conditions such as extreme low temperatures, significant temperature differences, and frequent freeze-thaw cycles pose severe challenges to the durability of substation structures. Substation structures, as the core infrastructure of the power system, undertake the key functions of power transmission, conversion and distribution. Their structural safety and service life are directly related to the stability and reliability of regional power supply. This paper, in combination with the climatic characteristics of high-cold regions and the features of substation structure projects, conducts an in-depth analysis of the freeze-thaw damage mechanism of concrete, sorts out the application status and deficiencies of the current mainstream freeze-thaw resistance technologies, and puts forward targeted technical optimization strategies and application suggestions, providing references for the construction of substation projects in high-cold regions.

## Keywords

High-altitude cold regions Substation structures; Concrete; Freeze-thaw resistance technology

## 高寒地区变电构筑物混凝土抗冻融技术应用探讨

章振国

中国能源建设集团新疆电力设计院有限公司, 中国·新疆 乌鲁木齐 830000

## 摘 要

在中国广袤的高寒地区, 极端低温、剧烈温差及频繁冻融循环等特殊气候条件, 对变电构筑物的耐久性构成了严峻挑战。变电构筑物作为电力系统的核心基础设施, 承担着电能传输、转换与分配的关键职能, 其结构安全性与使用寿命直接关系到区域电力供应的稳定性与可靠性。本文结合高寒地区气候特征与变电构筑物工程特点, 深入分析混凝土冻融破坏机制, 梳理当前主流抗冻融技术的应用现状与不足, 提出针对性的技术优化策略与应用建议, 为高寒地区变电工程建设提供参考。

## 关键词

高寒地区; 变电构筑物; 混凝土; 抗冻融技术

## 1 引言

随着中国能源战略向偏远高寒地区延伸, 青藏、东北、西北等区域的变电工程建设规模持续扩大, 混凝土抗冻融技术的重要性愈发凸显。当前, 行业内已形成一系列混凝土抗冻融技术手段, 但在高寒地区复杂环境下, 仍存在技术适配性不足、应用效果参差不齐、施工管控难度大等问题。因此, 系统探讨高寒地区变电构筑物混凝土冻融破坏机理, 优化抗冻融技术方案, 规范施工与养护流程, 对于提升变电构筑物耐久性、保障电力系统安全稳定运行、降低工程全寿命周期成本具有重要的理论价值与实践意义。

【作者简介】章振国(1983-), 男, 中国四川人, 本科, 高级工程师, 从事变电土建研究。

## 2 高寒地区环境特征与变电构筑物混凝土冻融破坏机理

### 2.1 高寒地区核心环境特征

高寒地区通常指海拔高于 2000 米、年平均气温低于 0℃ 的区域, 其气候环境具有显著特殊性: 一是极端低温持续时间长, 冬季最低气温可达 -40℃ 以下, 冻结期普遍超过 6 个月, 混凝土长期处于负温环境中; 二是冻融循环频繁剧烈, 昼夜温差可达 20℃ 以上, 春季与秋季更是出现“白天融化、夜间冻结”的反复循环, 部分地区年冻融循环次数超过 50 次; 三是多伴随复杂恶劣条件, 多数高寒地区同时存在强紫外线、低气压、大风沙等问题, 加速混凝土表面老化, 进一步削弱其抗冻能力; 四是地下水与湿度影响显著, 季节性冻土融化产生的地下水积聚, 以及雨雪天气导致的结构表面湿润, 为混凝土冻融破坏提供了必要的水分条件。

## 2.2 混凝土冻融破坏基本原理

混凝土冻融破坏的本质是内部水分相变引发的物理力学损伤，其核心过程可概括为“水分侵入—冻结膨胀—融化收缩—反复损伤”的循环过程。具体来看，混凝土内部存在大量毛细孔隙与凝胶孔隙，在高寒地区服役时，环境水分通过渗透、毛细作用等方式进入孔隙中。当温度降至冰点以下时，孔隙内的自由水冻结成冰，体积膨胀约9%，对孔隙壁产生向外的冻胀压力；若孔隙中存在过冷水或未冻结水，冻结过程中还会产生渗透压与晶体生长压力。这些压力共同作用于混凝土内部结构，当压力超过混凝土的抗拉强度时，会引发微观裂缝。

随着冻融循环次数增加，微观裂缝不断扩展、贯通，逐渐形成宏观裂缝，导致混凝土内部结构疏松多孔。同时，融化过程中水分会进一步向裂缝深处渗透，为下一次冻结提供更多水分，加剧损伤程度。此外，高寒地区的盐冻破坏的是冻融破坏的重要形式——土壤与地下水中的氯离子、硫酸盐等盐分随水分侵入混凝土，冻结时盐分结晶膨胀，且部分盐分与水泥水化产物发生化学反应，产生体积膨胀的物质，双重作用下加速混凝土破坏。

