

DOI :10.3880/j.issn.1006-7647.2009.06.020

土工膜防渗技术在泰安抽水蓄能电站上水库的应用

何世海¹ 吴毅谨² 李洪林³

(1. 中国水电顾问集团华东勘测设计研究院 ,浙江 杭州 310014 ; 2 中国水利水电建设工程咨询公司 ,北京 100011 ;
3. 中国水利水电第十二工程局有限公司 ,浙江 杭州 310004)

摘要 :介绍了泰安抽水蓄能电站上水库 HDPE 土工膜防渗方案的设计过程和施工方法 ,包括防渗层材料的选择 ,防渗层、下支持层、上保护层设计 ,土工膜周边连接方案 ,土工膜施工焊接工艺和无损质量检测方法等方面取得的成果。实践表明 ,土工膜防渗技术在泰安抽水蓄能电站的应用是成功的 ,水库已安全运行 4 年 ,库水外渗水量很小 ,库底最大总渗漏量仅为 3.89 L/s ,上水库总渗漏量仅为总库容的万分之三 ,防渗效果很好 ,节省投资 3 200 万元 ,缩短施工工期 4 ~ 6 个月 ,为我国大型水电工程土工膜防渗技术的应用积累了经验。

关键词 :泰安抽水蓄能电站 ;水库 ;土工膜 ;防渗层设计

中图分类号 :TV49 文献标识码 :B 文章编号 :1006-7647(2009)06-0078-05

Application of geomembrane in seepage control technique in upper reservoir of Tai 'an pumped storage power station//
HE Si-hai¹ , WU Yi-jin² , LI Hong-lin³ (1. HydroChina Huadong Engineering Corporation , Hangzhou 310014 , China ; 2. China Water Conservancy and Hydropower Engineering Consulting Company , Beijing 100011 , China 3. SINOHYDRO Bureau 12 Co. Ltd. , Hangzhou 310004 , China)

Abstract : The design process and construction method of the geomembrane HDPE for seepage control of the upper reservoir of the Tai 'an pumped storage power station are introduced , including the material choices ; the design of the seepage resistance layer , underlying supportive layer and overlying protective layer ; the peripheral connection of the geomembrane ; and the non-destructive quality detection method. The application of geomembrane in the seepage control technique for the Tai 'an pumped storage power station has been successful. The reservoir has already operated safely for 4 years. The seepage volume is very small , and the maximal seepage volume of the reservoir bottom is only 3.89 L/s. The anti-seepage effect is satisfactory and the total seepage volume of the upper reservoir is only one ten-thousandth of the total storage capacity. The investment has been reduced by 32 million yuan and the construction time reduced by 4-6 months , providing a positive experience of application of geomembrane in seepage control for large hydropower projects in China.

Key words : Tai 'an pumped storage power station ; reservoir ; geomembrane ; impervious layer design

1 工程概况

泰安抽水蓄能电站位于山东省中部 ,总装机容量 1 000 MW ,是山东省第一座大型抽水蓄能电站。工程枢纽由上水库、下水库、输水系统、地下厂房洞群、地面开关站及中控楼等建筑物组成 ,按一等大(1)型水库建设。电站上水库在泰山西麓樱桃园沟口筑坝形成 ,水库正常蓄水位 410 m ,死水位 386 m ,最大坝高 99.8 m。上水库需要发电有效库容 890 万 m³ ,但受地形限制 ,天然有效库容仅 586 万 m³ ,死库容 363 万 m³。针对天然有效库容小而死库容大的问题 ,设计采用开挖库岸以增加有效库容的方法 ,但大量开挖弃渣造成环境问题突出。

经研究 ,开挖料除用于直接填坝外 ,利用死库容堆存弃渣 181 万 m³ ,坝前最大堆渣厚度约 50 m。

泰安抽水蓄能电站上水库库盆北、西、南三面环山 ,库岸主要由强-弱风化混合花岗构成 ,右岸横岭(其山体内部为引水发电系统)山体单薄 ,节理密集带发育 ,连通性较好 ,透水性强。库区左岸山体雄厚 ,岩石新鲜完整 ,地下水位高。沿上水库底纵向发育区域性 F1 断层 ,宽 33 ~ 52 m ,上水库防渗问题突出。经垂直防渗、全库盆防渗、综合防渗等 3 类方案综合技术经济比较 ,选择综合防渗方案 :大坝、右岸山体坡面采用混凝土面板防渗 ,右岸库盆后半段山体采用垂直灌浆帷幕防渗 ,库底采用 HDPE 土工膜水平防渗。土工膜防渗区通过库底观测廊道和灌浆廊道

