

• 特约稿 •

DOI:10.12454/j.jsuese.202500556



本刊网刊

水利水电深部地下工程：地质环境、围岩灾变与技术挑战

张世殊, 赵小平

(中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司, 四川成都 610031)

摘要:向地球深部进军是目前必须解决的战略科技问题。开发深地资源与空间已成为未来中国科技发展的重要方向。水电能源和国家水网作为中国重要的清洁能源和发展战略,其地下工程埋深正向超数千米级发展。受极端复杂的地质环境影响,现有技术标准体系下的深部工程存在设计方法不适宜和围岩灾变不清的问题,亟需厘清水利水电深埋地下工程地质特性与深部关系,破解水利水电深部地下工程建设的盲目性和不确定性。本文在系统梳理不同行业深部地下工程深部概念的基础上,结合水利水电工程地下水工建筑物特点,从深部工程地质环境特征、地下工程围岩灾变等方面,对水利水电深部地下工程埋深进行了界定。在此基础上,梳理和展望了水利水电深部地下工程在精准勘探与随钻感知、设计理论创新、工程布置与智能建造、灾害预防与主动控制,以及智慧运维与应急逃生等方面需重点突破的关键技术挑战,以期对水利水电深部地下工程设计、建设和运维提供技术指导,促进深部能源开发。

关键词:水利水电工程;深部工程地质;地质环境;围岩灾变;技术挑战

中图分类号: O319.56

文献标志码: A

文章编号: 2096-3246(2026)01-0001-17

向地球深部进军是目前必须解决的战略科技问题,其中,深地资源与空间开发已成为中国科技发展的重要方向。《国家“十四五”规划和 2035 年远景目标纲要》明确提出,面向服务国家重大战略,实施川藏铁路、西部陆海新通道、国家水网和雅鲁藏布江下游水电开发等重大工程。以上重大工程目前正在向地下深部发展。另外,该纲要也明确提到在深地等前沿领域,实施一批具有前瞻性、战略性的国家重大科技项目,这对地下工程领域,尤其是超深地下工程,是一次历史性机遇。当前,中国西部水利水电开发面临更深、更大规模的地下工程建设任务。

不同于浅埋地下工程,深部地质环境复杂、探测技术有限,且相关理论尚不完善,深地工程面临盲目性、低效性和不确定性。随着国家战略工程的逐步实施,深地工程面临的深地环境特征、内部构造演变、致灾机理等仍处于“黑箱”或“灰箱”状态^[1]。目前,水利水电工程地下建设正由数百米向数千米深部发展,如交通隧道埋深达到 2 000~3 000 m,水电工程隧洞和地

下厂房埋深达 1 500~3 000 m,深部资源开采深度最大达 3 000 m。然而,现有大量的成果统计显示,埋深超过 600 m 时,水电工程地下洞室已进入深部,在其开挖过程中,岩爆、片帮、涌突水、围岩变形等各类工程灾害显著增加;随着埋深超过 1 000 m,岩爆、高渗透压、围岩变形等各类工程问题变得更为突出、复杂。深部环境下,现有理论基础、工程经验的认知、技术及装备水平是否仍然适用,成为亟待解决的关键技术问题;在深埋且未知的环境下修建规模庞大的地下洞室群,其安全稳定能否保证、如何保证,也成为制约工程推进的“卡脖子”难题^[2]。

本文对不同行业深部地下工程进行了系统的梳理,结合水利水电工程地下水工建筑物特点,从深部高能地质环境特征、水利水电工程深部地下工程建设规模与围岩灾变特征等方面出发,探讨水利水电工程深部范围的界定,并梳理水利水电深部地下工程需突破的关键技术挑战,以期对水利水电深部地下工程设计、建设和运维奠定基础。

收稿日期:2025-07-21 修回日期:2025-08-26 网络出版日期:2025-10-01

基金项目:国家自然科学基金项目(U22A20601;U23B20145);中国电建集团核心攻关项目(DJ-HXGG-2024-07)

作者简介:张世殊(1970—),男,正高级工程师,博士。研究方向:深部工程地质与灾害防控。E-mail:1992070@chidi.com.cn

1 地下深部概念与研究现状

深部工程是指在地下一定深度以下,岩体力学行为发生本质变化的特殊地质环境中的地下工程活动;在不同行业,因工程需求和地质条件的差异,深部概念呈现多样化的界定标准。

在采矿行业,深部开采通常将绝对深度作为主要划分依据,即以单一的深度值来界定深部,但不同国家和地区的具体阈值存在显著差异。最初,大多数国家认为,当矿山开采深度超过 600 m 即为深井开采,但对于南非、加拿大、德国等采矿技术成熟的国家,只有矿井深度达到 800~1 000 m 才称为深井开采。日本将深井开采的深度界定为 600 m,英国和波兰则将其界定为 750 m^[3]。中国对于深井开采深度的界定在不断演化,从 20 世纪 80 年代的煤矿平均采深 288 m 到目前平均采深超过 700 m^[4],根据目前发展趋势和客观实际,大多数专家认为,中国深井开采的深度可界定为 800~1 500 m^[5-6]。需要注意的是,上述深部概念主要是指深部煤矿开采深度,对于不同矿产资源,如金属矿等,其深部界定阈值相差显著,如:中国将金属矿深部开采的深度界定为 1 000~2 000 m,明显高于煤矿开采。因此,采矿行业对深部的界定还需根据不同矿产资源的赋存条件和开采技术的适应性需求来确定。

在交通行业,对深部定义的依据是工程开挖后的力学特点,以隧道工程为例,其对深部的界定不仅依赖于埋深绝对值,还需结合地质条件和围岩压力特性,可分为浅埋、深埋隧道。其中,浅埋隧道指隧道开挖后承受全部上覆土压力,而深埋隧道只承受一定范围内的土压力。深、浅埋隧道的分界深度 H_p 可以使用经验公式 $H_p=(2.0\sim 2.5)h$ 来计算,其中, h 为隧道开挖高度(或等效高度),可根据中国《公路隧道设计规范》(JTG3370-1-2018)^[7]确定,即:

$$h=0.45\times 2^{S-1}\omega \quad (1)$$

式中: S 为围岩级别,取 1、2、3、4、5、6; ω 为宽度影响系数,计算公式为 $\omega=1+i(B-5)$,其中, B 为隧道宽度(m), i 为隧道宽度每增减 1 m 时的围岩压力增减率。

当实际隧道埋深 $H>H_p$ 时,通常认为是深埋隧道,这一分类被铁路和公路隧道设计规范所采用,这种动态界定方式体现了交通工程对围岩稳定性和施工安全的综合考量。

在水利水电行业,深部地下工程定义结合了深度与地应力双重指标,但在实际应用过程中,由于深部地下工程地应力难以测得或测量成本高昂,给水利水电深部地下工程设计造成了很大的不确定性,需

要宏观量化、综合考虑复杂地质环境的深部概念。《水电水利工程深埋地下洞室开挖施工规范》(DL/T5854—2022)^[8]虽未明确规定具体深度阈值,但在工程实践中却常常面临深部复杂地质环境的挑战,例如,锦屏二级水电站引水隧洞最大埋深达 2 525 m,过程中实测地应力高达 70 MPa,且岩爆、突水和高地温等问题给工程建设带来了极大的挑战。为更好地指导水利水电深部工程建设,可借鉴其他行业对深部的定义,综合考量水利水电深部工程面临的复杂地质环境及主要技术挑战。

在对深部工程引起的岩石力学问题的研究过程中,国内外工程界专家学者相继提出“深部”的概念。早期研究多以绝对深度作为划分依据,将埋深超过一定程度的岩体工程视为深部范畴^[9-11],并指出深部岩体的强度特性与浅部存在显著差异。

随着研究的深入,学者们逐渐认识到深部环境的复杂性,提出“深部”并非单纯的深度概念,而是由地应力水平、岩体属性和工程扰动共同决定的力学状态,对深部概念的界定呈现从单一深度指标向多维度特征演化的趋势。

例如,何满潮等^[3,12-14]通过对深部工程岩体力学特点的深入研究,认为深部是指工程岩体开始出现非线性力学现象所处深度及其以下的深度区间,并在此基础上,确定了临界深度的力学模型及公式,建立了深部工程的评价指标。谢和平等^[4,15]认为,深部的概念是指能综合反映深部应力水平、应力状态和围岩属性的一种力学状态,并从力学角度出发,综合考虑多方面因素,提出亚临界深度、临界深度和超深部临界深度 3 个概念,对深部界定给出了一个机制性的、量化的描述。钱七虎^[16]、王明洋^[17]、李术才^[18]等从深部岩体工程响应特征出发,认为在分析深部岩体工程围岩的变形、破裂和稳定性时必须考虑分区破裂化现象及破裂区的残余强度,并以此现象的特征和标志明确深部具体概念。

就目前整体而言,学者们对深部的界定方式强调了深部岩体在高地应力作用下的独特力学响应,例如脆性-延性转化^[19-20]、分区破裂^[21]、流变效应增强等^[22-24],并且由于深部工程岩体普遍处于“三高一扰动”的特殊地质力学环境,故权威学者对深部特征的总结可归纳为两点:深部岩体的非线性力学行为^[25-26]和多场耦合效应^[27-31]。大量研究成果表明,深部岩体在高围压下呈现明显的非线性强度特性,具有显著的分层破裂特性,传统的连续介质理论难以准确描述其破坏过程。这种非线性响应与深部环境的温度、渗流等因素相互作用,形成复杂的多场耦合机制,例如:

高温环境下岩体的热膨胀效应可能加剧应力集中^[32-33],渗流作用可能弱化岩体的强度^[34-36],使得深部工程岩体的力学特性与工程特性更为复杂,亟需开展针对性研究。

综合来看,深部概念的学术定义已从单一深度指标转向多维特征体系,强调高地应力主导下的岩体力学响应、环境地质条件和工程扰动的综合作用。这种演化反映了深部工程研究从经验总结向理论创新的转变。但对水利水电工程而言,前期工作难以获取多维特征指标值,难以指导水利水电深部地下工程的设计与施工。因此,有必要结合水利水电工程深埋地下建筑物的结构特点与环境特征,在吸收矿山、交通等领域深部研究成果的基础上,对水利水电领域深部地质环境与地质风险进行系统分析,并在此基础上提出水利水电深部地下工程的埋深界定,以期水利水电

