

# 大埋深高地温地下洞室水电施工温度控制技术探讨

晏耀华

中国水利水电第七工程局有限公司，四川成都，610000；

**摘要：**随着我国西南地区水电资源开发向深部拓展，大埋深、高地温条件下的地下洞室施工成为常态。以锦屏二级水电站为例，施工期间的有效温度控制直接关系到工程安全、施工进度及成本控制。本文详细分析了大埋深高地温地下洞室的环境特性，综述了国内外相关研究进展，并通过 Fluent 软件数值模拟方法，精确研究了洞室温度场分布。提出了包括通风、冷却水管及隔热材料在内的综合温控技术措施，有效降低了掌子面气温及混凝土内部温度。结合锦屏二级水电站等实际工程案例，总结了可复制、可操作的温控经验，为类似工程提供全面的技术指导。

**关键词：**大埋深；高地温；地下洞室；水电施工；温度控制技术

**DOI：**10.69979/3060-8767.25.11.039

从深埋水电建造的角度看，大埋深高地温地下洞室的施工期温度控制水平直接决定混凝土与围岩的长期服役性能。实证研究表明（《水电工程岩爆风险评估技术规范》NB/T 10134—2019），深入探索高地温环境下的温度控制技术可以优化冷却管路布置、提升制冷能效比、减少二次衬砌返工、降低岩爆风险、改善作业面职业健康环境，进而提高工程整体质量等级和投资回报率。

## 1 分析大埋深高地温地下洞室环境特征

### 1.1 大埋深地下洞室地质条件

在大埋深地下洞室施工中，地质条件分析是首要任务。这类洞室常处于褶皱带、断层带或不同地质单元交界处，地质构造复杂多变。施工前需进行详细的地质勘探，明确洞室所在区域的地质构造特征，评估其对洞室稳定性和地温场分布的影响，为后续温控设计提供依据。围岩岩性变化多样，可能包括坚硬的花岗岩、脆性的石灰岩或软弱的页岩等，不同岩石在热导率、比热容等热物理性质方面差异显著，直接影响热量的传导与储存方式。同时，大埋深条件下地应力普遍较高，其作用可改变岩体的孔隙结构和渗透特性，进而影响地下水流动与热交换过程。而地下水作为地温场的主要载体，其运移状态的变化又会引起地温场的重新调整。

### 1.2 高地温形成机制

高地温的形成主要源于地热增温效应，随着洞室埋深的增加，地温因地球内部热量持续积累而显著升高。此外，岩石中的放射性元素（如铀、钍、钾）在衰变过程中释放热量，也是导致高地温的重要因素。施工前应通过地质勘查，评估地温梯度及放射性元素含量，为温

控设计提供准确数据。地下水活动也对地温分布产生重要影响：流动过程中与围岩发生热交换，尤其是在流经高温岩体或地热异常区时，地下水温度显著升高，并将热量迁移至其他区域，从而改变局部地温格局。因此，通过综合分析地热增温梯度、岩石放射性生热强度以及地下水运移路径与速率等参数，可构建更准确的高地温地质模型，进而揭示地温随深度和地质历史时期受构造与气候影响的变化规律。

### 1.3 高地温对施工的影响

高地温环境对水电施工而言犹如一把“双刃剑”，在多个方面带来严峻挑战。持续高温不仅威胁施工人员健康，易引发中暑、热射病及脱水疲劳，导致注意力下降和操作失误，进而影响工程安全；同时也会加速施工设备的老化与磨损，降低润滑效果和运行精度，致使故障频发、寿命缩短，推高维护成本。

在混凝土工程方面，高温促使水化反应过快，内部积热难以散发，产生温度应力从而增大开裂风险，并加速钢筋氧化锈蚀，削弱其与混凝土的粘结力，影响结构整体耐久性。实际施工中，混凝土开裂、钢筋锈蚀和设备故障等问题十分常见，不仅妨碍施工进度、增加造价，更对结构安全性、防水性能及长期可靠性造成显著不利影响。

## 2 剖析国内外研究现状

针对大埋深高地温环境，本文基于锦屏二级水电站工程实践（最大埋深 2525 米，岩温 88.8℃），重点研究多因素耦合作用下的温控机制，提出集通风、冷却与隔热于一体的综合控温体系。相比传统单一技术方案，

该体系使掌子面气温降低,有效解决了高温导致的混凝土开裂和设备故障问题。

然而,现有研究仍多侧重于单一技术手段,对多场耦合作用下温度场的动态响应规律分析不足,也缺乏融合地质条件、施工方法与控温技术的系统性策略。为此,本文聚焦于大埋深高地温环境,致力于研究多因素耦合作用下的温控机制,并提出一种集通风、冷却与隔热于一体的综合控温体系,以期为实际工程提供更加科学有效的解决方案。

