

文章编号: 1007-2993(2022)06-0437-06

基于滑动测微计的高地应力洞室围岩变形研究

张石磊^{1,2} 田振华^{1,2}

(1. 中国水利水电科学研究院, 北京 100048; 2. 北京中水科工程集团有限公司, 北京 100048)

【摘要】 基于工程地质调查及滑动测微计监测成果, 从空间连续角度(围岩应变)讨论了圆筒形洞室穹顶、长廊型洞室群中隔墙岩柱在下挖阶段的围岩变形特征; 分析圆筒形洞室顶板变形空间分异性和演化规律; 揭示了洞室群中隔墙岩柱的松弛圈范围及演化特征。研究表明: (1) 结构面对圆筒形洞室穹顶围岩变形量级影响很小(5 mm 以内), 穹顶结构面区段与Ⅲ级围岩变形规律类似, 围岩变形主要发生在掌子面近接施工期, 且影响范围局限于正穹顶; (2) 滑动测微孔内空气与洞室大气联通, 测值具有周期变化规律; (3) 长廊型洞室中隔墙岩柱松弛圈范围与应力集中程度影响成正比, 应力集中区松弛区深度约为开挖高度的1/3; 松弛圈的发展主要发生在下挖阶段, 洞室成型后, 基本无扩展。研究成果可供高地应力深埋洞室的支护结构优化和稳定性评价参考。

【关键词】 高地应力; 圆筒形洞室; 长廊型洞室; 围岩变形; 松弛区

【中图分类号】 TU 45

【文献标识码】 A

doi: 10.3969/j.issn.1007-2993.2022.06.002

Research on Deformation of Surrounding Rock by Linear Monitoring Technology in Large Underground Cavity with High Geostress

Zhang Shilei^{1,2} Tian Zhenhua^{1,2}

(1. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China;
2. Beijing IWHR Corporation, Beijing 100048, China)

【Abstract】 Based on the monitoring data of INCREX Mobile Extensometer implemented on the dome and engineering geological investigation in large underground cavity, the deformation characteristics of surrounding rock of dome in the cylindrical cavern and the middle wall of the long corridor-shaped underground cavern are discussed, as well as the development of relaxation circle. The spatial differentiation and evolution law of deformation in the cylindrical cavern dome are analyzed. The range and evolution characteristics of relaxation zone of mid-partition in large underground caverns are clarified. The results show that: (1) The structural plane has little influence on the deformation magnitude of the surrounding rock of the cylindrical cavern dome (within 5 mm), and the deformation law of the joint rock in the dome is similar to that of the grade III surrounding rock. The deformation of the surrounding rock mainly occurs in the construction period near the excavation face, and the influence range is limited to the normal dome. (2) The air in the measuring micrometer borehole is connected with the air in the cavern, and the measured value has a periodic variation. (3) The range of relaxation zone is proportional to the degree of stress concentration, and the maximal depth of relaxation zone is about 1/3 of the excavation height. The development of relaxation zone is mainly concentrated in the excavation stage, and there is basically no expansion after the cavity is formed. The research results can provide reference for the optimization and stability evaluation of the supporting structure of deep buried caverns under high geostress.

【Key words】 high geostress; cylindrical underground cavern; long corridor-shaped underground cavern; deformation of surrounding rock; relaxation zone

0 引言

围岩力学行为受制于地应力及结构面等因素影响, 变形特征复杂^[1]。近年来, 研究者基于三峡工程、锦屏等项目对工程岩体变形特性进行了卓有成效的

研究。彭琦等^[2]、魏进兵等^[3]、黄润秋等^[4]对中低地应力条件、高应力与低应力强度比的围岩变形特征进行研究, 总结出不同条件下围岩变形主要由结构面张开位移及岩块卸荷变形构成。卢波等^[5]、江

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFC1508502)

