

小天都水电站气垫调压室闭气补强的方案研究

张 良，殷家庆，吴 俊，王福科

(四川华能康定水电开发有限公司,四川 成都 610041)

摘 要:小天都电站引水系统采用“一坡到底+气垫式调压室”方案,电站运行初期气垫调压室漏气量较大。本文介绍了气垫式调压室的设计和运行情况,介绍了气垫式调压室闭气补强处理方案比选、闭气补强处理施工与实施效果。

关键词:小天都水电站;气垫式调压室;处理方案;实施情况;效果和评价

中图分类号:[TM622];TV732.5;TV543+.6 文献标识码: B 文章编号:1001-2184(2019)03-0127-06

Scheme Study on Air-Tight Reinforcement of Air Cushion Surge Chamber
at Xiaotiandu Hydropower Station

ZHANG Liang, YIN Jiaqing, WU Jun, WANG Fuke

(Kangding Hydropower Development Co., LTD, Huaneng, Chengdu, Sichuan, 610041)

Abstracts: The diversion system of Xiaotiandu Hydropower Station adopts the scheme of "one slope to the bottom + air cushion surge chamber". The air leakage of air cushion surge chamber is large at the preliminary stage of the operation. This paper introduces the design and operation of air cushion surge chamber, and the selection of air-tight reinforcement treatment schemes for air cushion surge chamber, as well as the construction and implementation effect of air-tight reinforcement treatment.

Key words: Xiaotiandu Hydropower Station; air cushion surge chamber; treatment scheme; implementation; effect and evaluation

0 引 言

气垫式调压室是 10 多年前自挪威引进的一项技术,在高山峡谷区采用此技术可以减小工程投资,同时具有良好的经济和环保效益。目前国内已建的气垫式调压室防漏气措施方案有两种:一是对围岩自身进行灌浆的同时,辅以在其周边设置长期运行的高压水幕;二是采用钢罩方案确保气室的气密性。由于国内地质条件的复杂性,采用第一种方案建成的气垫调压室漏气量较大、运行成本较高。而采用钢罩方案,由于施工空间制约,调压室施工难度大、作业条件差,造价较高,如工艺控制不好,同样达不到理想效果。为充分发挥气垫式调压室优势,需要对防漏气工程措施作进一步的改进,达到既能减少投资,又能达到漏气量小的目的,以减少运行期补气量,降低运行费用。我们在小天都水电站放空检查后对气垫调压室采取了闭气补强处理措,达到了预期效果,为同行提供参考和经验借鉴。

1 小天都电站概况

小天都水电站于 2003 年 6 月开工,2005 年 12 月投产发电。电站位于四川省甘孜州康定县境内,系大渡河一级支流瓦斯河梯级开发规划的第二级电站,电站为高闸引水式,具有日调节性能,电站装机容量 240 MW,工程主要以发电为主,兼顾下游生态环境用水。电站由首部枢纽、引水系统和地下厂房枢纽三大部分组成,额定水头 358 m,装 3 台 80 MW 混流式机组,设计引用流量 77.7 m³/s。

小天都电站引水隧洞采用“一坡到底+气垫式调压室”布置方案,系国内首次采用此方案,取得了可观的经济和环保效益。引水隧洞布置于瓦斯河右岸,沿线山体雄厚,地形陡峻,为高程 2 000 ~3 000 m 高山区。洞室围岩主要为晋宁~澄江期浅灰、深灰或灰白色中粒斜长花岗岩和闪长岩,岩石致密、坚硬引水隧洞岩石主要以花岗石高水头引水隧洞长约 6 km,承受最大内水水头 450 m。

收稿日期:2019-05-06

2 气垫式调压室设计和运行情况

2.1 气室设计情况

在气垫室位置选择和设计过程中,建设单位和设计单位做了大量的咨询和论证工作。在设计阶段为优选气垫式调压室位置,在PD₂平洞、压力管道(管)共进行了8组现场水压致裂法地应力、高压压水试验,保证气室位置有足够的岩体压覆厚度和地应力避免气体产生劈裂效应。