深部地下工程前期策略和技术应对提供支撑。

2 水利水电地下工程

水利水电地下工程一般指引水隧洞或引水发电系统构成的地下洞室群。中国西南地区水电工程多位于高山峡谷区域,由于地面空间有限、地表灾害频发,这些工程通常在岸坡山体内开挖不同尺寸的地下洞室进行引水或发电,形成一套成体系的地下洞室群。以水电工程为例,常以主厂房、主变室、尾水调压室三大洞室为主(有的水电站为四大洞室,还包含尾水管检修闸门室),同时包含其他规模相对较小的洞室,如排水隧洞、母线洞、尾水隧洞等。总的来看,水利水电地下工程的主要特点是隧洞长、洞室规模巨大、埋藏深、扰动作用强。图1为溪洛渡水电站复杂地下洞室群(左岸)的示意图。

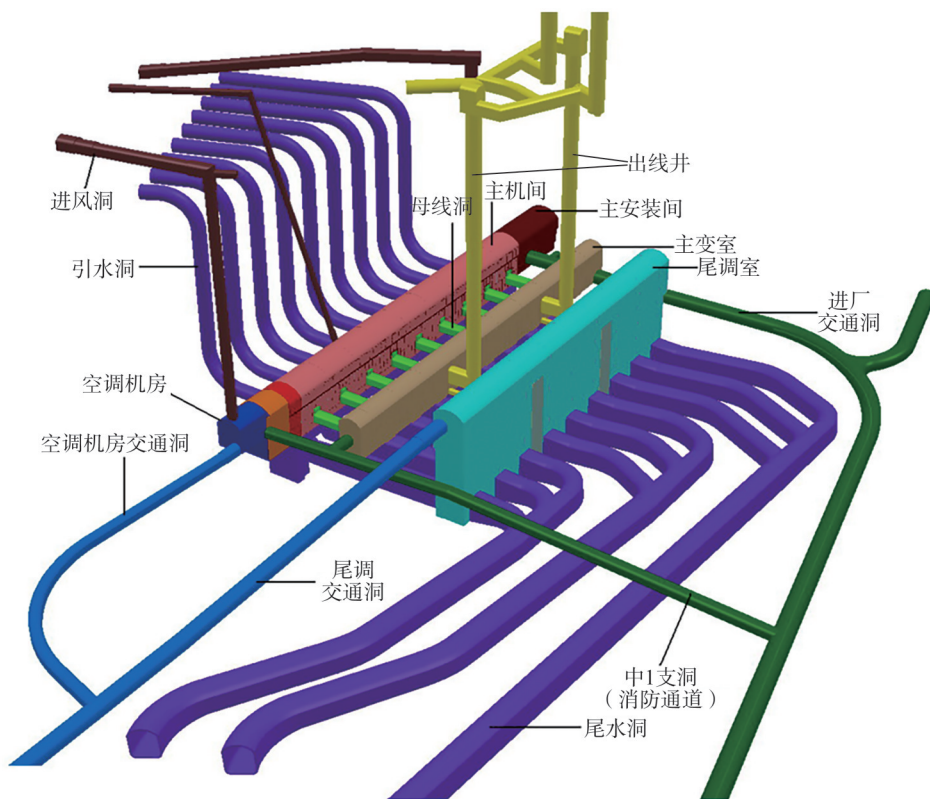


图1 溪洛渡水电站复杂地下洞室群(左岸)

Fig. 1 Underground caverns of Xiluodu Hydropower Station (left bank)

2.1 水利水电地下工程规模特点

水利水电工程地下洞室群的典型特征是规模巨大,如水电工程体现为单一洞室尺寸大、洞室数量多、洞群空间结构复杂、扰动作用强,这也是与交通隧道等其他行业地下工程主要的差异之一。

单一洞室尺寸大主要是指三(四)大洞室,其开挖跨度大、边墙高。表1为典型水电工程地下厂房及尾水调压室的开挖尺寸。由表1可知:地下厂房的长度基本

在200 m以上,少数超过400 m,厂房顶拱跨度一般为28~34 m,厂房高度一般为70~90 m;主变室的规模小于主厂房,长度一般为100~300 m,跨度一般约为20 m;尾水调压室一般为长廊型或圆筒型,规模大于主变室,其中,长廊型尾水调压室的跨度略大于主变室,高度较高,通常超过70 m。

随着国家水网战略的实施,水利工程引水隧洞朝着长距离、大埋深发展,而水电工程地下洞室群包含

的洞室种类、数量众多,除三(四)大洞室之外,还包括引水隧洞、母线洞、尾水连接管、尾水隧洞、检修闸室等,此外还有排水廊道、锚固观测洞、出线竖井、通风洞、交通洞、施工支洞等大量辅助洞室。以上特征常导

致洞室群的开挖方量巨大,扰动作用强,如:溪洛渡水电站地下洞室群洞室达 342 个,洞群总开挖量达 $1.760 \times 10^7 \text{ m}^3$;洞室之间平面相贯、立体交叉、纵横交错,空间结构十分复杂。

表 1 典型水利水电工程三大洞室尺寸信息

Tab. 1 Size information of three caverns in typical hydropower projects

工程名称	洞室尺寸(长廊型:长×跨度×高/(m×m×m);圆筒型:直径×高/(m×m))		
	主厂房	主变室	尾水调压室
叶巴滩	268.00×28.50×67.10	198.000×19.400×26.500	201.50×25.00×82.50
乌东德	333.00×32.50×89.80	272.000×18.800×35.000	50.00×113.50
白鹤滩	438.00×34.00×88.70	368.000×21.000×39.500	(44.50~48.00)×(112.10~127.91)
溪洛渡	443.30×31.90×77.60	336.000×19.800×26.500	317.00×26.50×95.00
向家坝	255.40×33.40×85.50	192.000×26.300×24.400	—
两河口	275.94×28.40×66.80	239.400×18.800×25.600	205.00×19.90×79.90
杨房沟	228.50×30.00×75.57	210.000×18.000×22.300	166.10×24.00×61.75
锦屏一级	276.99×28.90×68.80	201.600×19.300×32.700	(37.00~41.00)×(79.50~80.50)
官地	243.44×31.10×78.00	197.300×18.800×25.200	223.00×21.50×76.50
二滩	280.30×30.70×65.38	214.900×18.300×25.000	203.00×19.80×69.80
小湾	298.40×30.60×84.88	230.600×19.000×24.050	32.00×90.00
糯扎渡	418.00×31.00×81.60	348.000×19.000×22.600	38.00×94.00
双江口	219.50×28.30×68.30	158.300×19.500×25.400	137.20×20.00×75.50
猴子岩	219.50×29.20×68.70	139.000×18.800×25.200	140.50×23.50×75.00
长河坝	228.80×30.80×73.35	150.000×19.300×25.000	162.00×22.50×79.50
大岗山	226.58×30.80×74.60	144.000×19.300×25.800	147.00×24.30×77.10
瀑布沟	294.10×30.70×70.10	249.100×18.300×26.575	206.50×17.40×56.35
拉西瓦	311.80×30.00×74.90	232.600×290.000×51.500	32.00×71.58

2.2 水利水电地下工程常见灾害

水利水电地下工程具有长距离、大规模、大跨度、强扰动等显著特征,面临的工程灾害也更为突出,主要具有以下特点:

1)埋深较大,地应力值高,地质条件复杂。地下洞室群垂直埋深范围一般为 200~600 m,实测最大地应力基本超过 30 MPa,均处于高地应力区。

2)地下洞室群赋存岩性一般为脆性硬岩,强度一般较高,但由于深部环境的高地应力特征,围岩强度应力比多小于 3.0。

例如:锦屏一级水电站地下厂房洞室群规模巨大,地质条件复杂,最大主应力为 18.0~35.7 MPa,大理岩抗压强度为 60~75 MPa,地下厂房具有高应力、低强度应力比(1.5~3.0)的特点,处于极高~高应力状态。洞室开挖后出现了围岩片帮剥落、劈裂,局部岩体压碎,混凝土喷层开裂,钢筋弯折内鼓等一系列的变形破坏现象^[37]。

3)地下洞室施工期间围岩劈裂剥落、岩爆、喷层开

裂等灾害问题比较普遍。已有工程实践显示,多个洞室的顶拱部位出现片帮、剥落,拱肩、边墙等部位围岩破裂、劈裂、剥落。例如:白鹤滩地下厂房在支护后发生了顶拱喷层开裂,锦屏一级、猴子岩、白鹤滩、叶巴滩等工程出现了围岩大变形或剥落,如图 2 所示,甚至表现出时效变形特征^[38-42]。

综上,由于其长距离、大规模、强扰动等特点,水利水电工程与交通隧道等其他行业领域的地下工程相比,其灾害问题主要有以下差异:

1)洞群规模庞大、空间结构复杂、开挖周期长、扰动作用持久,导致围岩灾害问题的影响范围更广,持续时间更长,洞群效应更为突出。

2)由于水利水电地下工程洞室尺寸大,高地应力环境下的地应力方向对地下工程布置影响较大。

3)已建水利水电工程地下埋深多在 600 m 以内,地质灾害以由构造和岩性控制的岩爆为主,随着埋深越大,复杂地质环境叠加工程扰动引起的灾害问题也会越复杂。



(a) 锦屏一级, 围岩劈裂弯折



(b) 叶巴滩, 围岩劈裂剥落

图2 典型水利水电工程地下洞室群灾害现象

Fig. 2 Typical disaster phenomena in underground cavern complexes of hydraulic and hydropower engineering projects

3 水利水电工程地下深部界定

3.1 深部高能地质环境特征

随着国重水网和重大水电工程的推进,水利引水隧洞和水电地下洞室群埋深正从数百米向数千米深部发展,所赋存的地质环境具有高地应力、高地温、高水压等高能状态,如:某重大水电工程已测地应力高达 86 MPa,地温高达 76 °C,在强扰动作用下,给水利水电工程深部地下洞室的建造带来一系列的挑战,如岩爆灾害、大变形灾害、高地温热害和涌突水灾害等。

3.1.1 高地应力

在深部地下工程中,地应力是评价地下工程岩体性状、围岩变形及稳定性不可或缺的基础资料^[43]。已有统计结果(图3)显示,随着埋深增加,水平主应力与垂直主应力比值呈降低趋势,并逐渐趋近于1.0。