作者简介: 张石磊, 男, 1986年生, 汉族, 河南濮阳人, 主要从事大坝安全监测及岩体力学研究。E-mail: zhangsl@iwhr.com

权等^[6]、喻军等^[7]基于地质调查及围岩变形监测分析了高应力条件、结构面因素对围岩变形和破坏的影响。刘健等^[8]、孟国涛等^[9]在地质调查、监测数据分析基础上,详细阐述了地下厂房构造应力场对洞室群变形破坏的控制作用,用数值模型分析了白鹤滩地下厂房顶拱变形及破坏机理。在获取岩柱松弛圈信息方面,王鹏等^[10]通过统计分析单孔声波测试松弛深度数据,建立了柱状节理玄武岩的松弛深度经验公式。

总体来看,现有研究集中于洞壁或浅层围岩的受力特性、变形破坏机理,研究对象的空间离散程度高,缺少自空间连续角度对洞室群间大厚岩柱及穹顶围岩的力学响应特性的研究,未阐明高地应力洞室群中隔墙和洞室穹顶的围岩的变形规律及松弛范围。

本文基于白鹤滩水电站地下厂房主变洞中隔墙及尾水调压室穹顶的滑动测微计监测资料,对洞室群间岩柱及圆筒形洞顶围岩变形特征进行分析,探讨构造地应力占优的硬岩洞室群间中隔墙及顶板围岩的变形特性,为同类地下工程的优化设计提供参考。

1 工程背景

1.1 工程概况

白鹤滩水电站地下厂房跨度达 34 m,为目前世界已建跨度最大的地下厂房。主副厂房洞长 453.00 m,高 88.70 m。主副厂房轴线方向 N20°E。左岸设 4 个圆筒形、阻抗式尾水调压室。

尾水调压室与主厂房、主变洞平行布置,与厂房机组中心线间距为 220 m,与主变洞中心距为 130.5 m。1—4 号尾水调压室穹顶开挖直径分别为 48 m、47.5 m、46 m、44.5 m,井身开挖高度 84.00~88.41 m,衬砌厚度 1.5 m。主副厂房及尾水调压室平面布置见图 1。

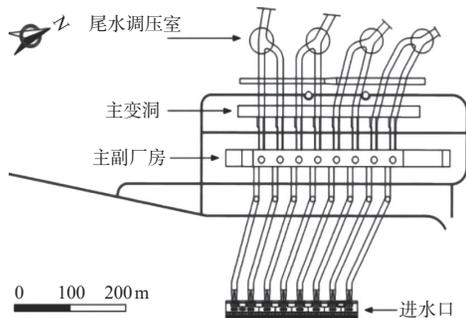


图 1 左岸地下洞室平面布置图

左岸地下厂房实际开挖步序如表 1 所示。左岸地下厂房自 2014 年 1 月开挖,2018 年 6 月 2 日全部开挖完成。

尾调室穹顶采用“先中导洞后两侧、分扇形条块、穹顶对穿锚索支护跟进”的施工方法,开挖时期为

2015 年 3 月至 2016 年 3 月。调压室竖井采用先溜渣井贯通,然后自上而下分层、分区开挖支护。井身开挖时期为 2016 年 3 月—2019 年 8 月。左岸尾水调压室开挖示意图如图 2 所示。

表 1 实际分层开挖信息

开挖层序	分层尺寸(宽×高)/m	开挖时间(年月)
I	34×12.6	201401—201412
II	34×3.6	201411—201505
III	34×8.5	201505—201512
IV	31×8.5	201602—201610
V	31×8.5	201609—201612
VI	31×10	201611—201703
VII	31×8.5	201702—201709
VIII	20×13	201708—201711
IX	20×9	201712—201805
X	16×5	201801—201806

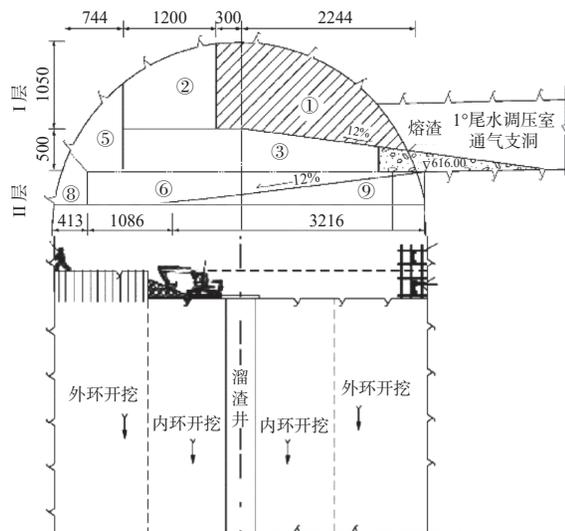
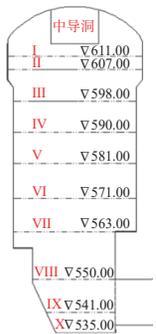


