

# 抗冻性能提升技术 在工业厂房化水区大体积混凝土施工中的应用

卞洪飞

上海新坤建筑工程有限公司 上海 202154

**摘 要:** 工业厂房化水区作为核心工艺区, 其大体积混凝土结构在严寒环境下长期受冻融循环威胁, 直接关系电站安全运行与寿命。文章深入分析了化水区大体积混凝土的工程特性及其面临的严酷冻融环境挑战, 阐述抗冻性能不足引发的耐久性劣化机理与结构风险。系统梳理了混凝土冻融破坏微观机理、抗冻剂作用机制与配合比优化原理等提升技术理论基础。构建了涵盖材料优化、结构设计与工艺控制、科学养护的综合性抗冻性能提升技术应用体系, 并以典型严寒地区燃煤电厂化水区工程为实践依托。

**关键词:** 抗冻性能; 提升技术; 工业厂房; 化水区; 大体积混凝土施工

## 引言

工业厂房化水区承担工艺用水处理及储存功能, 其混凝土结构通常具有大体积、承受持续水流或潮湿环境作用等特点。在寒冷或严寒地区, 此类结构面临着严酷冻融循环环境的严重挑战。冻融破坏引发的混凝土表面剥落、强度下降、渗透性增加等问题, 不仅损害结构外观与完整性, 更极大地削弱了其承载能力和使用寿命, 影响电厂安全运行。甘肃电投常乐电厂  $2 \times 1000\text{MW}$  燃煤机组扩建工程中的化水区工程, 地处典型西北严寒区域, 其大体积混凝土结构承受季节性的剧烈温度波动, 对混凝土材料的抗冻性能提出了极高要求。探索并系统应用有效的抗冻性能提升技术, 确保此类关键区域混凝土结构的长期耐久性, 已成为当前工业建筑建造领域亟待解决的重大课题。

## 1 工业厂房化水区大体积混凝土施工特点与抗冻需求

### 1.1 化水区大体积混凝土的工程特性与环境挑战

化水区结构如水池、设备基础通常截面尺寸巨大, 属于典型的大体积混凝土范畴。大体积混凝土的核心特性在于其显著的尺寸效应。在硬化过程中, 水泥水化反应释放大量热量, 积聚于结构内部难以迅速散发, 导致中心区域温度急剧上升, 而表层温度相对较低或受环境影响散热较快, 由此产生显著的内外温差。这种温差在约束条件下诱发内部温度应力, 是导致早期塑性收缩和后期温度裂缝产生的主要根源。裂缝的存在为环境中的水汽提供了侵入通道。

碱集料反应风险突出。大体积混凝土单位体积内水泥用

量高, 带入的碱总量也相应较大。若配制混凝土时未严格检验骨料的碱活性, 或未采取有效的抑制措施, 在高湿度甚至饱水的化水区环境下, 碱骨料反应发生的性显著增加。该反应过程伴随体积膨胀, 进一步加剧内部裂缝的产生与发展, 形成恶性循环。

长期承受水环境影响。化水区结构与生产水密切接触, 无论是内部盛水的水池结构壁体, 还是外部受地面积水、冲洗水及高湿度环境作用的区域, 混凝土均长期处于饱水或高湿度状态。水分不仅参与碱集料反应和腐蚀过程, 更重要的是, 它为冻融破坏的发生提供了物质基础——可冻结水。

对于地处寒冷或严寒地区的工业厂房, 如我国西北、东北等地, 化水区大体积混凝土面临着季节性冻融循环的严峻考验。冬季气温骤降至冰点以下, 侵入混凝土孔隙和微裂缝中的水分反复经历冻结与融化过程。冻结时体积膨胀约, 产生巨大的膨胀压力; 融化时体积收缩。这种冻胀压力及伴随产生的渗透压应力反复作用于混凝土孔壁和裂纹尖端, 对其内部结构造成持续的、累积性的损伤。加之该类地区昼夜温差大、干湿交替频繁, 气候条件极为严酷, 环境侵蚀性等级高, 对混凝土材料的抗冻耐久性构成了严峻挑战。

### 1.2 抗冻性能不足对结构耐久性的影响

混凝土在冻融循环下的宏观劣化表现显著, 表面开始出现细小的麻点, 随着冻融次数的增加, 麻点逐渐扩展、连通, 导致表层砂浆层松散、起砂。继而发展为局部片状或层状剥落, 骨料裸露。若冻融持续加剧, 混凝土表层保护层大面积

剥落,内部结构暴露,强度严重丧失。冻融产生的微裂纹不断扩展、连通,使混凝土的密实度急剧下降,透水性显著增加。这不仅意味着更多的水分、侵蚀性介质可以更快速地侵入混凝土内部,加速进一步的冻融损伤和其它腐蚀过程,还直接影响其承载能力和结构安全性。

