

海水抽水蓄能电站库盆防渗方案研究

李定林¹, 陈满¹, 段继周^{2,3,4}, 李言涛^{2,3,4}, 赵霞^{2,3,4}, 徐玮辰^{2,3,4}, 黄彦良^{2,3,4}

(1. 南方电网调峰调频发电有限公司, 广州 510635; 2. 中国科学院海洋研究所 海洋环境腐蚀与生物污损重点实验室, 山东 青岛 266071; 3. 中国科学院海洋大科学研究中心, 山东 青岛 266071; 4. 青岛海洋科学与技术国家实验室, 海洋腐蚀与防护开放工作室, 山东 青岛 266237)

摘要: 从目前已掌握的淡水防渗技术的角度出发, 综合对比了各种防渗材料及联合防渗方案的优缺点, 首次探讨了针对海水抽水蓄能电站库盆的防渗方案。建议在库底采用土工膜与黏土联合防渗方案, 而在库岸采用钢筋混凝土面板与防护涂层相结合的方式。关于海水抽水蓄能电站库盆防渗选材方案的讨论, 可为相关研究工作提供参考依据, 并为工程设计提供建议。

关键词: 海水抽水蓄能电站; 防渗; 土工膜; 混凝土

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2018.10.016

中图分类号: TU592; TV223 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2018)10-0098-05

Anti-seepage Scheme for Seawater Pumped-storage Power Plant Reservoir

LI Ding-lin¹, CHEN Man¹, DUAN Ji-zhou^{2,3,4}, LI Yan-tao^{2,3,4}, ZHAO Xia^{2,3,4}, XU Wei-chen^{2,3,4}, HUANG Yan-liang^{2,3,4}

(1. CSG Power Generation Co., Ltd, Guangzhou 510635, China;

2. CAS Key Laboratory of Marine Environmental Corrosion and Bio-fouling, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China;

3. Center for Ocean Mega-Science, Chinese Academy of Sciences, Qingdao, 266071, China;

4. Open Studio for Marine Corrosion and Protection, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266237, China)

ABSTRACT: From the point of current technology for fresh water, this study comprehensively compared the advantages and disadvantages of all single schemes and joint schemes, and discussed on schemes for the reservoir of seawater pumped-storage power plant for the first time. We suggest that geomembrane lining and clay joint scheme should be used for reservoir bottom, and coating protected concrete plate and protective coating should be used for reservoir bank. The discussion on material selection schemes for seawater pumped-storage power plant reservoir can provide reference for relative research and engineering design.

KEY WORDS: seawater pumped-storage power plant; anti-seepage; geomembrane; concrete

抽水蓄能电站启动速度快, 运行灵活, 具有调峰填谷功能, 可为电网的稳定提供保障, 对电力系统乃

至能源结构调整具有重要意义^[1]。火电、核电等行业的快速发展促进了对抽水蓄能电站的需求, 过去的十

收稿日期: 2018-07-13; 修订日期: 2018-08-13

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFB0903700, 2017YFB0903702)

作者简介: 李定林(1970—), 男, 贵州贵阳人, 博士, 主要研究方向为电力自动化。

通讯作者: 黄彦良(1966—), 男, 辽宁沈阳人, 博士, 研究员, 主要研究方向为海洋腐蚀防护研究。

几年间是我国抽水蓄能电站快速发展的时期,在役、在建和规划中的抽水蓄能电站已达 40 余座。截止 2015 年底,我国抽水蓄能系统的总装机容量已达 22.74 GW,在建容量达到 23.08 GW,预计 2020 年在役抽水蓄能电站的总装机容量将突破 50 GW^[2]。目前在役抽水蓄能电站均为内陆的以淡水为运行工质的常规抽水蓄能电站,受限于江河湖泊等自然环境、气候条件、地形地貌等限制,并对生态环境造成潜在威胁和负面影响。此外,近年来温室效应影响加剧,淡水资源日益紧张,而电力调峰需求却在不断增大。海水抽水蓄能电站与传统淡水电站相比,无需专门的下水库,节约建造成本;可就近建在风电厂、火电厂等附近,节省传输成本;使用海水势能存储电能,完全不占用淡水资源。种种原因使得海水抽水蓄能电站具有更广泛应用前景^[1,3,4]。研究开发海水抽水蓄能发电技术是值得世界各国电力行业高度重视,具有重大现实意义的研究课题。