图 2 左岸尾水调压室开挖示意图(单位:cm)

1.2 工程地质条件

金沙江上游白鹤滩水电站大坝坝址岩性为上二叠统峨眉山玄武岩。左岸地下厂房位于坝肩上游山体,水平埋深 600~1000 m,垂直埋深 260~330 m。

左岸厂房围岩主要由 $P_2\beta_2^3$ 和 $P_2\beta_3^1$ 层岩流层中新鲜的斜斑玄武岩、杏仁玄武岩、隐晶质玄武岩、角砾熔岩组成。厂房工程地质剖面见图 3。

左岸尾水调压室岩层总体产状为 N42°~45°E、SE∠15°~20°,为单斜岩层。主要由 $P_2\beta_3^1$ 和 $P_2\beta_3^2$ 层新鲜的隐晶质玄武岩、斜斑玄武岩、杏仁状玄武岩、角砾熔岩和凝灰岩等组成,岩质坚硬。左岸尾水调压室埋深约 287~337 m,围岩以 III₁ 类、II 类为主。

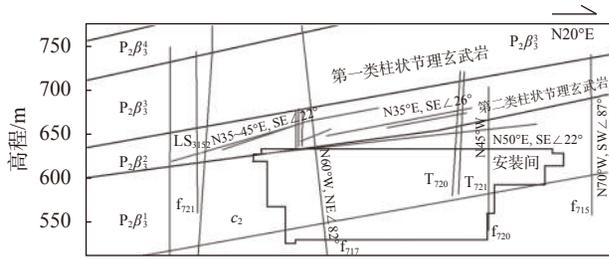


图3 左岸地下厂房上游墙工程地质剖面图

1.3 初始应力场特征

白鹤滩水电站位于小江断裂带的北侧、交际河断裂的东侧。受喜山期运动(NW-NWW 方向的区域挤压)的影响,白鹤滩水电站左岸主厂房围岩应力以构造应力为主。

初始应力场主应力量测值的分布见图4,最大主应力与厂房轴线的关系见图5。厂区水平应力大于垂直应力,第一主应力和第二主应力基本水平,第三主应力大致垂直。初始应力场最大主应力量值20~34 MPa,方位 N30°~50°W,倾角 5°~13°。方向近水平并且与厂房轴线大角度相交。最小主应力在 10 MPa 左右,方向近竖直。

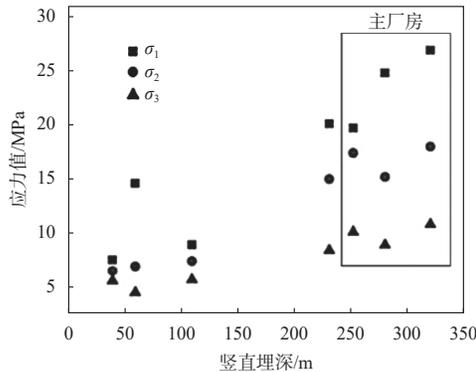


图4 左岸洞室群初始应力场主应力量测值的分布

大主应力方向与厂房轴线夹角较大,对围岩稳定不利^[4,9,11]。厂区岩石的强度应力比为 3~5,应力集中量级为 50~60 MPa,厂区岩石的强度应力比修正为 2~3 之间,总体上属于高地应力区^[11]。

2 测点布置

1号尾水调压室布置2个滑动测微孔,其中 SCzwt-1-1 位于正穹顶, SCzwt-1-2 位于通气洞上方。正穹顶测点 SCzwt-1-1 附近布置1套5点式位移计 Mzwt-1-2, 通气洞上方测点 SCzwt-1-2 附近布置1套5点式位移计 Mzwt-1-5。4号尾水调压室布置1个滑动测微孔 SCzwt-4-1, 位于通气洞上方。测孔附近布置1套5点式位移计 Mzwt-4-5。滑动测微孔埋设参数见表2, 1号尾水调压室测点监测布置见图6。

