

# 废弃矿井抽水蓄能电站水泵水轮机关键技术

张保生<sup>1</sup>, 陈宁<sup>1</sup>, 高博<sup>2</sup>, 陈凡<sup>2</sup>

1. 中国矿业大学电气与动力工程学院, 徐州 221116

2. 国网安徽省电力有限公司电力科学研究院, 合肥 230601

**摘要** 废弃矿井抽水蓄能电站“大落差、小空间、水质差”的特点决定了废弃矿井抽水蓄能电站水泵水轮机需要满足“超高水头、小体积、高耐蚀”的要求。目前适用于废弃矿井抽水蓄能电站的水泵水轮机的研究还不够全面,以矿井水为工作介质的水泵水轮机腐蚀-磨损-空蚀耦合机理还不够系统,针对新能源消纳的水泵水轮机频繁切换工况过渡过程还不够明确,需要进一步开发水泵水轮机水力实物模型设计优化技术,研发水泵水轮机频繁切换工况过渡过程安全稳定运行技术,研究矿井水条件下水泵水轮机腐蚀-泥沙磨损-空蚀耦合机理及协同控制技术。

**关键词** 废弃矿井; 地下抽水蓄能电站; 水泵水轮机

当前中国新能源、核电和智能电网迅猛发展,特别是碳达峰、碳中和目标的提出,要构建以新能源为主体的新型电力系统,必将带来巨大的储能需求。与其他储能方式相比,抽水蓄能是当今世界上技术最成熟、最经济的大规模电能储存方式,但是由于选址的限制,抽水蓄能电站在中国能源结构中比重很低,特别是当地区电力负荷急剧变动时,更显示出调峰能力的不足。

随着中国能源结构调整,大量矿井已经或即将

关停。以煤矿为例,中国工程院院士袁亮在中国工程院重大咨询研究项目“我国煤矿安全及废弃矿井资源开发利用战略研究”中指出:2020年中国废弃矿井数量达到1.2万处;2030年将达到1.5万处,地下空间约为90亿 $m^3$ ;约1/3的废弃矿井水量较为丰富,可利用水头落差很大;更重要的是在空间分布上与中国的北部风电光伏资源带和沿海风电核电资源带高度重合。因此,利用废弃矿井建设抽水蓄能电站,不仅可以突破常规抽水蓄能电站在落差、

收稿日期:2020-12-09;修回日期:2021-06-10

基金项目:国家电网有限公司总部科技项目(5419-201999356A-0-0-00)

作者简介:张保生,副教授,研究方向为能源清洁高效利用,电子信箱:147182970@qq.com

引用格式:张保生,陈宁,高博,等. 废弃矿井抽水蓄能电站水泵水轮机关键技术[J]. 科技导报, 2021, 39(13): 66-72; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2021.13.008

水源、环境等方面的选址限制,而且对于新能源侧储能意义重大,有利于突破中国新能源、核电和智能电网发展中的“卡脖子”储能环节,打造“新能源/核能-大规模储能-智能电网”产业链和产业集群,同时一揽子解决中国废弃矿井面临的资源利用、产业接续、生态修复、人员安置等一系列社会、经济、生态问题。

利用废弃地下空间建设抽水蓄能电站源于20世纪90年代,当时奥地利以人工隧道群为下水库建造了世界首座半地下抽水蓄能电站。1993年,美国利用露天铁矿坑修建了新泽西州霍普山半地下抽蓄电站。2018年,澳大利亚开始利用露天金矿坑建造抽蓄电站,德国鲁尔集团与杜伊斯堡-埃森大学合作开始将Prosper-Haniel煤矿改造世界上第1个废弃煤矿抽水蓄能电站。中国已开展了河北滦平镍矿、阜新海州露天矿坑建设抽水蓄能的工程设计。

