

水平薄层围岩洞室顶拱破坏特征与控制措施

张捷

(中国电建集团北京勘测设计研究院有限公司,北京 朝阳区 100024)

摘要:西龙池地下厂房位于水平薄层围岩中,围岩呈互层状、细层较薄、纹理发育、岩层产状平缓、岩层间结合力差,施工开挖过程中易出现塌顶现象,顶拱的围岩稳定是设计、施工的关键。针对水平薄层围岩的变形规律、破坏机理,从开挖支护设计、支护时序控制、安全监测、动态设计等方面,采取了针对性的控制对策,确保了地下厂房洞室施工期、永久期的安全稳定。

关键词:地下厂房;水平薄层围岩;顶拱稳定;变形破坏特征;多项指标综合评估

中图分类号:P614;U453.2;S891+.6

文献标识码:B

文章编号:1001-2184(2016)06-0111-04

1 工程概况

西龙池抽水蓄能电站地下厂房位于水道系统尾部,洞室埋深约165~330 m左右。地下厂房开挖尺寸(长×宽×高,下同)149.3 m×23.5 m×49 m,厂房轴线方向为NW280°;主变室平行布置于主厂房下游侧44.5 m处,其开挖尺寸130.9 m×16.4 m×17.5 m;两洞室通过一条交通洞和四条母线洞相联。主厂房两端墙与通风机室相连,4条高压管道及尾水隧洞与上述两大洞室成65°夹角布置,环绕两大洞室设三层排水廊道,下出线洞与主变室下游边墙垂直连接。

地下厂房自2004年1月份开挖顶拱,2005年12月完成整个洞室的开挖支护,截至2011年12月,厂房顶拱最大变位为19.16 mm,控制在允许变形值范围内,洞室围岩处于稳定状态。

2 工程地质条件

地下厂房洞室群位于寒武系张夏组、崮山组下段的岩层中,岩性为泥质鲕状灰岩、泥质条带状灰岩、泥质柱状灰岩、薄层粉砂岩等,岩体结构以互层状和薄层状为主,纹理极发育,岩层产状NW290°~340°NE∠4°~10°,岩层近水平状,岩层间结合力差,极易出现塌顶现象。围岩类别以Ⅲ类为主,裂隙发育段及断层破碎带属Ⅳ~Ⅴ类。岩体力学参数:岩石饱和抗压强度40~60 MPa;岩层间轴向抗拉强度较低,一般为0.1~0.4 MPa;垂直层面方向变形模量为6~10 GPa,平行层面方向变形模量为8~15 GPa;抗剪强度指标 $c=0.0$ MPa, $\varphi=35^\circ\sim 44^\circ$ 。

收稿日期:2016-11-11

厂区断层发育主要有三组:①NE10~30°NW/SE∠70~85°;②NE30~55°NW∠75~88°;③NW330~350°SW∠75~85°,其中以第②组最为发育,规模较大。且NW向断层的延伸均受NE向断层的控制。区内断层空间延伸连续性不好,遇软弱岩层即尖灭或错位。

厂区发育裂隙主要有四组:①NE5~30°NW(或SE)∠70~85°;②NE30~50°NW(或SE)∠70~88°;③NE50~60°NW(或SE)∠70~89°;④NW330~360°NE(或SW)∠70~85°,其中以第②组最发育。所统计的裂隙,大部分为高倾角裂隙,裂隙内多有红色塑泥充填,两侧岩石亦被侵染成褐红色。NE向裂隙多为泥质充填,裂隙面上附着方解石细脉;而NW向裂隙多充填方解石细脉或无充填。缓倾角结构面主要表现为岩层层面发育或微切层发育的缓倾角裂隙,如厂房探洞和厂房模型试验洞在开挖后常见有洞顶岩层沿层面开裂、脱落而形成大平板,难以成拱的现象。

厂区属中等地应力场,以自重应力为主。最大水平主应力为12 MPa,方向为NE50~60°,最小水平主应力为6 MPa。受褶皱的影响,局部地段存在应力集中现象。地应力与岩石饱和抗压强度之比约为1:3.3~5。

