

分析火电厂冷却塔混凝土腐蚀的原因

赵 宇

西北电力工程监理有限公司 陕西 西安 710075

摘 要：火电厂冷却塔作为热力循环系统的关键设施，其混凝土结构在复杂环境作用下长期暴露于侵蚀性介质中，导致耐久性劣化问题日益突出。本文从化学侵蚀、物理破坏、环境耦合作用及施工缺陷四大维度系统剖析混凝土腐蚀机理，结合实际工程案例揭示多因素协同作用下的破坏规律，为冷却塔全生命周期防护提供理论支撑。

关键词：火电厂冷却塔；混凝土腐蚀；化学侵蚀；冻融循环；施工缺陷

1 化学侵蚀：离子渗透与酸碱反应的双重攻击

1.1 硫酸盐侵蚀的膨胀性破坏

冷却塔循环水中高浓度硫酸根离子（ SO_4^{2-} ）是混凝土劣化的首要化学诱因。在冷却塔运行过程中，循环水不断循环，其中的 SO_4^{2-} 通过毛细作用渗透至混凝土内部。这些离子与水泥水化产物水化铝酸钙（ $\text{C}_3\text{A} \cdot \text{Ca}(\text{OH})_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ ）及氢氧化钙（ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ）发生化学反应，生成具有膨胀性的钙矾石（ $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 31\text{H}_2\text{O}$ ）和石膏（ $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ）。钙矾石晶体呈针状，其体积较反应物膨胀115%，在混凝土孔隙中产生巨大内应力。这种内应力首先导致混凝土表面出现粗大裂缝，随着侵蚀的持续，裂缝不断扩展、加深，最终使混凝土结构失去完整性。石膏结晶则使混凝土遍体溃散，强度损失率显著提升。实验表明，在45℃模拟溶液中，普通混凝土经6个月浸泡后，中性化深度达15mm，质量损失率超8%。而高性能混凝土因掺入硅灰等矿物掺合料，其微观结构更加致密，抗硫酸盐侵蚀能力提升3倍以上，能够有效减缓硫酸盐侵蚀的速度和程度^[1]。

1.2 氯离子侵蚀的钢筋锈蚀催化

氯离子（ Cl^- ）是冷却塔混凝土腐蚀的“隐形杀手”。火电厂烟气中的HCl及循环水中的 Cl^- 通过扩散作用穿透混凝土保护层，在钢筋表面富集至临界浓度（通常为0.02%集料质量）时，会破坏钢筋表面的钝化膜。钝化膜是钢筋在碱性环境中形成的一层致密氧化膜，能够阻止钢筋与外界环境发生化学反应，起到保护钢筋的作用。当 Cl^- 破坏钝化膜后，形成活化-钝化电化学腐蚀电池。活化的钢筋表面作为阳极，未活化区域作为阴极，在氧气和水存在的条件下，发生电化学反应，铁离子（ Fe^{2+} ）被氧化为氢氧化铁（ $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ），体积膨胀2-4倍。这种体积膨胀导致混凝土保护层顺筋开裂，裂缝进一步加速了 Cl^- 和其他腐蚀介质的渗透，形成恶性循环。某电厂冷却塔检测显示，淋水构件钢筋锈蚀率达32%，截

面损失超20%，承载力下降40%，直接威胁结构安全。

1.3 酸性气体腐蚀的碳化与酸雨叠加

火电厂排放的烟气中含有 SO_2 、 NO_x 等酸性气体，这些气体与水蒸气结合形成酸露滴（pH值可低至1），对冷却塔内壁混凝土产生双重腐蚀。一方面， CO_2 与混凝土中的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 反应生成碳酸钙（ CaCO_3 ），降低混凝土碱度（pH值从12.5降至9以下），破坏钢筋钝化膜。当混凝土碱度降低到一定程度时，钢筋表面的钝化膜失去稳定性，开始发生锈蚀。另一方面，酸露滴中的 H^+ 直接中和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ，生成可溶性钙盐（ CaCl_2 、 CaSO_4 ），导致混凝土孔隙率增加，抗渗性下降。模拟实验表明，在干湿循环条件下，混凝土经酸露滴腐蚀后，中性化深度较纯 CO_2 碳化增加50%，质量损失率提升2倍。干湿循环加速了酸露滴在混凝土中的渗透和反应，使得腐蚀作用更加剧烈^[2]。