总体来说,利用露天废弃矿坑建设抽水蓄能电站与常规抽水蓄能电站极其类似,技术难度较低,世界范围内都已经进入工程实施或工程规划阶段。而利用废弃矿井建设抽水蓄能电站,是以地下空间特别是矿井巷道硐室作为储水库,因此在地下水库的构建与运维、核心设备的设计与安装等方面还有一系列技术难题需要攻克,以德国为代表世界范围内刚刚进入工程设计阶段。

与常规抽水蓄能电站一样,水泵水轮机是废弃矿井抽水蓄能电站的核心关键装备。但是,废弃矿井抽水蓄能电站的一些特点,也决定了废弃矿井抽水蓄能电站水泵水轮机与常规抽水蓄能电站不同。

## 1 废弃矿井抽水蓄能电站的特点

目前中国矿山已经进入深部开采阶段。在煤矿方面,中国工程院院士袁亮指出:中国已探明的5.9万亿t煤炭资源中,埋深在1000 m以下的占53%;目前中国大部分煤矿逐步进入深部开采阶段,且以平均每年10~25 m的速度向下延伸;煤矿主体开采深度已达800~1000 m,开采深度超过1000 m的矿井达到47座,其中采深最大的矿井达

到1501 m。在金属矿方面,中国工程院院士古德生等<sup>[1]</sup>指出:目前国内大批金属矿山已经转入超过800~1000 m的深部开采,其中有色系统有1/2的矿山已过渡到深部开采,例如吉林夹皮沟金矿已达到1600 m,会泽铅锌矿达到1360 m,红透山铜矿达到1300 m。

废弃矿井抽水蓄能电站的上水库通常建在地面采矿塌陷区,也有的建在井下的浅水平巷道。但是,下水库肯定是建在井下,利用矿井巷道、硐室、采空区等井下空间构建而成,通常以巷道群的形式出现。因此,上下水库之间的落差很大,需要考虑超过800 m甚至1000 m的情况。

此外还具有井下空间充足但普遍狭窄、矿井水品质差等特点。矿井不仅井口狭窄和井下巷道狭窄,而且井下空间开拓难度大,这就给抽水蓄能设备特别是水泵水轮机的下井、运输和安装带来了挑战。矿井水的成分通常以具有强腐蚀性的碳酸根、硫酸根、钙离子、镁离子为主,而且泥沙、石屑、喷涂材料等固体颗粒含量高且粒径分布广泛,这就给废弃矿井抽水蓄能电站利用矿井水带来了挑战。

## 2 废弃矿井抽水蓄能电站水泵水轮机的特点

为了适应废弃矿井抽水蓄能电站的特点,与常规抽水蓄能电站的水泵水轮机相比,废弃矿井抽水蓄能电站的水泵水轮机需要具备“超高水头、小体积、高耐蚀”3个方面的特点。

### 2.1 超高水头

废弃矿井抽水蓄能电站水泵水轮机需要采用超高水头,原因在于:一是废弃矿井抽水蓄能电站的上水库与下水库的落差本来就很大,通常在800~1000 m,应该充分利用;二是同样功率条件下,高水头机组的流量要小些,这会使得水库容积、厂房尺寸和压力管道直径减小,从而减少土建工程部分的造价,以及另外机组本身的尺寸也会随水头增加而减小,机组单位功率造价通常会随水头的增加而降低,这些都有助于降低电站造价;三是可以使用较高的机组转速,减少机组尺寸,或在机组尺

寸不变的情况下增大单机容量,进而降低主机设备制造价,这些对提高电动发电机的效率也大有好处。

## 2.2 小体积

废弃矿井抽水蓄能电站水泵水轮机的安装流程通常应该是先通过竖井进入井下,然后通过巷道转运,最后安装在某个硐室。因此,水泵水轮机的体积必须适应井筒和巷道的尺寸,否则无法运输到井下。同时,水泵水轮机的体积最好也与拟装载硐室的尺寸相适应,否则就必须扩大现有硐室或开凿新硐室,虽然这样在技术上不会存在任何问题,但是毕竟会增加开拓费用。因此,废弃矿井抽水蓄能电站水泵水轮机的体积应该尽可能小。