地下水类型为基岩裂隙水,张夏组岩层中的地下水水位高程为716~719 m;崮山组的层间地下水水位为768~769 m,位于厂房顶拱以上。

3 水平薄层围岩变形破坏特征

鉴于本工程厂区地质条件的复杂性,开工之前在前期设计研究的基础上,在厂房顶拱部位开

展原位模型试验研究,进一步研究水平薄层围岩的变形规律、破坏形式。借助模型试验洞,采用探洞贯通了厂房轴线,进一步确定了地下厂房位置。

地下厂房顶拱主要为 $\epsilon 2z2 - 2$ 岩层,岩性为薄层钙质石英粉砂岩、薄层灰岩、鲕状灰岩和柱状灰岩,呈互层状结构,纹理发育。其中钙质石英粉砂岩及薄层灰岩纹理类型属水平交错状纹理;钙质石英粉砂岩岩层厚度一般为 $0.08 \sim 1.75 \text{ m}$,薄层灰岩岩层厚度一般 $0.07 \sim 1.8 \text{ m}$ 。钙质石英粉砂岩为泥质结合,极易风化或发生力学破坏,并具有较好的亲水性质,遇水软化、脱水缩裂,细层间还发育有泥化破碎夹层,厚度 $1 \sim 3 \text{ cm}$,并随岩层的褶曲而起伏;钙质石英粉砂岩自然状态下层间结合力为 $0.007 \sim 0.13 \text{ MPa}$ 。

在厂房顶拱开挖过程中,主要有以下两种破坏形式:



图1 厂房顶拱沿岩层面脱落破坏示意图

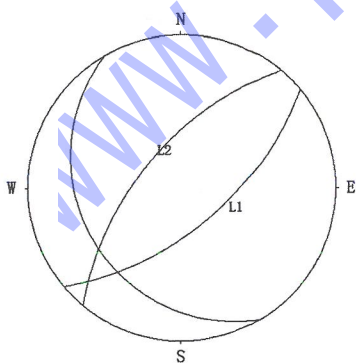
(2) 结构面组合的块体滑塌

厂房顶拱岩体在裂隙、岩层面(开挖面)等结构面的组合下,形成不稳定块体,这也是厂房顶拱常见的破坏形式。例如,在厂房顶拱发育两条夹

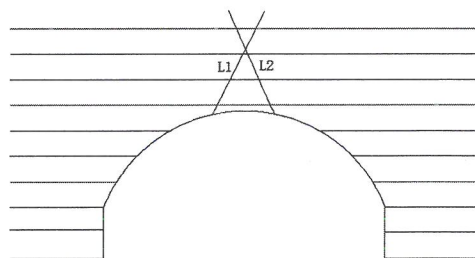
(1) 沿岩层面的脱落

洞室开挖后,平缓层状岩体在顶拱形成类似平行组合梁结构,支点在两侧拱座;在拱角部位形成了类似组合悬臂梁结构,支点在边墙。如图1左图所示。

由于岩层层间结合力较弱,岩层在重力作用下下弯,首先在拱角的组合悬臂梁结构处的下部岩层沿岩层面出现松弛张裂,与上部岩体脱离,进而逐步向中性面发展,在发展的过程中,悬臂梁越长,弯矩越大,则岩层越易发生弯曲或折断,从而逐渐形成具有一定规模的塌落,塌落成平顶。塌落后,无疑增加了位于顶拱平缓层状岩体的组合梁结构的跨度,梁中间的弯矩也将增大,这将对厂房顶拱的稳定造成了严重的不利影响。如图1右图所示。



不稳定块体赤平投影图



不稳定块体剖面示意图

图2 厂房顶拱不稳定结构面组合的块体滑塌破坏示意图

泥裂隙 $L1$ 、 $L2$, 其中 $L1$ 的产状为 $NE50^\circ NW \angle 65^\circ$, $L2$ 产状为 $NE50^\circ SE \angle 65^\circ$, 这两条裂隙与开挖面组合,易构成一楔形不稳定块体。详见图2。

4 围岩稳定控制措施

4.1 厂房位置和布置形式

工程前期,基本摸清了工程区的地质情况,地下厂房位于 $F118$ 、 $F112$ 之间相对完整的岩块内;

确定厂房轴线 NW280°, 与岩层走向及主要结构面的夹角较大, 与主地应力方向的夹角较小。

将安装场位于厂房中部。有限元计算分析表明: 安装场位于厂房中部可有效改善厂房围岩的应力、变位、松弛区范围等条件, 边墙拉损区、塑性区有明显改善, 局部塑性区可减小 10 m 左右; 变

位可减少约 9% ~ 11%。

4.2 系统支护参数

西龙池地下厂房按工程类比、极限平衡理论、现场模型试验和有限元分析相结合进行设计, 采用锚索、锚杆、喷钢纤维混凝土的柔性支护方案, 支护参数见表 1。

表 1 西龙池工程地下厂房支护参数

部位	类型	系统锚杆/锚索		长度 /m	厚度 /mm	挂网喷混凝土		支护抗力合力 /MPa
		直径 /mm	间距 /m			钢筋网直径 /mm	间距 /mm	
顶拱	预应力锚杆	32	1.5 × 1.5	5/7	200	喷钢纤维		0.402
	锚索 200 kN/1 600 kN		4.5 × 4.5	28.5/20				
边墙	砂浆锚杆	32	1.5 × 1.5	6/8	200	8	200	0.328
	锚索 2 000 kN/1 600 kN		4.5 × 4.5	20				