与 F1 断层设置的锁边垂直防渗帷幕相接 ,并通过连接板与大坝和右岸面板相接 ,形成封闭的防渗体系。

库底采用土工膜防渗 ,具有适应库底大范围填渣区变形能力强、防渗效果好的特点。土工膜防渗面积 16 万 m^2 ,膜上最大工作水头约 37 m ,最小工作水头约 11.8 m ,日最大工作水头变幅 24 m。综合防渗方案经济性好 ,可节省工程投资 0.5 亿 ~ 1.5 亿元 ,是我国大型水电工程首次采用土工膜作为永久工程防渗方案。

2 防渗层设计

2.1 防渗土工膜选择

从材料性能、施工工艺特性、应用经验、经济性 4 个方面采用加权评分方法评选上水库防渗土工膜材料。其权重的赋予结合泰安抽水蓄能电站上水库土工膜防渗特点进行 ,权重及评分参考了美国 GIS (土工材料研究所)的建议。经比较选择 HDPE 膜 ,因为 HDPE 膜具有可焊性、低温柔性较好的特点 ,同时具有耐磨性、抗戳穿能力、耐久抗老化能力强、厂家生产产品幅宽大、焊接接缝相对较少等优点。

泰安抽水蓄能电站土工膜厚度的选择 ,根据国内外土工膜厚度计算理论 ,分别采用薄膜理论计算公式^[1]、原苏联全苏水工科学研究所经验公式^[1]、Giroud 近似计算方法^[1]、GIS 计算公式^{[2]~4} 种方法进行计算。各方法计算所需要的土工膜理论厚度差别较大 ,为 0.1 ~ 0.7 mm。安全系数的选择 ,借鉴 GIS 建议的分类法确定 ,对重要的高等级工程取 10 ~ 15。最终选择 HDPE 防渗土工膜厚为 1.5 mm。

鉴于泰安抽水蓄能电站为国内大型水电工程永久建筑物中首次采用土工膜防渗 ,建筑物等级高 ,在确定膜材、初定膜厚后 ,进行了选材和承载模型试验。选材试验挑选国内 4 个厂家生产的 1.0 mm , 1.5 mm 2.0 mm 厚 HDPE 光膜和复合土工膜产品 ,隐名后进行物理性能、力学指标、渗透特性、抗老化和接缝性能测试比较试验。承载试验膜下垫层料从施工现场取样 ,在室内采用内径 600 mm 的水力刺破设备模拟实际承受设计水头 ,测试土工膜工作特性。承载试验结果^[3]表明 :①模拟实际承载条件 ,仅 C 厂家单膜产品不产生刺破或渗漏。②复合土工膜均未出现渗漏 ,但变形明显。③原设计膜下垫层粒径 (40 mm)偏大。根据材料和承载两项试验结果 ,采用 13 项性能指标加权综合评分的方法 ,择优选择土工膜厂家的产品。试验论证了 1.5 mm 土工膜厚度选择的可行性 ,并优化了原下支持层设计。最后确定泰安抽水蓄能电站上水库 HDPE 土工膜主要技术指标如下 :厚度 1.5 (+0.18 , -0.1)mm ;单位面积质量

大于或等于 1400 g/m^2 ;拉伸强度大于或等于 17 MPa ;断裂伸长率大于或等于 450% ;直角撕裂强度大于或等于 110 N/mm ;CBR 顶破强度大于或等于 3 kN ;刺破强度大于或等于 0.3 kN ;落锥法破洞直径小于 5 mm ;抗渗强度为 1.05 MPa(无渗漏) ;厚 3.6 mm 土工布质量为 500 g/m^2 。

