

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20230101

# 岩体结构面和蚀变对地下厂房岩壁吊车梁的影响分析

何一纯<sup>1</sup>, 辛 萌<sup>1</sup>, 何 军<sup>2</sup>, 李 斌<sup>1</sup>, 张雨霁<sup>2</sup>, 黄书岭<sup>2</sup>

(1. 河北丰宁抽水蓄能有限公司, 河北 丰宁 068350;

2. 长江水利委员会长江科学院水利部岩土力学与工程重点试验室, 湖北 武汉 430010)

**摘要:** 岩壁吊车梁是地下厂房中常见的承载构件, 由于直接支承在围岩上, 岩壁吊车梁的稳定性受围岩地质条件影响较大。以丰宁抽水蓄能电站二期地下厂房岩壁吊车梁为例, 通过对地下厂房岩体结构面特征、岩体蚀变效应及岩壁吊车梁原位观测资料进行深入解析, 阐释了岩壁吊车梁锚杆应力和围岩变形的分布规律, 并深入分析了吊车梁锚杆应力同围岩变形、地质条件、施工进度等之间的关联, 解译了岩壁吊车梁锚杆应力和围岩变形偏大的原因, 最终揭示了岩体结构面和蚀变对岩壁吊车梁稳定性的影响机理。研究结果可为岩壁吊车梁结构设计、施工组织和安全论证提供技术支撑, 具有实际工程意义。

**关键词:** 抽水蓄能电站; 地下厂房; 吊车梁; 岩体结构面; 岩体蚀变

**中图分类号:** TV731.6

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-7709(2023)11-0129-04

## 1 概况

河北省丰宁抽水蓄能电站为当今世界上最大的抽水蓄能电站<sup>[1]</sup>。工程共分两期建设, 地下厂房系统上覆岩体厚度 250~330 m, 厂房区挖空率高, 两期地下厂房工程总开挖规模为长 414.0 m, 宽 25.0 m, 高 54.5 m; 其中, 二期主副厂房开挖长度为 169.5 m。在丰宁抽水蓄能电站地下厂房区域蚀变带分布广泛、岩体强度低, 且岩体结构面发育、岩体破碎, 给地下厂房围岩变形控制和吊车梁稳定性带来了不利影响<sup>[2]</sup>。受不利地质条件的影响, 二期主厂房开挖过程中陆续发现围岩变形偏大、部分吊车梁锚杆应力读数偏高的现象。为了保障丰宁抽蓄二期地下厂房岩壁吊车梁的稳定性, 本文结合原位观测数据, 分析了吊车梁锚杆应力读数偏大现象的成因, 阐明了岩体结构面和蚀变效应对岩壁吊车梁稳定性的影响机理, 研究结果为评价丰宁二期地下厂房岩壁吊车梁运营状况提供技术支撑。

## 2 岩体蚀变效应和岩体结构面特征

丰宁抽蓄二期地下厂房围岩总体上以Ⅲ类花

岗岩为主, 但花岗岩蚀变带在整个地下厂区普遍存在; 此外, 地下厂房断层和长大裂隙等结构面发育。蚀变带、断层影响带和裂隙发育带围岩局部为Ⅳ类, 岩体蚀变效应和岩体结构面的耦联作用, 给地下厂房围岩及岩壁吊车梁稳定性带来了较大挑战。

### 2.1 岩体蚀变效应

二期地下厂房围岩蚀变呈带状发展, 空间分布规律较差, 一般伴随着构造带发展; 其延伸长度一般在 10 m 以内, 宽度在 2 m 左右<sup>[3]</sup>。在强度上, 蚀变带主要表现为岩体强度明显降低; 通过蚀变岩和非蚀变岩室内试验发现, 蚀变岩单轴抗压强度均值为 10.7 MPa, 而非蚀变岩单轴抗压强度均值为 146.0 MPa, 非蚀变岩为蚀变岩单轴抗压强度的 13.6 倍。在矿物成分上, 蚀变岩主要表现为角闪石、石英、长石等矿物蚀变。

### 2.2 岩体结构面特征

地下厂房区域结构面发育, 揭露断层 11 条, 以陡倾角为主, 与厂房轴线夹角较大。同时, 地下厂房区域发育长大裂隙千余条, 主要为北东和北西两组走向, 约 27.6% 的裂隙面存在蚀变现象。图 1 为二期地下厂房岩体结构面地质编录图, 可见

收稿日期: 2022-12-29, 修回日期: 2023-02-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(51979008); 长江科学院创新团队(CKSF2021715/YT); 中央级公益性科研院所基本科研业务费项目(CKSF2021458/YT)