4.3 顶拱支护措施

水平薄层围岩中岩石呈互层状、细层较薄、纹理发育、岩层产状平缓、岩层间结合力差, 顶拱的围岩稳定是设计、施工的关键。为了控制顶拱的围岩变形, 防止岩层层间脱开, 按照主动支护、尽早支护的原则制定顶拱支护措施。

顶拱支护的主要措施是先行开挖位于厂房顶拱上方 28.5 m 处由地质勘探洞扩建的厂顶锚洞, 锚洞尺寸为 5 × 5 m, 锚洞在主厂房顶拱层开挖前施工完, 并在该洞中提前完成 3 排厂房顶拱对穿锚索孔。在厂房顶拱中导洞开挖时及时完成 3 排对穿锚索的施工, 在顶拱围岩变形前对岩层预加固, 充分利用围岩本身的强度。

喷钢纤维混凝土和系统锚杆及时跟进, 避免了薄层岩体的松脱, 保留其承载能力。在厂房顶拱扩挖前, 中导洞主要支护措施完成, 即主厂房拱冠部位锚索、锚杆及首层喷混凝土完成, 相当于在厂房拱冠部位形成了一个柔性支撑点, 缩短了顶拱的跨度, 有利于两侧顶拱施工期的稳定及整个厂房顶拱的稳定。厂房顶拱共布置了 7 排锚索, 其中 4 排为 1 600 kN 预应力内锚锚索, 3 排 2 000 kN 的对穿锚索位于拱冠部位。

厂房顶拱支护力求在开挖完成后能尽快进行, 所以, 系统锚杆采用预应力树脂锚杆, 施工方便, 见效快, 符合开挖后及时支护的要求。顶拱系统预应力树脂锚杆 φ32, 长度 5 m 和 7 m。钢纤维混凝土的适应变形性和韧性都较符合西龙池工程特点, 顶拱喷钢纤维混凝土厚 20 cm。此外, 据开挖揭露的地质情况及监测资料, 在局部地质条件

复杂部位设置了混凝土钢筋肋拱、随机锚索、随机锚杆等加强支护措施。加强喷钢纤维混凝土肋拱, 肋拱断面(宽 × 高) 50 × 15 cm, 间距 3 ~ 6 m。

另外为了减小拱座部位的应力集中, 顶拱开挖曲线采用三心圆, 使拱墙平滑连接。

4.4 支护时序

根据现场原位模型试验洞、厂房洞室开挖所揭示的水平薄层围岩的变形特点, 主张尽早采取支护措施, 防止岩石层间脱开。西龙池地下厂房施工过程中要求锚喷支护滞后开挖面不应大于 10 m, 预应力锚索滞后开挖面不应超过 30 m。主厂房顶拱的三排对穿锚索, 安装施工应距中导洞开挖掌子面距离不得大于 30 m; 中导洞部位的喷混凝土层第一次喷射厚度为 10 cm, 待两边导洞跟进扩挖后再一起喷射补齐至设计厚度。开挖采用中导洞领进, 导洞开挖领先两侧扩挖的距离应不小于 30 m^[1]。

实际施工中, 在中导洞开挖、系统锚杆、首层喷混凝土、锚索等支护完成后依次扩挖上、下游侧顶拱, 两侧锚杆支护、首层喷混凝土、锚索基本能按照设计要求跟进; 最后完成全拱喷混凝土至设计厚度。

4.5 安全监测及动态控制

为了研究地下洞室围岩位移大小及变化规律、最终位移稳定时间和位移最终值、围岩松弛范围和塑性区范围、锚杆及锚索应力分布及变化规律, 从而验证层状结构岩体中锚杆及锚索的支护效果, 掌握洞室围岩的稳定状态, 西龙池地下厂房布置了 4 个系统监测断面(横向)、4 个辅助监测