## 2.3 高耐蚀

废弃矿井抽水蓄能电站水泵水轮机以矿井水作为工作介质。矿井水及其中含有的腐蚀介质会对设备造成腐蚀,而且矿井水固体颗粒含量高且粒径分布广泛,这会导致水轮机遭受泥沙磨损,高流速会进一步加剧泥沙磨损;超高水头容易造成设备过流部件空蚀,同时矿井水通常化学性质活跃,会使得空蚀现象更严重。因此,用于废弃矿井抽水蓄能电站的水泵水轮机必须兼具良好的防腐蚀、耐泥沙磨损和抗空蚀性能。

# 3 研究现状

超高水头对水头水泵水轮机的基本水力特性和双向运行过渡过程调控技术提出了更高的要求。超高水头和小体积通常意味着高压力和高转速,因此需要特别关注水泵水轮机转子部件应力应变特性及抗振防裂关键技术。同时,矿井水的理化特性也对水泵水轮机腐蚀-泥沙磨损-空蚀耦合机理及协同控制关键技术提出了新要求。

## 3.1 超高水头水泵水轮机基本水力特性

2008年,程云山<sup>[2]</sup>分析了水泵水轮机“S”特性区危害及解决对策;2015年,刘德民等<sup>[3]</sup>开展了超高水头抽水蓄能电站水泵水轮机水力特性研究;2016年,孙跃昆<sup>[4]</sup>研究了低比转速水泵水轮机驼峰稳定性及其影响因素;2017年,阳春树<sup>[5]</sup>研究了高水头抽水蓄能机组选型与水力稳定性;2017年,陈

金霞<sup>[6]</sup>对水泵水轮机驼峰区和“S”特性区迟滞效应开展了试验研究;2018年,阮辉<sup>[7]</sup>开展了考虑流体可压缩性的高水头水泵水轮机性能研究与优化。2011—2018年,文献[8—12]分别对回龙、三河口、仙居、清远、洪屏抽水蓄能电站的水泵水轮机水力特性开展了研究;2020年李琪飞等<sup>[13]</sup>分析了导叶不同开度下水泵水轮机内流特性。

Nicolet等<sup>[14]</sup>考虑共振条件下,采用一维水声模拟方法对模型混流式水泵水轮机动静干涉进行了时域仿真分析;Botero等<sup>[15]</sup>采用非侵入式方法对10°导叶转角时水轮机“S”特性曲线进行了研究,分析了水泵水轮机的振动特性、动静干涉的方向和旋转失速问题;Jung<sup>[16]</sup>完成了某新建电站可逆式单级水泵水轮机的研发,最大水头约750 m,考虑调压井波动在内的最大最小水头比为1.57,通过隧道连接2个已有电站作为该电站的水系统,因此其水系统兼具上游特性和下游调压井特征,水泵水轮机的水力设计主要关注在电站系统复杂水力流动下的可靠稳定运行,同时保持水泵及水轮机双向运行最高效率和最大灵活性;Anciger等<sup>[17]</sup>指出水泵水轮机设计就是寻找抽水与发电的平衡,关键在于水泵工况设计,能不能实现最大泵扬程和启动稳定性,计算流体力学可以帮助设计者评估水力性能和动力特性,但是由于简化,准确性受到限制。旋转失速限制了水泵在高水头低流速下的运行,有必要研究有效的方法预测旋转失速发生。