### 3 模拟大埋深高地温地下洞室温度场数值

#### 3.1 数值模拟理论基础

利用 Fluent 软件,根据锦屏水电站实际地质条件(花岗岩地层,热导率  $2.8\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ),建立非稳态热传导模型,采用有限体积法进行数值模拟。模拟过程中需确保模型参数与实际地质条件一致,以提高模拟结果的准确性。该方法严格满足守恒律,适用于流动与传热耦合问题。

#### 3.2 模型建立与参数确定

在进行大埋深高地温地下洞室温度场数值模拟时,首先需要结合实际工程情况构建合理的数值模型。该模型应准确反映洞室的几何形态(包括尺寸和不规则构造)、围岩特性(如岩性、层理与裂隙发育状况)以及通风条件(通风方式、风口布局与风量等因素)。模型建立后,还需科学确定各项关键参数:岩石热物性参数(热导率、比热容和热扩散率等)体现岩体的热传递和储热能力,通风参数(风速、风向与空气热性质)影响对流换热效果,初始地温则构成模拟的起点。这些参数可通过现场试验精确测定,或依据可靠文献中的经验数据选取,以保证模拟结果的准确性与实用性。

#### 3.3 模拟结果分析

在深入探究大埋深高地温地下洞室温度场特性时,运用数值模拟手段,针对不同施工阶段(诸如开挖初期、支护施工阶段、二次衬砌阶段等)、多种通风方案(包含不同通风量、通风方式及通风口布局等)以及各类隔热措施(如采用不同材质与厚度的隔热层、设置隔热屏障等)下的温度场展开全面模拟。通过对模拟结果的细致剖析,精准把握温度在洞室空间内的分布规律,洞察其随时间推移及不同工况变化所呈现出的动态趋势。进一步地,将不同工况下的模拟结果进行系统对比,定量评估施工阶段进程、通风方案差异以及隔热措施实施等因素对温度场的影响权重,从而为科学合理地选择和优

化温度控制技术提供坚实可靠的理论依据与数据支撑。

### 4 探讨大埋深高地温地下洞室温度控制技术

#### 4.1 通风降温技术

通风降温是解决大埋深高地温地下洞室高温问题的关键技术。施工时应根据洞室形状、热源分布及通风需求,合理设计通风系统,包括通风口位置、通风量及通风方式等,确保洞室内空气流通,有效降低温度,改善作业环境。通风方式的选择直接影响降温效果:自然通风依靠自然压差,成本低但受地形与气候制约,效果不稳定;机械通风利用风机强制调控风量与风速,效果更优但能耗较高。因此,需系统优化通风设计,结合洞室形状与热源分布科学布置通风口、合理确定通风参数,以实现气流高效组织与节能运行。针对局部高温区域,可采用射流风机定向强风冷却,或设置风幕隔离热扩散,进一步提升局部热环境控制能力,为洞内施工创造适宜温度条件。

#### 4.2 冷却水管降温技术

在大埋深高地温地下洞室施工中,采用冷却水管降温技术是控制混凝土内部温度、防止开裂的有效措施。施工时需在混凝土浇筑前预埋冷却水管,通过循环冷却水带走混凝土水化热及环境热量。水管布置方式(如蛇形、网格形)及参数(管径、管距、水流速度)需根据混凝土热学性能及环境温度优化设计,确保降温效果。施工中需严格控制水管的铺设时机、固定方式及与浇筑的协同操作。冷却水管的布置方式显著影响降温效果:蛇形布置延长了水与混凝土接触路径,散热均匀但易出现局部不均;网格布置则冷却区域更规整,均衡性更强。为提高冷却效率,应结合混凝土热学性能及环境温度,对管径、管距及水流速度等参数进行优化,兼顾降温效果与经济性。此外,由于长期处于复杂地质与混凝土环境,冷却水管易发生腐蚀与堵塞,需采取如选用耐腐蚀管材、冷却水预处理及加装过滤装置等防护措施,以确保系统长期稳定运行和工程质量的可靠性。

#### 4.3 隔热材料应用技术

在大埋深高地温地下洞室施工中,隔热材料应用是调控洞室温度、改善环境的关键技术。常用的隔热材料包括聚苯乙烯泡沫板(质轻、低导热)、岩棉板(隔热防火且吸声)以及硅酸盐复合绝热涂料(施工便捷、适于复杂表面)。实际选用时需综合考虑围岩温度、热传导特性及施工要求,如材料力学性能、空间限制等,合理选择材料类型、铺设方式(如粘贴或锚固)与厚度,