2 物理破坏：冻融循环与水流冲刷的协同作用

2.1 冻融循环的应力疲劳损伤

在北方地区，冷却塔在冬季运行期间面临着严峻的冻融考验。混凝土作为一种多孔材料，其内部存在着大量的毛细孔和微裂缝，这为冻融破坏埋下了隐患。当混凝土内部毛细孔中的水在0℃以下结冰时，水由液态变为固态，体积膨胀约9%，这一体积变化会在混凝土内部产生巨大的拉应力，经测算，该拉应力可达约9.6MPa。而当温度回升，冰融化成水时，应力又随之释放。这种反复的冻融循环，就如同对混凝土进行着持续的“疲劳试验”。在每一次冻融循环中，水的相变引起的体积变化在混凝土内部产生应力。

2.2 水流冲刷的机械磨损

冷却塔的淋水构件长期承受着高速水流的冲刷，水流的流速可达2-3m/s。这种高速水流携带的颗粒对混凝土表面产生强烈的撞击和摩擦作用，是一种典型的机械磨损过程。在水流冲刷的初始阶段，混凝土表面的砂浆层首先受到破坏。随着冲刷时间的延长，骨料逐渐外

露,砂浆不断流失,混凝土表面变得粗糙不平。实验研究表明,水流冲刷可使混凝土表面粗糙度增加 3 倍。表面粗糙度的增加不仅降低了混凝土的美观性,更重要的是会降低其抗水流冲刷的能力。因为粗糙的表面会使水流产生更多的湍流和涡流,增加水流对混凝土的冲击力,从而加速混凝土的磨损。同时,表面粗糙度的增加也会加速腐蚀介质的渗透。粗糙的表面为腐蚀介质提供了更多的附着点和渗透通道,使得腐蚀介质更容易进入混凝土内部,引发进一步的腐蚀破坏。此外,水流冲刷还会导致混凝土的抗渗性下降 50%。抗渗性是混凝土抵抗水分和其他液体渗透的能力,抗渗性下降意味着混凝土内部的孔隙结构变得更加疏松,水分和腐蚀介质更容易进入混凝土内部,从而加剧混凝土的劣化^[3]。当水流冲刷与冻融、钢筋锈蚀等因素叠加时,混凝土的破坏速度会呈指数级增长。例如,某电厂的淋水柱在运行 5 年后,柱体截面积损失超过 30%,部分构件甚至需要紧急加固。这是因为水流冲刷破坏了混凝土表面的保护层,使得钢筋更容易暴露在腐蚀环境中。钢筋暴露后,在潮湿的环境中会发生锈蚀,锈蚀产生的膨胀应力会进一步挤压周围的混凝土,导致混凝土开裂和剥落。同时,冻融循环产生的裂缝也会为水分和腐蚀介质的进入提供通道,加速钢筋的锈蚀和混凝土的破坏。这三种破坏因素相互影响、相互促进,形成了一个恶性循环,使得混凝土结构的破坏速度大大加快。