## 3.2 超高水头水泵水轮机双向运行过渡过程调控技术

1988年,陈乃祥等<sup>[18]</sup>研究了装有可逆式水泵水轮机的高水头抽水蓄能电站过渡过程计算;1995年,常近时等<sup>[19]</sup>研究了高水头抽水蓄能电站复杂水力装置过渡过程的新计算方法;2004年邵卫云<sup>[20]</sup>对带导叶不同步装置的抽水蓄能过渡过程进行了仿真;侯才水<sup>[21]</sup>对可逆式机组甩负荷水力过渡过程进行了优化;2005年王林锁<sup>[22]</sup>开展了抽水蓄能电站水力过渡过程调节控制研究;2013年刘星星<sup>[23]</sup>设计了水泵水轮机过渡过程半实物仿真平台;2017年郭耀峰<sup>[24]</sup>对高水头大容量水泵水轮机过渡过程开展了计算研究;2019年张晓曦等<sup>[25]</sup>对水泵水轮机甩负

荷过渡过程尾水管水柱分离进行了数值模拟。

1998年沈维义等<sup>[26]</sup>探讨了水头变幅大的水电站混流式水轮机额定水头及最优工况水头选择;2002年刘锦等<sup>[27]</sup>在水力试验中使用全数字直流调速装置;2003年刘胜柱等<sup>[28]</sup>开展了水头变幅大的混流式水轮机水力设计,并在2004年采用计算流体力学技术对水头变幅大的混流式水轮机进行优化<sup>[29]</sup>;2013年何国任等<sup>[30]</sup>开展了在水头变幅大的水电站采用双速发电机提高水轮机效率的研究;2016年陈锐等<sup>[31]</sup>开展了超宽水头变幅水泵水轮机参数选择及优化设计研究;2018年毛敏<sup>[32]</sup>研究了三河口电站大容量四象限变频调速方案。

### 3.3 高压高速转子部件应力应变特性及抗振防裂关键技术

2007年H.霍瑟等<sup>[33]</sup>提出高水头混流式水轮机转轮和水泵转轮的新技术;2013年庞立军等<sup>[34]</sup>对高水头水泵水轮机转轮的抗振防裂纹设计展开了专门论述;2017年徐用良<sup>[35]</sup>进行了混流式水泵水轮机转轮应力测试模型试验;2018年何玲艳<sup>[36]</sup>开展了水泵水轮机转轮动力特性研究与共振预测;2019年滕喜彬<sup>[37]</sup>开展了大型水泵水轮机组转子动力学模型研究。Egusquiza等<sup>[38-39]</sup>选取3个抽水蓄能电站的水泵水轮机机组进行运行中动静干涉分析,研究发现真实运转的转轮在水中的固有频率比空气试验中得到的固有频率要低很多,通过对7台水泵水轮机机组进行15年的振动监测,得出了动静干涉产生的主要激振力和振动特征,对水泵水轮机机组进行大修后发现发电机和推力轴承损坏、轴承磨损、转轮出现裂纹等问题。

### 3.4 水泵水轮机腐蚀-泥沙磨损-空蚀耦合机理及协同控制关键技术

国内外学者对水泵水轮机防护涂层的腐蚀、泥沙磨损或空蚀单一水力学性能进行了研究。2009年丁奇等<sup>[40]</sup>提出一种织构化类金刚石薄膜制备方法;2012年郝玉喜<sup>[41]</sup>进行了蒙乃尔合金表面激光改性层的制备,并对空蚀性能开展研究;2016年方勇<sup>[42]</sup>对超音速火焰热喷涂碳化钨抗磨蚀涂层进行了研究,取得了阶段性效果;2017年文树洁等<sup>[43]</sup>对