气垫式调压室由连接洞、气室、水幕廊道及其交通洞组成。水幕室位于气室上部,气室和水幕室均为一字型布置,气室(长×宽×高)为80×16×15.5~19.97(m),水幕廊道断面尺寸为80×4.8×5.85(m)。水幕室内沿气垫式四周钻水幕孔,间排距3 m,通过高压水泵向水幕廊道注水,形成“伞”字形水幕。气室正常运行气压为3.76 MPa,水幕压力较气室压力超压0.5 MPa,起到防止气室漏气的目的。

在开挖后,气垫室总体情况和预想的有较大差异。气室局部因地应力高有岩爆出现,总体岩体状况并不理想,大部分表面节理和裂隙发育,特别是拱肩下部一约宽2.5 m断层破碎带横穿整个边墙。加之施工时控制爆破掌控欠佳,岩体表面起伏较大,多处发生小规模塌方。为此,气室大部分岩体均采取了锚杆支护,局部进行挂网和喷混凝土支护。为确保气室气密性,对气室围岩采取系统性水泥高压无盖重固结灌浆处理,灌浆孔深8.0 m,同时对所有临时通道堵头均进行高压固结灌浆。

2.2 气垫式运行情况

在气垫调压室运行初期,水幕廊道堵头外和气垫式堵头外交通洞沿线均出现多处漏气点,部分点位大量水气逸出。根据监测数据,气室漏气量约15 m³/min左右。主要原因是:(1)当时国内缺乏工程经验,在气室附近布置了包括气室交通洞、水幕廊道交通洞、PD₂地质探洞、PDs地质探洞等4条支洞,气室附近临空面过多。(2)气室附近存在3条宽度0.5~2.5 m宽度不等的断层,最大一条断层水平向横穿气垫式。(3)岩石裂隙发育,虽经系统灌浆,但由于岩体各向异性特点,仍未能保证气室气密性。(4)水幕孔深度偏浅,未

能覆盖气体逃逸范围。

气垫调压室运行后,随着时间的推移,漏气量逐渐增加。到2016年1月,测得的漏气量达到35~40 m³/min。由于漏气量大,为维持气垫调压室水位,空压机运行数量多(4台10 m³/min+2台10 m³/min),导致运行成本高、人员疲于应对空压机系统的维护保养工作。

在小天都电站投产运行后,因各种客观原因一直都未进行过放空检查。为此,为确保电站安全运行,决定放空引水系统进行检查,同时对气垫调压室进行闭气补强处理。

3 气垫式调压室处理方案和技术准备

3.1 气室内方案比较

国内某电站因气室漏气量过大无法正常运行,采取了系统性补强灌浆和气室岩体表面局部涂刷环氧涂层措施,减少了漏气量。除此之外,再没有其他类似经验可供借鉴。公司和电站原设计单位进行了多次研究和讨论,比较了三种处理方案:

方案1:钢罩方案。采用钢板进行闭气,即钢板外挂衬砌混凝土表面。

方案2:局部补强方案。放空后对气室内渗水点或异常点进行化学灌浆或固结灌浆;对水幕交通洞和气垫式交通洞漏水和漏气点进行衬砌,并进行局部固结灌浆。

方案3:内涂材料+局部灌浆。放空后对气室内渗水点或异常点进行化学灌浆或固结灌浆,之后在岩体表面涂刷高分子材料。对水幕交通洞和气垫式交通洞漏水和漏气点进行衬砌,并进行局部固结灌浆。

方案1从理论上来说,闭气可靠度高,但由于仅有1#支洞预留的2×2.5 m进人门洞可利用,施工通道受限,施工难度大,施工时间需要近一年时间。况且钢板加工尺寸小,焊缝太多,漏气风险增加,处理费用和发电损失将超1亿元。方案2施工简单,时间短,处理费用和发电损失小,但不能保证能大幅降低漏气量。方案3施工也较简单,时间较短,处理费用和发电损失较小,且有较高可靠度减少漏气量。