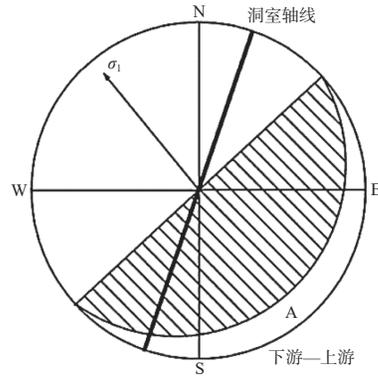


图5 左岸地下厂房最大主应力与厂房轴线关系

表2 尾水调压室监测点埋设参数统计表

部位	仪器类型	测点编号	位置
1号尾调室	滑动测微孔	SCzwt-1-1	正穹顶
	多点变位计	Mzwt-1-2	正穹顶
	滑动测微孔	SCzwt-1-2	下游侧穹顶
	多点变位计	Mzwt-1-5	下游侧穹顶
4号尾调室	滑动测微孔	SCzwt-4-1	下游侧穹顶
	多点变位计	Mzwt-4-5	下游侧穹顶

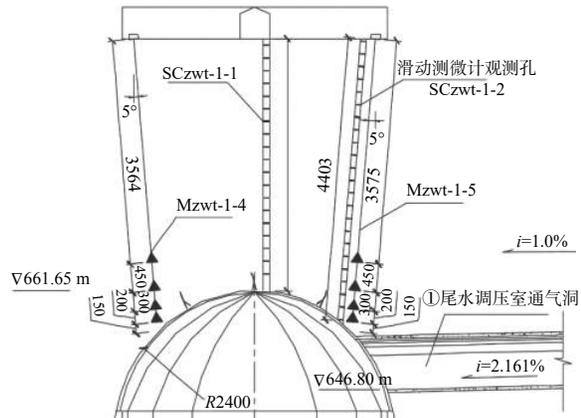


图6 尾水调压室滑动测微计典型监测剖面图(单位:cm)

在左岸主厂南侧 0-12 断面、北侧 0+229 断面中隔墙岩柱内布置2个滑动测微孔。埋设参数见表3, 滑动测微孔监测布置见图7。

滑动测微仪采用美国 INCREX Mobile Extensometer, 多点位移计采用美国 Geokon 传感器。位移计为预埋式, 变形值的计算选取锚固洞底板处为不动点。变形值以拉伸为正, 压缩为负。对于滑动测微成果, 以围岩应变表示, 符号约定与位移计同。

表3 主厂房-主变洞中隔墙监测点埋设参数统计表

仪器类型	测点编号	位置	埋设日期(年-月-日)
滑动测微孔	SCzc0-012-1	厂纵0-12	2017-01-07
滑动测微孔	SCzc0+229-1	厂纵0+229	2016-07-09

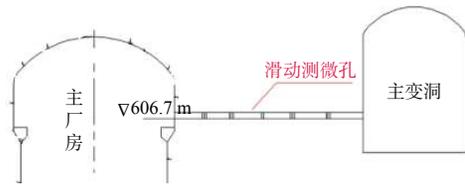


图7 主厂房滑动测微计监测剖面图

3 结果及讨论

3.1 圆筒形洞室穹顶围岩变形特征

1号尾调室正穹顶测孔累计变形值为4.737 mm, 孔内最大围岩应变为0.585 mm/m, 在距穹顶12.1 m处。附近位移计孔口处测点累计围岩变形为3.65 mm, 沿轴向换算得到的围岩应变最大值为0.37 mm/m, 深度为距穹顶1.5~3.5 m。围岩变形特征值见表4。

图8为穹顶围岩应变-深度分布曲线。可见穹顶沿孔深方向围岩变形以受拉为主(松弛变形)。穹

顶围岩应变具有明显空间分异特征:多数在0.4 mm/m以内,1号尾调室正穹顶15 m深度、31 m深度的应变突变点,对应裂隙或节理结构面,穹顶围岩变形主要集中在结构面处。但穹顶围岩变形总量低于5 mm,表明结构面规模较小或稳定性较高,未引起显著松弛变形。