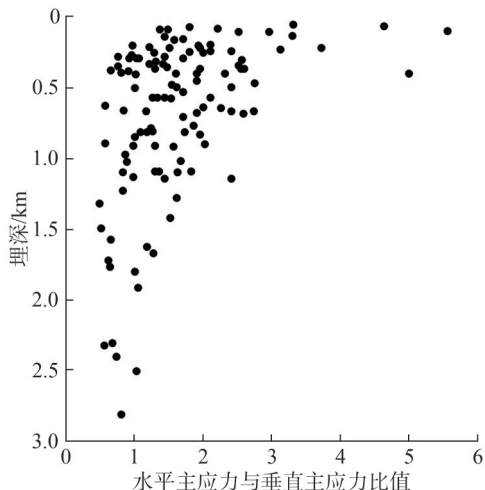


图3 水平地应力与垂直应力比值随埋深变化规律

Fig. 3 Variation of the ratios of horizontal to vertical stress with burial depth

其中:在埋深小于 600 m 范围,地应力总体以水平主应力为主,受构造作用影响强;在 600~1 000 m 埋深区间,总体上水平主应力和垂直主应力量值趋于一致,构造作用影响减弱;超过 1 000 m 埋深后,地应力水平主应力和垂直主应力量值基本一致,受构造作用减弱,呈现出静水应力状态。

随着水利水电工程引水隧洞和地下洞室群向地下深部发展,深部地应力的分布规律对水电工程布置和洞室围岩稳定控制等的影响愈加显著。基于 170 余个西部地区水电工程地应力测试数据,统计了不同埋深条件下的地应力分布情况,主要规律如下:

1) 最大主应力随埋深变化规律

四川西部河谷最大主应力与埋深的关系如图4所示。

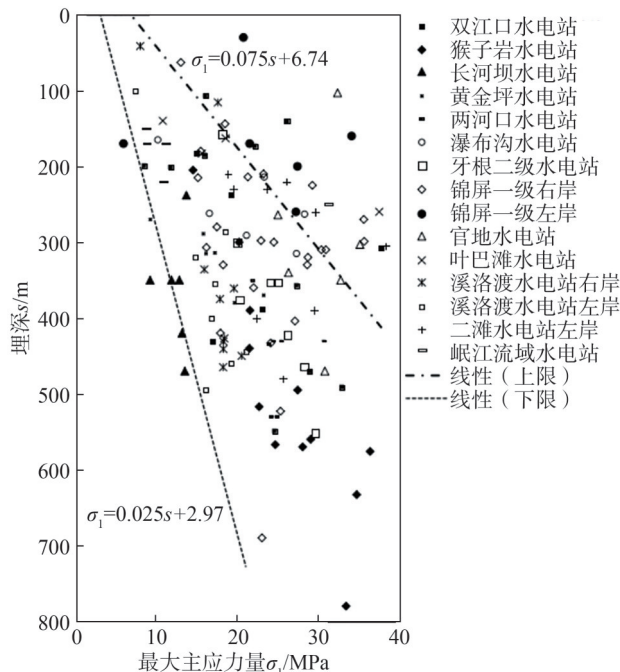


图4 四川西部河谷最大主应力随垂直埋深变化规律

Fig. 4 Variation regulation of maximum principal stress with vertical burial depth in Western Sichuan River Valley

由图4可知,最大主应力量值整体上随埋深增大而增大。其中:在埋深 0~600 m 范围内,最大主应力的量值较为离散,受构造作用较强;埋深大于 600 m 时,其量值总体随埋深也呈增大趋势,但离散程度减弱,表现为受构造作用减弱,逐渐转为受自重应力的影响。

2) 最小主应力随埋深变化规律

图5为最小主应力随埋深的变化规律,由图5可知:最小主应力 σ_3 整体上随埋深增大而加大;在埋深 0~600 m 范围内,最小主应力随埋深增大增幅变大,且量值分布较离散,受构造作用显著;当埋深大于 600 m

时,最小主应力随埋深增大而增大的趋势趋于平稳,同样表现为受构造作用减弱,逐渐转为受自重应力影响。

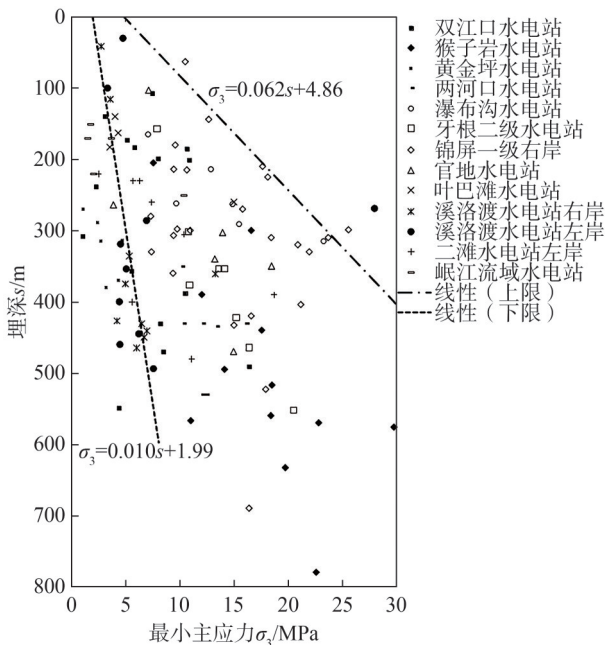


图5 四川西部河谷最小主应力随垂直埋深变化规律

Fig. 5 Variation of σ_3 with vertical burial depth in Western Sichuan River Valley

除此之外,川西水电工程河谷应力场最小主应力方向和倾角的分布规律也表明,其与最大主应力的变化规律基本保持一致,表现为:在垂直深度小于600 m的范围,最小主应力主要受构造应力的影响;当垂直埋深大于600 m时,最小主应力主要受自重应力的影响。

综上所述,沿垂直深度,最大主应力与最小主应力的分布规律一致,表现为:当垂直深度小于600 m时,地应力以水平地应力为主,主要表现为受构造应力影响;当埋深大于600 m时,水平主应力和垂直主应力趋于一致,构造作用影响减弱,重力场作用影响逐渐增强。

3.1.2 高地温

随着中国能源结构转型,水电工程深埋洞室工程日益增多。这类工程位于地质构造复杂区域,不仅要应对坍塌^[44]、大变形^[45]、涌水^[46]、突泥^[47]等传统地质灾害威胁,还需直面高地温等带来的热害特殊挑战^[48]。

目前,地下洞室高地温热害的研究主要聚焦于施工过程中高岩温问题,在高岩温诱发的灾害效应和处置措施方面取得了一定成果。但是,相关成果主要基于工程实践中遇到的具体灾害,随着深埋洞室地温异常区域越来越大,与地温异常现象伴生的高温水、有害气体等突涌逐渐引起了学术界和工程界的共同

关注。

表2为国内外地下工程高地温案例。通过分析表2中的案例可以看出,高地温热害具体表现为高岩温、有害气体突涌、高岩温+高温水突涌、高岩温+有害气体突涌及高岩温+有害气体突涌+高温水突涌共5种类型。

总体而言:地下工程埋深是高地温热害强度的基础,地温和水温随着埋深的增大总体上呈现升高的趋势;岩性是控制热害类型的关键因素,例如花岗岩区域容易出现高岩温的问题,富水破碎地层容易出现高岩温与高温涌水的问题;耦合效应推动了灾害链式放大,例如高温水会加速气体释放,加剧灾害的危害程度。

通过对国内外典型隧道热害案例的系统梳理,本文总结出隧道热害效应可以分为:导致地下洞室内部温度湿度环境恶化、加剧围岩变形与破坏、诱发围岩支护系统级联失效、诱发洞内多维度气态灾害链等4类。

热害恶化地下洞室内温、湿度环境已成为制约深埋隧道施工安全与效率的关键难题。当围岩温度超过35℃、相对湿度>80%时,地下洞室狭长受限空间内的湿热耦合环境会对作业人员的身心健康及劳动效能造成系统性损害,具体表现为生理机能失调、心理负荷加重以及作业效率显著下降,构成了复杂的人-环交互影响链。

热害通过热-力-化多场耦合作用,显著改变了围岩的力学与结构特征,对围岩稳定性的影响不可小觑。高地温环境不仅直接改变岩石的物理力学特性,还与地应力、地下水等环境因素耦合作用,形成复杂的围岩劣化机制。隧道热害显著改变围岩变形与破坏模式,短期效应表现为强度骤降与变形突增,长期效应体现为流变持续与结构劣化;同时,表现出硬岩岩爆、软岩大变形、爆破安全风险增大等呈多因素链式放大特征。

热害对围岩支护系统的破坏效应具有显著的多尺度与多物理场耦合特征,其通过热力耦合、化学腐蚀及材料劣化等多重路径,引发支护系统级联失效。具体表现为以下几种情况:

- 1) 锚固体系因强度衰减与界面劣化,丧失传力功能;
- 2) 喷射混凝土因微结构损伤与黏结失效,承载能力降低;
- 3) 初期支护因热应力与蠕变压力而产生失稳;
- 4) 二次衬砌因温度梯度致裂,以及出现长期徐变损伤。

表 2 国内外地下工程高地温案例

Tab. 2 High ground temperature cases of underground engineering at home and abroad