3.2 方案拟定

经与设计单位进一步研究讨论后,小天都电

站气室闭气补强方案如下：

(1)气室内采用方案 3 进行闭气补强处理。
处理方案见图 1。

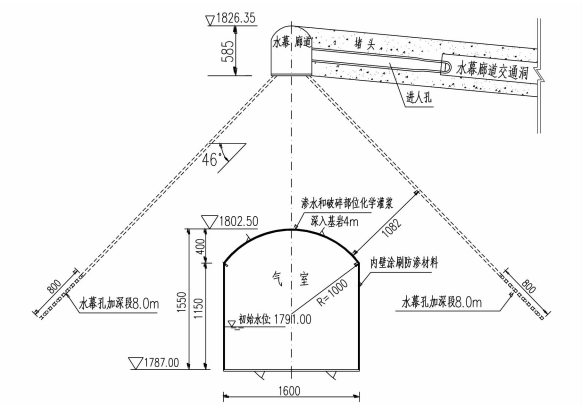


图 1 气垫调压室气室处理方案

(2)在以气室内部处理为主基础上,同时对气室交通洞和水幕廊道交通洞漏气点密集部位进行混凝土衬砌,并进行定点固结灌浆。延长水幕廊道孔,加深 8 m。气室交通洞和水幕廊道交通洞加固处理方案见图 2。

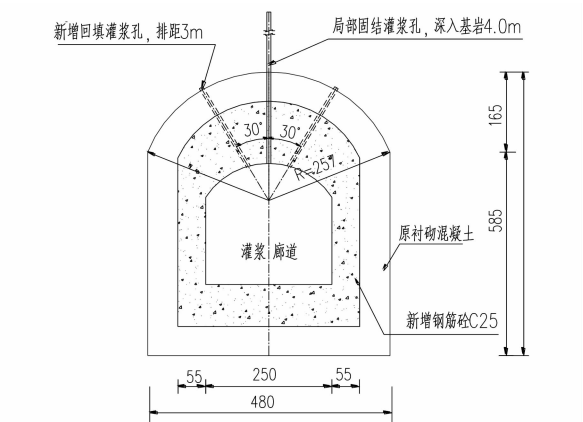


图 2 调压室交通和水幕廊道洞加固处理方案

4 补强处理实施情况

4.1 气室喷涂材料选择

在不同的运行工况下,气垫式调压室防渗涂层将承受气压和水压差的作用,设计单位对表面防渗闭气材料特性要求为:具有较高的抗拉强度和抗裂能力;与岩石或混凝土具有较高的粘结强度,防止外水压作用下脱落;具有较好的防渗闭气性能,要求渗透系数小于 10^{-8} cm/s;具有一定的柔性,能适应围岩在各种运行和检修情况下的变形;具有较好的耐久性;材料能在潮湿环境下施工

和固化;施工方便,不需要大型施工设备,能适应小天都电站所能提供的施工条件。

我们对设计、施工、材料厂商进行了广泛的市场调研。目前在防渗工程中采用的主流材料有环氧、丙烯酸盐和聚脲。经过材料性能和环境适应性比较,环氧类防渗材料涂层强度高,与混凝土粘结力强,有一定韧性(韧性通过配方调整能够使涂层的韧性满足设计要求)。综合考虑上述情况,结合电站实际条件,最终决定在小天都电站调压室检修中采用环氧涂层材料。我们邀请了国内多家环氧产品厂家进行了现场实验,重点关注指标是抗渗性能与岩体粘结强度。

试验结果,我们选择了性能最好的 PSI-HY-Ehp 环氧树脂。PSI-HY-Ehp 防渗抗冲耐磨涂层材料分为底涂和面涂,由 A、B 两组分组成,其中 A 组分由低粘度环氧树脂及其它高硬度高耐磨无机材料混合而成,所用环氧树脂类型为特殊双酚 A 类型;B 组分由环氧树脂固化剂混合其它无机材料组成,其固化剂由传统 T31 固化剂改性而来,属于新型酚醛胺(PAA)环氧固化剂。

