

地下水封洞库围岩稳定性分析及控制技术研究

王志明

中国安能集团第三工程局有限公司武汉分公司, 中国·湖北 武汉 410000

摘要: 地下水封洞库是国家能源战略储备的重要载体, 具有占地小、密封性好、安全可靠、运行费用低等优点, 在油气等能源储存领域具有广阔的应用前景, 其围岩稳定特性是其规划设计、施工和长期运行的关键控制点。基于此, 本文立足地下水封洞库工程建设实际, 系统剖析多重因素对围岩稳定性的影响机制, 对比分析理论解析、数值模拟、现场监测三类围岩稳定性分析方法的适用场景, 深入探究围岩破坏机理, 进而提出围岩稳定性综合控制技术, 并结合工程实例验证技术应用成效。以期为行业内相关人员提供参考。

关键词: 地下水封洞库; 围岩稳定性; 破坏机理; 控制技术

Stability Analysis and Control Technology Research of Surrounding Rock in Underground Water-Sealed Caverns

Wang Zhiming

Wuhan Branch, Anneng Group No.3 Engineering Bureau Co., Ltd., China Hubei Wuhan 410000

Abstract: Underground water-sealed cavern storage is a crucial carrier for national energy strategic reserves, offering advantages such as small land occupation, excellent sealing, safety, and low operational costs. It holds broad application prospects in energy storage for oil, gas, and other resources. The stability characteristics of surrounding rock formations serve as key control points in its planning, design, construction, and long-term operation. Based on this, this paper systematically analyzes the influence mechanisms of multiple factors on surrounding rock stability, compares the applicability scenarios of three types of stability analysis methods—*theoretical analysis, numerical simulation, and field monitoring*—for surrounding rock. It further explores the failure mechanisms of surrounding rock and proposes comprehensive control technologies for surrounding rock stability, validating their effectiveness through engineering case studies. The findings aim to provide reference for professionals in the industry.

Keywords: Underground rock cavern; Surrounding rock stability; Failure mechanism; Control technology

0 引言

利用地下自然岩石的承压封闭特性, 采用人工挖掘方式构筑地下储库, 是目前大规模战略性能源储备的首选方案。随着国家对能源的需求不断增大, 洞库围岩的规模和深度不断增大, 工程地质情况日趋复杂, 在高地应力、地下水和施工扰动等多重因素的共同影响下, 容易发生变形开裂、剥落坍塌、塑性流变等失稳现象, 直接影响到施工的安全性和运行的可靠性。洞室群岩体的稳定与否, 直接影响着洞室的施工质量和服役年限, 也直接影响着地下水封洞库的安全运营。基于此, 本文开展地下水封洞库围岩稳定性分析及控制技术研究, 厘清围岩失稳核心诱因与破坏规律, 构建针对性管控技术体系, 对解决工程实际难题、推动地下储库技术发展具有重要意义。

1 地下水封洞库围岩稳定性影响因素分析

1.1 地质条件因素

地质环境是影响岩体稳定的内在核心要素, 包含了岩体岩性、岩体完整性、地质结构和地应力等四个重要方面。岩石的性质是由岩石的性质所决定的, 坚硬而完整的花岗岩、片麻岩等岩石, 具有较高的单轴抗压强度和较高的变形能力, 具有较好的自稳性; 软岩如泥岩、页岩、灰岩等, 在水的作用下, 容易发生软化和溶蚀, 导致其机械强度很低, 其自身稳定性非常差。结构面(节理、裂隙和层理)的发育状况决定着岩体的完整性, 结构面密度越高, 延展性越强, 充填物越疏松, 其完整性就越差, 不但会显著降低围岩的综合承载力, 同时也是地下水的主要渗流通道, 加速了围岩的退化。断层、褶皱、破碎带等不良地质结构是岩体自然弱化带, 其内部岩体破碎、强度极低, 地

应力异常集中,在开挖后极容易出现突然失稳。高应力条件下,围岩应力再分配后容易产生应力集中,导致岩爆、板片等脆性损伤,且与主应力方向成夹角,直接改变了围岩的受力状况,增加了稳定性控制的难度。

