

## 水利工程

## 水利工程中双曲拱坝大体积混凝土施工技术及其实践探讨

王明芳

贵州水利实业有限公司

DOI: 10.32629/jpm.v7i1.8689

**[摘要]** 本文围绕水利工程中双曲拱坝大体积混凝土施工展开探讨。阐述了其特点，包括复杂温度应力场分布、高强度抗裂耐久要求、空间曲面精准成型挑战及分层浇筑层间结合难题。详细介绍了低热高性能配合比设计、精准高效温控防裂、双曲面模板定型技术以及全机械化连续浇筑工艺等施工技术要点。同时提出施工策略优化方向，如施工全过程动态仿真推演、多作业面智能协同调度、基于大数据的温控自适应调控和全产业链绿色低碳集成，旨在为双曲拱坝高质量建设提供全面的理论与实践参考，促进水利事业发展。

**[关键词]** 双曲拱坝；大体积混凝土；施工技术

## Exploration into the Construction Technology and Practice of Large Volume Concrete for Hyperbolic Arch Dams in Water Conservancy Engineering

Wang Mingfang

Guizhou Water Conservancy Industry Co., Ltd.

**[Abstract]** This article explores the construction of large volume concrete for hyperbolic arch dams in hydraulic engineering. It elaborates on its characteristics, including complex temperature stress field distribution, high-strength crack resistance and durability requirements, challenges in precise shaping of spatial surfaces, and difficulties in interlayer bonding during layered pouring. Detailed introductions were given on key construction techniques such as low heat and high-performance mix design, precise and efficient temperature control and crack prevention, hyperbolic formwork shaping technology, and fully mechanized continuous pouring process. At the same time, the direction of optimizing construction strategies is proposed, such as dynamic simulation and deduction of the entire construction process, intelligent collaborative scheduling of multiple work surfaces, adaptive temperature control based on big data, and green and low-carbon integration of the entire industry chain. The aim is to provide comprehensive theoretical and practical references for the high-quality construction of hyperbolic arch dams and promote the development of water conservancy industry.

**[Key words]** hyperbolic arch dam; Large volume concrete; construction technique

随着水利事业的发展，双曲拱坝的建设日益增多，环境温度是影响大体积混凝土施工质量的重要因素。在施工期间若环境温度过高，混凝土内外部将会出现明显温差，形成温度应力，最终因为内外温差过大出现裂缝现象。为解决这一问题，本文着重分析了混凝土温度应力的影响因素并提出多种应对措施

### 一、双曲拱坝大体积混凝土的特点

#### (一) 复杂温度应力场分布

双曲拱坝大体积混凝土内部温度场具有高度的非线性、时变性。水泥水化放出的热量被厚重的坝体所包裹，散热途径被严重地限制，内部温度急剧上升。内外温差明显，加上基础约

束的作用，形成了非常复杂的温度应力场。应力集中现象容易出现在孔口周围、体型突变处、基础强约束区，这些地方是裂缝萌生和发展的高危区。正确预测并有效控制该温度应力场是防止结构出现裂缝、保证大坝完好无损的前提。

#### (二) 高强度抗裂耐久要求

双曲拱坝对混凝土的力学性能和耐久性提出近乎苛刻的双重要求。混凝土除了要具有高抗压强度来承受巨大的水荷载和自重外，还必须有良好的抗拉性能和极限拉伸值来抵抗温度应力和收缩应力。耐久性上混凝土要达到高抗渗、抗冻融、抗侵蚀等长期性能指标，保证大坝在设计寿命期内安全运行。因

此混凝土配合比设计已经超出了普通的强度范围,进入了性能基础的精细化设计阶段,重视体积稳定性和长期耐久性的统一。

### (三) 空间曲面精准成型挑战

双曲拱坝是双向弯曲空间薄壳结构,对混凝土的成型精度有很高的要求<sup>[1]</sup>。任何局部的体型偏差都会改变坝体的应力传导路径,引起次生应力,影响结构安全。因此模板工程成为施工中重要的一个环节。模板系统要满足设计复杂的曲面,在多次使用后不能降低精度,必须有足够的刚度和稳定性。施工测量控制网也必须具有很高的精度和可靠性,才能实现浇筑体型的实时监控和动态调整。