目前海水抽水蓄能电站还存在很多亟待解决的问题,其中上水库的海水渗漏是最为关键的问题之一。首先,水量渗漏意味着能量的损失;其次,渗漏将严重影响周围建筑基础和岸坡安全;再次,海水渗漏会对电站周围的生态环境造成严重破坏^[5-7]。因此,海水抽水蓄能电站对库盆的防渗性能要求很高,同时,相较于淡水而言,海水具有更强的腐蚀性,对于防渗工程和材料的负面影响可能比淡水更加严重。

文中针对抽水蓄能电站工程应用的单一防渗和联合防渗方案进行了综合论述,首次对海水抽水蓄能电站的防渗方案进行探索。目前海水抽水蓄能电站在工程上的实例极少,有文献可查的已建工程仅有日本冲绳山原海抽水蓄能电站^[8-9],目前已停运。希腊也正在开展海水抽水蓄能电站相关研究,但在防渗方面基本套用日本的方案^[6,10]。文中将结合近几十年以来国内外在淡水抽水蓄能电站工程防渗方面的经验,探讨针对海水库盆的合理防渗方案。

1 防渗方案优缺点分析

防渗工程材料及方案主要有垂直灌浆帷幕防渗、黏土铺盖、钢筋混凝土面板、沥青混凝土面板和土工膜衬砌等几种^[11]。

1.1 垂直灌浆帷幕

垂直灌浆帷幕是最为成熟的技术之一,对水文地质条件和工程地质条件要求较高,且复杂条件下的大规模灌浆对精度要求极高,不确定性比较大,难以精确控制,施工难度大,防渗效果和长效性难以保证^[11]。一般在结构较为简单的水池或垃圾填埋场等工程上应用较多,由于抽水蓄能电站的地质条件非常依赖于自然环境,垂直帷幕灌浆防渗技术很少应用,不适用

于海水抽水蓄能电站的库盆防渗。

1.2 黏土

对于施工现场土料比较丰富的条件,黏土铺盖防渗是非常好的方式。黏土具有一定的自愈合能力,在轻微破损情况下能够自修复^[12],但黏土的防渗等级普遍不高,较难以满足海水抽水蓄能电站的防渗要求。由于其较低的成本和自愈合能力,可考虑作为辅助材料与其他防渗材料共用。此外,还有报道对比了风化料与黏土的防渗性能,如果控制好粗颗粒的含量,也能达到较好的防渗效果^[13],但以海水抽水蓄能电站库盆的防渗要求,也仅能作为辅助材料使用。

1.3 钢筋混凝土面板

钢筋混凝土面板具有一定的防渗性能,施工简单,工艺和质量控制技术成熟,成本不高,但由于其刚性结构,变形模量大,对不均匀变形的适应性比较差,抗拉强度仅为 1.3 MPa 左右^[14],一般应用于库盆库岸防渗结构^[15-16]。但也有将钢筋混凝土面板应用于全库盆防渗的案例,十三陵抽水蓄能电站上水库为我国第一个应用实例:考虑到干缩、温度应力和不均匀变形等,合理分缝至关重要;还要对局部软性地基进行开挖置换,用过渡料回填压实;此外,面板的微小裂缝采用改性环氧浆液或聚氨酯处理^[17]。十三陵抽水蓄能电站前十年服役期间满足相关防渗标准,后期暂无可查证数据。