2.2 土工膜组合防渗形式

复合土工膜能利用土工织物保护膜防刺 ,防运输损伤 ,限制或减少渗漏量^[4] ;同时可以利用土工布增加土工膜承载能力和沉降引起的拉伸 ,并具有现场敷设工序相对简单的特点。因此 ,设计最初拟采用一布一膜形式的复合土工膜。根据对国内土工膜市场调研 ,厂家对于厚度 1 mm 以上的 HDPE 土工膜 ,因其材料硬 ,多不进行复合。泰安抽水蓄能电站防渗工程现场曾试购过 1.5 mm 厚一布一膜的复合土工膜产品 ,均存在问题。其中 ,采用吹塑法生产的土工膜 ,由于膜布复合是采用二次加热压合工艺 ,厚膜两侧未复合预留连接部位有严重的折皱 ,现场试验折皱部位焊机难以通行 ,致使局部高热融化形成孔洞。采用压延法生产的土工膜 ,由于膜布复合是采用一次加热压合工艺 ,在生产过程中土工膜一面直接接触压辊 ,具有速冷条件 ,另一面通过土工布接触压辊 ,复合压力受土工布影响 ,无法达到同等压力条件下光膜密度 ,使复合土工膜中膜本身的压实性不及光膜 ,各项性能指标也不如压延法生产的光膜稳定 ,而且复合土工膜的表面缺陷也多于光膜。未复合区域(焊接条带区域)占 4% ,其性能不仅达不到复合土工膜的性能 ,且不及光膜的性能 ,成为薄弱带。考虑到防渗方案中土工膜本身的性能是最重要的 ,设计方案必须在考虑材料生产质量和现场施工质量的前提下合理确定。由于库底水平防渗形式对土工膜和土工布复合与否要求不如斜面防渗高 ,抗拉强度土工光膜和复合土工膜均可满足要求。而采用膜布分离的布置方式可以克服厚膜在复合生产工艺中存在的缺陷。因此 ,泰安抽水蓄能电站库底土工膜防渗结构采用膜布分离的布置方式 ,即膜下设置一层分离的土工布 ,既起底部防护作用 ,又在小破损时限制渗流。最终 ,设计选择了压延法生产的 1.5 mm 厚 HDPE 膜和 500 g/m^2 聚酯(涤纶)短丝针刺无纺土工布组合防渗层。

3 土工膜周边连接设计

泰安抽水蓄能电站土工膜水平防渗层面积约 16 万 m^2 ,周长 1 830 m。土工膜与坝底部的混凝土连接板相接段长约 400 m ;与右岸趾板相接段长约 730 m ;与库底廊道相接长约 700 m。通常 ,土工膜周边连接

主要有锚固槽嵌入连接、机械固定连接以及焊接(或化学黏结)3种形式,国内已建工程主要采用锚固槽嵌入连接方式。该方式工艺相对简便,但防渗效果相对较差,布置条件限制较严,土建工程量较大。而机械固定连接和化学黏结连接结构应用很少,具体的结构形式还不成熟。泰安抽水蓄能电站设计采用机械锚固连接方式,因承受最大水头约37 m,周边连接成为库底土工膜防渗结构中最易受损的薄弱环节,也是防渗体系安全可靠的关键点^[5]。为此设计者开展了系统的现场锚固试验,试验内容包括:锚固钻孔成孔方式和效果试验,锚固剂性能现场试验对比试验,孔距选择对比试验,锚固件选型和锚固力、机械连接整体防渗效果现场加载试验等。大量试验对比后选择采用钻孔机械DDEC-1钻机,成孔孔径18 mm,孔深130 mm,控制钻孔轴线偏差及孔位偏差不大于±1.5 mm,锚固剂采用喜利得RE500化学锚固剂,螺栓规格为M16×190 mm,锚固深度为125 mm,螺栓紧固力120 N·m。经现场反复试验和调整研究,周边连接结构形式自下而上分层结构见图1^[6]。

