

抽水蓄能电站地下工程施工技术

李世鹏

中国水利水电第四工程局有限公司第二分局 甘肃 定西 730500

摘要：抽水蓄能电站地下工程是一项复杂而精细的建设任务，其特点在于地下厂房规模宏大、结构复杂，且施工环境恶劣，面临高水位复杂地质条件和丰富地下水等挑战。关键技术包括洞室开挖与支护、混凝土施工技术、灌浆施工技术以及压力钢管的制造与安装。随着技术创新与突破，新材料、新设备及智能化、自动化施工的应用成为发展趋势，旨在提高施工效率、保障工程质量，并注重环保与可持续发展，减少对周边环境的负面影响。

关键词：抽水蓄能电站；地下工程；施工技术

引言：抽水蓄能电站作为电力系统的重要调节设施，其地下工程部分承载着发电、抽水及水力调节等关键功能，施工难度大，技术要求高。随着能源结构的调整和智能电网的发展，抽水蓄能电站的建设规模日益扩大，地下厂房的施工技术显得尤为重要。本文旨在综述抽水蓄能电站地下工程的施工特点、关键技术及其最新进展，以期为工程师们提供理论指导和实践参考，推动抽水蓄能电站建设技术的不断创新与发展。

1 抽水蓄能电站地下工程特点与难点探析

1.1 地下厂房的特点

抽水蓄能电站的地下厂房是整个电站的“心脏”，承担着发电、抽水和水力调节等重要功能。其特点主要体现在以下几个方面：（1）规模宏大。地下厂房不仅体积庞大，而且内部结构复杂，集成了众多机械、电气和水力设备。这种规模宏大的特点要求施工过程必须精细规划，确保每一个细节都符合预期设计要求。（2）跨度大、边墙高、结构复杂。为了满足发电和抽水效率的需求，地下厂房往往具有较大的跨度和高耸的边墙。同时，内部结构复杂多变，包括机组段、母线洞、变压器洞等多个功能区域。这些特点增加了施工难度，要求施工团队具备高超的技术水平和丰富的施工经验。（3）交叉洞室多、围岩稳定性要求高。地下厂房内部存在多个交叉洞室，这些洞室不仅增加了施工的复杂性，还对围岩的稳定性提出了更高要求。一旦围岩失稳，将对电站的安全运行构成严重威胁^[1]。

1.2 施工环境复杂性

抽水蓄能电站地下工程的施工环境极为复杂，主要体现在以下几个方面：（1）高水位以下的复杂地质条件。地下厂房通常位于地下水位以下，且地质条件复杂多变。这要求施工团队必须对地质条件进行详尽的勘察和分析，以确保施工过程的顺利进行。（2）地下水丰

富、裂隙发育。丰富的地下水和发育的裂隙增加了施工难度。在开挖过程中，必须采取有效的排水和防渗措施，以防止地下水对施工进度和质量造成不利影响。同时，裂隙发育的围岩更容易发生失稳，需要特别注意支护措施的实施。

1.3 技术难点概述

抽水蓄能电站地下工程的技术难点主要集中在以下几个方面：（1）洞室开挖与支护。由于地下厂房规模宏大、跨度大且结构复杂，洞室开挖过程中必须严格控制开挖轮廓和进度，以确保围岩的稳定性。同时，支护措施的实施也至关重要，必须根据围岩的实际情况选择合适的支护形式和材料。（2）混凝土衬砌与灌浆。混凝土衬砌是保护洞室围岩、提高电站运行安全性的重要措施。在衬砌过程中，必须确保混凝土的质量和密实度，以满足设计要求。此外，灌浆技术的实施也是关键，必须确保灌浆材料的渗透性和扩散性，以达到预期的加固效果。（3）压力钢管的制造与安装。压力钢管是抽水蓄能电站中的重要组成部分，承担着传递水压力和流量的重要任务。其制造与安装过程必须严格控制质量，确保钢管的强度和密封性符合设计要求。同时，由于钢管通常位于地下深处，安装过程也面临着诸多挑战。

2 抽水蓄能电站地下工程施工关键技术

2.1 洞室开挖及支护技术

（1）开挖施工程序与通道布置。洞室开挖是地下工程施工的首要步骤，合理的开挖施工程序和通道布置对于提高施工效率和保障施工安全至关重要。一般来说，洞室开挖应遵循“先上后下、先外后内、分段开挖、逐步支护”的原则。通道布置则需考虑施工机械的运行路径、材料运输和人员疏散的需求，确保施工过程中的物流顺畅和人员安全。（2）掘进方式与钻爆参数。掘进方式的选择取决于地质条件、洞室尺寸和施工要求。