### (四) 分层浇筑的层间结合难题

由于温控要求和施工能力的限制,大体积混凝土必须采用分层分块浇筑的方式。这必然会形成大量的水平施工缝。施工缝作为一个相对薄弱的界面,结合质量的好坏直接关系到坝体的整体性、抗渗性和抗剪能力。如果处理不当,缝面就会成为渗漏通道或者应力集中区。因此,怎样通过科学的缝面处理工艺、合理的层间间歇时间控制、优质的结合面混凝土浇筑来实现无缝的整体性能,是施工中不断面对的技术课题。

## 二、双曲拱坝大体积混凝土施工技术要点

### (一) 低热高性能配合比设计

双曲拱坝大体积混凝土施工时,低热高性能配合比设计是保证工程质量、耐久性的基础工作。水泥选择上摒弃传统高热水泥,采用低热硅酸盐水泥,水化热比普通硅酸盐水泥低15-20kJ/kg左右,可以减少混凝土内部温升,降低温度裂缝产生的概率。为了进一步提高混凝土的性能,在混凝土中掺入适量的矿物掺合料是非常必要的。粉煤灰作为掺合料,在每立方米混凝土中掺入120kg至180kg时,不但能填充混凝土内部的孔隙,提高混凝土的密实度,而且能与水泥水化产物发生二次反应,提高混凝土的后期强度。掺入50到100kg矿渣粉,微集料效应和火山灰活性可以改善混凝土界面结构,提高抗渗性能和抗化学侵蚀能力。外加剂的精准添加也不能忽视,高效减水剂的加入可以使混凝土用水量减少15-25kg/m<sup>3</sup>,在保持坍落度不变的情况下,明显提高混凝土强度,28天抗压强度可提高5-10mpa。另外适量加入缓凝剂,可使混凝土的凝结时间延长2-4h,给施工操作提供更充裕的时间,保证混凝土浇筑质量。粗骨料采用级配良好的碎石,最大粒径控制在150mm以内,细骨料采用中砂,细度模数在2.6-3.0之间,通过合理级配设计,可使混凝土孔隙率降低到35%以下,提高混凝土整体性能。

### (二) 精准高效的温控防裂

精准高效的温控防裂技术属于双曲拱坝大体积混凝土施工的关键部分。原材料预冷时,对骨料采用喷淋冷水降温的方式,可使骨料温度降低8-12k,拌合水冷却处理,将水温控制在5-8k,通过一系列预冷措施,混凝土出机口温度可降

低4-6k,有效控制混凝土初始温度。在混凝土内部埋设冷却水管,是带走水化热的主要手段。冷却水管一般用直径为30mm至50mm的钢管或者塑料管,按梅花形布置,间距为1.0m至1.5m。混凝土浇筑后1-3天通水流量控制在12-18l/min,根据混凝土内部温度监测结果,动态调整通水时间和流量。通过冷却水管通水,可以使混凝土内部最高温度降低12-16k,使混凝土内部与表面温差控制在20k以内,有效减小温度应力,防止裂缝产生。混凝土表面保温养护也十分重要,采用覆盖保温被和塑料薄膜的双重保温措施,保温被厚度不小于3cm,可使混凝土表面热扩散系数降低到0.002-0.003m<sup>2</sup>/h,减少表面热量散失,防止表面裂缝。寒冷季节可搭建保温棚,提高混凝土周围环境温度,保证混凝土强度正常发展。建立完善温度监测系统,在混凝土内部不同深度、不同位置埋设温度传感器,实时采集温度数据,经由数据采集系统传送到监控中心,对混凝土温度实施动态监测和精准调节。