作者简介: 何一纯(1975-), 男, 硕士、高级工程师, 研究方向为抽水蓄能电站工程建设, E-mail: 1092982738@qq.com

通讯作者: 何军(1987-), 男, 博士后、高级工程师, 研究方向为工程岩体稳定性, E-mail: hejun@mail.crsri.cn

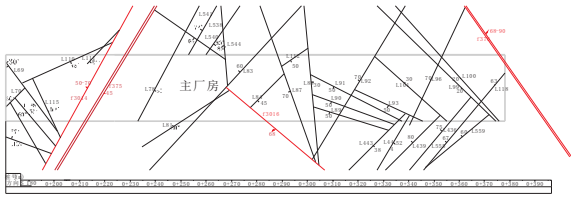


图 1 丰宁抽蓄二期地下厂房主要岩体结构面

Fig. 1 Structure plane of Fengning phase II main power house

岩体结构面发育,对地下厂房稳定性有较大影响。

### 3 吊车梁部位原位观测结果分析

#### 3.1 主厂房支护措施及吊车梁安全监测布置

二期主厂房支护参数见表 1。在二期主厂房中共布置 7 个监测断面,编号为 e-e、V-V、f-f、VI-VI、g-g、VII-VII、h-h(图 2);其中,V-V、VI-VI、VII-VII 监测断面,共布置 45 个吊车梁锚杆应力计,在 7 个监测断面均布置了多点位移计,吊车梁附近的多点位移计主要在高程 1 000 m(吊车梁上方)和高程 989 m(吊车梁下方)处。

表 1 主厂房系统支护参数

Tab. 1 System support parameters of main power house

洞室	部位	支护方式	支护参数
主厂房	顶拱	锚杆	C28/C32, L=6 m/9 m, 间隔布置, 其中 6 m 长锚杆为普通砂浆锚杆, 9 m 长锚杆为预应力树脂锚杆
	房洞	锚索	5 排系统锚索, L=25 m, 预应力 T=1 000 kN, 间距 6 m
		喷混凝土	喷射纤维混凝土 CF30, 20 cm 厚
上游边墙	锚杆	C28/C32, L=6 m/9 m, 间隔布置, 普通砂浆锚杆	
	锚索	5 排系统锚索, L=25 m, 预应力 T=1 000/1 500 kN, 间距 4.5 m, 其中第 1 排为对穿锚索	
	喷混凝土	喷射纤维混凝土 CF30, 15 cm 厚	
下游边墙	锚杆	C28/C32, L=6 m/9 m, 间隔布置, 普通砂浆锚杆	
	锚索	6 排系统锚索, L=20/25/40 m, 预应力 T=1 000/1 500 kN, 间距 4.5 m, 其中第 1, 2 排为对穿锚索	

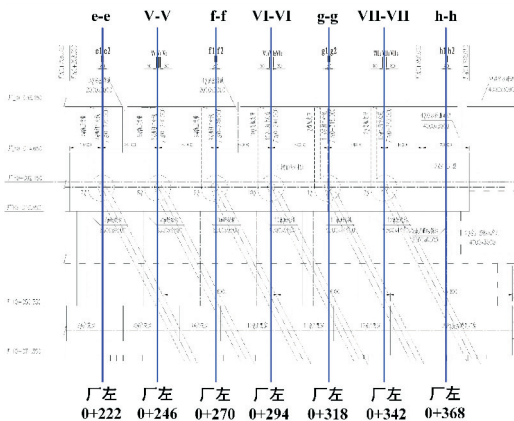


图 2 二期主厂房监测断面

Fig. 2 Phase II main power house monitoring section

#### 3.2 吊车梁附近围岩变形

图 3 为二期地下厂房吊车梁附近表层围岩变形分布,图 4 为最大表层围岩变形柱状图。由图

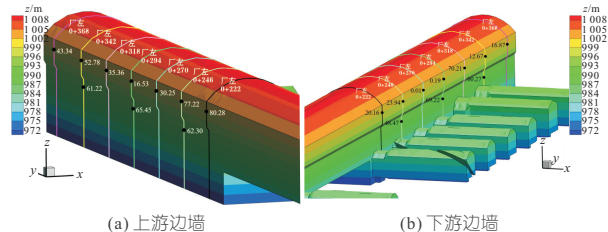


图 3 二期主厂房吊车梁附近浅层围岩变形分布(单位:mm)