该技术方案的特点为:锚固剂可适应大规模露天施工,长期水下运行基本不需检修更换。柔性填料底胶配合柔性填料结构,适应了混凝土连接结构面的不平整度,达到找平、闭气、防渗的目的,并在角钢螺栓机械拧紧挤压过程中,形成第一道机械压紧防渗线。柔性填料底胶加复合防渗盖片加弹性环氧封边剂,形成连接结构的第二道黏结辅助防渗线,增加了连接结构的防渗安全性。现场加载试验,该结

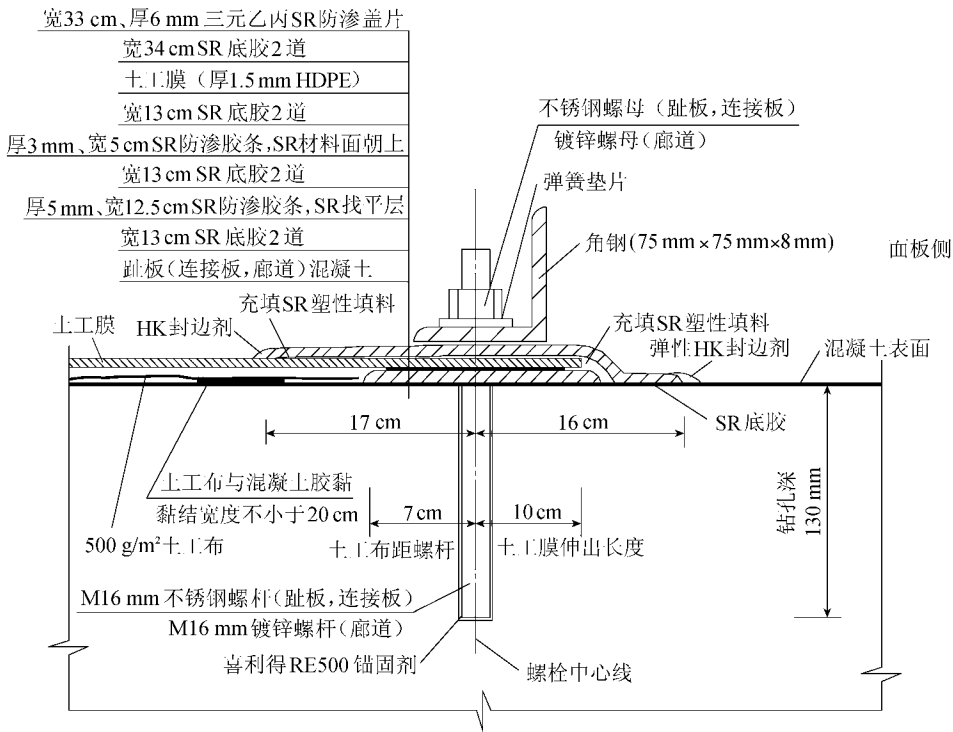


图1 土工膜与混凝土连接板连接

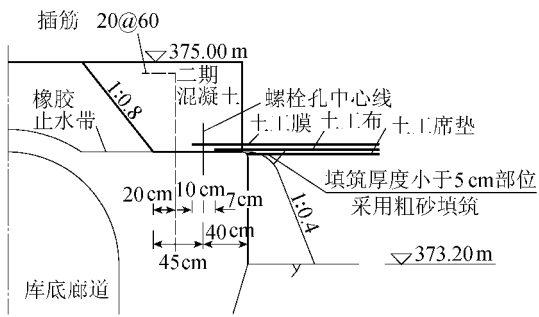


图2 土工膜与库底廊道连接结构

构在0.5 MPa水头和18 kN水平拉力作用下,当土工膜受力拉伸量为65~75 mm时,稳压试验150 min无任何渗漏,证明该连接方式安全可靠,见图3。



图3 土工膜锚固连接现场试验

4 下支持层和上保护层设计

泰安抽水蓄能电站土工膜下支持层自下而上包括:下支持过渡层、下支持垫层、土工席垫。

4.1 下支持过渡层

下支持过渡层厚120 cm,料源采用库盆弱风化开挖料,最大粒径15 cm,铺层厚度40 cm,碾压后干密度大于或等于2.11 t/m³,孔隙率小于或等于20%,渗透系数为8×10⁻³~2×10⁻¹ cm/s,实测为