### (三) 双曲面模板定型技术

双曲面模板定型技术对于双曲拱坝的外观质量、结构尺寸精度起着决定性的作用<sup>[2]</sup>。在模板材料选择上,钢模板由于刚度大、强度高、重复使用率高等优点被选作首选。采用厚度为6-8mm的优质钢板制作模板,可以保证模板在浇筑过程中变形量很小,保证双曲面形状的准确性。对于复杂的曲面部位,用计算机辅助设计(CAD)和计算机辅助制造(CAM)技术来设计模板并加工,通过数控机床精确加工模板曲面,使模板曲面偏差控制在±1.5mm以内,大大提高了模板加工精度。模板安装定位为关键环节,用全站仪、激光铅直仪等高精度测量仪器进行模板定位,保证模板位置偏差在±3mm以内。在模板安装时设置足够数量、足够强度的支撑、拉杆,支撑间距根据模板高度、混凝土侧压力确定,一般为0.8-1.2m,拉杆直径不小于16mm,间距为1.0-1.5m,保证模板在浇筑过程中稳定、整体。对于双曲面模板的拼接,采用特殊的拼接工艺及密封材料,保证模板拼接严密,无错台、漏浆现象。模板拆除时间要根据混凝土强度增长情况而定,当混凝土强度达到2.5mpa以上时才可拆除模板,在拆除过程中要保护好混凝土表面,不能碰撞、刮擦。拆除后的模板要立即进行清理、维修、保养,涂刷脱模剂,以提高模板的重复利用率,降低工程成本。

### (四) 全机械化连续浇筑工艺

全机械化连续浇筑工艺是提高双曲拱坝大体积混凝土施工效率和质量的重要保障<sup>[3]</sup>。机械设备选型配套按照工程规模及施工条件选择合适的混凝土搅拌站、运输设备和浇筑设备。混凝土搅拌站采用生产能力为80-100m<sup>3</sup>/h的双卧轴强制式搅拌机,能保证混凝土的均匀性及质量稳定性。运输设备采用容量为10~12m<sup>3</sup>的混凝土搅拌运输车,运输过程中保持罐体转速在2~4r/min,防止混凝土离析。浇筑设备采用塔带机和缆机组合的方式,塔带机浇筑效率高、覆盖范围大,浇筑速度可达60-80m<sup>3</sup>/h,适合大面积混凝土浇筑;缆机灵活性好,能

适应复杂地形和双曲面部位的施工，起重量可达 20 - 30t，能满足不同的浇筑高度。混凝土运输组织上制定详细的运输路线规划，合理安排运输车辆数量和运输间隔时间，保证混凝土供应连续、均匀。运输过程中严格控制混凝土搅拌运输车行驶速度，防止颠簸、急刹车，减少混凝土分层、离析现象。在浇筑过程中采用分层分段浇筑的方法，分层厚度控制在 2.0 到 3.0 米之间，每层浇筑间隔时间不超过混凝土初凝时间。振捣采用插入式振捣器和平板振捣器相结合的方式，插入式振捣器移动间距不大于振捣棒作用半径的 1.5 倍，一般为 300 - 400mm，振捣时间控制在 20 - 30s，以混凝土表面不再下沉、无气泡冒出、表面泛浆为准。平板振捣器用来做表面振捣和平整，保证混凝土表面平整度达到设计要求。采用全机械化连续浇筑工艺可以大大提高施工效率，缩短工期，保证混凝土浇筑质量，为双曲拱坝的安全运行奠定基础。

### 三、双曲拱坝大体积混凝土施工策略优化

#### (一) 施工全过程动态仿真推演

掌握好核心技术要点的基础上完成双曲拱坝的高质量建设，确保工程的高质量完成。施工全过程动态仿真技术的引入，是改善施工方案、预控施工风险的主要方法。该策略在工程开工之前，依靠准确的 BIM 模型，把地质地形、坝体结构、施工机械、材料性质、环境气候等各方面的数据综合起来，创建虚拟建造环境。仿真系统可以模拟混凝土生产、运输、浇筑、温控养护全过程。经过推演后能准确预知不同施工期坝体温度场、应力场变化，从而事先发现高温区、应力集中区等存在的潜在风险点。同时仿真可以检验施工机械布置是否合理，优化缆机运行轨迹和塔带机站位，防止设备干涉，提高浇筑效率。将施工由“经验试错”变为“模拟优选”，给科学施工组织设计提供量化的决策依据，大大降低了现场施工的不确定性。