海水抽水蓄能电站混流式水泵水轮机的防磨防腐进行了研究,杨宛利<sup>[44]</sup>对高水头混流式水泵水轮机空化特性展开了专门研究。

ALSTOM电力公司基于侵蚀能量模型,预测不同运行工况下真机的侵蚀现象时发现,空化数的最大相对误差为2%,当导叶出口与叶片进口离得很近时,预测结果可能无效。空化流动的试验研究中流动现象观测是最简单直接的方法,由于气态水和液态水具有明显的形态差异,因此空化可以在不借助其他辅助设备(照明设备除外)的情况下进行直接观测,高速数码摄像机是直接观测研究中必不可少且非常有用的工具,如Sato等<sup>[45]</sup>采用高速数码摄像机研究了空化云的发生和脱落机理;Grekula等<sup>[46]</sup>研究了轴流式水轮机的空化问题;Roger<sup>[47]</sup>基于时间分辨粒子成像测速系统对不同攻角下的NACA0015水翼云空化长度进行了测量,并研究了水翼形状、表面特性、水的质量以及实验设备对空化流动的影响;杨静等<sup>[48]</sup>进行了水泵水轮机比转速与空化系数统计分析。

## 4 存在问题

综合分析国内外研究现状可知,若要开发一种适用于废弃矿井抽水蓄能电站的“超高水头、小体积、高耐蚀”的新型水泵水轮机,目前仍存在一些关键科学技术问题需要解决:

1) 针对废弃矿井抽水蓄能电站“超高水头、小体积、高耐蚀”水泵水轮机的专门和系统研究不足,缺乏相应的设计方法和水力实物模型。

2) 现有的高水头水泵水轮机通常水头小于700 m,不能满足废弃矿井抽水蓄能电站800 m甚至1000 m超高水头需要。

3) 以矿井水为工作介质的水泵水轮机腐蚀-泥沙磨损-空蚀耦合机理还不够清晰,腐蚀-泥沙磨损-空蚀协同控制技术还需要进一步发展。

4) 废弃矿井抽水蓄能电站主要用于新能源的消纳,机组频繁切换工况的需求较高,因此对水泵水轮机频繁切换工况过渡过程还需做进一步研究。

## 5 关键技术

要发展废弃矿井抽水蓄能电站水泵水轮机,需要在水力模型优化设计、工况过渡过程稳定运行、蚀害协同控制方面突破以下关键技术。

### 5.1 超高水头小体积水泵水轮机水力实物模型设计优化技术

主要是获得水泵水轮机结构设计和水力设计方法,从而建立相应的水力实物模型,并针对该模型开展基本水力特性研究。

1) 超高水头小体积水泵水轮机的结构设计方法,包括机组推力轴承的布置位置、机组的装拆方式、底环与尾水锥管的埋入方式、蜗壳埋设方式等总体设计和转轮、水导轴承、主轴密封、机组轴系稳定性、导水机构、蜗壳底环、尾水管等主要部件设计。

2) 超高水头小体积水泵水轮机的水力设计方法,包括涡轮、叶栅、蜗壳、尾水管等。

3) 超高水头小体积级水泵水轮机水力实物模型及其基本水力特性研究,包括水轮机工况的“S”形特性、水泵工况的驼峰特性和空化性能、流固耦合水力激振动态特性、水力稳定性基本规律等。