针对钢筋混凝土防渗面板的不足,可应用一些特殊的防护方法。柔性聚合物砂浆技术是近十几年发展起来的用于保护混凝土防渗面板的技术,可与混凝土材料粘结,提高抗背水压性能和弹性模量,大幅增强适应变形的能力。聚合物颗粒相互连接,可在混凝土基材的毛细孔内形成枝蔓状封闭体系,堵塞混凝土结构的渗水通道和表面的微裂缝,从一定程度上增强钢筋混凝土材料的耐久性和防渗性能^[18-19]。针对混凝土的一种高渗透环氧涂料与之类似,也有一定程度的应用^[20]。另一方面,国家海洋腐蚀防护工程技术研究中心研制了一种钢筋混凝土柔韧涂料,包括封闭底漆、密封腻子、延展中涂和耐候面漆四层,具有较强的混凝土裂缝追随性能,能够承受混凝土的微小裂缝,已在港口码头和电厂等工程中有较多实际应用,对混凝土防渗性能的提升也有一定效果^[21]。此外,混凝土接缝的薄弱部位还有应用纳米改性的有机止水材料进行防渗或修复处理的实例(宁波溪口抽水蓄能电站)^[22]。因此,钢筋混凝土可以作为库岸的防渗基材,但往往需要配合面板的防护技术才能更好地满足海水抽水蓄能电站的防渗需求。

1.4 沥青混凝土面板

沥青混凝土面板也是较常用的防渗材料,在抽水

蓄能电站中有广泛应用,其适应变形能力强(常温下抗拉强度在5 MPa左右),出现裂缝后有一定的自愈合能力,易修补^[23],相较于钢筋混凝土更适用于库底防渗^[15]。然而,沥青混凝土对材料要求较高,与刚性建筑物的连接部位易形成结构应力和变形突变,接头部位为防渗性能薄弱处,处理工序复杂(例如需要两套混凝土拌和系统),施工及生产工序较多。此外,沥青需求量较高,而运输成本也不得不作统筹考虑。沥青混凝土在库盆底部和库周防渗中均有应用^[11,15]^[16],由于其本身具有较强的防水性能,很少使用类似于钢筋混凝土面板的防护技术。

1.5 土工膜

土工膜衬砌是应用最为广泛的防渗方式,不仅用于水库的防渗,也大量应用于海水/淡水养殖行业。虽然相较于淡水而言,污水或海水对土工膜材料的侵蚀性有所增加,但近几十年大量研究已经表明,橡胶材料对海水侵蚀的耐受性仍然是比较强的^[24-26]。从20世纪60年代开始,土工膜就在欧洲大量使用,直至20世纪80年代,几乎所有土工膜防渗系统的应用仍然都在欧洲,全球大多数的土工膜工程仍在采用欧洲延续下来的设计和技术^[27],针对淡水的土工膜技术目前已非常成熟。聚乙烯和聚氯乙烯都是土工膜合成防渗材料较常用的原料,而从20世纪90年代开始,土工膜与土工织物热复合后组成的新型复合防渗材料也开始有越来越广泛的应用。其相较于光膜的防渗性能更强,但表面褶皱现象较严重,表面缺陷更多,焊接难度增大,因此单一土工膜和复合土工膜的应用也各有优势^[28]。土工膜相较于混凝土面板而言,耐应力性能是最为突出的优势,抗拉强度至少都在12 MPa以上,比钢筋混凝土高出一个数量级。三峡工程二期上游围堰的土工膜应变计原位测得高达20%的应变值^[29]。

土工膜最关键的问题之一就是接缝的处理,直接影响防渗性能和服役寿命^[28]。目前接缝技术有搭接、焊接和粘接等几种,焊接的防渗效果最好,目前的技术能够使焊接部位达到与主体材料同等水平的强度。但如果地质条件对变形量的要求较高,粘接工艺的接缝处柔软度则高于焊接,适应变形能力更强。具体施工工艺还需要根据具体的设计要求进行选择。日本冲绳海水抽水蓄能电站的防渗采用EPDM三元乙丙橡胶材质的土工膜进行全库盆防渗,服役期间未有严重渗漏现象的报道^[1,9]。