序号	工程名称	国家	长度/km	最大埋深/m	最高岩温/°C	最高水温/°C	有害气体	主要岩性
1	勃朗峰公路隧道	法国、意大利	11.600	2 480	35.0	40.0		花岗岩
2	里昂—都灵隧道	意大利	54.000	2 000	40.0	—		砂页岩
3	亚平宁隧道	意大利	18.518	2 000	63.8	—		砂岩等
4	阿尔帕—谢万输水隧洞	俄罗斯	43.000	1 230	50.0	—		中等坚硬岩
5	阿帕—塞万隧道	前苏联	48.300	600	—	38.0		玄武岩
6	特克洛特隧道	美国	6.400	2 287	47.0	—		砂岩
7	安房公路隧道	日本	4.350	700	65.0	73.0		花岗岩
8	青函隧道	日本	53.850	140	50.0	—		玄武岩
9	辛普隆隧道	瑞士	19.800	2 140	55.4	56.0		花岗岩
10	新圣哥达隧道	瑞士	57.000	2 300	45.0	27.0		片麻岩
11	老列奇堡隧道	瑞士	14.640	1 673	39.0	—		片麻岩
12	新列奇堡隧道	瑞士	33.000	2 200	42.0	—		花岗岩
13	吉沃希嘎隧道	中国	3.985	102	65.4	—		闪长岩
14	萨嘎隧道	中国	4 919.000	300	55.0	—		闪长岩
15	巴玉隧道	中国	13.017	2 080	47.0	—		花岗岩
16	拉月隧道	中国	31.700	2 100	69.3	91.5		花岗岩
17	色季拉山隧道	中国	37.000	1 800	85.0	—		花岗岩
18	甫当隧道	中国	7.517	90	56.0	—		花岗岩
19	黑白水三级电站引水隧洞	中国	2.313	800	45.0	62.0		砂岩
20	大柱山隧道	中国	14.484	995	31.0	—		砂岩
21	高黎贡山隧道	中国	34.538	1 155	40.6	50.0	H ₂ S	玄武岩
22	红豆山隧道	中国	10.616	1 020	48.0	36.0	CO ₂ 、H ₂ S	砂岩
23	帮福隧道	中国	8.178	477	42.5	43.9	CO ₂ 、H ₂ S	砂岩
24	云南禄劝铅厂引水隧洞	中国	7.220	380	76.0	70.0		白云岩
25	王登隧道	中国	6.644	880	—	—	H ₂ S	千枚岩
26	跃龙门隧道	中国	20.042	1 450	—	—	H ₂ S	板岩
27	米仓山隧道	中国	13.800	1 070	40.0	—	H ₂ S	砂岩
28	孜拉山隧道	中国	30.370	1 480	60.0	—		花岗岩
29	达嘎山隧道	中国	7.210	700	64.0	—		闪长岩
30	折多山隧道	中国	19.760	1 251	56.8	—		花岗岩
31	九峰隧道	中国	1.410	140	43.0	—		砂岩
32	玉和隧道	中国	7.066	355	39.0	—		花岗岩
33	联建隧道	中国	4.965	520	44.4	—		花岗岩
34	宝丰隧道	中国	4.300	730	49.2	—	CO ₂	花岗岩
35	齐热哈塔尔水电站工程发电引水隧洞	中国	15.640	1 720	110.0	67.0		花岗岩
36	关角隧道	中国	32.600	1 100	40.0	—		花岗岩
37	西秦岭隧道	中国	28.238	1 400	40.0	—		片麻岩
38	秦岭隧道	中国	18.460	1 645	40.0	—	N ₂ 、CO ₂ 、CO	花岗岩
39	玉峰山隧道	中国	3.720	389	—	—	H ₂ S	砂岩
40	杜夜隧道	中国	0.500	78	—	—	H ₂ S、SO ₂	砂岩
41	五指山特长隧道	中国	4.870	383	40.0	—		花岗岩
42	三百山隧道	中国	10.187	700	56.5	78.0		凝灰岩

3.1.3 高水压

随着埋深增大,除深部地质环境越来越复杂外,外水压力的增加也愈显著,其中高水压成为水利水电工程深部地下洞室建设和运维的重要制约因素,如锦屏二级引水隧洞实测水压超过 10 MPa,严重威胁衬砌的安全。

表 3 为国内外部分工程地下水压力^[49]。

表 3 国内外部分工程地下水压力^[49]

Tab. 3 Groundwater pressures of some projects at home and abroad^[49]

工程名称	埋深/m	外水压力/MPa
锦屏二级引水隧洞	2 525	10.2
滇中引水松林隧洞	606	2.0~2.5
滇中引水芹河隧洞	468	2.0~3.0
青函隧道(日本)	100	2.4
天生桥二级水电站	700	3.8
歌乐山隧道	280	2.6
中天山隧道	1 700	6.3
圆梁山隧道	780	3.0

由表 3 可知,外水压力与埋深成正比,水电深部地下洞室建设中的外水压力更突出。以锦屏二级水电站引水隧洞为例^[50-53]:锦屏二级水电站位于四川省凉山彝族自治州雅砻江干流,利用大河湾天然落差截弯取直,通过隧洞引水发电,总装机容量 4×800 MW,引水隧洞共 4 条,隧洞上覆岩体埋深 1 500~2 000 m,最大埋

深达 2 525 m,长探洞实测最大外水压力达 10.22 MPa,而钢筋混凝土无法承受 10 MPa 及以上的外水压力,施工过程中的高压涌水造成工程多次停工及重大经济损失。

3.2 水利水电深部地下工程主要灾害统计

如第 2 节所述,水利水电已有工程实践多以 600 m 以内浅埋的地下洞室为主,工程主要面临的灾害多呈现出受构造或岩性控制的岩爆和围岩劈裂现象。近 20 年来,随着国家“三深”战略的实施,深埋地下工程在中国水利水电领域蓬勃发展,并呈现出大埋深、长距离、大跨度等特征。然而,在深部极端复杂地质环境及强扰动作用下,这些长引水隧洞、大型地下洞室建设常存在复杂的地质问题并由此造成了一系列地质灾害^[54],见表 4。

1) 云南滇中引水工程:一期工程全线输水总干渠总长 664.24 km,最大埋深 1 450 m。隧洞沿线穿越地质条件复杂,包括断裂破碎带、岩溶发育段和高地应力环境等。施工建设过程中,突涌水与围岩大变形等工程地质问题频发。

2) 青海引大济湟输水隧洞:引水隧洞洞线总长为 24.3 km,最大埋深 1 100 m,采用一台双护盾式 TBM 施工。工程位于中纬度高寒少氧的高原地区,区域地质构造复杂,存在岩爆、区域性大断层、隧洞涌水和高外水压力等工程地质问题。

表 4 典型水利水电工程地下洞室地质问题

Tab. 4 Geological problems of underground caverns in typical hydraulic and hydropower projects

工程名称	隧洞规模			主要地质问题	强度应力比	最大主应力/ MPa	最大埋深/ m
	条数	单洞长度/ km	断面直径/ m				
锦屏二级	4	16.70	12.4~14.3	高地应力、高外水压、岩溶、岩爆、软岩	2.13	113.87	2 525
硬梁包	2	14.40	16.7	涌水突泥	—	17.96	220~310
双江口	—	—	—	高地应力、岩爆	1.58~2.44	38.00	320~500
叶巴滩	—	—	—	岩爆、围岩大变形	1.50~3.00	37.60	790
齐热哈塔尔	1	15.64	4.7	高地应力、岩爆、活动断裂、高地温、突涌水	—	—	1 720
昌波	4	11.50	—	高地应力、软岩	1.69~3.59	—	1 100
丹巴	2	17.00	8.0	高地应力、软岩	1.00~4.00	31.22	1 200
两家人	4	12.09	14.2	高地应力、岩爆	—	—	1 650
天生桥二级	3	9.56	9.5~10.8	高地应力、高外水压、活动断裂、岩溶、岩爆	—	30.55	800
大盈江四级	2	14.00	6.0	高地应力、软岩、塌方	—	—	400
南椰	1	11.00	7.5	高地应力、软岩	—	—	350
泗南	1	10.20	5.3	高地应力、软岩	—	—	610
滇中引水香炉山隧洞	2	62.60	16.7	岩爆、围岩大变形	1.70~7.00	46.10	310~1 450
引大济湟输水隧洞	1	24.30	—	岩爆、区域性大断层、隧洞涌水和高外水压力	—	30.70	1 100
南水北调	—	—	—	突涌水、岩爆、围岩变形、高地温等	2.13	113.87	1 150

3)双江口水电站:地下洞室群垂直埋深为320~500 m,实测地应力高达38 MPa,为当今世界已建和在建的地应力最高的水电站地下洞室群。地下洞室群赋存岩性主要为燕山期黑云钾长花岗岩,存在岩爆等工程地质问题。

4)硬梁包水电站:两条引水隧洞单条长度约为14.4 km,最大开挖直径16.7 m,在同类型在建地下长引水隧洞中规模最大。隧洞处于三大断裂交会地带,区域地质条件复杂、地震烈度高,围岩构造发育、蚀变强烈、岩体质量差、地下水丰富,洞室围岩稳定性差,工程建设中面临涌水突泥等灾害的挑战。

5)叶巴滩水电站:地处金沙江板块缝合带,地应力值高、地质条件复杂,实测地应力达37.8 MPa,多级结构面数量超700条,为已建水电站地下洞室群中最多,围岩变形稳定控制难度大,工程建设中面临岩爆、围岩劈裂剥落与大变形等灾害问题。

6)锦屏二级水电站:隧洞单洞长约16.6 km(4条),最大埋深约2 525 m,采用钻爆法与TBM法施工。隧洞施工过程中的高压涌水问题十分突出。此外,还有岩爆及围岩变形等不良工程地质问题。

综上,与浅部地下工程常见灾害相比,水利水电工程深部地下工程受赋存地质环境的影响,深埋环境和强扰动耦合作用下的地质灾害向多灾种和突发性转变,给深部地下工程建设带来诸多不确定性。

3.3 水利水电地下工程深度划分

如前所述,随着埋深的增加,深部地质环境变得愈发复杂极端,受限于工程实践和现有勘探测试手段,深部地质环境处于“黑箱”或“灰箱”状态,给水利水电工程深部地下洞室建设带来一系列盲目性和不确定性。本文从深部复杂的地质环境角度出发,结合水利水电工程地下洞室特点,从统计意义上,归纳总结水利水电深部地下工程面临的地质特征与埋深关系,为采取针对性的设计、施工和运维技术提供依据。

从地应力角度,本文统计了170余个水电工程地下洞室地应力已有实测数据,得到最大主应力与最小主应力比值随埋深的变化,如图6所示。由图6可知:地应力在0~600 m范围内,地应力以构造应力为主,此范围内,水电工程地下洞室轴线设计主要考虑洞轴线与最大水平地应力呈小角度;在600~1 000 m范围内,地应力由构造应力为主逐步向静水应力状态过渡,水利水电工程地下洞室轴线设计除考虑与最大水平主应力呈小角度关系外,还应考虑顶拱、边墙围岩稳定等情况;当埋深大于1 000 m时,最大、最小主应力比值逐渐趋于1.0,呈静水应力状态,突破了现有行业技术标准范畴(现有最大埋深709 m,叶巴滩水电站),给水电工程

地下厂房轴线布置和大型洞室群设计带来挑战。此外,根据已收集的强度应力比数值(表4),地下埋深0~600 m范围内,强度应力比受构造应力和岩体强度影响,强度应力比多在2.0~6.0之间,部分存在岩爆问题;地下埋深超过600 m时,强度应力比大部分在1.0~3.0区间,普遍存在岩爆问题,显示深部环境下,岩爆问题越来越突出。