### 5.2 高转速水泵水轮机频繁切换工况过渡过程安全稳定运行技术

主要是基于新能源的特点探索水泵水轮机频繁工况转换规律,包括典型过渡过程的和事故情况条件下的,从而开发相应的计算方法和运行技术。

1) 基于新能源特别是太阳能和风能发电运行特点的废弃矿井抽水蓄能电站水泵水轮机工况清单,探索水泵水轮机频繁工况转换规律。

2) 超高水头水泵水轮机典型过渡过程的水力特性,可逆式水泵水轮机的高水头抽水蓄能电站过渡过程计算方法。

3) 事故情况下水泵水轮机水力特性。

4) 变速调节、导叶调节及组合调节方法对机组稳定性的影响规律。

5) 高转速水泵水轮机频繁切换工况过渡过程安全稳定运行关键技术,从而对系统的稳定性及危险工况进行预测,为机组和调速系统参数的选择、导叶关闭规律的优化等提供依据。

### 5.3 矿井水条件下水泵水轮机腐蚀-泥沙磨损-空蚀耦合机理及协同控制技术

主要是依据矿井水的理化特性,获得矿井水条件下水泵水轮机腐蚀、磨蚀、空蚀损伤评价方法及其耦合机理,从而开发相应的协同控制技术。

1) 依据矿井水的理化特性,构建矿井水化学和物理构成对水泵水轮机腐蚀、泥沙磨损、空蚀损伤的评价方法。

2) 矿井水化学成分与金属材料之间的作用机理,揭示水泵水轮机内部腐蚀规律。

3) 水泵水轮机内部固液两相流动,揭示高流速下矿井水固体颗粒对水泵水轮机泥沙磨损规律。

4) 矿井水化学性质与超高水头紧凑型水泵水轮机空化特性的相互作用机理,揭示矿井水条件下水泵水轮机空蚀规律。

5) 综合研究腐蚀-泥沙磨损-空蚀耦合机理,探索腐蚀-泥沙磨损-空蚀协同控制关键技术,为水泵水轮机水力设计和结构设计优化提供支撑,同时为新型复合涂层的筛选和开发建立评价体系,并改进该新型金属/陶瓷复合防护涂层施工工艺。

## 6 结论

1) 废弃矿井抽水蓄能电站水泵水轮机的研制必须基于“超高水头、小体积、高耐蚀”的特点,以水泵水轮机水力特性的研究为突破点和主要抓手,从设计和运行2条路线开展系统研究,形成一套适用于废弃矿井抽水蓄能电站水泵水轮机的设计方法和水力实物模型。

2) 高效率 and 稳定性是水泵水轮机性能的核心要求,但是在超高水头和小体积约束下实现这2个目标面临巨大挑战,因此开发满足高效率 and 稳定性要求的超高水头小体积高耐蚀水泵水轮机设计技术是关键。

3) 矿井水的强腐蚀性和活跃的的化学性质会加剧超高水头水泵水轮机的空蚀效应,水中固体颗粒在高流速下会导致泥沙磨损,而且腐蚀、泥沙磨损、空蚀会形成耦合效应使得水泵水轮机结构部件快速损坏,因此研发水泵水轮机腐蚀-泥沙磨损-空