Fig. 3 Shallow surrounding rock deformation near crane beam of phase II main power house

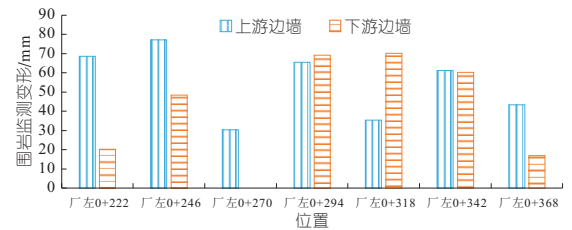


图 4 二期主厂房吊车梁附近表层围岩变形最大值柱状图  
Fig. 4 Histogram of maximum deformation of shallow surrounding rock near crane beams of phase II main power house

3、4 可看出,上游吊车梁附近表层围岩变形值为 16.53~80.28 mm,最大值 80.28 mm 出现在 e-e 断面上游边墙吊车梁上方。从上游吊车梁表层围岩变形最大值分布来看,e-e 和 V-V 监测断面的围岩变形最大,VI-VI 监测断面的围岩变形次之,其他监测断面的围岩变形相对较小。下游吊车梁附近的表层围岩变形为 0.19~70.21 mm,最大值 70.21 mm 出现在 g-g 断面的吊车梁上部。从下游吊车梁表层围岩变形最大值分布来看,VI-VI、g-g 两个监测断面的围岩变形最大,VII-VII 监测断面的变形次之,其他监测断面的围岩变形相对较小。综合上下游吊车梁附近表层围岩变形来看,e-e、V-V、g-g 三个断面围岩变形最大,最大值超过 70 mm;VI-VI、VII-VII 两个断面围岩变形次之,最大值均超过 60 mm;f-f、h-h 监测断面的围岩变形监测值相对较小,最大值均在 50 mm 以内。

图 5 为围岩变形沿深度分布柱状图。由图 5 可看出,围岩变形总体上在孔口最大,且沿围岩深度方向逐渐递减,变形量值超过 50 mm 的在孔

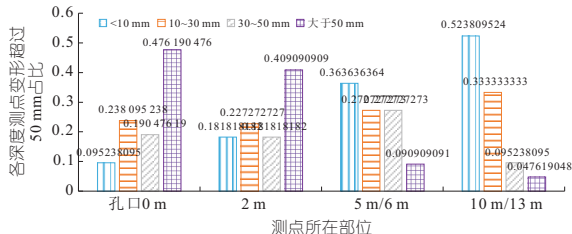


图 5 吊车梁附近围岩变形在不同深度上的各量值区间占比柱状图  
Fig. 5 The proportion of surrounding rock deformation near crane beam for each value intervals and different depths

口、距开挖面 2 m 深、距开挖面 5~6 m 深、距开挖面 10~13 m 深等部位分别占 48%、41%、9%、5%。

### 3.3 吊车梁锚杆受力

图 6 为二期主厂房吊车梁锚杆不同应力水平的比例。由图 6 可看出,在所有吊车梁锚杆应力计中,读数低于 100 MPa 的占有所有测点的 48%,读数在 100~200 MPa 之间的占有所有测点的 21%,读数在 200~360 MPa 之间的占有所有测点的 14%,读数超过 360 MPa 的占有所有测点的 17%。

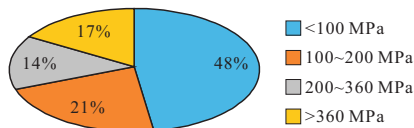


图 6 二期主厂房吊车梁锚杆不同应力水平比例

Fig. 6 Proportion of different stress levels of crane beam bolts in phase II main power house

图 7 为吊车梁锚杆应力在不同深度测点上各量值的占比。由图 7 可看出,按深度分析,吊车梁锚杆应力在 0.5 m 深度测点上,读数小于 100 MPa 的测点占该深度所有测点的 50%,读数在 100~200 MPa 之间的测点占该深度所有测点的 28%,读数在 200~360 MPa 之间的测点占该深度所有测点的 17%,读数超过 360 MPa 的测点占该深度所有测点的 42%。在 3.5 m 深度上,读数小于 100 MPa 的测点占该深度所有测点的 33%,读数在 100~200 MPa 之间的测点占该深度所有测点的 8%,读数在 200~360 MPa 之间的测点占该深度所有测点的 17%,读数在 360 MPa 以上的测点占该深度所有测点的 42%。在 8.5 m 深度上,读数小于 100 MPa 的测点占该深度所有测点的 58%,读数在 100~200 MPa 之间的测点占该深度所有测点的 25%,读数在 200~360 MPa 之间的测点占该深度所有测点的 8%,读数超过 360 MPa 的测点占该深度所有测点的 8%。