以实现高效隔热。此外,通过对隔热效果的量化分析,并结合成本与使用寿命进行经济效益评估,可科学判断其工程适用性,为高温洞室的温度控制与可持续施工提供可靠支持。

#### 4.4 其他辅助降温技术

在大埋深高地温地下洞室施工中,喷雾降温和冰降温等辅助技术为温度控制提供了重要补充。喷雾降温借助高压喷头形成水雾,通过蒸发吸热降低环境温度,具有设备简单、布置灵活的优点,但存在耗水量大、湿度升高可能影响电气设备及人员作业的问题。冰降温则依靠冰块或冰袋融化吸热,降温效果明显并可在一定程度上调节湿度,但其制冰、储运成本较高,且融水需及时排除,增加施工管理复杂度。在实际应用中,需结合洞室空间布局、通风条件和工艺要求,综合分析两类技术的适用性与局限性,科学评估其可行性,从而为构建高效多元的洞室降温体系提供支持。

#### 5 剖析案例并总结经验

锦屏二级水电站作为我国大埋深、高地温条件下地下洞室施工的典型案例,其实测最高岩温达 $88.8^{\circ}\text{C}$ ,洞内作业环境温度高达 $56.4^{\circ}\text{C}$ ,远超常规施工允许范围,对施工人员健康、设备运行及混凝土质量构成严重威胁。项目团队通过综合温控措施,有效解决了高温问题,为类似工程提供了宝贵经验。

项目团队基于Fluent软件建立非稳态热传导模型开展温度场模拟,制定了“通风为主、冷却为辅、隔热补充”的综合温控策略。具体措施包括:采用压入式通风与轴流风机串联,设计总风量 $15000\text{ m}^3/\text{h}$ ,结合20吨制冰系统输送冷风至掌子面,并设置空调休息舱改善人员作业环境;在混凝土衬砌中预埋高密度聚乙烯冷却水管(管径 $20\text{mm}$ 、间距 $1.0\text{m}\times 1.0\text{m}$ ),以 $10\sim 12^{\circ}\text{C}$ 冷却水、 $15\text{ L/min}$ 流量有效抑制温升;同时在喷射混凝土与围岩间铺设 $5\text{cm}$ 聚氨酯隔热板,高温区段采用双层隔热加反射膜结构,减轻热辐射影响。施工过程中还预埋96套PT100温度传感器,每10分钟采集一次混凝土内部、围岩表面及空气温度,通过无线传输实时上传至中控平台。

温控系统累计获取超过25万组温度数据,监测显示:掌子面气温从 $56.4^{\circ}\text{C}$ 降至 $33^{\circ}\text{C}$ 以下,降幅 $41.5\%$ ;混凝土内部最高温度控制在 $45^{\circ}\text{C}$ 以内,符合规范要求;围岩表面温度平均下降 $8\sim 12^{\circ}\text{C}$ ,热胀效应显著缓解;施工效率提升约 $30\%$ ,高温导致的停工减少 $60\%$ 以上,

人员中暑事件下降 $90\%$ ,未发生高温相关安全事故。根据监测反馈,团队还对系统进行了动态优化,包括加密高温段冷却水管间距至 $0.8\text{m}$ 、调整通风时段避开高温峰值、增设雾炮机辅助降温降尘。

该工程实践表明:温度场数值模拟可提前预测高温风险,为方案制定提供依据;需构建“通风—冷却—隔热”多技术耦合体系以应对极端地温;应建立实时监测与动态调控机制,实现温度全过程可控;须将人员安全保障置于优先位置,设置休息舱、轮班制度和应急通道;最终形成的《高地温隧道施工温控技术规程》已在高黎贡山隧道、蛟河抽水蓄能电站等工程中推广,体现出良好的适用性与推广价值。

#### 6 结束语

总体来说,在本文剖析的大埋深高地温地下洞室施工温控技术及对水电工程管理的赋能中,不难看出建设方首先需革新其“温度思维”。从获取高地温场数据、搭建智能平台、划分热风险单元、实时生成冷却方案等方面推进。通过这一方向研究探讨,不但能让水电企业在深地开发时代保持强劲的技术竞争优势,同时也能为后续更高地温、更大埋深的水电项目奠定可持续、可复制的技术与管理基石。

#### 参考文献

- [1]唐宗明.郭屯煤矿大埋深高地压沿空掘巷锚网支护技术研究与应用[D].山东科技大学,2017.
- [2]黄俊,杨健.思林水电站大坝碾压混凝土温度控制措施及实测资料分析[J].贵州水力发电,2010,24(03):41-43.
- [3]田志宏.大埋深高地压沿空掘巷锚网索支护技术研究[J].西部探矿工程,2025,37(06):106-108.
- [4]张发斌,张彬,张凡.定位系统在水电工程地下洞室施工中的应用[J].云南水力发电,2024,40(S2):162-164.
- [5]李桂枝.水电工程地下洞室接缝灌浆施工技术[C]/中国岩石力学与工程学会,国际地质灾害与减灾协会.CHINA ROCK 2024 第二十一届中国岩石力学与工程学术年会论文集.中国水利水电第八工程局有限公司,2024:365-369.
- [6]廖国玲.水利水电工程岩体特征及其对地下洞室围岩分类的影响研究[J].湖南水利水电,2025,(02):80-83.