$2 \times 10^{-2} \sim 4 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$ 。为防止膜下渗水不能及时排除,产生顶托现象,过渡层的顶部设置土工排水管网,排水管网间距 $30 \text{ m} \times 30 \text{ m}$,排水盲管内径 90 mm ,外包 100 g/m^2 土工布,排水管网与库底排水廊道周边排水孔连接。

4.2 下支持垫层

下支持垫层厚度 60 cm ,分 2 层铺设。下部 40 cm 按 $d_{\text{max}} < 4 \text{ cm}$ 采用砂、碎石掺配而成,粒径小于 5 mm 颗粒质量分数为 $35\% \sim 55\%$,小于 0.1 mm 的质量分数小于 8% ,干密度大于或等于 2.15 t/m^3 ,孔隙率小于 18% 。上部 20 cm 厚按 $d_{\text{max}} < 2 \text{ cm}$,干密度大于或等于 1.84 t/m^3 ,孔隙率小于 30% 。渗透系数为 $5 \times 10^{-4} \sim 5 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$ 。垫层料与过渡料之间按满足 $D_{15}/d_{85} \leq 5$, $D_{15}/d_{15} \geq 5$ 的反滤要求设计。

鉴于大面积铺筑施工过程中难免存在超径石、尖锐物体和杂物等,为了尽可能避免其对土工膜的刺破损伤,在垫层料顶部加设一层土工席垫保护。土工席垫采用 HDPE 丝条自行黏结成三维网状结构,厚 0.6 cm ,孔隙率小于或等于 80% ,抗压强度大于或等于 150 kPa 。

4.3 土工膜上保护层

在泰安抽水蓄能电站防渗工程可行性研究和招标阶段,土工膜的上保护层拟采用 30 cm 厚粗砂和 50 cm 厚的填渣保护层,其缺陷是检修困难。经对日本、美国部分土工膜防渗工程的调研,结合泰安抽水蓄能电站防渗最小水头 11.8 m 的特点,修改为仅在膜上覆盖一层土工布(500 g/m^2)作为施工期和运行期保护方案,以方便可能进行的检修,并简化施工。土工布上的压重采用 30 kg 沙袋,压覆间距为 $1.4 \text{ m} \times 1.4 \text{ m}$ 间距。实效证明该方案经济实用,效果好。

5 土工膜施工和质量控制

5.1 焊接施工

土工膜防渗施工共完成膜铺设 $160\,798 \text{ m}^2$,焊缝 $33\,740 \text{ m}$,T 形焊缝 896 处,缺陷修补 246 处,虚焊与漏焊修补 65 处。泰安抽水蓄能电站防渗工程土工膜防渗层的快速和高质量的施工,在很大程度上得益于选择了一套技术先进、性能优良的土工膜施工、监测专业设备。泰安抽水蓄能电站防渗工程土工膜所有接缝均采用热焊接法连接,共采用了热楔、热合熔、挤压焊条、热风焊接等 4 种焊接方法。直焊缝采用 LEISTER Comet 电热楔式自动焊机焊接,均为双焊缝搭接,搭接宽度 10 cm ,焊缝宽度 1.4 cm 。T 形焊缝采用手持挤出式焊机和半自动爬行热合熔焊机焊接。热合熔焊接采用 TRIAC-DRIVE 型手持式半自动爬行热合熔焊接机施工,挤压焊条焊接采用

SKR-A 型手持挤出式焊机施工,通过焊机焊嘴将螺杆挤出的熔融 HDPE 焊料沿焊接方向均匀用力压在被焊母材表面上,通过焊料高温热熔黏结 HDPE 膜。热风焊接采用热风枪施工。焊接前,对焊缝部位应用洁净的干毛巾进行擦拭,以确保焊缝结合面洁净、干燥,上下层土工膜熔接紧密。低温时段或温度变幅较大的天气焊接时应及时采用厚棉被对焊缝进行覆盖保温,避免焊缝温度梯度过大发生脆断。T 形焊缝采用热合熔焊接和挤压焊条焊接的方法组合施工,并对 T 形焊缝端部焊接气道采用电吹风热熔封闭。库盆中央部位土工膜铺设时,其外围预留施工道路,待中央部位完成后再对预留部分与周边锚固同步进行施工。预留部位施工时,为避免土工膜因温度变化对焊接产生影响,先摊铺周边土工膜,并与中央部位已完成的土工膜进行预拼接,然后对周边膜不规则边进行裁剪、锚固,最后焊接周边土工膜与中央部位土工膜预留缝。泰安抽水蓄能电站上水库土工膜施工主要技术参数如下:风速 $0.1 \sim 3.0 \text{ m/s}$;气温 $5 \sim 26 \text{ }^\circ\text{C}$;膜温 $20 \sim 49 \text{ }^\circ\text{C}$;焊接速度 $1.4 \sim 3.0 \text{ m/min}$;焊接压力 $700 \sim 900 \text{ N}$;焊接温度 $360 \sim 400 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