2 海水抽水蓄能电站联合防渗方案对比

联合防渗主要是针对不同的地质条件对库岸和库底进行不同形式的防渗。由于库底不可能做到绝对

平坦,因此耐形变能力较差的钢筋混凝土面板极少应用于库底(仅有十三陵抽水蓄能电站上水库等实例,且针对实际情况进行了特殊处理^[17]),海水库盆的联合防渗方案基本可确定为库岸面板与库底铺盖相结合的方式^[16]。

2.1 土工膜+黏土

土工膜虽然已有很广泛的应用,但目前基本全部在淡水环境中,海水养殖等行业防渗要求较低,日本冲绳的海水抽水蓄能电站的运行时间也仅有十几年^[8],因此目前人们对土工膜海水防渗性能的认识仅仅停留在初步阶段,在具体的耐侵蚀时间长度等方面不明确。上文已提到黏土可以作为辅助材料,其与土工膜的配合使用是较为典型的工程应用方式。黏土层为土工膜提供了较厚的保护层,减少了土工膜材料的老化起鼓,此外黏土的自愈合能力也极大地减少了土工膜检修的需求,可以认为黏土保护层为土工膜的耐久性提供了一层保障。但两者结合也有一些需要注意的工程问题,例如黏土颗粒的粒径,要避免高压水作用下颗粒物将土工膜顶破等。在实际工程中,土工膜的厚度在1~2 mm,而黏土的铺盖厚度可达4~5 m^[12]。土工膜在防渗性能优异的同时,具有较强的抗拉强度和抗形变性能,对施工气候条件没有特别要求,可快速进行大面积铺设。黏土的覆盖很大程度上解决了土工膜的老化问题,且抗形变能力甚至比土工膜更强,因此土工膜与黏土的配合对地质和地势条件的宽容度最高,很适用于库底防渗。泰安抽水蓄能电站^[28]及溧阳抽水蓄能电站^[12]库底等均采用了土工膜与黏土结合的方式。

2.2 沥青混凝土+钢筋混凝土

除土工膜以外,沥青混凝土与钢筋混凝土联合防渗也有应用。在一些黏土资源缺乏的地域,利用沥青混凝土进行库底防渗,再利用钢筋混凝土进行库岸防渗也是一个可行方案,例如西龙池抽水蓄能电站^[15]。水库建于深厚的覆盖层上,使得库底能够尽量平坦,柔性的沥青混凝土能够适应一定量的变形。如上文所说,由于形变量和受力条件不同,沥青混凝土面板与刚性结构的连接位置是最薄弱部位,带来较大的不确定性,要重点防范,如增加柔性连接材料等。

防渗钢筋混凝土面板对淡水具有一定的防渗性能和耐久性能,但对于海水环境,其腐蚀性是不得不考虑的问题。柔性聚合物砂浆^[18,19]或者多层的柔韧防腐防水涂料^[21](详见1.3节)有必要配合钢筋混凝土面板使用,以提高其耐蚀防水性能。素混凝土面板很难在海水环境中长期使用。

2.3 沥青/钢筋混凝土+土工膜

混凝土与土工膜的联合防渗方案也比较常见,此

方案使用土工膜作为库底防渗材料,而混凝土(钢筋混凝土或沥青混凝土)则一般作为库岸防渗材料。虽然沥青混凝土的抗拉强度和耐形变性能均可接受,但相较于土工膜仍然远远不足。有研究以泰安抽水蓄能电站的情况为例,用主成分分析(PCA)法和模糊综合评价模型分析发现,在防渗效果、技术性能指标、经济性能指标、土地综合利用效果和环保指标上,土工膜均优于钢筋或沥青混凝土面板,其中在经济指标和环保指标方面土工膜的优势十分明显。与沥青混凝土相比而言,钢筋混凝土各项指标均非常接近。该研究构建了防渗材料综合评价指标体系,结果表明模型效果良好,研究方法可行^[30-31]。