在抽水蓄能电站地下工程中，常用的掘进方式包括手工掘进、机械掘进和钻爆法掘进。钻爆法掘进因其适应性强、灵活性高而被广泛应用。钻爆参数的选择，包括炮眼布置、装药量、起爆顺序等，对掘进效率和洞室稳定性有重要影响。合理的钻爆参数能够减少围岩扰动，提高开挖效率，降低安全风险^[2]。（3）支护形式及设备选型。支护是保障洞室稳定性的关键措施。在抽水蓄能电站地下工程中，常用的支护形式包括锚杆支护、锚索支护和混凝土喷护。锚杆和锚索通过深入围岩内部，提供额外的支撑力，增强围岩的稳定性。混凝土喷护则能够迅速封闭围岩表面，减少风化作用，提高洞室的耐久性。在支护设备选型上，应选择性能可靠、操作简便的设备，如锚杆钻机、锚索张拉设备和混凝土喷射机等。锚杆无损检测技术是评估锚杆支护质量的重要手段。通过检测锚杆的锚固力、长度和位置等参数，可以及时发现潜在的安全隐患，确保支护系统的可靠性和稳定性。

2.2 混凝土施工技术

（1）模板技术与应用。混凝土施工是地下洞室衬砌的关键环节。模板技术的选择和应用对于提高混凝土衬砌的平整度和耐久性至关重要。在抽水蓄能电站地下工程中，常用的模板形式包括木模板、钢模板和组合模板。木模板成本低、易加工，但耐用性较差；钢模板强度高、耐用性好，但成本较高；组合模板则结合了木模板和钢模板的优点，具有较高的性价比。（2）混凝土拌合、运输与浇筑。混凝土的拌合、运输和浇筑过程需要严格控制，以确保混凝土的质量和性能。拌合过程中，应严格按照设计配比进行，确保混凝土的强度、耐久性和工作性能满足要求。运输过程中，应采取有效措施防止混凝土离析和温度损失。浇筑过程中，应严格控制浇筑速度和振捣强度，确保混凝土密实度和均匀性。（3）混凝土质量控制与检测。混凝土质量控制是保障地下洞室衬砌质量的关键。在施工过程中，应对混凝土的原材料、拌合物性能、浇筑质量和养护条件进行全面监控。同时，还需进行混凝土强度、耐久性和外观质量检测，确保混凝土衬砌满足设计要求^[3]。

2.3 灌浆施工技术

（1）灌浆材料与设备。灌浆材料的选择对于提高灌浆效果和保障洞室稳定性至关重要。常用的灌浆材料包括水泥浆、水泥-水玻璃双液浆和化学浆等。在选择灌浆材料时，应充分考虑地质条件、灌浆目的和施工要求。灌浆设备则应选择性能稳定、操作简便的设备，如灌浆泵、混合器和灌浆管等。（2）高压灌浆对围岩、混凝土结构的影响。高压灌浆是提高围岩稳定性和增强混凝

土结构强度的重要手段。然而，高压灌浆过程中产生的压力和温度对围岩和混凝土结构可能产生不利影响。因此，在灌浆过程中应严格控制灌浆压力和速度，避免对围岩和混凝土结构造成损伤。（3）提高灌浆效果的措施。提高灌浆效果的关键在于优化灌浆参数和改进施工工艺。合理的灌浆参数包括灌浆压力、灌浆速度、灌浆浓度和灌浆时间等。通过调整这些参数，可以提高灌浆液的渗透性和扩散性，增强灌浆效果。同时，还应采用先进的施工工艺和设备，如分段灌浆、循环灌浆和智能灌浆等，以提高灌浆效率和质量。

2.4 压力钢管的制造与安装技术

（1）高强度钢板的成型与焊接。压力钢管作为抽水蓄能电站的核心部件，其制造质量直接关系到电站的安全运行。高强度钢板是制造压力钢管的主要材料，其成型和焊接过程需严格控制。在成型过程中，应采用先进的卷板机和预弯设备，确保钢板的弯曲精度和形状稳定性。在焊接过程中，应选择高性能的焊接设备和材料，并采用合理的焊接工艺和参数，以确保焊缝的质量和强度。同时，还应对焊缝进行严格的无损检测和力学性能试验，以确保焊接质量符合设计要求。（2）焊后应力处理技术。焊后应力处理是压力钢管制造过程中的重要环节。由于焊接过程中会产生残余应力和变形，因此必须对钢管进行焊后应力处理。常用的焊后应力处理方法包括局部加热法、振动时效法和爆炸消除应力法等。这些方法能有效地减少残余应力和变形，提高钢管的力学性能和稳定性^[4]。（3）安装工艺与质量控制。压力钢管的安装过程需严格控制安装精度和质量。在安装前，应对钢管进行全面检查和测量，确保其几何尺寸、形状精度和表面质量符合设计要求。在安装过程中，应采用先进的安装工艺和设备，如吊装设备、定位装置和调整工具等。同时，还应加强安装过程中的监控和检测工作，及时发现和处理安装中的问题。在安装完成后，还应对钢管进行全面的质量检查和验收工作，确保其满足设计要求和使用要求。