5.2 质量检测

检测对质量控制起着重要作用。施工中应对原材料和焊缝及缺陷修补点进行 100% 的检测。泰安抽水蓄能电站防渗工程土工膜施工检测主要采用目测、充气检测、真空检测、拉伸测试等 4 种方法。
①目测:采用“看、摸、撕”三道工序进行。看:检查土工膜上是否具有孔眼、烫伤、深度划痕、褶皱,检查焊缝是否清晰、连续均匀无褶皱。摸:检查有无漏焊、虚焊。撕:待焊缝温度降低后,对每条焊缝进行 100% 剥离,检查焊接是否充分。
②充气检测:对每一直焊缝和长条状修补焊缝,采用充气检测仪进行充气检测,检测焊缝气道是否漏气。
③真空检测:对 T 形接头,充气检测针孔、熔点、疤痕、孔洞、凹坑修补点等部位采用真空检测。检测时,将肥皂液沾湿需测试的部位,将真空罩密贴在潮湿区,启动真空泵,调节真空压力大于或等于 0.05 MPa ,保持 30 s 后,当焊缝边缘的肥皂液不起泡即为合格。
④拉伸测试:焊缝强度检测利用手提式拉伸仪进行,检测结果以土工膜线材断裂,而土工膜的接缝不破坏、也不可剥离为合格。焊缝强度检测统计结果见表 1。

表 1 土工膜焊缝拉伸检测结果统计

项目	剪切 峰值/ N	剪切 峰值 拉伸 率/%	剪切 断点 拉力/ N	剪切 断点 拉伸 率/%	剥离 峰值/ N	剥离 峰值 拉伸 率/%	剥离 断点 拉力/ N	剥离 断点 拉伸 率/%
平均值	1482	12	414	115	1020	45	501	49
最大值	1699	89	1290	296	1167	58	818	76
最小值	1307	8	-17	43	841	27	-6	30

5.3 缺陷处理

土工膜缺陷主要有:生产、运输过程中产生的熔点、孔眼、疤痕、凹坑、划痕、孔洞;施工过程中产生的划痕、检测针孔、尖锐物顶破孔洞(或孔眼)、虚焊、漏焊;温度变化时产生的褶皱等。泰安抽水蓄能电站防渗工程对各种缺陷处理方法为:①孔洞修补。将破损部位的土工膜用角磨机适度打毛,外贴直径(或边长)大于孔洞至少 100 mm 的土工膜,用半自动爬行热熔焊接机将上下层土工膜热熔黏结,并用塑料焊枪对黏结面周边用焊料黏结固定。②虚焊、漏焊修补。当虚焊、漏焊长度不大于 50 mm 时,外贴膜采用挤压焊条焊接方法修补。当虚焊漏焊长度超过 50 mm 时,采用热熔合焊接和挤压焊条焊接修补。③表面缺陷修补。疤痕:造成土工膜自身烫伤的疤痕,割除疤痕按孔洞进行修补。熔点:外贴 HDPE 膜按孔洞进行修补。凹坑:表面凹坑深度不大于膜厚 1/3 时,将凹坑部位打毛后用挤出式塑料焊枪挤压焊料修补;表面凹坑深度大于膜厚 1/3 时,按孔洞修补。划痕:划痕深度超过膜厚 1/5 时,外贴 HDPE 膜按孔洞修补。孔眼:采用热风焊接法进行修补。烫伤:修补方法同虚焊、漏焊。④表面褶皱处理。土工膜受气温影响较大,施工中热胀冷缩现象明显,缩短后处于张紧状态,伸长后处于张弛状态。已铺设的土工膜受到基层摩擦力及上压土工沙袋约束,伸长后不能完全恢复到原来的状态,就产生隆起“褶皱”现象。温差越大,隆起的高度越大。土工膜周边没有完全锚固之前,由于已铺设完成的土工膜不断受到气温变化影响,隆起的高度也越来越大,最终形成表面褶皱。对表面褶皱的处理,可在土工膜周边锚固结束后,人工调整上部土工沙袋摆放位置,将较大的褶皱分解成诸多小褶皱,避免土工膜褶皱部位在蓄水后应力集中破坏。泰安抽水蓄能电站防渗工程施工完成和蓄水后面貌见图 4、图 5。