1.2 工程施工因素

工程施工是导致岩体破坏的一种后天人为因素,其施工方案、开挖技术、支护时机和施工质量都会对围岩的受力和结构产生直接影响。开挖断面的大小和形态直接影响着围岩的应力集中,大断面异形开挖会使应力集中显著增加,无序开挖和超大进尺会引起围岩应力的快速无序释放,从而打破原有的结构平衡。钻孔爆破是洞室工程中常见的一种掘进方式,由于不合理的爆破参数和过量的装药,会引起强烈的震动和冲击载荷,导致原生裂隙扩展和新生裂隙扩展,直接破坏岩体的结构完整性。如果施工方法不当,还可能引起周围环境的过大干扰。支护时机的把握是控制围岩的重要环节,如果开挖后不能对围岩进行有效的控制,则围岩将处于无约束的状态,直到破坏临界稳定性。由于锚杆和喷砼等施工质量不达标,支护参数不能与围岩条件相匹配,致使其与围岩不能形成协同承载系统,不能充分发挥其控制变形的功能。另外,施工时的机械振动和施工人员的不规范操作等因素,都会使围岩的扰动更加严重,从而增加了提升的不稳定性。

1.3 地下水赋存条件因素

地下水是地下洞室围岩稳定的重要动力因子,水-岩耦合是其核心诱发因素。地下水静水压可直接作用在岩体结构上,使其外荷载增大,破坏了原地应力平衡;渗透压通过对裂隙的冲刷和劈裂作用,使裂隙的宽度和长度不断增大,最终导致整个岩体的完整性被破坏。更重要的是,地下水和岩石之间存在着物理和化学的耦合,在物理上会使结构面充填物软化,降低结构面的内聚力和摩擦系数,使围岩易沿着结构面滑移而失稳。在化学上,岩石中的胶结物质被溶蚀,与粘土矿物发生水化反应,使岩石的机械强度不断降低,从而导致岩石的大变形和破坏。同时,岩体渗透性各向异性加剧了地下水的不均匀性,局部地区的地下水压力异常增高,进而加大了围岩的变形和失稳风险;同时,库水封槽系统的水位涨落也将对围岩的受力状况产生持续的影响,进而影响其长期稳定。

2 地下水封洞库围岩稳定性分析方法

2.1 理论分析方法

理论分析方法是基于岩体力学、弹塑性力学、流变力学基础理论,采用极限平衡、弹性塑性分析、流变理论等

方法,对岩体稳定性进行定性和定量研究。基于极限平衡理论,假定围岩处于滑塌破坏的临界破裂面,通过计算破裂面的抗滑力和下滑力,确定出岩的稳定安全系数。采用弹性塑性分析方法,根据围岩的弹塑性变形特征,建立围岩应力场、位移场和塑性区分布的解析表达式,揭示围岩的变形和应力演化规律,并将其应用到坚硬岩石的稳定分析中,但需要将工程实际情况简化到理想状态。本项目以软岩围岩的流变特性为研究对象,以流变理论为基础,建立考虑时效影响的围岩流变-变形模型,实现对长期荷载作用下围岩变形演化的准确预测,从而解决长期运行中软岩围岩稳定性评价的难点问题,为地下洞室-库的长期运行稳定研究提供重要的理论支持。

2.2 数值模拟分析方法

数值模拟分析方法借助计算机仿真技术,将工程地质条件、施工过程与多场耦合模拟与分析相结合,对洞库围岩进行全方位、动态的数值模拟,已成为目前国内外研究的主要手段,主要有FLAC3D、ABAQUS、ANSYS等。本项目提出一种基于岩体力学参数、地应力、地下水渗透系数等参数的新方法,通过对围岩应力分布、位移变形、塑性区发展等进行可视化描述,量化不同施工方案及支护参数对围岩稳定性影响的差异,实现对高地应力、地下水渗流、多场耦合等复杂条件下的围岩失稳高风险区进行精确辨识。该方法具有较强的适用性和较高的拟真度,能够较好地多个工况的比较和优化,并能有效地弥补现有的理论研究方法的不足,其关键的关键在于,需要通过野外实验精确地获取岩体参数,以保证仿真结果符合工程实际。