## 2.3 变电构筑物混凝土冻融破坏的特殊表现

变电构筑物因功能需求，其混凝土结构具有独特性，冻融破坏表现也更为复杂：一是承重结构损伤风险高，主变压器基础、构支架基础等承重构件长期承受设备荷载，冻融导致的强度下降可能引发基础沉降、倾斜，直接威胁设备安全；二是薄壁结构易受损，电缆沟、保护壳等薄壁构件厚度小、表面积大，水分易渗透，且抗冻胀能力较弱，易出现表层剥落与裂缝；三是节点部位破坏集中，预埋件与混凝土结合处、结构转角等节点部位应力集中，冻融循环易引发裂缝开展，甚至导致预埋件松动；四是与电气设备衔接部位隐患突出，混凝土结构与电气设备的连接部位若因冻融出现缝隙，可能导致雨水侵入、绝缘性能下降，引发电气故障。

## 3 高寒地区变电构筑物混凝土抗冻融技术应用现存问题

### 3.1 技术适配性不足

部分工程照搬常温地区或其他高寒地区的抗冻融技术方案，未结合当地具体气候条件，如极端低温、冻融循环次数、盐分含量等进行针对性优化。例如，部分工程选用的防冻剂型号与当地最低气温不匹配，导致冬季施工时混凝土出现冻结；引气剂掺量未根据骨料吸水率调整，导致含气量过高或过低，影响抗冻性能与强度平衡。

### 3.2 施工质量管控不到位

高寒地区野外施工环境恶劣，部分施工单位为赶进度，简化施工流程，存在搅拌不均匀、振捣不密实、养护不及时等问题。例如，混凝土搅拌时未严格控制水温与骨料温度，入模温度低于规范要求；养护期间未及时监测温度，保温措

施不到位，导致混凝土表面产生冻缩裂缝；表面防护涂层涂刷厚度不足，出现漏刷、起皮现象，无法有效阻挡水分侵入。

### 3.3 材料质量参差不齐

部分工程为降低成本，选用质量不达标的原材料与外加剂，如使用含泥量超标的骨料、过期防冻剂等，直接影响混凝土抗冻性能。此外，部分新型抗冻材料缺乏权威检测数据与长期服役验证，应用过程中存在性能不稳定风险，如部分纤维增强混凝土因纤维分散不均，反而形成结构薄弱点。

### 3.4 后期运维机制不完善

多数变电站重建设、轻运维，缺乏针对混凝土抗冻融的长期监测与维护机制。混凝土表面出现轻微剥落、裂缝等早期损伤时，未及时进行修补处理，导致损伤持续扩大；排水系统堵塞、防护涂层老化等问题未及时整改，加剧了冻融破坏程度。同时，运维人员缺乏专业的抗冻融维护知识，难以识别潜在风险<sup>[1]</sup>。

## 4 高寒地区变电构筑物混凝土抗冻融技术体系

### 4.1 抗冻融混凝土材料优化技术

#### 4.1.1 水泥品种选择

优先选用强度等级不低于42.5级的普通硅酸盐水泥或硅酸盐水泥，此类水泥水化热高、凝结硬化快，且水化产物结构致密，抗冻性能优于矿渣硅酸盐水泥等品种。同时，需控制水泥中游离氧化钙、氧化镁含量，避免水化后期体积膨胀导致结构疏松。

#### 4.1.2 骨料级配优化

粗骨料应选用质地坚硬、吸水率低、级配良好的花岗岩、玄武岩等碎石，粒径控制在5-31.5mm，针片状颗粒含量不超过15%；细骨料选用洁净的中砂，含泥量不大于2%，泥块含量不大于0.5%，通过优化骨料级配减少混凝土内部孔隙率。此外，严禁使用含有冻融损伤或风化颗粒的骨料，避免成为结构薄弱点。

#### 4.1.3 外加剂合理掺用

高效引气剂是提升混凝土抗冻性能的关键外加剂，通过引入均匀分布的微小气泡（直径0.05-1mm），缓冲冻结时水分膨胀产生的压力，减少裂缝产生。高寒地区宜选用引气型高效减水剂，掺量根据试验确定，通常为胶凝材料质量的0.8%-1.5%，确保混凝土含气量控制在4%-6%。同时，可掺用适量防冻剂，优先选用无氯盐类防冻剂（如硝酸盐类、胺类），避免氯离子引发钢筋锈蚀，防冻剂掺量需根据最低气温调整，确保在-40℃环境下混凝土不冻结。

#### 4.1.4 掺合料科学配伍

掺用优质矿物掺合料可改善混凝土内部结构，提升致密性与抗冻性。合理掺用I级粉煤灰、磨细矿渣粉或硅灰，替代率控制在20%-30%（粉煤灰）、30%-50%（矿渣粉）或5%-10%（硅灰），通过二次水化作用填充毛细孔隙，减少有害孔隙含量。需注意掺合料掺量不宜过高，避免降低混