4.2 放空检查情况

小天都电站于 2017 年 11 月 1 日停机,6 日引水系统全线放空。经检查,引水隧洞混凝土全衬砌段、喷锚支护段、底板混凝土均运行良好。未采取喷锚支护段沿线有不同程度和大小不一的掉块,5 km 未支护段掉落石块约 180 m³。调压室以下混凝土衬砌段和压力钢管段状况良好。

气垫式与引水隧洞间的连接洞淤积较为严重,淤积至顶部洞顶剩余约 1.6 m,通道面积减小已严重影响了水气交换调压作用。气垫式底部淤积厚度 0.5~1.2 m。气垫式围岩无掉块现象,原交通洞堵头拱间以上接触面均渗水,破碎带均有不同程度渗水,多处呈线状水。部分岩面有白色物质析出,疑似为原灌浆物质析出所致。

4.3 补气补强工作重点和难点

(1)工期短,工程内容较多,施工准备时间太短,临建工程量大且条件受限,需采取措施保证进度。

(2)裂缝封堵、聚氨酯化学堵漏灌浆和环氧灌浆是为涂料喷涂施工的先行工作,能否在计划时间内完成防渗堵漏灌浆,达到堵漏目的,为

涂料喷涂提供工作面,是保证施工质量和进度的关键。

(3)涂料喷涂施工是调压室防渗闭气的重要工序,如何控制好施工质量是本工程的重点和难点之一。

4.4 调压室气室处理实施情况

放空后,经过对气垫式状况观察和分析,在方案基础上进行了调整和细化。总体处理工艺为:清理底部淤积物→气室岩体表面初步清洗和处理→岩壁渗水部位堵漏→岩体渗水部位和破碎带化学灌浆→排水孔处理→岩体表面清洗并处理至表干状态→环氧涂涂料喷涂。在布置好通风机、照明线路后,开始气室施工作业。具体实施方案如下:

4.4.1 清理底部淤积物

采用装载机装车,用小型农用车将淤积物自引水隧洞和原1#支洞运出洞外。

4.4.2 岩体表面初步清洗和处理

清除松动岩块,割除原气垫式系统锚杆露头,以确保安全和便于补强作业。经过多年运行后,因补气空压机补气,气室岩体表面积攒了大量油污,为此采用了高压水和清洗剂进行清洗。在清洗过程中,在气室底板布置拦挡设施,收集油污。为保证灌浆效果和防漏气目的,采用环氧砂浆充填大于2mm岩石缝隙。

4.4.3 岩壁渗水部位堵漏。

右边墙顶拱肩以下有横穿整个调压室破碎渗水带,破碎带长80m,宽1.5~2.5m,渗水极为分散,局部成线状流水,采用聚氨酯和环氧树脂堵漏,孔深0.5m,间排距0.5~1m。处理后,堵漏效果不好,因此采用了钻设排水孔,排水孔深度2m。对于呈线状流水处钻设集中排水孔。

4.4.4 化学灌浆

为保证达到气室闭气效果,对破碎带、渗水部位及有白色物体析出部位进行环氧树脂化学灌浆。将原设计方案调整为:灌浆孔间排距1m~1.5m,孔深1.5~2m。在处理过程中参建各方高度重视灌浆质量管理和效果检测工作。从处理完成后气室运行情况看,化学灌浆是防漏气主要处理手段。

4.4.5 排水孔处理

在化学灌浆完成后,试图将排水孔进行封堵,但效果不好,水又从其他部位渗出,无法实施环氧涂层施工。为此决定采用不锈钢管一直延伸至气垫调压室水位以下,确保气体不溢出。

4.4.6 气室岩壁清洗和处理

在完成灌浆后,清洗岩壁油污和粉尘、松动小石块,保证环氧涂层与岩体之间粘结强度。另外对于表面存在尖角的岩体,采用人工倒角,避免在气室高压状态下,尖角处的涂层受到应力集中而受到破坏。