表4 圆筒型洞室穹顶围岩变形特征值

部位	测点编号	位置	累计变形/mm	最大应变	
				量值/(mm·m ⁻¹)	距穹顶/m
1号尾调室	SCzwt-1-1	正穹顶	4.737	0.585	12.1
	Mzwt-1-2	正穹顶	3.67	0.37	1.5~3.5
	SCzwt-1-2	下游侧穹顶	6.818	0.393	23
4号尾调室	Mzwt-1-5	下游侧穹顶	16.82	1.89	1.5~3.5
	SCzwt-4-1	下游侧穹顶	4.918	0.4	21
	Mzwt-4-5	下游侧穹顶	21.73	4.72	1.5~3.5

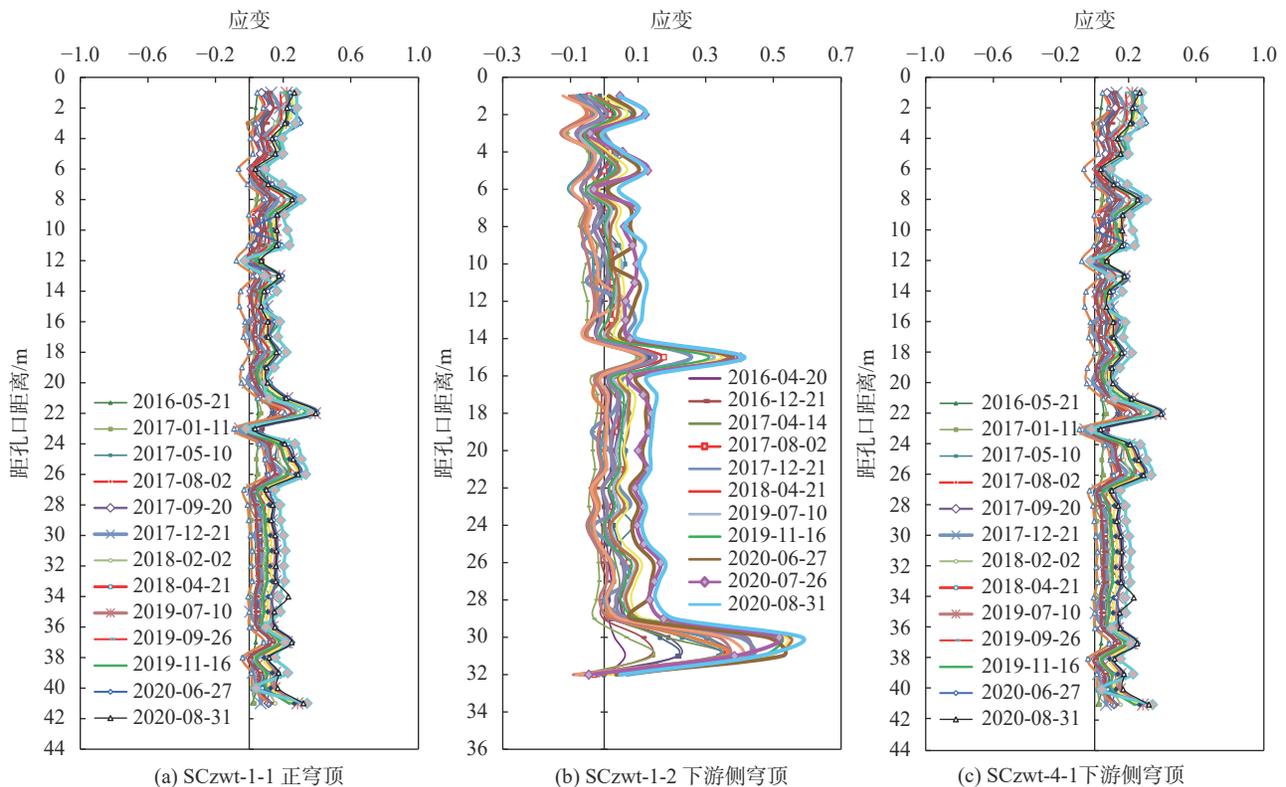


图8 尾水调压室滑动测微计应变-深度分布曲线

图9为滑动测微计成果时序曲线,测孔累计变形量值具有明显的周期性变化规律,周期约为1年。在每年的6月—7月达到最大,随后开始减小至每年的11月达到最小值。这主要与围岩温度的周期性变化相关,与圆筒形洞室井身的后续开挖相关性很小。