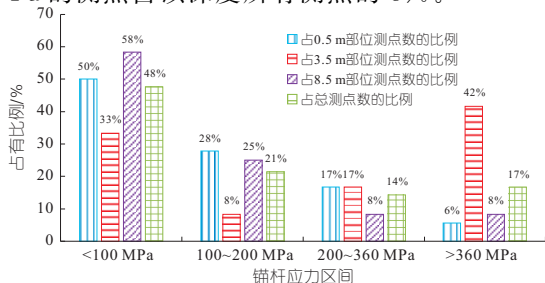


图 7 二期主厂房吊车梁锚杆应力不同深度测点不同量级的分布比例

Fig. 7 Distribution ratio of stress of different magnitude at different depth measuring points of crane beam bolts in phase II main power house

综上可看出,大多数超限(超过 360 MPa)的锚杆应力监测点位于 3.5、8.5 m 深处,即位于围岩中的测点,且以 3.5 m 深处靠近围岩表层的测点居多。

## 4 岩壁吊车梁稳定性影响因素分析

从吊车梁锚杆应力分布规律可看出,吊车梁锚杆应力较大的测点主要为拉锚杆围岩内的测点。图 8 为 V-V 监测断面典型吊车梁锚杆应力和围岩变形监测时程曲线。由图 8 可看出,吊车梁锚杆应力增长趋势与围岩变形增长趋势大致同步。具体来看,吊车梁锚杆应力在 2018 年 3 月~2018 年 8 月和 2019 年 5 月~2019 年 9 月之间增长较快,同时间段附近围岩变形增幅也正好相对较大。此外,吊车梁锚杆应力和附近围岩变形均主要发生在 2019 年 12 月之前;而二期主厂房在 2019 年 12 月施工完成,即吊车梁锚杆应力增长基本均发生在主厂房施工期,主厂房施工完成后多点位移计变形时程曲线趋于收敛,吊车梁拉锚杆应力时程曲线也同样保持平稳。

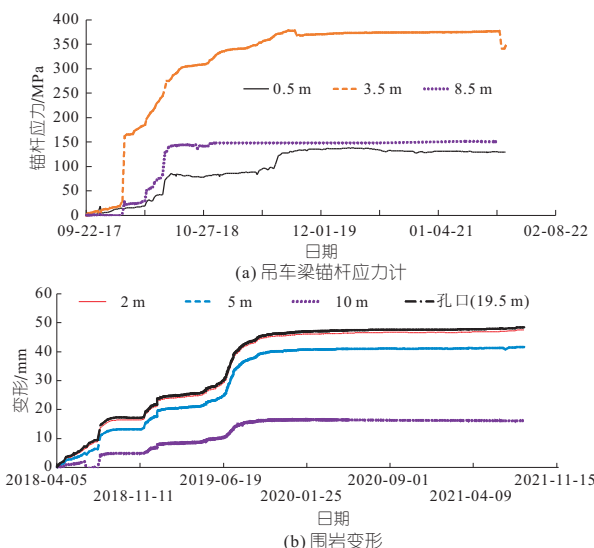


图 8 V-V 断面代表性吊车梁锚杆应力和围岩变形时程曲线  
Fig. 8 Representative crane beam bolt stress duration curve and surrounding rock displacement duration curve at V-V section

对围岩变形来讲一般主要受该区域岩性、岩体结构、地应力等地质条件影响,进而使吊车梁锚杆应力也对地质条件具有敏感性。从图 5 围岩变形沿深度分布规律来看,变形监测值大于 50 mm 的有 95% 均发生在距开挖面 6 m 深以内的围岩中。从丰宁二期主厂房揭露的地质条件来看,二期主厂房厂左桩号 0+192~0+237 上游边墙较大范围揭露蚀变岩,岩体类别为 IV 类;同时从图 1

中岩体结构面来看,该段出露断层 f3014 和 f375; 在蚀变岩和岩体结构面综合影响下,导致 e-e 监测断面(厂左 0+222)上游边墙孔口围岩变形量值达 80.28 mm,为所监测围岩变形的最大值。所以,据此推测浅层围岩变形和吊车梁锚杆应力较大应该是受岩体蚀变、岩体结构面和开挖卸荷扰动等综合影响所致,岩体蚀变和开挖卸荷扰动导致岩体质量变差、力学参数降低,岩体结构面又会进一步加剧围岩非连续变形,总体上会使越靠近开挖面受影响的程度就越明显,从而产生较大值的变形。