3 环境耦合作用: 烟塔合一技术的特殊挑战

3.1 烟塔合一的酸腐蚀强化

烟塔合一技术作为一种创新的环保排放方式,将脱硫后的净烟气直接通过冷却塔排放。然而,这一技术也给冷却塔带来了特殊的腐蚀挑战。烟气中的 SO_3 、 HCl 等酸性气体在塔内遇冷会凝结成酸露滴,这些酸露滴附着于塔壁,形成 pH 值低至 1 的酸性液膜。该酸性液膜成分复杂,不仅含有高浓度的硫酸根离子 (SO_4^{2-}) 和氯离子 (Cl^-),还富含二氧化碳 (CO_2)。这使得混凝土同时遭受硫酸盐侵蚀、氯离子腐蚀和碳化三重作用。硫酸盐侵蚀会导致混凝土内部生成钙矾石和石膏等膨胀性产物,引起混凝土膨胀开裂;氯离子腐蚀会破坏钢筋表面的钝化膜,引发钢筋锈蚀;碳化作用会降低混凝土的碱性,使钢筋失去碱性环境的保护,加速锈蚀过程。与传统的冷却塔相比,烟塔合一技术使得冷却塔内的腐蚀环境更加恶劣。模拟实验显示,烟塔合一冷却塔内壁混凝土的中性化深度较传统冷却塔增加 2 倍。中性化是指混凝土中的碱性物质与酸性物质发生反应,导致混凝土的碱性降低的过程。中性化深度的增加意味着混凝土的保护作

用减弱,钢筋更容易受到腐蚀。质量损失率提升 3 倍,表明混凝土在酸性环境下的腐蚀速度明显加快。腐蚀速率达 0.5mm/年,这意味着在相同的时间内,烟塔合一冷却塔的混凝土腐蚀程度更加严重。如果不采取更加有效的防腐措施,冷却塔的结构安全将受到严重威胁,使用寿命将大大缩短。

3.2 干湿交替的加速劣化

冷却塔内壁在运行过程中经历着周期性的干湿变化。吸热后的湿热空气从塔顶排出,塔壁内侧水分蒸发,使得内侧处于相对干燥的状态;而外侧因环境温度低,空气中的水蒸气会凝结成水珠,形成“内干外湿”的特殊环境。这种干湿交替的环境对混凝土的耐久性产生了极为不利的影响。混凝土内部含有一定量的盐分,如硫酸钙 (CaSO_4)、氯化钠 (NaCl) 等。在干燥状态下,盐分会在混凝土孔隙中结晶析出,产生结晶压力。这种结晶压力会对孔隙周围的混凝土产生挤压作用,导致微裂缝的产生和扩展。当混凝土处于湿润状态时,盐分又会溶解在水中,压力释放。然而,随着下一次干燥过程的到来,盐分又会再次结晶,产生新的结晶压力。这种反复的结晶-溶解过程就如同对混凝土进行着持续的“疲劳加载”,使得混凝土内部的微裂缝不断扩展、连通,最终导致混凝土结构的破坏。某电厂冷却塔检测发现,干湿交替区混凝土的氯离子渗透深度较恒湿区增加 40%,硫酸盐侵蚀深度增加 60%。这表明干湿交替环境显著加速了腐蚀介质在混凝土中的渗透和反应。在干湿交替区,由于频繁的干湿变化,混凝土的孔隙结构不断发生变化,为腐蚀介质的渗透提供了更有利的条件。同时,结晶-溶解过程产生的应力也会破坏混凝土的内部结构,使得腐蚀介质更容易与水泥水化产物发生反应,加剧了混凝土的劣化。

4 材料与施工缺陷: 腐蚀的内在诱因

4.1 混凝土配合比不合理

在部分冷却塔的建设中,存在混凝土配合比不合理的问题。一些工程为了降低成本或对混凝土性能认识不足,采用了低强度等级混凝土,如 C20。低强度等级混凝土的抗压、抗拉强度较低,其内部结构相对疏松,难以抵抗外界环境的侵蚀和破坏。同时,水胶比过大 (> 0.5) 也是一个常见的问题。水胶比是指混凝土中水的用量与胶凝材料用量的比值,它对混凝土的性能有着重要影响。水胶比过大时,混凝土中的水分过多,在硬化过程中,多余的水分蒸发后会留下大量的孔隙,导致混凝土的孔隙率增高、抗渗性变差。实验表明,水胶比从 0.4 降至 0.3 时,混凝土的性能会发生显著改善。