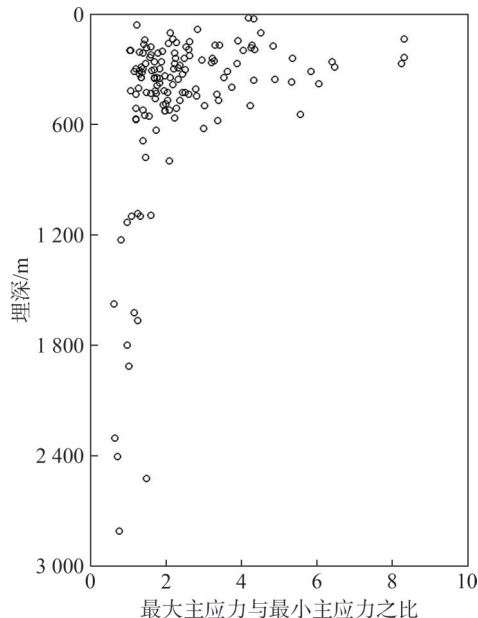


图6 地下工程最大主应力与最小主应力比值随埋深变化趋势

Fig. 6 Variation of ratios of maximum principal stress to minimum principal stress with burial depth in underground engineering

从地温角度,根据国内外高地温案例统计(图7),0~2 500 m埋深范围内,最高岩温多在40~80 °C之间。随着埋深增加,温度呈增加趋势,但埋深在0~1 000 m范围内,高地温分布较为离散,其分布更多的是受构造活动影响,如位于西藏的帕当山隧道、吉沃希嘎隧道、萨嘎隧道;埋深300 m范围内,有55.0~76.4 °C的高岩温。超过1 000 m埋深后,地温受深埋环境的地温场影响,总体呈随埋深增大温度增高的趋势,但局部仍受构造影响,比如齐热哈塔尔水电站工程发电引水隧洞,其埋深1 720 m,最高地温为110 °C。

在高水压方面,地下洞室承受的外水压力首先来自地下水,并受赋存岩体的水文地质结构影响,总体上随埋深的增加,外水压力增加,但同一深度范围内,岩体越破碎,面临的外水压力越高。已有地下洞室案例显示(图8):埋深0~600 m范围内,存在高水压地下洞室的外水压力多在2~4 MPa之间,其量值大小主要受地下水和岩体构成的水文地质结构影响;埋深超过600 m时,地下洞室面临的外水压力与埋深总体呈线

性关系,外水压力系数约为0.4~0.5。

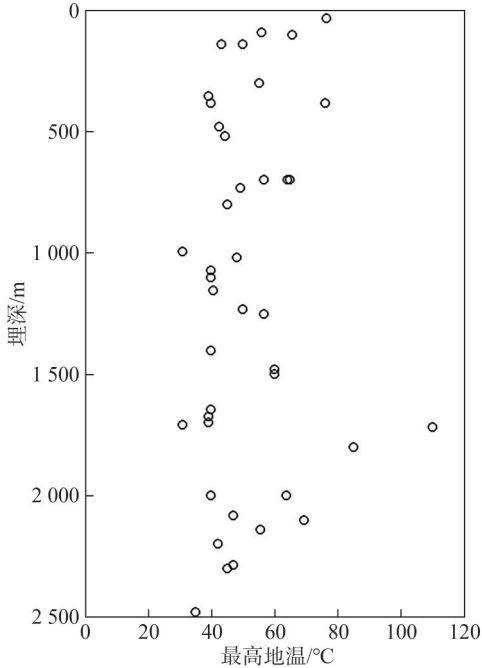


图7 国内外高地温工程地温随埋深变化规律

Fig. 7 Variations of ground temperatures with burial depth in high ground temperature cases at home and abroad

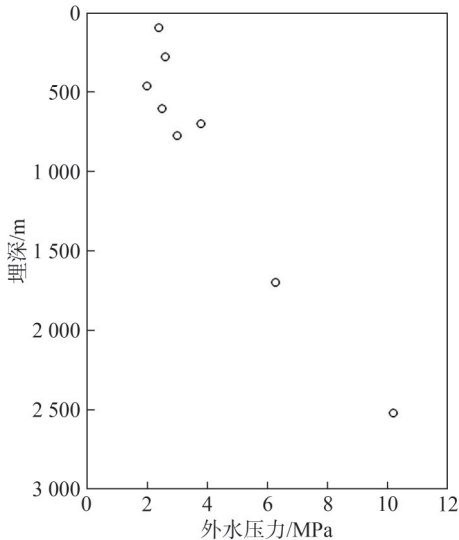


图8 代表性工程地下洞室外水压力随埋深变化特征

Fig. 8 Variations of external water pressure of underground caverns with burial depth in representative projects

从深部工程地质灾害角度,在深部高地应力、高地温和高水压等高能环境和强扰动作用下,水利水电深部地下洞室灾害在程度上、频度上均有增加的趋势,且成灾机理更加复杂,如岩爆频率和强度显著增加、突水突泥趋于严重、围岩变形量大,具有分区破坏性、作业环境恶化等特征。

综上所述,水利水电工程由于地下洞室的复杂性,

在建设过程中对深部地质环境有着特殊的应对策略,如地下厂房轴线与地应力方向关系、高地温对大型地下洞室群开挖支护的影响和外水压力对支护结构的影响等,以及由深部复杂的地质环境导致大型地下洞室群开挖过程中的岩爆、大变形、突水突泥等灾害问题也是决定工程成败的关键因素。通过前述大量的成果统计,埋深在0~600 m范围内,现有水电工程地下洞室设计规范、防治措施均具有很好的适应性;当埋深超过600 m时,水电工程大型洞室群在开挖过程中,岩爆、片帮、涌突水、围岩变形等各类工程灾害显著增加,同时厂房轴线与地应力方位的关系需要重点论证;埋深突破1 000 m后,高地应力、高地温和高水压的地质环境在强扰动作用下,岩爆、高渗透压、围岩变形等各类工程问题变得更为突出,现有规范体系下的地下洞室布置原则存在适用性问题。

由于地下深部是各类条件的综合体现,能直观、直接体现水利水电深部工程面临的特殊环境,有必要从深部宏观概念上体现水电工程地下洞室建设面临的主要问题,以便指导工程实践,为采取应对策略提供宏观支撑。总体而言,埋深0~600 m范围内,现有水利水电工程设计标准体系能够很好地适应大型地下洞室群建设,地质灾害影响可控;埋深在600~1 000 m范围内,受赋存地质环境的影响,现有标准体系存在一定的适应性问题,地下工程进入深部领域,需对输水发电系统布置及各类地质灾害处理进行论证;当埋深超过1 000 m时,地下工程进入超深领域,高能地质环境下现有标准体系存在适用性问题,如地下洞室群布置、设计等需进行论证,且在强扰动作用下的围岩灾变等成为制约工程成败的关键。

4 水利水电深部工程主要技术挑战

4.1 深部工程精细勘探

现有技术水平条件下,水利水电工程深地探测方面较突出的成绩主要包括:引大济岷工程在可研阶段布置了10个水平定向钻孔;引江补汉工程在建设工程中实施了一个定向勘察孔,主孔孔深达630.8 m、取心近160次,目标取心段岩心采取率达到95%,并在孔内进行了声波、水文等试验,为水电深埋隧洞工程勘察提供了新的手段。尽管现有技术在垂直定向、水平定向、斜孔定向等方面已有较为成熟的成果,但对深部复杂环境条件下的水电地下工程建设而言,仅垂直、水平或斜孔定向并不能满足深部千米级以上的勘探需求,以深部曲线定向钻探和同步取心为核心的深地工程探测技术将是未来的发展重点,并推动实现深地工程探测装备智能化、钻探过程规范化、钻孔质量可

控化和事故提前预判化。

同时,随钻随测是深部精准勘探必不可少的关键技术,包括实时测量地层压力、围岩力学特性、温度、不良地质体、钻孔轨迹等。研究超深钻孔实时数据高效传输、耐高温高压传感器、深地随钻随测技术及实时高效采集装备是未来深部探测技术的重点研究方向。

4.2 深部工程设计理论

理论是工程建设的基础。然而,随着地下工程进入深部,现有的理论基础并不完全适应深部环境,亟待更新。目前,针对岩石力学行为的理论认知大多是基于假三轴室内试验成果,这对于赋存于深部真三向高应力环境下的岩石可能并不适用,现有基于浅部岩石力学行为建立的理论模型很难真实反映深部岩石的力学特性,迫切需要依据深部特殊应力条件开展真三轴岩石(体)试验,以揭示深部岩石(体)的力学特性、变形破坏机制并建立相应的理论模型^[55-56]。

另一方面,现有的计算分析方法是基于中浅埋深条件下岩石力学理论建立的,在进行深部工程计算时可能出现偏差,有待改进。近年来,专家学者建立了一些适用于深部岩石的本构模型,一定程度上准确描述了深部高应力环境下岩石的力学行为,但这些本构模型存在尺度相对实际工程较小,参数较多难以确定、过于复杂不适宜工程计算等问题。因此,建立兼顾合理性与实用性的力学模型十分必要。

另外,岩石多场耦合力学特性在中浅埋深条件下并不显著,但对于水利水电深部工程而言,高应力、高地温、高水压耦合作用下岩石的力学行为应予以关注。深部高能地质环境下,岩体可能出现热损伤破坏或高压突涌水等灾害问题,在理论分析与工程计算方面应予以考虑^[57-58]。

4.3 深部工程智能建造

地下工程进入深部环境,现有的空间布局设计方法也需更新,体现在洞室轴线方向选择、洞室间距选定、洞室体型设计等方面。

洞室轴线方面,目前规范中轴线方向选取主要考虑的因素是最大主应力方向和结构面产状,这比较适宜中浅埋深的情况。当地下洞室处于深埋状态,3个方向的主应力量级接近一致,不能忽略中间和最小主应力的影响。因此,深部工程的轴线方向选取应考虑真三向应力状态,且对于不同主应力的影响,应量化评价而不仅是定性规定。

洞室间距方面,间距的选取应考虑深层岩体开裂的情况。已有研究^[59]表明,高地应力地下洞室在开挖应力调整过程中,会出现距离临空面一定距离的岩体

发生开裂的现象,并且裂纹随洞室下挖和应力调整进一步发展。因此,在设计深部洞室间距时,应考虑通过间距设计和支护,避免中间岩柱中裂纹的扩展和贯通。并且,在大跨度洞室开挖过程中,有可能会发生相邻小洞室的围岩破坏,即为洞群效应,这在洞室间距选定和开挖支护工序设计中也应考虑^[60]。