此外,有 5% 监测变形值大于 50 mm 发生在距开挖面 6 m 以外区域,即深部围岩变形量值反而较大。这主要是受围岩中发育的裂隙或断层等不连续结构面影响所致。主厂房开挖卸荷会导致围岩在结构面处产生张开或错动等不连续变形,不连续变形会使得该部位围岩变形量值显著增大。图 9 为 V-V 监测断面的地质编录图和围岩变形分布图。由图 9 可看出,变形较大的多点位移计一般穿过了两条甚至更多的长大裂隙;具体来看,位于上游边墙的 M5-6 和位于下游边墙的 M5-7 两个多点位移计穿过的长大裂隙相对较多,则多个测点的读数超过 40 mm,且变形主要发生在围岩 6 m 或更深处。

### 5 结 论

结合原位观测数据研究了岩体结构面和蚀变效应对吊车梁稳定性的影响。吊车梁锚杆应力与

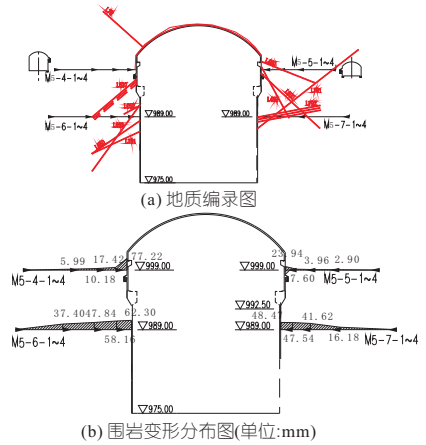


图 9 V-V 监测断面地质编录图和围岩变形分布图  
Fig. 9 Geological logging and surrounding rock deformation distribution at V-V section

围岩变形的历时曲线有较好一致性,施工期吊车梁拉锚杆应力快速增长主要是承受了围岩形变压力所致。在围岩浅层,吊车梁稳定性受岩体蚀变、岩体结构面和开挖卸荷扰动等综合影响;在围岩深层,吊车梁稳定性主要受岩体结构面影响。

### 参 考 文 献:

[1] 马雨峰,刘登学,刘双华,等. 丰宁抽水蓄能电站一期地下厂房施工期围岩安全监测分析[J]. 水电与抽水蓄能,2020, 6(3): 56-61.  
[2] 何一纯,丁秀丽,吕风英,等. 大型抽水蓄能电站地下厂房围岩变形时效特征和反馈分析[J]. 长江科学院院报,2020, 37(11): 172-179.  
[3] 吕风英,孟宪磊,何军,等. 丰宁抽水蓄能电站二期地下厂房施工期围岩安全监测分析[J]. 水利与建筑工程学报,2020, 18(3): 112-117.

## Influence of Rock Mass Structural Plane and Alteration on Rock Wall Crane Beam of Underground Powerhouse

HE Yi-chun<sup>1</sup>, XIN Meng<sup>1</sup>, HE Jun<sup>2</sup>, LI Bin<sup>1</sup>, ZHANG Yu-ting<sup>2</sup>, HUANG Shu-ling<sup>2</sup>

(1. Hebei Fengning Pumped Storage Company Ltd., Fengning 068350, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical Mechanics and Engineering of Ministry of Water Resources, Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China)

**Abstract:** Rock wall crane beam is a common bearing structure in underground powerhouse. Because it is directly supported on the surrounding rock, the stability of the rock crane beam is greatly affected by the geological conditions of the surrounding rock. Taking the rock wall crane beam of phase II underground powerhouse of Fengning pumped storage power as an example, the distribution law of rock wall crane beam anchor stress and surrounding rock deformation were explained by analyzing the rock mass structural plane characteristics, the rock mass alteration effect as well as the in-situ observation data of the rock wall crane beam. Furthermore, the correlations between the bolt stress of the crane beam and the deformation of surrounding rock, the geological conditions as well as the construction process were deeply analyzed. The reasons for the large bolt stresses and the large deformations of surrounding rock of the crane beam were then explained, and the influence mechanism of rock mass structural plane and rock mass alteration on the stability of the crane beam was finally revealed. This research can provide technical support for the structural design, the construction organization and the safety demonstration of the rock wall crane beam, thus has practical engineering significance.

**Key words:** pumped storage power station; underground powerhouse; crane beam; rock mass structural plane; rock mass alteration