3 抽水蓄能电站地下工程施工技术的发展趋势

3.1 技术创新与突破

（1）新材料、新设备的应用。在抽水蓄能电站地下工程施工中，新材料和新设备的引入是推动技术创新的重要途径。新材料，如高性能混凝土、耐腐蚀高强度钢材等，不仅能够提升工程的耐久性和安全性，还能在一定程度上减少材料消耗，降低工程成本。例如，高性能混凝土的使用，可以显著提高混凝土的强度和抗渗性，减少裂缝的产生，从而延长工程的使用寿命。新设备的

应用同样至关重要。随着机械化、自动化程度的提高，各类高效、智能的施工设备不断涌现，如多功能钻机、大型吊装设备等，这些设备的应用极大地提高了施工效率和质量。特别是针对复杂地质条件下的施工难题，新设备的引入往往能够找到更为高效、安全的解决方案。

(2) 施工工艺与方法的改进。施工工艺与方法的改进是技术创新的另一重要方面。传统的施工工艺和方法在某些方面可能已难以满足现代抽水蓄能电站地下工程的施工需求。因此，通过不断优化施工工艺和流程，引入先进的施工技术和方法，如预裂爆破、光面爆破等，可以显著降低对围岩的扰动，提高开挖精度和效率。同时，针对特定施工环节的技术创新，如锚杆支护技术的改进、混凝土喷护工艺的优化等，也能进一步提升工程的整体质量和稳定性。

3.2 智能化与自动化施工

(1) 智能多臂钻、智能定位系统的应用。智能化与自动化施工是抽水蓄能电站地下工程施工技术的重要发展趋势。智能多臂钻等高效、精准的钻孔设备，能够大幅提高钻孔效率和精度，减少人工干预，降低施工风险。同时，智能定位系统的应用，可以实现对施工设备的实时追踪和精准定位，确保施工过程的准确性和安全性。(2) 自动化施工设备的研发与推广。自动化施工设备的研发与推广，是推动抽水蓄能电站地下工程施工技术智能化与自动化的关键。通过引入自动化施工设备，如自动搅拌站、自动喷浆机器人等，可以实现施工过程的自动化控制和监测，提高施工效率和安全性。此外，自动化施工设备的应用还能减少人工操作带来的误差和安全隐患，进一步提升工程的整体质量。

3.3 环保与可持续发展

(1) 施工过程中的环境保护措施。在抽水蓄能电站地下工程施工过程中，采取有效的环境保护措施是实现

绿色施工的重要保障。通过合理规划施工布局、严格控制施工噪音和扬尘污染、妥善处理施工废弃物等措施，可以最大程度地减少对周边环境的负面影响。同时，积极引入环保型施工技术和材料，如使用环保型混凝土、推广绿色爆破技术等，也能进一步降低施工过程中的环境污染。(2) 可持续发展理念在施工中的应用。可持续发展理念在施工中的应用，不仅体现在对环境的保护上，还包括对资源的合理利用和循环利用。在抽水蓄能电站地下工程施工中，应优先考虑使用可再生资源和可回收材料，减少资源消耗和废弃物产生。同时，通过优化施工工艺和流程，实现施工废弃物的分类处理和资源化利用，进一步提高资源的利用率和工程的环保性能。

结束语

综上所述，抽水蓄能电站地下工程施工技术是一项系统工程，融合了地质勘探、开挖支护、混凝土浇筑、灌浆处理及重型装备制造与安装等多领域知识。随着技术的不断革新和智能化水平的提升，施工效率和安全性得到了显著提升。然而，面对复杂多变的地质条件和日益增长的环保要求，仍需不断探索新技术、新材料和新方法。未来，抽水蓄能电站地下工程施工技术将更加注重可持续发展，致力于实现绿色、高效、安全的施工目标，为能源领域的高质量发展贡献力量。

参考文献

- [1] 梁飞.抽水蓄能电站交通洞TBM掘进关键技术研究与应用[J].建筑机械化,2023,(03):33-34.
- [2] 刘存,苏枳赫,田伟.抽水蓄能电站地下空间内部环境控制关键技术研究[J].中国科技信息,2021,(10):105-106.
- [3] 柳洪丹.大型抽水蓄能电站施工关键技术[J].工程地质,2021,(12):122-123.
- [4] 刘格格,李秦.抽水蓄能电站地下工程施工技术[J].文化科学,2020,(08):80-81.