#### (二) 多作业面智能协同调度

建立以物联网和人工智能为基础的多作业面智能协调调度系统，就是提升施工效率和资源利用率的优化之本<sup>[4]</sup>。双曲拱坝施工存在多个浇筑仓面同时施工的情况，传统的调度方式需要人工来协调，容易造成资源冲突或者工序间歇。智能调度系统通过安装在拌和楼、运输车、浇筑设备以及仓面的各类传感器来获取混凝土生产强度、车辆位置、仓面准备情况、浇筑进度等大量数据。系统内置的 ai 算法按照实时工况、施工优先级、资源约束条件，实时生成最佳的调度指令。指令由系统自动下达到混凝土生产、运输车、仓面指挥终端，保证混凝土供应与浇筑设备无缝对接。该系统可以保证各个作业面协调推进，使施工流水线如同一个智能工厂般运转，从而达到整个施工流水线工期压缩、成本节约的效果。

#### (三) 基于大数据的温控自适应调控

推动温控策略从预设程序控制向大数据学习的自适应调控升级，就是温度裂缝防治策略的深度优化。传统的通水冷却可以实现自动化，但是参数设置仍然要靠经验公式和前期仿

真。自适应调控策略是以大数据积累、机器学习为基础建立起来的。系统汇集了历史工程及本工程已浇筑块的海量数据，包括混凝土配合比、浇筑温度、冷却通水参数、全过程温度监测记录及最终裂缝检查结果。机器学习模型经过训练之后，可以不断发现复杂的非线性关系，自主寻找出各个季节、各个坝段、各个浇筑层厚的个性化最佳温控曲线。系统根据实时的温度数据以及预测模型输出，实时地调节各冷却回路的通水参数，甚至预测裂缝风险，提前进行干预。数据驱动的自适应策略，可以更精细化地控制温度应力，提高防裂效果的可靠性以及经济性。

#### (四) 全产业链绿色低碳集成

实行原材料、生产、施工、废弃物全产业链绿色低碳集成策略，是顺应可持续发展要求的必然选择<sup>[5]</sup>。该策略从源头上优先选用地方性材料、工业副产胶凝材料，减少长距离运输以及水泥熟料的使用，降低隐含碳排放。在混凝土生产过程中使用变频节能设备，采用太阳能等清洁能源，实现废水废渣零排放循环利用。在浇筑养护阶段研发应用可降解环保型养护剂和保温材料。建立施工废弃物分类回收与资源化利用体系，将废弃模板加工成临时设施材料，将混凝土试块破碎成骨料。通过创建贯穿设计、采购、施工、运维的绿色评价指标体系，把低碳目标量化并纳入工程管理全过程。不仅降低水利工程建设对环境的影响，而且以资源的高效利用获得长期的经济效益，使水利工程建设走向环境友好型的道路。

### 结束语

综上所述，双曲拱坝大体积混凝土施工是一项综合性强且极具挑战性的工程任务。通过对施工技术要点的深入剖析以及施工策略的优化探索，我们明确了保障工程质量的关键路径。在实际施工中，应充分融合各项技术与策略，严格把控从原材料到浇筑养护的每一个环节，以实现双曲拱坝在力学性能、耐久性以及外观质量等多方面的卓越表现，确保其在水利枢纽工程中安全稳定地发挥重要作用，推动我国水利工程建设不断迈向新的高度，为经济社会的可持续发展奠定坚实基础。

### [参考文献]

- [1]刘邦贵, 农炳作, 张慧. 外掺氧化镁常态混凝土双曲拱坝施工质量控制技术应用[J]. 工程质量, 2025, 43(08): 98-102.
- [2]杨浩. 双曲拱坝与碾压混凝土组合施工技术的应用分析[J]. 科技资讯, 2025, 23(04): 188-190.
- [3]石海超. 高效施工技术在碾压混凝土双曲拱坝的分析实践[J]. 陕西水利, 2025, (02): 108-109+112.
- [4]李立军, 孟伟峰, 潘伟军. 双曲拱坝大悬挑曲线现浇混凝土表孔施工技术研究[J]. 珠江水运, 2024, (01): 71-73.
- [5]庞书起. 水利工程中双曲拱坝大体积混凝土施工及优化[J]. 江西建材, 2023, (01): 203-204+207.

作者简介：王明芳，出生 1994 年 9 月 16 日，男，籍贯：贵州省兴义市人，研究方向：水利水电工程。