

液氨制冷系统在混凝土预冷中的效率评估

施利波

中国水利水电第七工程局有限公司第五分局 四川 眉山 620800

摘要:水电工程大坝混凝土施工里,温控防裂是质量保障关键,液氨制冷系统因高效经济成混凝土预冷设计普遍选择。本文聚焦其效率评估,先剖析系统与预冷工艺耦合机理,明确能量传递与效率关键;再识别系统参数、预冷工艺、环境条件三类影响因素;构建涵盖能效、预冷效果、经济性的评估体系,明确指标原则、核心指标及流程;最后提出优化策略。研究形成完整方案,可量化运行效率,为高效应用提供支撑,提升施工质量与效益。

关键词:液氨制冷系统;混凝土预冷;制冷效率;能效比;温度控制

引言:大体积混凝土在水电工程大坝工程中应用广泛,浇筑后水化热积聚易致温度裂缝,影响结构安全与工程寿命。混凝土预冷是控制浇筑温度核心技术,液氨制冷系统因制冷量大、成本低、适配大规模施工,应用普遍。但当下系统多固定参数运行,缺针对性评估体系,能效未充分发挥,有能源浪费、预冷不达标问题。现有研究孤立关注系统或工艺,忽视耦合特性,评估指标难适配动态需求。本文研究效率评估方法,提供支撑推动技术升级。

1 液氨制冷系统与混凝土预冷耦合机理

1.1 液氨制冷系统核心构成与工作原理

液氨制冷系统核心由压缩机、冷凝器、节流阀、蒸发器四大核心设备及储氨罐、氨泵等辅助设备构成,整体基于蒸汽压缩制冷循环实现制冷。其工作流程为:压缩机将低压气态氨压缩为高压高温气体,送入冷凝器与冷却介质换热后冷凝为高压液态氨;高压液态氨经节流阀节流降压,变为低温低压的气液混合物进入蒸发器;在蒸发器内,液氨吸收载冷剂(水电工程通常为片冰、冷水、冷风)的热量蒸发为气态,使载冷剂温度降低;蒸发后的气态氨重新进入压缩机,完成循环。该系统通过连续循环实现持续制冷,核心优势在于液氨汽化潜热大,制冷效率高,且原材料成本低,适配混凝土预冷的大规模制冷需求。

1.2 混凝土预冷工艺与制冷需求

水电工程混凝土预冷工艺多采用“粗骨料一次风冷+粗骨料二次风冷+冷冻水+片冰”模式。粗骨料经两级风冷,温度可降低至0至4℃;拌和水多采用冷水机组或螺旋管蒸发器制备,温度可降低至1至3℃,部分项目还需制备片冰(温度可低至-5℃),确保浇筑温度达标。其核心制冷需求呈现三大特征:一是精准控温,需根据工程设计要求将混凝土浇筑温度控制在5至15℃,载冷剂温度

需稳定在-5至5℃;二是动态适配,需根据混凝土浇筑强度、原料初始温度的变化,灵活调整制冷量;三是兼顾性能,预冷过程需避免骨料冻结、含水率异常等异常情况出现,保障混凝土拌和质量^[1]。

1.3 耦合系统能量传递与效率形成机制

液氨制冷系统与混凝土预冷的耦合核心是能量的高效传递与转换,其能量传递路径清晰:电能输入驱动压缩机工作,转化为系统机械功;机械功作用下,液氨在制冷循环中完成“压缩-冷凝-节流-蒸发”的热能转换,通过蒸发器吸收载冷剂热量实现降温,液氨吸收的热量通过冷凝器与冷却水换热后释放至外界环境。降温后的载冷剂与混凝土原料(粗骨料、拌和水)进行热交换,吸收原料热量实现预冷;耦合系统效率的形成依赖多环节协同:制冷循环的热力学效率决定能量转换基础,蒸发器、冷凝器的传热效率影响能量传递效果,载冷剂输送效率决定能量传输损耗,预冷工艺与制冷量的匹配度则直接决定最终预冷效果,任一环节效率不足都会导致整体效率下降。

2 液氨制冷系统预冷效率影响因素分析

2.1 系统自身参数影响

系统自身参数是决定预冷效率的核心因素,主要包括核心设备性能与运行参数两类。核心设备性能方面,压缩机的容量、能效等级直接决定制冷量与能耗,低效压缩机易导致“大能耗、小制冷”的问题;冷凝器与蒸发器的换热面积、传热系数影响热交换效率,结垢、腐蚀会显著降低传热性能;节流阀的调节精度决定液氨节流后温度的稳定性,影响制冷量输出精度。运行参数方面,蒸发温度与冷凝温度的差值直接影响制冷系数(COP),差值过大易导致能耗激增;氨泵与载冷剂泵或冷风机的流量参数决定换热速率,流量不足会延长预冷时间,流量过大则增加输送能耗;另外,制冷剂充注量、系