3 地下水封洞库围岩破坏机理研究

3.1 脆性破裂破坏机理

脆性破裂破坏主要发生在高地应力、硬质完整岩体的地下水封洞库中,它是由岩石内部的应力集中超过了岩石的承载能力而导致的突然的失稳破坏。深埋深埋硬岩体在开挖前处于高应力平衡状态,开挖后表面应力快速卸荷,内应力再分配形成极大的应力集中,坚硬岩体的塑性变形能力差,难以通过塑性变形来消除集中应力,一旦内应力超出其最大抗压强度,就会在瞬间产生突然断裂,大块大块沿裂缝面迅速剥落、弹射,形成岩爆、片帮、剥落等破坏形态。这类破坏没有显著的早期预兆,其发生速度快,破坏力大,对支护结构造成严重破坏,对施工安全构成威胁,其损伤程度受地应力大小、岩体完整性和开挖扰动强度等因素影响,随着开挖卸荷速率的加快,应力集中程度的增大,脆性断裂破坏更加严重。

3.2 塑性流变破坏机理

塑性流变破坏是软岩、破碎岩体围岩特有的渐进式长期破坏形式,其本质是在应力和时效的共同影响下,使围岩产生不断的流变变形。洞室开挖后,软岩和破碎岩体的应力超过了弹性极限,进入了塑性变形期,在持续的地应力和地下水的共同作用下,岩体的变形并没有随着工程的进行而终止,反而随着时间的流逝,表现出显著的粘弹流变特征。初期围岩的变形速度很快,如果能得到有效的支撑,可以逐渐达到稳定的程度;当支护时间过长或支撑强度不够时,其流变变形将不断积累,引起裂隙不断扩展,岩体结构逐渐破裂,从而产生大变形、底鼓、垮塌等失稳破坏。这类损伤因其时效、渐变等特点,在早期容易被忽略,但其长期变形积累将导致围岩稳定性急剧下降、支撑系统失效,进而威胁到洞库的长期运行安全,是目前软岩隧道工程建设中亟待解决的关键科学问题。

3.3 地下水侵蚀破坏机理

地下水侵蚀破坏是地下水封洞库专属的围岩破坏形式,其实质是在水-岩-化学-物理-化学耦合作用下,岩石力学性质不断退化而导致的失稳。地下水沿岩石节理裂隙渗透扩散,物理层面不断冲刷裂隙充填体,使裂隙张开度增大,渗透通道扩大,从而破坏了岩体的完整性。在此基础上,通过与岩石中的矿物组分进行溶蚀、水化和离子交换作用,使其胶结材料发生破坏,使结构面发生软化,从而显著地降低了岩体的抗剪强度和结构面的力学性能。随着渗流时间的推移,岩体的水-岩耦合效应不断增强,其力学特性逐渐退化,原有的稳定性逐渐出现破裂、剥落、软化等现象,同时,静水压力和渗透压力的共同作用会进一步破坏围岩的应力平衡,导致围岩的破坏。在破碎岩体和软岩洞库群中,地下水的冲刷效应尤其明显,常伴随着塑性流变损伤的发生,使得控制难度大大增加。

4 地下水封洞库围岩稳定性控制技术

4.1 超前预支护控制技术

超前预支护控制技术在洞库开挖前对前方围岩进行提前加固的前瞻性管控技术,其主要功能为超前约束围岩变形,阻断地下水渗流通道,提高围岩的稳定性,适合于破碎岩体、断裂带和高地应力等不良地质地段。超前锚杆支护、超前管棚、超前注浆等三种常见的支护工艺,超前锚杆和超前管棚沿着开挖轮廓线向外侧倾斜布置,构成超前支护拱,可以提前承受围岩的应力,避免在开挖时发生落块坍塌。超前注浆加固是将水泥基浆体或化学浆液灌注到岩体裂隙中,实现对破碎岩体的胶结和充填,提高岩体的

整体性和机械强度,并阻断了地下水的渗漏通道。通过本项目的研究,将为后续的深基坑工程建设和支护提供稳定的环境,从而从根源上减少工程中的失稳性。

4.2 锚固协同支护控制技术

锚固协同支护控制技术在地下水封洞库围岩稳定管控的核心技术,采用锚杆、锚索、喷砼和钢筋网等联合支护,形成一个与围岩共同受力的整体系统,发挥其自身的承载能力,并对其进行约束。锚碇是一种嵌入到岩石内部的锚固系统,起到了加固和加固岩石的作用,同时起到了上抬、阻止了裂隙的扩展的作用;在高地应力、大变形的围岩中,锚杆能够提供较高的预拉力,并能有效抑制围岩的大变形和流变;采用喷浆混凝土对地表进行封堵,有效地阻止了风化和地下水的渗入,并对开挖引起的地表破坏进行了修补;在施工过程中,可依据围岩级别和稳定性条件,对支护参数进行灵活调整,形成差别化锚杆支护方案,对围岩变形进行精细控制。