图10为穹顶多点位移计成果时序曲线。可见,

轴向变形量值与滑动测微成果相当,为5 mm左右。穹顶结构面区段与Ⅲ级围岩变形规律类似,围岩变形主要发生在掌子面近接施工期。位移计测值在尾调室井身开挖期间基本无变化,验证了穹顶围岩变形受井身开挖扰动影响很小。

对比穹顶滑动测微成果与多点位移计成果,

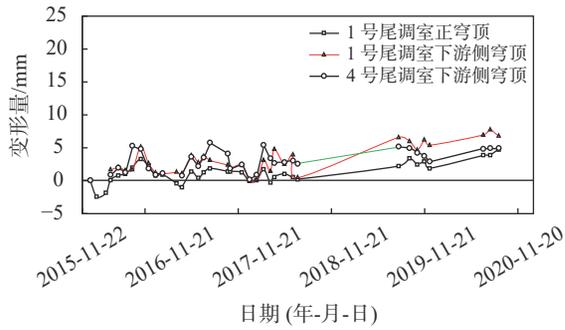


图9 尾调室穹顶滑动测微孔轴向累计变形时序过程线

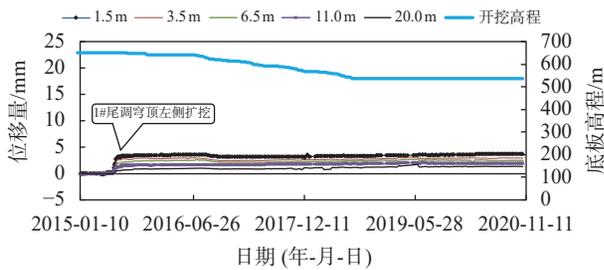


图10 尾调室穹顶位移计围岩变形时序过程线

不同点在于是否具有周期波动的规律。可以从测孔的原理和构造来分析: 测微孔为钻孔中安装的测斜管和固定间距铜环构成, 测斜管内空气与洞室大气联通, 气温存在一定的周期变化。由此引起测孔围岩周期性温度应力变化, 导致围岩变形呈现伸长—缩短交替变化。然而, 位移计测孔被灌浆封堵体填充, 围岩温度变化小, 温度应力波动较弱, 所以很难出现测微孔围岩具有的变形周期性规律。两种测孔构造原理对比如图 11 所示。

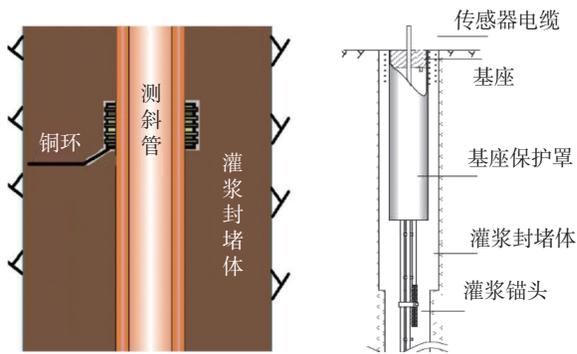


图11 滑动测微计测孔(左)及位移计测孔(右)构造原理

3.2 长廊型洞室群中隔墙围岩变形特性

根据开挖后揭示的岩体破坏特征, 南侧厂纵 0—12 断面属于典型的应力集中区, 而北侧 0+229 则主要受到大型层间错动带 C₂ 斜切的影响, 岩体以表面松弛为主^[6,8,10]。主厂房—主变洞中隔墙滑动测微监测成果特征见表 5。