4.4.7 环氧涂料涂刷

工艺流程为:基面清理及检查→施工分区→缺陷修补→基面清理→底涂喷涂(褐色)→面涂喷涂(灰色)→质量检查。

岩体完整地涂层厚度3mm,破碎带部位涂层厚度4mm。由于岩体起伏不平,人工涂刷难度大,且难于控制质量。之后经过现场试验,施工单位购买了德国产喷涂机进行喷涂,大大提高了施工效率。且由于涂料由喷嘴中高速喷射而出,涂料可以深入岩面裂隙将其填充充实,而这个问题是人工涂刷工艺难以解决的,同时由于涂料与岩面的高速撞击,涂料与岩面之间的结合也较涂刷工艺更加紧密,尤其在调压室顶拱部位,喷涂较人工涂刷工艺涂料与岩面之间的结合更加牢固,大大提高了施工质量。

4.4.7.1 底涂施工

常规区域(喷涂厚度为3mm的区域)底涂厚度为1.0mm,岩体相对破碎的区域(喷涂厚度为4mm的区域)底涂厚度为1mm,待基面干燥及前期基面修补材料凝固后,采用毛刷、刮板将防渗材料喷涂于基岩表面,喷涂施工应用力必须均匀一致。喷涂施工应沿同一走向喷涂,以保证涂层的厚度均匀和表面平整,对于渗水较多部位,重点进行聚氨酯堵漏,局部辅助环氧灌浆。

4.4.7.2 面涂施工

常规区域(喷涂厚度为3mm的区域)面涂厚度为1.5mm,喷涂一次,岩体相对破碎的区域(喷涂厚度为4mm的区域)面涂厚度为3mm,分两次喷涂,每次1.5mm。喷涂施工应沿同一走向喷涂,以保证涂层的厚度均匀和表面平整。

4.4.7.3 喷涂施工质量检查

(1)基面检查:喷涂前确保基面干净干燥,如有凝结水汽等,可使用棉纱将明水拭干;

(2)阴角处喷涂:阴角等部位不宜一次性成面,应使用毛刷进行多次喷涂,确保喷涂厚度,并保证平滑可靠。

(3)喷涂顺序:本工程喷涂 4 mm 厚的部位刷 4 次,3 mm 厚的部位刷 3 次,相邻涂层层均采用不同颜色,喷涂一次后需待检查验收完成后,方可进行下一层施工。

(4)涂料使用:涂料应搅拌均匀,随拌随涂,拌好的涂料应在 30 min 内用完,避免材料浪费。涂层喷涂厚度应满足设计要求。

(5)涂层检查:施工完毕后,对施工面进行检查,表面应处于平整光滑状态,不得有粗糙、松散、可视气孔、鼓包、白化、坠落现场,如发现有漏涂或有缺陷部位,进行二次喷涂或人工修补。

4.4.7.4 养护及拉拔检测

防渗涂层(面涂)施工完毕后 7 d 内做好保护措施,设立醒目的警示牌,防止坚硬物撞击等,防渗涂层养护完成后进行抗拉试验检测,验收合格后拆除施工脚手架。

4.5 调压室交通洞和水幕室交通洞处理实施情况

4.5.1 调压室交通洞

气室交通洞 TJ0+294.185 — TJ0+483.756 m 段的各个渗漏点作局部灌浆处理如下:沿漏气点(面)周围钻孔(见图 3),深入基岩 4.0 m,每处不少于 4 孔,采用聚氨酯类化学材料灌浆、封孔,反复几个循环,直至不出现气泡;沿漏水点(面)周围钻孔(见图 4),深入基岩 4.0 m,每处不少于 4 孔,采用水泥灌浆、封孔,反复几个循环,直至不出现渗水;对混凝土表面破损的地方可用环氧胶泥进行修补。