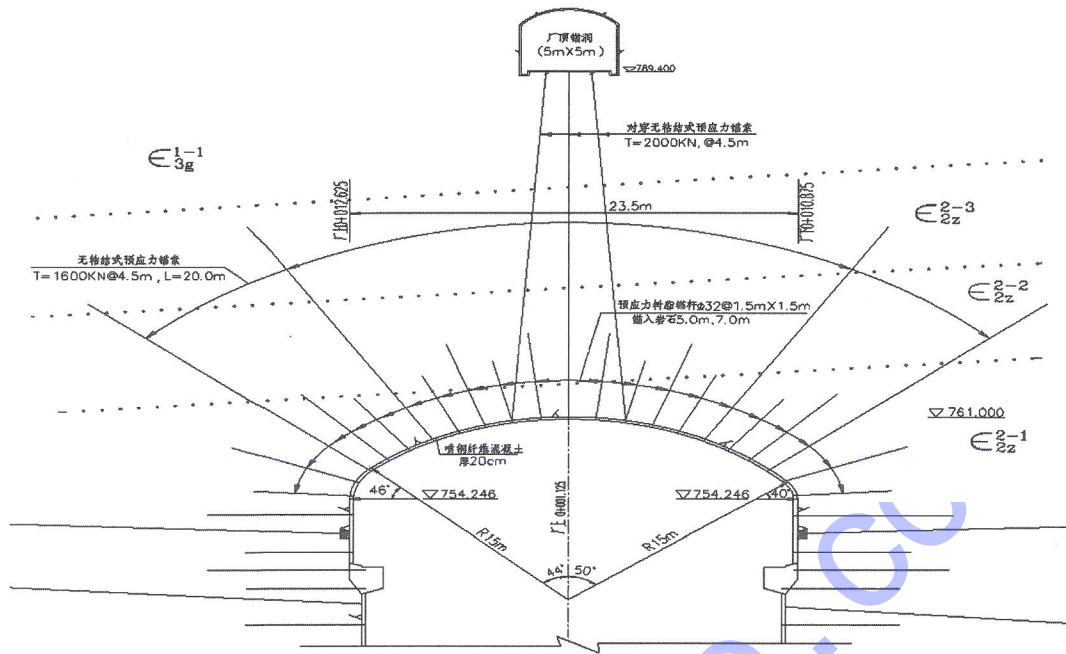


图3 地下厂房顶拱支护剖面

断面(其中2个为横向,2个为纵向),主要仪器采用预埋方式,监测项目主要包括围岩内部位移、收敛变形、围岩松动范围、锚杆应力、锚索应力、孔隙水压力等^[2]。

(1)结合工程的地质条件有针对性地布置监测仪器,在地质条件较差的部位适当加密监测断面。

(2)利用附洞在洞室开挖前预先布置监测仪器。顶拱正中的9排多点位移监测仪器均为预埋,获得了比较全面的洞室变形资料。边墙、端墙也利用主要洞室周围的排水廊道布置预埋多点位移监测仪器。

开挖支护设计坚持动态设计理念,采用动态设计方法,采用设计→施工→监测→反分析计算预测→调整设计→指导施工这样的设计施工程序。即根据工程的围岩特点和理论分析成果,对顶拱开挖过程中的允许变位最大值提出控制要求。根据监测成果,在每一层开挖后均进行了围岩稳定的正反分析,并对下层的开挖变位、应力等进行了预测。监测资料显示位移动值接近控制标准时增加支护措施,以便洞室的变位处在设计控制范围内。

4.6 围岩稳定判别

西龙池电站地下厂房经过现场实测及分析工

作后,过程中采用“多项指标综合评估”法进行判断围岩稳定。

(1)对近水平层状岩体,其顶拱中央的围岩位移明显大于拱角、边墙处位移,顶拱位移最大值为19.16 mm。围岩的变形随着离洞周深度的增加而减小,顶拱的松动区范围为1.2~3 m,强度下降区范围为3~8 m。顶拱允许相对变形值小于跨度的0.1%(约23.5 mm);顶拱允许变形速率0.1 mm/d以下;顶拱允许变形速率比5%以下。

(2)顶拱的变形与爆破开挖密切相关,变形随爆破呈明显的台阶状。由第一层中导洞及其两侧扩挖和第二层拱角的开挖引起的顶拱变形占了稳定后变形的绝大部分。

(3)顶拱变形速率的空间效应非常明显。当开挖掌子面离开监测断面1倍中导洞洞径时,围岩变形速率已稳定地降低到了0.2 mm/d以下,离监测断面2倍中导洞洞径时,围岩变形速率降低到0.03 mm/d以下,此时围岩变形趋于稳定。

(4)本工程围岩稳定性根据多种方法进行判别,都在规定的允许值范围内,表明地下厂房围岩是稳定的。

5 结语

(1)西龙池地下厂房位于水平薄层围岩中,

(下转第120页)

向开回油沟。

这样吸油毡牛毛毡刮吸轴上的润滑油,阻止润滑油沿着轴向外渗漏,而且吸油毡刮吸的油通过下铜环流及轴承下端盖梳齿止口槽回油孔回流到轴承内。而且吸油毡与轴之间有润滑油软接触运行,不会对轴有伤环。