统气密性也会极大影响制冷循环稳定性，进而降低整体预冷效率。

2.2 混凝土预冷工艺影响

混凝土预冷工艺的合理性直接影响制冷系统效率的发挥，核心影响因素包括预冷对象特性与工艺参数。预冷对象特性方面，骨料的含水率、初始温度、粒径分布影响热交换效率，高含水率骨料需吸收更多冷量，会增加制冷负荷；拌和水比例越高，预冷难度越小，但需平衡水灰比与混凝土强度^[2]。工艺参数方面，预冷时间需与施工节奏匹配，过长会导致冷量浪费，过短则无法达到目标温度；原料与载冷剂的接触方式（直接对流接触、间接换热）决定传热效果，直接接触换热效率更高，但需避免骨料含水率异常；搅拌速率影响原料温度均匀性，速率不足会导致局部温度过高，增加制冷系统负荷，间接降低预冷效率。

2.3 环境因素影响

环境因素通过影响制冷系统运行状态间接作用于预冷效率，核心包括环境温湿度、大气压力与风速。环境温度是关键影响因素，夏季高温会降低冷凝器散热效率，导致冷凝温度升高，制冷系数（COP）下降，能耗增加；冬季低温虽利于散热，但会增加骨料初始温度控制难度。环境湿度影响蒸发器结霜情况，高湿度环境下蒸发器易结霜，堵塞换热通道，降低传热效率，需频繁除霜，进一步增加能耗。露天施工场景中，大气压力影响液氨沸点，进而改变蒸发温度；风速则影响冷凝器散热效果，适宜风速可提升散热效率，但强风或无风会导致散热不稳定，影响制冷循环的连续性与稳定性，最终降低预冷效率。

3 液氨制冷系统预冷效率评估体系构建

3.1 评估指标构建原则

评估指标体系的构建是准确评估液氨制冷系统预冷效率的关键前提，必须严格遵循四项核心原则，以此保障评估结果的科学性与实用性。（1）针对性原则，液氨制冷系统与混凝土预冷之间存在着紧密且独特的耦合关系，这就要求指标设计必须充分考量这一特性，既要关注制冷系统自身的能效表现，也要重视对混凝土预冷效果的评估，绝不能简单照搬通用制冷系统的评估标准，否则会导致评估结果与实际情况脱节。（2）科学性原则，要依据热力学原理和能量平衡方程，精准界定每个指标的物理意义，并确定科学合理的量化方法，只有这样，才能确保评估结果能够客观、真实地反映出液氨制冷系统的效率水平。（3）系统性原则，评估不能局限于某一个方面，而应全面覆盖“系统运行-预冷效果-经济成本”等多个维度，形成一个完整、闭合的评估链条，避免因

单一指标的使用而造成评估的片面性。（4）实用性原则，指标数据要便于通过现场监测、查阅设备台账等方式获取，计算方法应尽可能简便易懂，以适配工程技术人员的实际操作需求，同时还要兼顾不同工程规模的通用性，确保评估体系具有广泛的适用性。

3.2 多维度评估指标体系

为了全面、准确地评估液氨制冷系统的预冷效率，需要构建一个涵盖系统能效、预冷效果、经济成本三大核心维度的多维度评估指标体系。在系统能效维度，制冷系数（COP）是核心指标之一，它是制冷量与系统消耗功率的比值，能够直观地反映出制冷循环的热力学效率；单位制冷量能耗（SCOP）则适用于变负荷工况，可综合评估不同施工负荷下的能效水平；换热器传热系数用于量化热交换设备的能量传递效率，对于评估制冷系统的换热性能至关重要。在预冷效果维度，混凝土降温速率是衡量预冷效率的关键指标，即单位时间内混凝土原料温度的降低值；预冷达标率则通过统计达到目标浇筑温度的混凝土量占比，来评估预冷的质量；温度均匀性通过测量同一批次混凝土的最大温度偏差，保障混凝土性能的稳定^[3]。在经济成本维度，单位混凝土预冷能耗反映了每吨混凝土达标所需的能耗成本；设备运行维护成本涵盖了制冷剂消耗、设备检修等各项费用，综合评估了液氨制冷系统的经济性。

3.3 评估方法与流程

为确保对液氨制冷系统预冷效率的评估结果精准全面，采用“能量平衡法+试验测试法+综合评分法”的组合评估方法。能量平衡法基于热力学第一定律，通过计算系统输入和输出的能量，能够量化制冷循环中的能量损失，从而明确效率提升的潜力所在。试验测试法则通过在现场布置温度、压力、功率等监测设备，实时采集系统运行数据，进而计算出各评估指标的实际值，为评估提供准确的数据支持。综合评分法结合层次分析法确定各指标的权重，对多维度指标进行加权评分，最终形成综合效率等级，使评估结果更加科学合理。评估流程分为五步：第一步明确评估范围与目标，确定评估的具体时段、施工工况以及核心指标；第二步合理布置监测点，确保数据采集能够覆盖关键环节；第三步进行数据采集与预处理，剔除异常数据，规范数据格式；第四步进行指标计算与综合评分，结合各指标权重得出综合效率等级；第五步输出评估报告，明确指出效率短板所在，并提出针对性的优化方向，为液氨制冷系统的优化改进提供有力依据。