因此,对于海水抽水蓄能电站库盆防渗而言,土工膜或者复合土工膜是库底防渗的首选材料,但库岸的坡度使得土工膜较难与黏土紧密结合,且日本冲绳电站库岸橡胶衬砌在大风天气甚至会由于负压而脱离库岸表面,因此混凝土面板可作为库岸的主材料。钢筋混凝土与沥青混凝土相比,沥青混凝土受限于原材料成本以及繁杂的施工工序,在成本和施工难易程度上明显弱于钢筋混凝土。从多方面考虑,钢筋混凝土与土工膜联合防渗方案的适应性比较强,基本能够适用于大多数地质条件^[11],必须注意的是要在表面进行砂浆喷涂或涂覆涂层,以减少裂纹风险并增强耐蚀耐形变性能。此外,还有文献报道了一种混凝土面板与土工膜联合进行库岸防渗的设计方案,即复合土工膜铺设于库岸垫层上,在其上预制混凝土面板并用沥青粘合^[32]。两种防渗材料复合使用必将大幅增加工程造价,必要性和工程上的可行性还需要谨慎考虑。

目前笔者正在开展耐海水土工膜材料和针对钢筋混凝土的保护涂层研究,期望为我国海水抽水蓄能电站前瞻性研究工作提供有针对性的防渗材料。

3 结论

文中从淡水库盆防渗材料的角度出发,对比了各种防渗材料以及联合防渗措施的优缺点,在此基础上探讨了海水抽水蓄能电站上水库库盆的防渗选材方案。根据各种防渗材料及联合防渗方案的系统分析,建议选用土工膜与黏土联合对库底进行防渗,选用有涂层保护的钢筋混凝土面板进行库岸防渗。可为我国相关前瞻性研究工作提供参考,并在未来可能开展的工程设计上提供建议。

参考文献:

- [1] 柴建峰,肖微. 海水抽水蓄能电站及我国工程建设条件浅析[J]. 水电与抽水蓄能, 2016, 2(2): 46-49.
- [2] MING Z, ZHANG K, LIU D. Overall Review of Pumped-hydro Energy Storage in China: Status Quo, Operation Mechanism and Policy Barriers[J]. Renewable &