洞室体型方面,现有的洞室断面形状一般是基于中浅埋深条件设计的,在深部真三向应力状态下,目前普遍采用的断面形状是否有利于围岩整体受力,有待进一步研究。如:高地应力地下洞室群比较普遍出现顶拱围岩片帮、边墙围岩劈裂等现象,在深部环境下,可进一步优化断面形状,以降低顶拱应力集中和边墙卸荷的不利影响^[61-62]。因此,有必要结合深部应力状态,对现有的洞室断面形状和体型进行针对性优化。

综上,水利水电深部工程应建立适用于深部环境的地下洞室群空间布局基本理念及设计方法,包括洞室轴线、洞室间距、洞室体型设计方法等。

4.4 深部工程灾害防控

在水利水电深部地下工程灾害防控方面,现有技术方法也应进行调整,以适应深部特殊地质条件。针对深部真三向高应力状态,建议提出适应应力调整的大跨度高边墙地下洞室群开挖方法。对开挖步序、分层分区进行优化调整,弱化应力集中与卸荷影响,对爆破工艺进行优化以更适应高应力状态,并在必要时进行预支护。针对洞室部位不同应力状态、不同变形破坏模式及机制,提出靶向支护技术,对洞室分部位、深浅分区、时机分步序实施支护,并创新应用纤维混凝土、纤维锚杆等新型材料。

深部工程的地质环境特征及致灾机理目前仍处于“黑箱”或“灰箱”状态,因此实现岩体性态感知与透明监测是未来需解决的问题。建立深部岩体性态感知技术,通过多源监测感知手段及多源数据融合方法,将应力、变形、损伤、微震、结构面等多源信息融合重构与推演,实时掌握深部岩体随开挖卸荷的响应过程及性态。通过全局表观形变与局部内观响应信息融合,捕捉围岩内部损伤开裂演化至宏观变形破坏的孕育过程,避免传统点线式监测易出现空区的不足,实现深部工程的全域透明化安全监测^[63]。并在此基础上,建立多源信息协同反馈体系,实现深部工程的开挖支护动态防控^[64-67]。

4.5 深部工程智慧运维

水利水电深部地下工程后期运维过程仍面临着大量的安全难题,包括突发灾害应急救援、围岩大变形或失稳坍塌等重大安全难题,需重点关注深部隧

洞、巨型硐室群等特殊场景可能出现的工程灾害,以期形成深部工程智慧健康运维理论技术体系。

经过多年发展,水利水电深部工程智慧运维技术体系的构建目前正经历从人工经验向数字智能的转型。当前技术框架以多模态感知与数据融合为核心,通过传感器网络实时采集围岩应力、渗流、设备振动等多维数据,结合人工智能算法实现设备故障早期预警与性能优化。此外,数字孪生与边缘计算技术的初步应用,已构建覆盖工程全生命周期的虚拟模型,实现物理实体与数字空间的动态同步,并通过边缘设备完成数据预处理,显著缩短关键预警响应时间。

未来,水利水电深部工程智慧运维技术可重点关注以下三大方向:其一,多场耦合预警技术的深度应用,通过融合地应力、渗流、温度场数据,构建“前兆识别—风险评估—动态调控”的全链条预警模型,突破单一阈值报警的局限性;其二,自适应支护技术与智能调控装置研发,提升支护结构对围岩动态响应的匹配能力;其三,主动式逃生通道设计与多能互补应急能源系统集成,结合定位系统与烟气扩散模拟优化疏散路径,同时利用新能源技术保障应急供电。

综上,通过对这些技术挑战的突破,水利水电深部工程将真正实现从被动响应到主动防控的范式转变,为复杂地质条件下的工程高效建设与安全服役提供核心技术支撑。

5 结论与展望

向深地进军是国家重要战略,水利水电地下工程埋深正向超数千米级发展,而现有水利水电地下洞室群埋深多在 600 m 范围内,深部环境下的现有技术标准体系存在适用性问题,亟需界定水利水电地下工程深部概念,消除水利水电深部地下工程建设的不确定性,指导工程实践,并提前采取针对性的策略和措施。基于此,本文对不同行业深部地下工程进行了系统的梳理,结合水利水电工程地下引水隧洞长,单个洞室规模大、成群分布,扰动作用强等特点,从深部高能地质环境特征、水利水电工程深部地下工程特点与围岩灾害特征等方面,对水利水电深部工程埋深进行了界定:埋深 0~600 m 范围,现有技术标准体系能很好地支撑水利水电地下工程的建设,工程灾害总体不突出;埋深 600~1 000 m 范围内,工程灾害频率及强度逐渐增加,现有技术标准体系存在一定的适用性问题;埋深超过 1 000 m 时,水利水电地下工程布置、设计需进行专项论证,工程灾害也成为制约地下工程成败的关键因素。在此基础上,梳理和展望了水利水电深部工程在精准勘探与随钻感知、设计理论创新、工程布置与智能建

造、灾害预防与主动控制和智慧运维与应急逃生等方面需重点突破的关键技术,以期为水利水电深部地下工程设计、建设和运维提供指导,拓展深地空间开发利用边界,促进深部能源的开发利用。

参考文献:

- [1] Xie Heping, Zhang Ru, Zhang Zetian, et al. Exploration and thinking on deep science and deep engineering technology[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(11): 3959–3978. [谢和平, 张茹, 张泽天, 等. 深地科学与深地工程技术探索与思考[J]. 煤炭学报, 2023, 48(11): 3959–3978.]
- [2] Zhang Shishu. Research status and development trend of deep geological exploration techniques for hydraulic and hydropower engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2025, 44(6): 1377–1404. [张世殊. 水利水电深部工程地质勘察技术现状与发展趋势[J]. 岩石力学与工程学报, 2025, 44(6): 1377–1404.]
- [3] He Manchao. Conception system and evaluation indexes for deep engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(16): 2854–2858. [何满潮. 深部的概念体系及工程评价指标[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(16): 2854–2858.]
- [4] Xie Heping, Gao Feng, Ju Yang. Research and development of rock mechanics in deep ground engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(11): 2161–2178. [谢和平, 高峰, 鞠杨. 深部岩体力学研究探索[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(11): 2161–2178.]
- [5] Xu Zemin, Huang Runqiu, Wang Shitian. Tunnel classifying in light of depth(i.e. thickness of overburden)[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2000, 11(4): 5–10. [徐则民, 黄润秋, 王士天. 隧道的埋深划分[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2000, 11(4): 5–10.]
- [6] He Manchao, Lü Xiaojian, Jing Haihe, et al. Characters of surrounding rockmass in deep engineering and its non-linear dynamic-mechanical design concept[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(8): 1215–1224. [何满潮, 吕晓俭, 景海河, 等. 深部工程围岩特性及非线性动态力学设计理念[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(8): 1215–1224.]
- [7] 中华人民共和国交通运输部. 公路隧道设计规范第一册 土建工程: JTG 3370.1—2018[S]. 北京: 人民交通出版社, 2018.]
- [8] 国家能源局. 水电水利工程深埋地下洞室开挖施工规范 DL/T 5854—2022[S]. 北京: 中国电力出版社, 2022.]
- [9] Hudson J A. Engineering rock mechanics[M]. London: Reedwood Publishing Company, 1997.
- [10] Sellers E J, Klerck P. Modelling of the effect of discontinuities on the extent of the fracture zone surrounding deep tunnels[J]. Tunnelling and Underground Space Technology,

- 2000,15(4):463–469.
- [11] Malan D F. Time-dependent behaviour of deep level tabular excavations in hard rock[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 1999,32(2):123–155.
- [12] He Manchao, Wu Yiyi, Gao Yubing, et al. Progress of rock mechanics in deep mining[J]. *Journal of China Coal Society*, 2024,49(1):75–99. [何满潮, 武毅艺, 高玉兵, 等. 深部采矿岩石力学进展[J]. *煤炭学报*, 2024,49(1):75–99.]
- [13] He Manchao. Research progress of deep shaft construction mechanics[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021,46(3):726–746. [何满潮. 深部建井力学研究进展[J]. *煤炭学报*, 2021,46(3):726–746.]
- [14] 何满潮. 深部开采工程岩石力学现状及其展望[C]//第八次全国岩石力学与工程学术大会论文集. 成都:科学出版社, 2004:99–105.
- [15] Xie Heping. Research review of the state key research development program of China: Deep rock mechanics and mining theory[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019,44(5):1283–1305. [谢和平. 深部岩体力学与开采理论研究进展[J]. *煤炭学报*, 2019,44(5):1283–1305.]
- [16] Qian Qihu, Li Shuchen. A review of research on zonal disintegration phenomenon in deep rock mass engineering[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008,27(6):1278–1284. [钱七虎, 李树忱. 深部岩体工程围岩分区破裂化现象研究综述[J]. *岩石力学与工程学报*, 2008,27(6):1278–1284.]
- [17] Wang Mingyang, Zhou Zeping, Qian Qihu. Tectonic, deformation and failure problems of deep rock mass[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006,25(3):448–455. [王明洋, 周泽平, 钱七虎. 深部岩体的构造和变形与破坏问题[J]. *岩石力学与工程学报*, 2006,25(3):448–455.]
- [18] Li Shucui, Wang Hanpeng, Qian Qihu, et al. *In-situ* monitoring research on zonal disintegration of surrounding rock mass in deep mine roadways[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008,27(8):1545–1553. [李术才, 王汉鹏, 钱七虎, 等. 深部巷道围岩分区破裂化现象现场监测研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2008,27(8):1545–1553.]
- [19] Hu Kun, Zhao Lunyang, Li Pengfei, et al. Micromechanical damage model for the brittle-ductile transition in deep hard rock[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2024,56(3):11–20. [胡坤, 赵伦洋, 李鹏飞, 等. 深部硬岩脆–延性转化行为的细观损伤模型[J]. *工程科学与技术*, 2024,56(3):11–20.]
- [20] Zuo Yujun, Li Xibing, Ma Chunde, et al. Catastrophic model and testing study on failure of static loading rock system under dynamic loading[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005,24(5):741–746. [左宇军, 李夕兵, 马春德, 等. 动静组合载荷作用下岩石失稳破坏的突变理论模型与试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005,24(5):741–746.]
- [21] Wang Xiangyu, Zhou Hongwei, Zhong Jiangcheng, et al. Study on energy evolution and permeability characteristics of deep coal damage under triaxial cyclic loading and unloading conditions[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018,37(12):2676–2684. [王向宇, 周宏伟, 钟江城, 等. 三轴循环加卸载下深部煤体损伤的能量演化和渗透特性研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2018,37(12):2676–2684.]
- [22] Wang Lujun, Zhou Hongwei, Rong Tenglong, et al. Nonlinear creep constitutive model and experimental study of deep coal body[J]. *Journal of China Coal Society*, 2018,43(8):2196–2202. [王路军, 周宏伟, 荣腾龙, 等. 深部煤体非线性蠕变本构模型及实验研究[J]. *煤炭学报*, 2018,43(8):2196–2202.]
- [23] 周宏伟, 彭瑞东, 薛东杰, 等. 深部开采中强扰动和强时效基本特征初探[M]. 北京:高等教育出版社, 2016:571–580.
- [24] Qiao Lan, Zhang Yihai, Li Yuan, et al. A non-linear elastic model and high-level biaxial loading and unloading test for CSIRO *in situ* stress measurement in deep granite[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2019,38(1):40–48. [乔兰, 张亦海, 李远, 等. 深部花岗岩 CSIRO 地应力测量中高压双轴加卸载试验及非线性弹性分析模型[J]. *岩石力学与工程学报*, 2019,38(1):40–48.]
- [25] Song Zhanping, Wang Bowen, Fan Shengyuan, et al. Nonlinear creep intrinsic modeling of hard rock considering aging damage[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2024,43(10):2368–2380. [宋战平, 王博文, 范胜元, 等. 考虑时效损伤的硬岩非线性蠕变本构模型研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2024,43(10):2368–2380.]
- [26] Zhu Hehua, Cai Wuqiang, Liang Wenhao, et al. Three-dimensional analysis theory of GZZ rock mass strength and stress control design analysis method of deep buried tunnel[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2023,42(1):1–27. [朱合华, 蔡武强, 梁文灏, 等. GZZ 岩体强度三维分析理论与深埋隧道应力控制设计分析方法[J]. *岩石力学与工程学报*, 2023,42(1):1–27.]
- [27] Xie Heping. Research framework and anticipated results of deep rock mechanics and mining theory[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2017,49(2):1–16. [谢和平. “深部岩体力学与开采理论”研究构想与预期成果展望[J]. *工程科学与技术*, 2017,49(2):1–16.]
- [28] Liu Quansheng, Lei Guangfeng, Peng Xingxin. Advance and review on the anchoring mechanism in deep fractured rock mass[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and En-*