左厂房—主变洞中隔墙岩柱围岩应变—深度分布

曲线如图 12 及图 13 所示。南侧厂纵 0—12 断面围岩应变沿轴向通孔均出现了拉伸变形, 围岩应变多数在 4 mm/m 以内, 这与研究者通过孔内摄像观测到的应力型破坏现象相吻合^[6,9,12]。由于孔轴向均产生了拉伸应变, 中隔墙围岩松弛深度可取孔深 1/2(30 m), 见图 12。图 14 为松弛深度经验公式^[10], 左厂开挖高度 88 m, 对应的松弛圈深度约 33.95 m, 验证了滑动测微观测成果的可靠性。这表明高构造应力条件下, 应力集中区的围岩应力调整深度与松弛圈深度相当, 约为洞室高度的 1/3。

表 5 左厂房—主变洞中隔墙围岩变形特征值

测点编号	位置	累计变形/mm	最大应变	
			量值/(mm·m ⁻¹)	距厂房/m
SCzc0-012-1	厂纵0—12	58.828	4.377	26
SCzc0+229-1	厂纵0+229	60.126	9.449	3

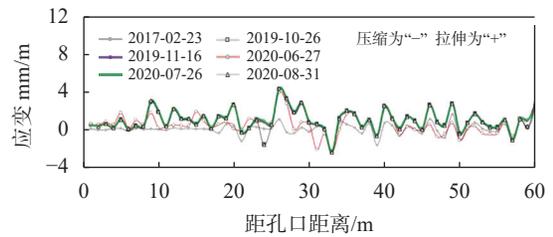


图12 厂纵 0-012 断面中隔墙围岩应变轴向分布曲线

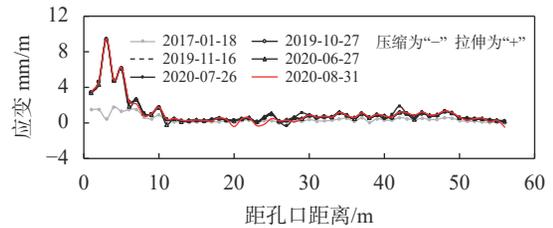


图13 厂纵 0+229 断面中隔墙围岩应变轴向分布曲线

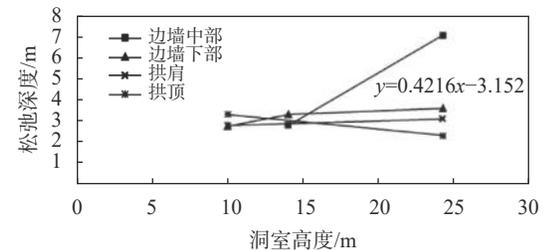


图14 高应力洞室松弛圈范围与洞室高度关系曲线^[10]

厂房北侧 0+229 测孔围岩松弛变形集中在浅层 (距孔口 10 m 内), 其余孔深应变很小, 如图 14。由此判断北侧中隔墙松弛圈深度基本在 10 m 左右, 仅相当于南侧应力集中区 (厂纵 0-012) 围岩松弛深度的 1/3, 而最大应变值则超过南侧应力集中区近 1 倍。可见, 北侧发育的大型结构面造成围岩松弛变形集中于结构面附近, 而结构面以里围岩变形很小, 岩体应

力调整幅度较南侧明显削弱。换言之,构造应力为主应力的长廊型洞室群,中隔墙围岩松弛圈范围与应力集中程度成正比。

将厂房-主变洞岩柱各滑动测微测孔的轴向应变累加得到轴向累计变形,绘制滑动测微测孔轴向累计变形的时序过程线如图15所示。

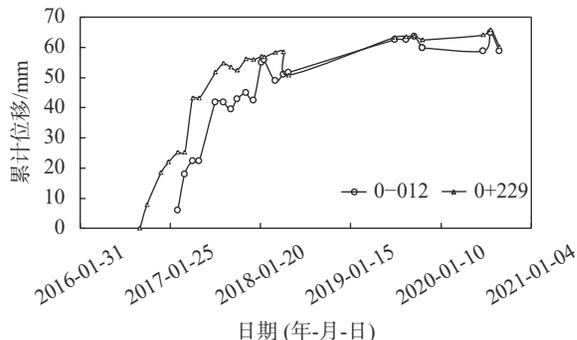


图15 中隔墙围岩变形时序过程线

由图15可见,在厂房下挖阶段,测孔累计松弛变形在开挖期呈台阶状增长趋势,尤其第Ⅵ层—第Ⅶ层下挖期间,变形量增速较为显著,最大达到0.60 mm/d。该阶段厂房下挖速度为开挖时期最大的时段,随着洞室开挖成型,测孔累计变形量明显趋收敛。表明中隔墙围岩松弛圈的发展主要集中在下挖阶段,洞室成型后,基本无扩展。