4.5.2 水幕廊道交通洞

(1)水幕廊道交通洞 TJ'0+000.000 — TJ'0+300.301 m 段的各个渗漏点作局部灌浆处理,处理方式与气室交通洞相同。

(2)水幕廊道交通洞 TJ'0+177.040 — TJ'0+237.040 m 段加厚衬砌(在衬砌以前对漏水点作局部化灌或水泥固结灌浆),再进行回填灌浆。

4.6 质量控制要点和措施

为确保气垫调压室闭气补强成功,在气室内

施工过程中,监理工程师和公司专业技术人员全程进行严格把关,保证工序质量。质量控制要点为:

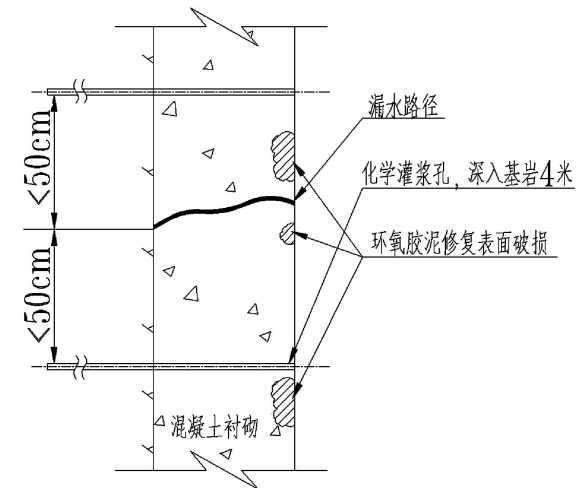


图 3 边墙衬砌漏气点处理示意图

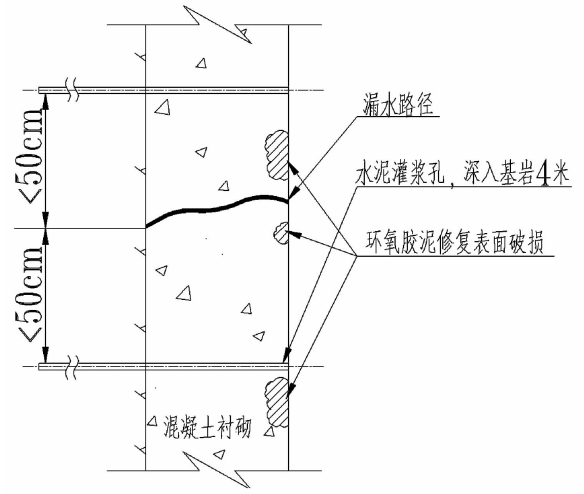


图 4 边墙衬砌漏水点处理示意图

(1)首先保证堵漏和排水孔效果,保证岩体无可视渗水。

(2)保证环氧砂浆充填岩石缝隙质量,不遗漏任何一处缝隙,保证环氧灌浆质量。

(3)环氧涂料喷涂前,保证岩石表面干净,无岩粉和油污,岩体表面处于表干状态。

(4)安排专职质检人员全程旁站喷涂施工,从基面处理到涂料配制,再到每一层涂料喷涂都实行全程旁站制度。

(5)相邻层涂料要使用不同的颜色进行区分,确保每一层都是全面覆盖

(6)排水孔处理重点是采用环氧砂浆堵塞

好排水管和孔之间缝隙,堵塞深度不得少于 10 cm;保证管接头连接和焊接质量,并采用环氧树脂涂刷接头表面,排水管伸入设计最低水位,保证不漏气。

5 闭气补强效果

由于时间短,且实施难度太大,本次处理工作没有对水幕孔进行钻孔加深。电站于 2018 年 2 月 6 日恢复发电,较原计划提前 21 d。完成补强处理后,开始隧洞充水充气工作。在未启动水幕加压泵和水头低于 2 MPa 情况下,气室水位下降较快,在水头超过 2 MPa 后,水位下降慢,达到 3 MPa 之后水位不再下降,漏气量增大,于是,立即启动水幕超压。随着水幕压力逐步增加,漏气量明显减小,在达到设计超压 0.5 MPa 后,漏气量为 10~12 m³/min,小于预期的 14 m³/min。电站于 2018 年 2 月 6 日恢复发电,较原计划提前 21 d。自从电站恢复发电后至今,气室漏气量稳定,大大减少了补气空压机数量,降低了运行成本和发电机组运行安全风险。