当大体积混凝土关键区域如水池池壁、大型设备基础发生严重的冻融破坏,导致混凝土表面剥落、骨料严重裸露、保护层丧失时,其内部的钢筋便失去有效保护。高湿环境极易促使钢筋发生锈蚀。钢筋锈蚀不仅削弱截面,锈蚀产物体积膨胀导致保护层混凝土进一步开裂、剥落,形成更为严重的破坏连锁反应。对于水处理功能区域,混凝土冻融劣化造成的渗漏不仅影响厂区环境,更污染水质,影响整个电厂的水处理效率和供水安全。大型设备的稳固运行依赖于稳定的基础结构。基础混凝土受冻融破坏影响产生不均匀沉降、裂缝扩展或强度退化,将直接危及上层设备的平稳运行,增加故障风险,甚至引发安全事故。

### 1.3 工业厂房化水区抗冻技术应用的迫切性

化水区是整个工业厂房水处理系统的核心枢纽,其运行状态直接关系到全厂乃至电网的安全稳定。如甘肃电投常乐电厂这样的超超临界燃煤机组,其化水区承担着制备极高纯度锅炉补给水及处理各类工业废水的重任,是保障机组热效率、防止关键设备结垢腐蚀的核心环节。一旦化水区的混凝土结构因冻融破坏导致渗漏、沉降或设备基础失效,轻则迫使化水系统停机检修,重则导致整台发电机组非计划停运,引发巨大的供电缺口和安全风险,对区域电网稳定性构成严重威胁。

严寒环境赋予工业建设独特挑战,必须在设计施工阶段就将抵御极端冻融循环作为核心考量,执行严于常规项目的耐久性标准。仅满足基本强度的传统混凝土技术与方法,难以保障严寒条件下结构的长期服役性能。频繁维修导致的资金浪费与生产中断严重损害经济效益。通过集成先进抗冻技术实现长寿命周期免维护运行,其全周期经济性显著优于后期修补。随工业向资源富集型寒区延伸,亟需构建高可靠性的系统化抗冻技术体系以满足数十年服役需求。

## 2 大体积混凝土抗冻性能提升技术的理论基础

### 2.1 混凝土冻融破坏的微观机理与宏观表现

混凝土冻融破坏源于毛细孔内水的相变过程。孔隙水结冰时体积膨胀产生巨大静水压力,在密闭孔隙约束下超过

混凝土局部抗拉强度即引发微裂纹。伴随冻结析盐形成的浓度梯度进一步产生渗透压力,驱使未冻水向冻结区迁移并结冰膨胀,加剧孔壁损伤。宏观上,冻融循环诱发渐进性劣化:初期微裂纹萌生仅导致声学性能微变;随循环频次增加,微裂纹贯通形成连通孔道,表现为表面麻点、局部剥落及吸水率骤升;持续作用将造成表层片状脱落与粗骨料裸露,宏观力学指标显著劣化,最终导致结构承载能力衰退与防护功能丧失。

### 2.2 抗冻剂的作用机理与分类选择

引气剂作为关键抗冻组分,通过降低浆体表面张力,在搅拌中形成大量稳定、均匀分布的密闭微气泡体系。这些气泡有效缓冲冻融过程产生的膨胀压力与渗透压力,显著抑制微裂纹扩展。抗冻剂按功能分为三类:引气型专注于提升抗冻耐久性;防冻型(多为有机盐类)通过降低冰点及促进负温硬化保障冬季施工可行性;复合型则集成引气、减水早强与降冰点功能,适用于严寒环境高抗冻需求工程。合理选用需综合考虑工程地极端气温、冻融频次、构件服役水环境状态、设计规范抗冻指标要求、材料兼容性及经济成本四大要素,确保技术适配性与工程可靠性。

### 2.3 配合比优化对抗冻性能的增强路径

配合比优化的核心在于严控水胶比,在保障工作性与强度前提下最大限度降低水胶比,以减少毛细孔隙并形成高密实浆体,有效阻隔水分渗透并增强抗冻胀能力。掺入高性能矿物掺合料发挥其活性矿物效应与微集料填充协同作用,显著细化孔隙结构并优化孔径分布,部分矿料兼具降低水化热温升的功能。选用级配连续、低吸水性、高坚固性且无碱活性的优质骨料,科学设计骨料级配以提升堆积密度,严格限定针片状颗粒与含泥量,减少浆体需求与孔隙率,形成抵抗内部冻胀应力的稳定骨架。针对严寒地区特性,须设定满足高抗冻性要求的最低强度保障基准,确保混凝土具备支撑反复冻融应力的密实基础。

## 3 工业厂房化水区大体积混凝土抗冻技术应用体系

### 3.1 材料优化技术

材料优化是提升混凝土本体抗冻性能的核心环节,工程严格选用水化热较低的中热或低热硅酸盐水泥,并严控含碱量以抑制碱集料反应风险。高效利用矿物掺合料是关键策略,通过科学配比掺入优质粉煤灰、矿渣粉及严寒区域关键部位适用的硅灰,显著优化孔隙结构并提升早期密实度。