图 4 土工膜防渗施工完成后的上水库



图 5 运行中的上水库

泰安抽水蓄能电站防渗工程土工膜施工原计划 6 个月完成,由于设计方案修改、材料供应、工艺试验等多方面原因,实际留给土工膜施工的工期很短。最后土工膜在 60 个有效工作日全部焊接完成,确保了上水库蓄水目标。土工膜平均铺设强度 $2499.7 \text{ m}^2/\text{d}$,最高铺设强度 $8000 \text{ m}^2/\text{d}$,平均焊接强度 $527.18 \text{ m}/\text{d}$,最高焊接强度 $1600 \text{ m}/\text{d}$ 。

6 应用效果

泰安抽水蓄能电站上水库设计采用 HDPE 土工膜水平防渗,水库自 2005 年 5 月 31 日开始蓄水,一次性蓄水成功,未进行任何修补或处理,水库已安全运行 4 年,库水外渗水量很小,库底最大总渗漏量仅为 3.89 L/s 。上水库总渗漏量仅为总库容的万分之三,防渗效果优秀。泰安抽水蓄能电站防渗工程土工膜水平防渗层单位造价约为 $121.5 \text{ 元}/\text{m}^2$,而同比采用 30 cm 厚钢筋混凝土面板水平防渗层单位造价约为 $327 \text{ 元}/\text{m}^2$ 、采用沥青混凝土防渗层单位造价约为 $785 \text{ 元}/\text{m}^2$,直接节省投资 3200 万元,缩短工期 4~6 个月,其经济和社会效益显著,为我国大型水电类似工程设计、施工及运用提供了经验。

泰安抽水蓄能电站土工膜防渗技术研究于 2005 年 6 月通过国家电网公司验收^[7],2005 年获中国水电顾问集团公司科学技术进步一等奖,2006 年获中国电力科学技术二等奖,2009 年获浙江省建设工程钱江杯奖(优秀设计)一等奖,2009 年 10 月获中国建设工程鲁班奖。

参考文献:

- [1] 土工合成材料工程应用手册编写委员会. 土工合成材料工程应用手册[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1994:131-134.
- [2] ROBERT M. Koerner, designning with geosynthetics[M]. 4th. Prentice Hall, New Jersey, 1998.
- [3] 鄢俊,张春生,周建平,等. 泰安抽水蓄能电站上库工程土工膜及土工织物性能测试和选材试验报告[R]. 南京:南京水利科学研究院,杭州:华东勘测设计研究院,2004.
- [4] 顾淦臣,沈长松,吴江斌. 应用复合土工膜加固石砬峪沥青混凝土斜墙坝[J]. 水利水电科技进展,2004,24(1):10-14.
- [5] 束一鸣,顾淦臣,向大润,等. 长江三峡二期围堰土工膜防渗结构前期研究[J]. 河海大学学报:自然科学版,1997,25(5):71-77.
- [6] 张春生,何世海. 水库土工膜防渗周边连接结构:中国,ZI2005 2 0013492.4[P].
- [7] 周建平,张春生,何世海,等. 抽水蓄能电站土工膜防渗与坝身溢洪道技术研究项目研究报告[R]. 北京:水电水利规划设计总院,2004.

(收稿日期 2009-07-28 编辑 胡新宇)