从围岩变形在开挖期的时序特征来看,变形具有明显的脆性特征,变形的增幅与爆破开挖扰动的幅度成正比。对于长廊型厂房边墙而言,高构造地应力格局决定了围岩卸荷后会产生显著的松弛变形,围岩松弛圈范围远高于洞室顶板区域。

4 结论

本文基于工程地质调查及滑动测微计监测成果,从空间连续角度(围岩应变)系统地分析了高地应力硬质围岩条件下圆筒形洞室穹顶的围岩变形规律,探讨了长廊型洞室群中隔墙围岩松弛圈的范围及演化特性。主要得出以下结论:

(1)1号尾调室穹顶存在两个软弱结构面,但结构面对穹顶围岩变形影响较小,影响范围局限于正穹顶。围岩变形及分布特征主要与地应力格局、岩性和软弱结构面因素有关。

(2)由于滑动测微孔内空气与洞室大气联通,测值具有周期变化规律。多点位移计测孔空隙被灌浆填充,围岩温度稳定,温度应力波动弱,所以变形演化过程与温度相关性小,无周期性规律。

(3)高构造应力条件下,长廊型洞室群,中隔墙围岩松弛圈范围与应力集中程度成正比;北侧发育的大

型结构面造成围岩松弛变形集中于结构面附近,岩体应力调整幅度较南侧明显削弱;应力集中区的围岩应力调整深度与松弛圈深度相当,接近洞室高度的1/3;中隔墙围岩松弛圈的发展主要集中在下挖阶段,洞室成型后,基本无扩展。

(4)本文基于全过程围岩变形演化规律,查明了圆筒型洞室穹顶围岩变形特性和长廊型洞室群中隔墙的围岩松弛规律,可为运行期及同类工程的支护参数优化设计提供参考。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 彭 琦,王伟凯,邓建辉,等.地下厂房围岩变形特征分析[J].岩石力学与工程学报,2007,(12):2583-2587.
- [3] 魏进兵,邓建辉,王伟凯,等.锦屏一级水电站地下厂房围岩变形与破坏特征分析[J].岩石力学与工程学报,2010,29(6):1198-1205.
- [4] 黄润秋,黄 达,段绍辉,等.锦屏I级水电站地下厂房施工期围岩变形开裂特征及地质力学机制研究[J].岩石力学与工程学报,2011,30(1):23-35.
- [5] 卢 波,王继敏,丁秀丽,等.锦屏一级水电站地下厂房围岩开裂变形机制研究[J].岩石力学与工程学报,2010,29(12):2429-2441.
- [6] 江 权,樊义林,冯夏庭,等.高应力下硬岩卸荷破裂:白鹤滩水电站地下厂房玄武岩开裂观测实例分析[J].岩石力学与工程学报,2017,36(5):1076-1087.
- [7] 喻 军,林志斌,李元海.基于透明岩体的深部隧道围岩变形分析[J].地下空间与工程学报,2017,13(4):943-949.
- [8] 刘 健,朱赵辉,蔡 浩,等.超大型地下洞室拱圈围岩变形、破坏特性研究[J].岩土工程学报,2018,40(7):1257-1267.
- [9] 孟国涛,何世海,陈建林,等.白鹤滩右岸地下厂房顶拱深层变形机理分析[J].岩土工程学报,2020,42(3):576-583.
- [10] 王 鹏,洪望兵,宋 刚.柱状节理玄武岩松弛圈尺寸效应及地应力影响[J].岩土工程学报,2018,40(1):139-146.
- [11] GB50487—2008 水利水电工程地质勘察规范[S].北京:中国计划出版社,2009.
- [12] 张宜虎,卢轶然,周火明,等.围岩破坏特征与地应力方向关系研究[J].岩石力学与工程学报,2010,29(S2):3526-3535.

收稿日期:2021-08-04