抗氯离子渗透性提升 5 倍,这意味着混凝土抵抗氯离子侵蚀的能力大大增强,能够有效延缓钢筋锈蚀的时间。抗硫酸盐侵蚀能力提高 3 倍,表明混凝土在硫酸盐环境中的稳定性得到提高,减少了因硫酸盐侵蚀导致的膨胀开裂风险。此外,部分工程为降低成本,使用高碱活性集料(如含石英砂的骨料),这会引发碱-集料反应(AAR)。碱-集料反应是一种缓慢的化学反应,当混凝土中的碱性物质(如氢氧化钠、氢氧化钾等)与高碱活性集料中的活性二氧化硅发生反应时,会生成膨胀性凝胶。这种凝胶在吸收水分后会膨胀,对混凝土内部产生巨大的膨胀应力,导致混凝土开裂。一旦碱-集料反应发生,它会对混凝土结构造成长期的、不可逆的破坏,严重影响混凝土的使用寿命和结构安全。

4.2 施工质量控制不严

混凝土保护层厚度不足是冷却塔施工中普遍存在的问题。规范要求淋水构件保护层厚度 $\geq 40\text{mm}$,但在实际检测中,发现最小值仅 3mm 。混凝土保护层是保护钢筋的重要屏障,它能够阻止腐蚀介质与钢筋直接接触,延缓钢筋锈蚀的时间。保护层厚度不足会使得钢筋过早暴露于腐蚀环境中,大大缩短了钢筋的使用寿命。一旦钢筋锈蚀,产生的膨胀应力会导致混凝土开裂、剥落,进一步加剧混凝土的破坏。此外,混凝土振捣不密实、养护不到位等问题也严重影响着混凝土的质量。混凝土振捣不密实会导致混凝土内部存在孔洞和缝隙,这些孔洞和缝隙不仅会降低混凝土的强度和抗渗性,还会成为腐蚀介质的藏身之所,加速腐蚀介质在混凝土内部的渗透和反应。养护不到位则会影响混凝土的水化反应。混

凝土的水化反应是一个复杂的过程,需要适宜的温度和湿度条件。如果养护不当,混凝土的水化反应不充分,会导致混凝土的强度发展不足,增加混凝土开裂的风险。同时,养护不到位还会使混凝土表面出现干缩裂缝,进一步降低混凝土的耐久性。这些施工质量控制不严的问题相互交织,共同作用,加速了冷却塔混凝土的腐蚀和破坏,给冷却塔的安全运行带来了潜在威胁。

结束语

未来研究应聚焦于以下方向:一是建立多因素协同腐蚀模型,综合考虑化学侵蚀、物理破坏、环境耦合作用及材料与施工缺陷等因素,准确预测冷却塔混凝土的腐蚀寿命;二是开发新型防腐材料,如具有自修复功能的高性能混凝土、耐腐蚀涂层等,提高混凝土的抗腐蚀能力;三是加强施工质量控制,制定严格的施工规范和验收标准,确保混凝土的质量和性能符合要求;四是推广智能监测与维护技术,利用传感器、物联网等技术实时监测冷却塔混凝土的腐蚀状态,及时采取维修和加固措施,保障冷却塔的安全运行。通过多维度协同防控,可显著延长冷却塔使用寿命,保障火电厂安全高效运行。

参考文献

- [1]杨乐.燃煤火电厂排烟冷却塔钢筋混凝土结构防腐问题[J].山西建筑,2015,41(34):43-44.DOI:10.13719/j.cnki.cn14-1279/tu.2015.34.024.
- [2]高扬.火电厂排烟冷却塔混凝土在腐蚀环境下的耐久性研究[D].北京交通大学,2014.
- [3]崔文迪.排烟冷却塔混凝土材料在模拟环境溶液作用下的耐久性.2016.北京交通大学,MA thesis.