- gineering,2016,35(2):312–332.[刘泉声,雷广峰,彭星新.深部裂隙岩体锚固机制研究进展与思考[J].岩石力学与工程学报,2016,35(2):312–332.]
- [29] He Manchao,Guo Pingye.Deep rock mass thermodynamic effect and temperature control measures[J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(12): 2377–2393.[何满潮,郭平业.深部岩体热力学效应及温控对策[J].岩石力学与工程学报,2013,32(12):2377–2393.]
- [30] Xia Kaiwen,Wang Shuai,Xu Ying,et al.Research progress of deep rock dynamics experiment[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(3): 448–475. [夏开文,王帅,徐颖,等.深部岩石动力学实验研究进展[J].岩石力学与工程学报,2021,40(3):448–475.]
- [31] Rao Pingping,Feng Weikang,Cui Jifei,et al. Response of rock breaking by high-voltage electrical pulse considering multi-field coupling[J].Advanced Engineering Sciences, 2024,56(6):93–102.[饶平平,冯伟康,崔纪飞,等.考虑多场耦合高压电脉冲作用下岩体破碎响应[J].工程科学与技术,2024,56(6):93–102.]
- [32] Zuo Jianping,Xie Heping,Zhou Hongwei,et al.SEM *in situ* investigation on thermal cracking behaviour of Pingdingshan sandstone at elevated temperatures[J]. Geophysical Journal International,2010,181(2):593–603.
- [33] Zuo Jianping,Xie Heping,Dai Feng,et al.Three-point bending test investigation of the fracture behavior of siltstone after thermal treatment[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,2014,70:133–143.
- [34] Yu Hongdan, Chen Feifei, Chen Weizhong, et al. Study on seepage mechanical characteristics of fractured rock[J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2012, 31(S1):2788–2795.[于洪丹,陈飞飞,陈卫忠,等.含裂隙岩石渗流力学特性研究[J].岩石力学与工程学报,2012, 31(S1):2788–2795.]
- [35] Li Xiangchun,Zhang Liang,Zhao Yiliang.Evolution of gas-filled coal creep-seepage under conventional triaxial compression[J].Advanced Engineering Sciences,2018,50(4):55–62.[李祥春,张良,赵艺良.常规三轴压力下含瓦斯煤蠕变-渗流演化规律[J].工程科学与技术,2018,50(4):55–62.]
- [36] Chen Weizhong,Gong Zhe,Yu Hongdan,et al.Review of thermo-hydro-mechanical coupled tests and constitutive models of clays[J].Rock and Soil Mechanics,2015,36(5): 1217–1238.[陈卫忠,龚哲,于洪丹,等.黏土岩温度-渗流-应力耦合特性试验与本构模型研究进展[J].岩土力学, 2015,36(5):1217–1238.]
- [37] Dong Zhihong,Ding Xiuli,Huang Shuling,et al.Analysis of ageing-stress characteristics and long-term bearing risk of anchor cable for a large cavern in high geo-stress area[J]. Rock and Soil Mechanics,2019,40(1):351–362.[董志宏,丁秀丽,黄书岭,等.高地应力区大型洞室锚索时效受力特征及长期承载风险分析[J].岩土力学,2019,40(1): 351–362.]
- [38] Jiang Quan,Feng Xiating,Li Shaojun,et al.Cracking-restraint design method for large underground caverns with hard rock under high geostress condition and its practical application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2019,38(6):1081–1101.[江权,冯夏庭,李邵军,等.高应力下大型硬岩地下洞室群稳定性设计优化的裂化-抑制法及其应用[J].岩石力学与工程学报,2019,38(6): 1081–1101.]
- [39] Feng Xiating,Zhou Yangyi,Jiang Quan.Rock mechanics contributions to recent hydroelectric developments in China[J].Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering,2019,11(3):511–526.
- [40] He Manchao,Ren Fuqiang,Liu Dongqiao,et al.Experimental study on strain burst characteristics of sandstone under true triaxial loading and double faces unloading in one direction[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2021, 54(1):149–171.
- [41] Li Biao,Xu Nuwen,Xiao Peiwei,et al.Microseismic monitoring and forecasting of dynamic disasters in underground hydropower projects in southwest China: A review[J].Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering,2023, 15(8):2158–2177.
- [42] Shi Anchi,Li Congjiang,Hong Wangbing,et al.Comparative analysis of deformation and failure mechanisms of underground powerhouses on the left and right banks of Baihetan hydropower station[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering,2022,14(3):731–745.
- [43] Li Xinping,Wang Bin,Zhou Guilong.Research on distribution rule of geostress in deep stratum in Chinese mainland [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012,31(S1):2875–2880.[李新平,汪斌,周桂龙.我国大陆实测深部地应力分布规律研究[J].岩石力学与工程学报,2012,31(增1):2875–2880.]
- [44] Ding Xiuli,Zhang Yuting,Huang Shuling,et al.Large deformation mechanism of surrounding rock masses of tunnels, prediction method of squeezing large deformation and its application[J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2023,42(3):521–544.[丁秀丽,张雨霆,黄书岭,等.隧洞围岩大变形机制、挤压大变形预测及应用[J].岩石力学与工程学报,2023,42(3):521–544.]
- [45] Zhang Guohua,Zhang Bowen,Tan Fei,et al.Origin of clay in granite intrusive contact zone and its influence on tunnel deformation and instability[J]. Engineering Geology, 2023,313:106965.

- [46] Li Shucai, Xu Zhenhao, Huang Xin, et al. Classification, geological identification, hazard mode and typical case studies of hazard-causing structures for water and mud inrush in tunnels[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(5): 1041–1069. [李术才, 许振浩, 黄鑫, 等. 隧道突水突泥致灾构造分类、地质判识、孕灾模式与典型案例分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(5): 1041–1069.]
- [47] Zhang Guohua, Wang Chengtang, Jiao Yuyong, et al. Deposits sources of inrush hazards for the Liangshan Tunnel passing through deeply buried granite[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019, 92: 103058.
- [48] Zhang Guohua, Xie Zhongzhi, Zhang Bowen, et al. Sources of high-temperature water and gas inrush during tunnel excavation: A case of Bangfu tunnel in Southwest China[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2024, 16(12): 5027–5049.
- [49] Huang Wei, Sun Yun, Zhang Jianping, et al. Research review on high external water pressure of deep-buried tunnels[J]. Journal of China Three Gorges University(Natural Sciences), 2023, 45(5): 1–11. [黄威, 孙云, 张建平, 等. 深埋隧洞高外水压力研究进展[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2023, 45(5): 1–11.]
- [50] Ren Xuhua, Wang Meiqin, Wang Shuhong, et al. Study on the external water pressure of deep-lying tunnel in Jinping hydropower station[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2004, 31(3): 85–88. [任旭华, 王美芹, 王树洪, 等. 锦屏二级水电站深埋隧洞外水压力研究[J]. 水文地质工程地质, 2004, 31(3): 85–88.]
- [51] Zhang Shishu, Pei Xiangjun, Wei Xiaojia, et al. Back analysis of structural loads and deformation characteristics of erguxi tunnel 1[#] at Shiziping hydropower station[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(11): 2283–2290. [张世殊, 裴向军, 魏小佳, 等. 狮子坪电站二古溪 1[#] 隧道变形破坏特征及结构荷载反分析研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(11): 2283–2290.]
- [52] Jiang Quan, Feng Xiating, Zhou Hui. Study on acceptable minimum interval of long deeply burial hydropower tunnels in Jinping II hydropower station[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(3): 656–662. [江权, 冯夏庭, 周辉. 锦屏二级水电站深埋引水隧洞群允许最小间距研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(3): 656–662.]
- [53] Ren Xuhua, Chen Xiangrong, Shan Zhigang, et al. Water problems and corresponding countermeasures in projects of deep-lying long tunnels located in water-rich regions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(11): 1924–1929. [任旭华, 陈祥荣, 单治钢, 等. 富水区深埋长隧洞工程中的主要水问题及对策[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(11): 1924–1929.]
- [54] Song Yue, Jia Guochen, Bian Jianfeng, et al. The gradation and classification for geological condition complexity of deeply embedded long tunnels of hydropower projects[J]. Design of Water Resources & Hydroelectric Engineering, 2008, 27(4): 30–33. [宋岳, 贾国臣, 边建峰, 等. 水利水电深埋长隧洞工程地质条件复杂性分级与分类[J]. 水利水电工程设计, 2008, 27(4): 30–33.]
- [55] Feng Xiating, Xu Hong, Yang Chengxiang, et al. Influence of loading and unloading stress paths on the deformation and failure features of Jinping marble under true triaxial compression[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2020, 53(7): 3287–3301.
- [56] Zhu Chuanqi, Zhao Jun, Xue Jiachao, et al. A simplified three-dimensional crack growth model to simulate the deformation of brittle rock under true triaxial stresses[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2022, 274: 108784.
- [57] Wu Shiyong, Wang Ge. Rock mechanical problems and optimization for the long and deep diversion tunnels at Jinping II hydropower station[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2011, 3(4): 314–328.
- [58] Tao Jian, Shi Anchi, Li Hongtao, et al. Thermal-mechanical modelling of rock response and damage evolution during excavation in prestressed geothermal deposits[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2021, 147: 104913.
- [59] Feng Xiating, Pei Shufeng, Jiang Quan, et al. Deep fracturing of the hard rock surrounding a large underground cavern subjected to high geostress: *In situ* observation and mechanism analysis[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2017, 50(8): 2155–2175.
- [60] Wang Meng, Shi Anchi, Li Haibo, et al. Mechanism analysis of surrounding rock mass failure induced by the multi-cavern effect in a large-scale underground powerhouse[J]. Applied Sciences, 2023, 13(7): 4376.
- [61] Su Guoshao, Chen Yanxiang, Jiang Quan, et al. Spalling failure of deep hard rock Caverns[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2023, 15(8): 2083–2104.
- [62] Liu Guofeng, Feng Xiating, Jiang Quan, et al. *In situ* observation of spalling process of intact rock mass at large cavern excavation[J]. Engineering Geology, 2017, 226: 52–69.
- [63] Zhang Shishu, Yang Weimin, Qin Nianwen, et al. Research status of transparent technology for geological information of ultra-deep buried tunnels[J/OL]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2025. (2025–03–25)[2025–05–20]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?dbcode=CJFD&dbname=CJFD&filename=BASE20250324003>. [张世殊, 杨为民, 秦念稳, 等. 超深埋隧道地质信息透明化技术