- Sustainable Energy Reviews 2013, 17(1): 35-43.
- [3] 张文泉,何永秀. 海水抽水蓄能发电技术[J]. 中国电力, 1998(11): 16-18.
- [4] MCLEAN E, KEARNEY D. An Evaluation of Seawater Pumped Hydro Storage for Regulating the Export of Renewable Energy to the National Grid[J]. Energy Procedia 2014, 46(46): 152-160.
- [5] 王樱峻. 抽水蓄能电站库盆防渗方案综述[C]// 抽水蓄能电站工程建设文集. 北京: 中国水利水电出版社, 2010.
- [6] KATSAPRAKAKIS D A, CHRISTAKIS D G, STEFANAKIS I, et al. Technical Details Regarding the Design, the Construction and the Operation Ofseawater Pumped Storage Systems[J]. Energy, 2013, 55(1): 619-630.
- [7] KATSAPRAKAKIS D A, CHRISTAKIS D G, PAVLOPOYLOS K, et al. Introduction of a Wind Powered Pumped Storage System in the Isolated Insular Power System of Karpathos-Kasos[J]. Applied Energy, 2012, 97(9): 38-48.
- [8] FUJIHARA T, IMANO H, OSHIMA K. Development of Pump Turbine for Seawater Pumped-Storage Power Plant[J]. American Society of Civil Engineers, 1998, 47(5): 199-202.
- [9] HIRATSUKA A, ARAI T, YOSHIMURA T. Seawater Pumped-storage Power Plant in Okinawa Island, Japan[J]. Engineering Geology, 1993, 35(3): 237-246.
- [10] KATSAPRAKAKIS D A, CHRISTAKIS D G. Seawater Pumped Storage Systems and Offshore Wind Parks in Islands with Low Onshore Wind Potential. A Fundamental Case Study[J]. Energy, 2014, 66(4): 470-486.
- [11] 李作舟. 陕西镇安抽水蓄能电站上水库库盆防渗型式比选研究[J]. 西北水电, 2014(6): 54-57.
- [12] 宁永升,冯树荣,胡育林,等. 土工膜黏土组合防渗在溧阳抽水蓄能电站中的应用[J]. 水利水电科技进展, 2009, 29(6): 83-85.
- [13] 董存波. 风化石作为土石坝防渗材料的初步试验研究[J]. 贵州水力发电, 1996(4): 30-34.
- [14] 石含鑫,常姗姗. 溧阳抽水蓄能电站上水库防渗形式选择[J]. 水力发电, 2010, 36(7): 50-52.
- [15] 陈桂芳. 西龙池下水库防渗面板接头结构设计特点[J]. 水利技术监督, 2008, 16(4): 71-73.
- [16] 张利荣,严匡柠,张孟军. 大型抽水蓄能电站渗控工程施工关键技术[C]// 抽水蓄能电站工程建设文集. 北京: 中国水利水电出版社, 2015.
- [17] 吴吉才. 十三陵抽水蓄能电站上水库全库盆混凝土面板衬砌防渗设计及运行情况[C]// 高寒地区混凝土面板堆石坝的技术进展论文集. 北京: 中国水利水电出版社, 2013.
- [18] 郑礼夏,徐秀珍. 柔性聚合物砂浆防渗技术在铜官山抽水蓄能电站中的应用[J]. 浙江水利水电专科学校学报, 2009, 21(2): 85-88.
- [19] 杨建州,谭建平,马方平. 江苏宜兴抽水蓄能电站上水库闸门井(兼调压井)防渗处理[J]. 水力发电, 2009,

- 35(2): 57-59.
- [20] 吴娟娥. 抽水蓄能水电站混凝土抗侵蚀环氧喷涂施工[J]. 云南水力发电, 2016, 32(4): 116-118.
- [21] DB37/T 2320—2013, 海洋大气区钢筋混凝土构筑物涂装防腐技术规程[S].
- [22] 张勇. “SR”防渗材料面板堆石坝中的应用[J]. 科协论坛, 2013(6): 28-30.
- [23] 贾金生, 董哲仁. 德国水工沥青混凝土技术进展[J]. 水力发电, 1997(10): 59-62.
- [24] 李杰, 恽才兴. 土工合成材料与海岸防护[J]. 上海水务, 1999(4): 18-23.
- [25] 李德和. 耐海洋老化的氯苯橡胶的研究简报[J]. 青岛科技大学学报:自然科学版, 1983(1): 107-109.
- [26] 罗健林, 李璐, 李秋义, 等. 废旧橡胶粉改性木塑复合材料耐海水侵蚀性能研究[J]. 青岛理工大学学报, 2015, 36(5): 1-5.
- [27] 斯库埃罗 A M, 左志安. 欧洲土工膜防渗系统近况[J]. 水利水电快报, 2012, 33(2): 19-23.
- [28] 裴云, 张鲁晋. 土工合成防渗材料在岩溶水库上的应用[J]. 山西水利科技, 1999(s1): 63-64.
- [29] 龚履华, 李青云, 包承纲. 土工膜应变计的研制及其应用(Ⅱ): 应用[J]. 岩土力学, 2005, 26(12): 2035-2040.
- [30] 孙薇, 杜秋实. PCA 模糊综合评价在抽水蓄能电站选择防渗材料中的应用[J]. 水电与抽水蓄能, 2010, 34(2): 54-57.
- [31] 孙薇, 杜秋实. 基于粗糙集与支持向量机的抽水蓄能电站防渗材料选取评价[J]. 华东电力, 2009, 37(11): 1932-1935.
- [32] 宁宇, 喻建清, 崔留杰. 软岩堆石高坝土工膜防渗技术[J]. 水力发电, 2016, 42(5): 62-67.