骨料选用遵循级配连续、质地坚固、低吸水率与低碱活性的原则,严格控制针片状颗粒与含泥量,部分采用特殊憎水处理骨料以延缓水分毛细渗透。针对严寒环境与高抗冻等级需求,科学复配多组分外加剂体系:核心是引入高性能引气剂,确保形成稳定均匀的密闭微气泡结构;复合高效减水剂以保障低水胶比下的工作性;结合冬季低温工况,必要时掺入具备低温塑化与降低冰点功能的复合防冻组分,全面增强混凝土抗冻能力。

### 3.2 结构与施工工艺优化

科学的构造设计结合精细化施工是保障抗冻性能落地的关键,针对化水区各关键构件特性与环境约束,进行基于温度场与温度应力仿真的专项抗裂设计,优化配筋细节并设置后浇带或跳仓法施工缝以分散应力。对冻融临界水位变动区构件,采取增强混凝土抗冻等级并辅以高品质表面防水防腐层的多道防护策略,在结构突变处设置柔性隔离层缓解应力集中。施工阶段严格遵循优化配合比组织生产,采用分层推移浇筑工艺严控层厚与覆盖时效,确保充分密实振捣并维持引气结构稳定。嵌入智能化温度传感网络实现浇筑体全时段温度监测,构建实时反演模型进行风险预警。当内表温差或降温速率临近阈值时,即刻启动动态调控预案,精准实施通水冷却、保温层调整或局部加热等温控措施,有效规避裂缝风险,确保抗冻性能贯穿施工全过程。

### 3.3 养护阶段的抗冻强化措施

养护是混凝土抗冻性能形成的决定性环节,针对西北严寒环境,工程采用综合防护策略:初凝后立即覆盖高效复合保温系统,对结构棱角及风口区域实施加厚防风密封处理。引入智能温控手段,包括内置电伴热装置配合多层保温包裹或搭建密封保温棚辅以热风设备,确保关键构件处于稳定正温环境。强化湿养护工艺,在保温基础上采用储水养护、保水垫层覆盖与定时喷雾相结合,维持表层持续高湿度状态,促进水化反应充分进行,优化孔隙结构。建立严密监测体系,基于实时温湿度数据与预测模型动态调整养护方案,当环境温度临近临界值时延长保温覆盖时间。大体积混凝土降温期执行分阶段、小梯度拆模策略,避免温度骤变引发应力裂缝,保障结构在严苛条件下实现抗冻性能的稳定发展。

## 结束语

严寒地区工业厂房化水区大体积混凝土结构在严酷冻融环境下的耐久性挑战,关乎工业核心设施长期服役安全与全生命周期效益。文章系统论述了提升其抗冻性能的技术路径与应用体系。基于对混凝土冻融破坏微观机理及环境严酷性的深刻认知,通过材料端对水泥基复合体系、高品质骨料及高性能多组分外加剂进行协同优化,显著增强了混凝土本体的密实性与应力缓冲能力;在结构构造和施工工艺上采取精细化的防裂设计、科学的跳仓分块、严格的温控监测及精准调控措施,有效规避早期温度裂缝并保障整体性;科学智能的长期保温保湿养护策略,则为材料性能稳定健康发展提供了关键环境保障。

甘肃电投常乐电厂工程化水区工程实践表明,系统集成上述材料优化技术、结构施工精细控制技术和智能养护强化技术的综合应用体系,能切实保障大体积混凝土在西北严寒环境中的高抗冻性能实现。所形成结构表现出卓越的抵抗冻融循环损伤的能力,表层无劣化迹象,内部结构完好,满足极端服役环境下的耐久性要求。这种整合创新材料、精益建造与科学管理的抗冻提升技术模式,不仅极大提升了关键工业设施的结构安全性和服役年限,减少了后期高昂的维修加固成本与生产中断损失,也为严寒条件下大型工业工程复杂水工构筑物的高质量工程建设提供了具有重要推广价值的范式参考。未来研究需进一步探索基于环境参数与材料性能演变的智能模型预测技术在工程全寿命维护决策中的深化应用。

## 参考文献:

- [1] 李玄昆,陈菲,方静,等.大体积纤维混凝土抗压及收缩性能研究[J].成都大学学报(自然科学版),2023,42(04):442-448.
- [2] 杨德永.基于不同防裂剂掺量的混凝土抗裂性能研究[J].水利科学与寒区工程,2023,6(12):20-23.
- [3] 林锋.大体积混凝土结构基础设计与研究[J].建筑技术开发,2021,48(17):7-8.
- [4] 马如,赵长明.冬季大体积混凝土施工浅谈[J].科技资讯,2021,19(11):91-94.

**作者简介:** 卞洪飞(1988-3-26),男,汉族,江苏省灌南县人,职称:工程师,本科,研究方向:建筑施工