4.3 地下水精准控排控制技术

地下水精准控排控制技术在针对水岩耦合侵蚀引发的围岩失稳问题,采用“堵排结合”的方法,对地下水的赋存状况进行调节,削弱水-岩作用,是一种特殊的工艺。本项目拟通过全断面注浆和帷幕灌浆等方法,在洞室周围形成一道封闭式止水帷幕,阻止外界地下水渗入洞室,降低地下水与围岩的接触面,实现从源头上抑制水-岩耦合效应。排水技术是指在岩体裂隙中设置排水孔和排水孔,对岩体裂隙内残留的地下水进行疏排,以减少岩体内部的水压和渗透压力,从而防止地下水继续侵蚀。该技术需兼顾地下水封洞库的密封储库要求,在保证围岩稳定的前提下,保证洞室的正常运行,并保证洞室和库水封闭的正常运行,达到对地下水和围岩稳定性的协同控制。

4.4 施工工艺优化控制技术

施工工艺优化控制技术在通过优化施工流程、规范施工工艺,减少施工扰动、实现围岩应力平稳释放的辅助管控技术,以“短进尺,小爆破,强支护,早封闭,勤监测”为基本原则。在开挖阶段,应采取减震爆破技术,如光面爆破和预裂爆破,并对爆破参数进行优选,以减小爆破震动对周围环境的破坏;在施工过程中,要严格控制一次掘进进尺,避免大面积急进,采取分阶段、分阶段的施工方法,使围岩的应力得到较好的释放。在支护过程中,准确掌握支护时机,对围岩变形的早期阶段进行跟踪,达到了“挖-支”的无缝连接;加强施工全过程的质量控制,保证锚杆、灌浆和喷射混凝土的质量达到标准。在此基础上,

结合现场监测资料,对施工参数和支护方案进行动态调整,形成动态控制系统,将施工对围岩的干扰破坏降到最低。

5 工程实例应用分析

某大型地下水封石油洞库工程,总储油规模 100 万 m^3 ,洞室埋深 130-160m,围岩以花岗岩为主,局部发育 3 条断层破碎带与节理裂隙密集带,区域地应力高达 15-20MPa,地下水赋存丰富,围岩稳定性管控难度极大。在前期工作中,通过现场调查,获得了大量的岩体参数,并通过理论分析和 FLAC3D 数值模拟,研究了岩石脆性断裂和水-岩耦合冲蚀破坏的可能性。在工程建设中,对断裂带进行超前管棚+超前注浆预护,在普通断面上使用喷锚网组合锚支,并配合帷幕灌浆、止水及廊道排水,并对光面爆破进行全过程的变形和应力实时监测。项目建成后,监测结果表明,隧道围岩最大变形只有 8 mm,远远小于警戒限值,锚杆轴力和地下水压力也基本稳定,无开裂、剥落、渗漏水等现象,总体稳定。

6 结语

综上所述,地下水封洞库围岩稳定性受地质、施工和地下水等多因素的影响,其失稳模式多样、复杂,其稳定

性控制是一个系统的工程。本文系统梳理了围岩稳定性核心影响因素,明确了理论分析、数值模拟相结合的综合研判方法,揭示了脆性破裂、塑性流变、地下水侵蚀三类破坏机理,构建了超前预支护、锚固协同支护、地下水精准控排、施工工艺优化的综合控制技术体系,经工程实例验证,这一系统能够有效地控制地下洞室的稳定性,保证地下洞室和库群的安全。未来,研发更具针对性的智能化支护技术与动态预警系统,将进一步提高地下洞室群围岩稳定性控制的精细化和智能化水平,为国家战略性能源储备的建设提供更加有力的技术支持。

参考文献:

- [1] 彭振华,张彬,李玉涛等. 海岛地下水封洞库围岩稳定性及水封可靠性研究[J]. 地下空间与工程学报, 2020, 16(6): 1875-1881.
- [2] 刘国超. 寒冷地区地下水封洞库工程超前预注浆施工技术研究[J]. 人民黄河, 2024, 46(S1): 161-162.
- [3] 李春来,李增涛. 综合超前地质预报在水封洞库施工中的应用[J]. 科学技术创新, 2023(17): 155-158.

作者简介: 王志明(1989.02-),男,汉族,湖北当阳,工程师,大学本科,研究方向:工程技术、安全管理。