4 液氨制冷系统预冷效率优化策略

4.1 系统运行参数优化

系统运行参数优化旨在达成“负荷适配、精准调控”的目标。首先,依据混凝土浇筑计划以及原料初始温度的监测数据,构建制冷量需求预测模型。此模型能够精准预估不同施工阶段所需的制冷量,进而动态调节蒸发温度与冷凝温度。通过合理控制,使制冷系数(COP)稳定处于最优区间,一般将蒸发温度控制在 -15 至 -5°C ,冷凝温度控制在 30 至 35°C 。同时,运用变频技术对压缩机与输送泵进行改造。依据施工负荷的实时波动,灵活调节它们的转速,有效避免在低负荷工况下出现“大马拉小车”的能源浪费现象,降低无效能耗。此外,建立运行参数动态调整机制至关重要。在夏季高温时段,适当提高氨泵流量,增强换热效率,确保预冷效果;而在冬季低温时段,优化冷凝器散热,降低冷凝温度,减少能量损耗。通过这种精细化的参数调控,全方位提升系统能效,实现节能与高效预冷的双重目标^[4]。

4.2 设备与系统配置优化

设备与系统配置优化着重于“提升性能、降低损耗”。冷凝器和蒸发器作为关键设备,其性能直接影响制冷效果。定期对它们进行清洗除垢,能有效去除换热表面的杂质与水垢,显著提升传热系数,增强制冷能力。并且,要根据预冷规模精准适配换热面积,避免设备出现冗余造成资源浪费,或能力不足影响预冷效果。系统保温设计也不容忽视,在制冷管道、低压储氨罐、蒸发器等部位采用高效保温材料,可大幅减少冷量在传输过程中的损失。同时,优化管道布局,缩短载冷剂输送距离,降低输送过程中的能耗。此外,配置智能监测与控制系统,能够实时监测液氨液位、压力、温度等关键参数。一旦出现异常,系统自动触发调节机制,保障系统稳定运行。选用高效节能型压缩机、氨泵等设备,从设备源头提升系统能效基础水平,为整个制冷系统的高效运行提供坚实保障。

4.3 预冷工艺协同优化

预冷工艺协同优化的核心在于实现“制冷需求与工

艺匹配”。在预冷过程中,要优化多环节预冷比例。根据骨料初始温度与拌和水比例,科学合理地分配各环节的制冷量。由于拌和水比热容大、预冷效率高,优先对其进行预冷,可显著降低整体制冷负荷,提高能源利用效率。改进预冷接触方式也是关键一环,对于粗骨料,采用风冷预冷工艺,冷风与粗骨料在料仓中直接对流接触,既能提升换热效率,又能有效控制骨料的含水率,保证混凝土质量。同时,优化搅拌流程,在预冷后适当延长搅拌时间,可使混凝土温度更加均匀,提升预冷效果。另外,建立施工与制冷协同机制十分必要,根据混凝土浇筑强度动态调整预冷时间,避免因过度制冷造成制冷量浪费;在浇筑间隙,降低系统运行负荷,仅维持基础制冷,通过工艺与制冷的深度协同,最大化提升整体预冷效率,实现大体积混凝土预冷的高质量与高效益。

结束语

液氨制冷系统在大体积混凝土预冷中发挥着不可替代的作用,其效率水平直接影响工程质量与经济效益。本文系统剖析液氨制冷系统与混凝土预冷的耦合机理,识别三类核心影响因素,构建多维度效率评估体系,提出涵盖运行参数、设备配置、工艺协同的优化策略,形成“机理-影响-评估-优化”的完整技术体系。未来可进一步融合智能算法与物联网技术,构建自适应优化系统,实现动态负荷下的实时调控;同时开展极端环境下的效率评估研究,拓展成果适配范围,为液氨制冷系统在混凝土预冷中的高效、安全应用提供更全面的技术支撑。

参考文献

- [1]时婷,肖仁杰,杨信林,等.液氨制冷系统安全替代技术研究进展[J].广东化工,2020,47(20):51-52,50.
- [2]刘宁宁.液氨制冷系统工艺与设备安全设施设计探讨[J].上海安全生产,2024(8):58-60.
- [3]王璐英.水利工程混凝土细骨料间接预冷技术的分析与应用[J].建筑与预算,2022(04):71-73.
- [4]李新明.水利工程混凝土细骨料间接预冷技术研究与应用[J].红水河,2020,39(02):45-48.