6 结 语

小天都电站气垫式调压室漏气量并未如国外电站那样随着时间推移而减少,虽然本次处理效果好于预期,但漏气量与挪威已建电站比较仍有差距。引水式电站采用气垫式调压室的定会带来经济和环保效益,但如漏气量大,会给机组运行带来安全隐患,使运行人员疲于应对补气设施的维

(上接第 126 页)

速器切至备套运行,若运行在功率模式,则切换至开度模式运行。调速器优先选择变送器 1 主用,当变送器 1 和 2 偏差超过设定值持续一定时间后,将变送器 1、2 分别与变送器 3 进行比较,选择与变送器 3 偏差值较小者为主用,并报另一个变送器故障。

8 结 语

调速器液压系统发生故障,将对机组的安全运行造成威胁。通过对该电站调速器功能进行完善和优化,有效的解决了机组在运行过程中存在的问题和薄弱环节,切实提高设备的可靠性。

参考文献:

[1] 防止电力生产重大事故的二十五项重点要求》(国能安全

护和检修工作。
(1)从本次补强后充水充气情况分析,环氧涂层承受气压压力在 2 MPa 左右。虽然环氧抗压抗拉强度高,但由于受环境条件、施工工艺影响和制约,涂层中出现众多微小气泡、施工缺陷等不利因素。环氧涂层薄弱部位在高压击穿后所起作用已很微弱,主要还是固结灌浆和超压水幕孔在起闭气作用。

(2)对于利用围岩和水幕防漏气的气垫室,由于受开挖爆破和高地应力影响,岩石圈均有不同深度松动范围,因此,应增加固结灌浆深度,同时提高灌浆压力。在灌浆材料选择上,以水泥灌浆为主,而化学灌浆是重要的补充手段,断层是重点处理部位。

(3)水幕廊道内设置的水幕孔要适当延长,保证水幕孔孔底高程达到气垫室初始运行水位,以达到封住漏气通道目的,减少气室漏气量。

作者简介:
张 良(1968-),男,四川西充人,高级工程师,四川华能泸定公司副总经理,从事水利水电技术和管理工
殷家庆(1963-),男,四川长寿人,高级工程师,四川华能康定公司总经理,从事水利水电技术和管理工
吴 俊(1979-),男,贵州金沙人,工程师,四川华能康定公司基建部主任,从事水利水电技术和管理工
王福科(1974-),男,广西武宣人,高级工程师,四川华能康定公司基建部副主任,从事水利水电技术和管理工

(责任编辑:卓政昌)

[2014]161 号).
[2] 杨威,毛羽波.新型过速限制器分析.大电机技术[J].水电站机电技术.2014(3).
[3] 何林波,许栋,初云鹏.全国水电厂自动化技术信息网.第十届全国大会暨全国水电厂自动化技术 2011 学术交流研讨会论文集[C].太原.2011.
[4] 杨建伟,廖润,邵建林.FC 型主配压阀在若水电站的改造与应用[J].水电站机电技术.2016(2).
[5] 樊建军.基于 PCC 的调速器控制系统在大峡水电站的应用.甘肃省电机工程学会.甘肃省电机工程学会 2013 年学术年会论文集[C].兰州.2013.

作者简介:
张 勇(1990-),男,四川南充人,助理工程师,本科,主要从事水电站运行管理工作。

(责任编辑:卓政昌)