研究现状[J/OL]. 地下空间与工程学报, 2025. (2025-03-25) [2025-05-20]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?dbcode=CJFD&dbname=CJFD&filename=BASE20250324003>.]

- [64] Zhang Ru, Lü You, Zhang Zetian, et al. Development and prospect of multidimensional information perception and intelligent construction in deep earth engineering[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(3): 1259–1290. [张茹, 吕游, 张泽天, 等. 深地工程多维信息感知与智能建造的发展与展望[J]. 煤炭学报, 2024, 49(3): 1259–1290.]
- [65] Zhang Ping, Ren Song, Wu Fei, et al. Prediction method of rockburst in deep buried tunnel based on multi-source data fusion[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2024, 54(3): 707–716. [张平, 任松, 吴斐, 等. 多源数据融合的深埋隧道岩爆预测方法[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2024, 54(3): 707–716.]
- [66] Peng Hao, Han Yu, Liang Ming, et al. Research on dynamic safety assessment technology for tunnel construction based on multi-source information fusion[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2025, 47(9): 1893–1902. [彭浩, 韩玉, 梁铭, 等. 基于多源信息融合的隧道施工综合安全动态

评估技术研究[J]. 岩土工程学报, 2025, 47(9): 1893–1902.]

- [67] Zhang Shishu, Wang Peng, Zhang Kai, et al. An advanced geological forecast method of tunnels based on multi-source data fusion of full-process information[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2025, 44(4): 838–849. [张世殊, 王鹏, 张开, 等. 基于全过程信息的多源数据融合隧道超前地质预报方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2025, 44(4): 838–849.]



张世殊, 中国电建集团首席技术专家, 享受国务院政府特殊津贴, 国家百千万人才工程人选, 国家有突出贡献的中青年专家, 第十八次李四光地质科学奖获得者, 四川省有突出贡献的优秀专家, 四川省工程勘察设计大师。兼任国际岩石力学与岩石工程学会中国国家小组副主席、中国岩石力学与工程学会第十届理事会副理事长、四川省岩石力学与工程学会理事长。主要从事深部工程地质与灾害防控研究, 先后荣获国家科技进步奖二等奖 1 项、省部级科技进步奖 14 项, 获得国家专利授权 90 余件, 牵头编制国家行业技术标准 9 部, 出版技术专著 13 部, 发表论文 90 余篇。

Concept and Key Technical Challenges of Deep Underground Hydraulic and Hydropower Engineering

ZHANG Shishu, ZHAO Xiaoping

(POWERCHINA Chengdu Engineering Corporation Limited, Chengdu 610031, China)

Abstract:

Significance Advancing into the Earth's deep interior has become a key direction in China's current strategic scientific and technological development. As a crucial component of the national clean energy system, hydropower projects are extending their underground construction toward depths exceeding one kilometer and even deeper. These deep geological environments are typically characterized by extreme conditions such as high in-situ stress, elevated geothermal gradients, and high pore pressure. The associated disaster-inducing factors differ significantly from those in shallower zones, revealing the limitations of conventional engineering design methodologies and technical standards in such settings. Existing project statistics indicate that geological hazards, including rockbursts, spalling, and large deformations, occur frequently at depths greater than 600 meters. Moreover, the large-scale, complex spatial structure and high disturbance intensity of deep underground caverns amplify the risk of cascading failures in surrounding rock masses. Traditional depth-based classifications are no longer sufficient to fully characterize the high-energy geological environment encountered in deep hydraulic and hydropower projects. There is an urgent need to systematically redefine the boundaries of "deep" environments from the integrated perspective of stress, temperature, and pore pressure, and to establish corresponding disaster prevention and engineering design systems, thereby enhancing the scientific rigor and safety of deep underground hydropower construction.

Progress Based on a systematic review of how the concept of "deep" is defined across industries, including mining, transportation, hydraulic and hydropower, this study examines its relevance in the context of hydraulic and hydropower engineering, in which the unique structural and environmental characteristics of large-scale underground hydraulic structures have been taken into account. From this perspective, the study defines the notion of "deep" in hydraulic and hydropower underground projects through three interrelated dimensions: the evolution of stress-dominated mechanical regimes, the classification of high-temperature thermal hazards, and the progressive increase in pore pressure. Within this framework, underground spaces at depths of less than 600 meters, depths between 600 and 1 000 meters and depths exceeding 1 000 meters are respectively identified as conventionally controllable zones, hazard-intensified zones and ultra-deep complex zones, which require specialized technical assessment and justification. Building on this refined classification, the study further investigated the critical challenges existing throughout the full life cycle of deep hydraulic and hydropower projects. There are five core technical directions, where significant breakthroughs are urgently needed: 1) Precise exploration and real-time sensing during drilling: There is a need to develop directional drilling and synchronous coring technologies adapted to environ-

ments with high geothermal gradients and high pore pressures. These technologies should be integrated with sensors capable of withstanding extreme conditions to enable real-time transmission of deep geological data and inversion of dynamic parameters, thereby providing high-resolution geological constraints for the layout and design of underground cavern groups; 2) Design theory for large-scale deep-buried cavern groups: It is necessary to establish a coordinated design framework that incorporates tunnel axis optimization, spacing control, and structural synergy under true triaxial stress conditions. This theoretical system aims to overcome the limitations of traditional two-dimensional assumptions and enhance the adaptability of design strategies to the challenges posed by deep geological environments; 3) Engineering layout and intelligent construction: Advancing collaborative excavation technologies—such as stepwise and zoned excavation—alongside multi-parameter blasting optimization methods is essential. These should be supported by targeted support systems, including high-performance rock bolts, sprayed concrete, and composite linings, to ensure safe construction under conditions of high stress and elevated temperature; 4) Disaster prevention and proactive control: For typical deep geological hazards such as rockbursts, large deformations, and high-permeability seepage, it is critical to establish an integrated prevention and control framework based on the “source-pathway-receptor” model. This framework should incorporate technologies such as curtain grouting, pre-relief blasting, and zoned drainage and guidance systems to improve disaster response preparedness and promote coordinated stability between surrounding rock and supporting structures; 5) Smart operation, maintenance, and emergency evacuation: The construction of a multi-parameter coupled sensing system and a digital twin platform is necessary to establish a closed-loop management mechanism encompassing early warning, emergency response, and post-event recovery. This system should integrate monitoring of thermal hazards, seepage, and deformation with the deployment of escape routes and emergency power systems, thus enabling proactive safety management over the long service life of deep underground hydraulic and hydropower facilities.

Conclusions and Prospects As hydraulic and hydropower underground projects extend into kilometer-scale depths, the types of risks, their underlying mechanisms, and the corresponding prevention strategies in design, construction, and operation undergo fundamental transformation. Within this context, a depth of 600 meters can be considered the upper applicability limit of current technical systems, whereas 1 000 meters represents a critical threshold that demands special attention. To address these challenges, a zoned and hierarchical engineering response framework should be established to provide more targeted solutions across five key technological domains. First, high-precision exploration and enhanced sensing of thermo-hydro-mechanical coupling parameters are essential to characterize deep geological environments accurately. Second, multi-objective collaborative design methods must be formulated under true triaxial stress conditions to improve structural adaptability. Third, intelligent construction equipment and processes should be developed, guided by multi-source information, to ensure safety and efficiency during excavation. Fourth, integrated risk-control strategies combining blockage, drainage, and pressure relief need to be deployed to achieve proactive disaster management. Fifth, smart operation and maintenance systems should be built on big-data platforms and predictive modeling to support long-term monitoring and resilience. In conclusion, these pathways are expected to substantially enhance engineering safety, operational reliability, and economic viability of deep underground hydraulic and hydropower projects under extreme geological conditions. In addition, they will provide replicable and transferable technical support for deep-earth resource development and the implementation of major infrastructure projects.

Key words: hydraulic and hydropower engineering; deep engineering geology; geological environment; surrounding rock catastrophe; technical challenges

(编辑 李轶楠)

引用格式:Zhang Shishu,Zhao Xiaoping. Concept and key technical challenges of deep underground hydraulic and hydropower engineering[J].Advanced Engineering Sciences,2026,58(1):1–17.[张世殊,赵小平. 水利水电深部地下工程:地质环境、围岩灾变与技术挑战[J].工程科学与技术,2026,58(1):1–17.]