此外,弹片的作用,一方面可以有效调节铜环与轴的密封间隙,另一方面可以避免飞逸转速或震动时发生止漏铜环与轴的硬接触损坏,从而起到保护作用。

电站通过对机组轴承端盖进行技改,应用新型端盖止漏密封环,于2016年1月技改完成运行至今,彻底解决了机组轴承端盖漏油问题。

3 轴承端盖止漏密封改进后的效果

通过实践应用,新型轴承端盖止漏密封环结构科学,适用于卧式机组轴承端盖密封。主要产生了如下效果:

(1) 确保机组运行安全可靠。防止发电机两端轴承渗漏的润滑油进入发电机,造成绝缘老化,油泥堵塞通风沟,定子温升高,油污粘附到滑环上,使炭刷跳火,加速炭刷磨损及滑环腐蚀;防止因轴端大量漏油使轴承油位下降等问题,保证了机组的安全运行。

(2) 降低运行成本,提高发电效益。新型止漏密封环有效的解决了机组轴承端盖漏油的问题,防止了油的损耗,降低了运行成本;防止了停

(上接第114页)
由于岩石呈互层状、细层较薄、纹理发育、岩层产状平缓、岩层间结合力差,施工开挖过程中易出现塌顶现象,其顶拱的围岩稳定是设计、施工的关键。

(2) 通过现场原位模型试验、三维数值模拟、监测资料分析等方法,系统研究了水平薄层围岩的变形规律、破坏机理。

(3) 选择合理的厂房位置和布置形式,按照主动支护、尽早支护的原则,采用对穿锚索预加固顶拱,预应力树脂锚杆、喷钢纤维混凝土及时跟进掌子面等措施,有效控制了围岩变形,防止了围岩层间脱开。

(4) 利用附洞在厂房开挖前预先布置监测仪器,获得了比较全面的监测数据。开挖过程中,实时掌控围岩变形趋势,依据严格的变形指标评估

机维护,提高发电效益。

(3) 防止环境污染,确保了安全文明生产。

4 结 语

在分析出水轮机轴承出现漏油原因的基础上,对轴承漏油的部位进行处理,研究改造了最为科学的止漏环,通过运用,达到很好的密封效果,从根本上解决了渗油的问题。从而保障了卧式水轮机可以正常的运转,提高水轮机组运行的效率,从而保证水电站供电质量(安全可靠),促进了电站的生产效益。实践结果表明,本电站采用的这种新型的轴承端盖止漏环结构,取得了良好的效果。

参考文献:

- [1] 窦纯玉. 解决卧式水轮机轴承漏油问题的探讨[J]. 科技创新导报, 2008, (14).
- [2] 杨晋波. 中小型卧式水轮机主轴密封结构的改进[J]. 技术与市场, 2011, (7).
- [3] 王阳, 陈少武, 赵爱民. 中小型卧式水轮机主轴密封结构的改进[J]. 机电技术, 2013, (4).

作者简介:

何 军(1976-),男,四川芦山人,毕业于西安航空技术高等专科学校热能工程专业,四川众能电力有限公司安全生产技术部副经理,工程师,从事水电安全生产管理工作;

王政宏(1974-),男,四川成都人,大专,技师,四川众能电力有限公司双河电站生技部主任,从事水电安全技术生产管理工作;

李 慧(1989-),女,湖北荆州人,毕业于河海大学水利工程专业,硕士,四川众能电力有限公司安全生产技术部专责,从事水电设备管理工作。 (责任编辑:卓政昌)

围岩状态,动态调整支护参数,控制围岩变形。

(5) 从厂房布置到支护措施研究、施工过程控制,严控厂房围岩变形的思想贯穿整个设计过程,有效防止了岩层层间脱开,成功解决了水平薄层围岩条件下地下厂房围岩稳定问题,该设计成果值得同类工程借鉴。

参考文献:

- [1] 周长兴、张捷、赵朝霞、张万祝,西龙池抽水蓄能电站地下厂房设计,《水利规划与设计》2010年01期第54~56页。
- [2] 刘凤成、胡五星、钱能尊、仇水波,西龙池蓄能电站地下厂房围岩监测成果分析反馈,《水力发电学报》2009年第3期第121~125页。

作者简介:

张 捷(1979-),男,湖北十堰人,毕业于武汉大学水利水电工程专业,高级工程师,现任中国电建集团北京勘测设计研究院水工专业总工程师,从事水利水电工程设计工作。

(责任编辑:卓政昌)