蚀协同控制关键技术是废弃矿井抽水蓄能电站水泵水轮机的必然要求。

### 参考文献(References)

- [1] 古德生, 周科平. 现代金属矿业的发展主题[J]. 金属矿山, 2012(7): 1-8.
- [2] 程云山. 水泵水轮机“S”特性区危害及解决对策[J]. 水力发电, 2008, 34(6): 70-73.
- [3] 刘德民, 姚李超. 超高水头抽水蓄能电站水泵水轮机水力特性研究[C]//中国水力发电工程学会电网调峰与抽水蓄能专业委员会会议论文集. 北京: 中国水力发电工程学会, 2015: 183-188.
- [4] 孙跃昆. 低比转速水泵水轮机驼峰稳定性及其影响因素研究[D]. 北京: 清华大学, 2016.
- [5] 阳春树. 超高水头抽水蓄能机组选型与水力稳定性研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2017.
- [6] 陈金霞. 水泵水轮机驼峰区和S区迟滞效应试验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- [7] 阮辉. 考虑流体可压缩性的高水头水泵水轮机性能研究与优化[D]. 西安: 西安理工大学, 2018.
- [8] 宫让勤, 高欣. 回龙抽水蓄能电站水泵水轮机[J]. 大电机技术, 2011(6): 43-46.
- [9] 毛拥政. 三河口水利枢纽主要技术问题和设计方案[J]. 中国水利, 2015(14): 86-88.
- [10] 郭彦峰, 罗成宗, 赵志文. 浙江仙居电站水泵水轮机模型验收试验及水力性能分析研究[J]. 大电机技术, 2016(4): 36-41.
- [11] 刘畅, 宋翔, 熊建平. 清远抽水蓄能电站水泵水轮机主轴密封设计探讨[J]. 水电与抽水蓄能, 2018, 4(1): 67-71.
- [12] 李军. 洪屏抽水蓄能电站300 MW机组主要结构及技术特点[J]. 水电站机电技术, 2017, 40(5): 48-52.
- [13] 李琪飞, 龙世灿, 周峰. 导叶不同开度下水泵水轮机内流特性分析[J]. 排灌机械工程学报, 2020(1): 32-37.
- [14] Nicolet C, Ruchonnet N, Alligne S, et al. Hydroacoustic simulation of rotor-stator interaction in resonance conditions in Francis pump-turbine[C]//25th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems. Romanian: IOP, 2010, doi: 10.1088/1755-1315/12/1/012005.
- [15] Botero F, Hasmatuchi V, Roth S, et al. Non-intrusive detection of rotating stall in pump-turbines[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2014, 48: 162-173.
- [16] Jung A. Development of a reliable very high-head pump turbine considering challenging hydrodynamics[C]//26th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems. Beijing: IOP, 2012: 115-123.
- [17] Anciger D, Jung A, Aschenbrenner T. Prediction of rotating stall and cavitation inception in pump turbines[C]//25th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems. Romanian: IOP, 2010: 261-270.
- [18] 陈乃祥, 容伟洪, 梅祖彦, 等. 装有可逆式水泵水轮机的高水头抽水蓄能电站过渡过程计算与研究[J]. 大电机技术, 1988(6): 45-56.
- [19] 常近时, 白朝平. 高水头抽水蓄能电站复杂水力装置过渡过程的新计算方法[J]. 水力发电, 1995(2): 51-55.
- [20] 邵卫云. 带MGV装置的抽水蓄能过渡过程仿真及其应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2004.
- [21] 侯才水. 可逆式机组甩负荷水力过渡过程的优化[J]. 南昌水专学报, 2004, 23(2): 75-78.
- [22] 王林锁. 抽水蓄能电站水力过渡过程调节控制研究[D]. 南京: 河海大学, 2005.
- [23] 刘星星. 水泵水轮机过渡过程半实物仿真平台的软件设计与实现[D]. 武汉: 华中科技大学, 2013.
- [24] 郭耀峰. 高水头大容量水泵水轮机过渡过程计算研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2017.
- [25] 张晓曦, 陈秋华. 水泵水轮机甩负荷过渡过程尾水管水柱分离数值模拟[J]. 水动力学研究与进展, 2019, 34(6): 749-755.
- [26] 沈维义, 林雁庆. 水头变幅大的水电站混流式水轮机额定水头及最优工况水头选择的探讨[J]. 水电站设计, 1998, 14(2): 27-32.
- [27] 刘锦, 李永贵, 何润兵. 全数字直流调速装置在水力试验中的控制应用[J]. 东方电机, 2002, 30(1): 38-41.
- [28] 刘胜柱, 罗兴铸, 梁武科. 水头变幅大的混流式水轮机水力设计[J]. 水力发电学报, 2003(4): 105-111.
- [29] 刘胜柱, 罗兴铸, 郭鹏程, 等. 水头变幅大的混流式水轮机CFD分析与优化[C]//2004年水力发电国际研讨会论文集(下册). 宜昌: 中国水力发电工程学会, 2004: 39-43.
- [30] 何国任, 周思好. 水头变幅大的水电站采用双速发电机提高水轮机效率的研究[C]//第十九次中国水电设备学术研讨会论文集. 大连: 中国动力工程学会, 中国水力发电工程学会, 中国电机工程学会, 2013: 366-371.
- [31] 陈锐, 田娅娟, 王鑫, 等. 超宽水头变幅水泵水轮机参数选择及优化设计研究[J]. 水利水电技术, 2016, 47(1): 85-89.
- [32] 毛敏. 三河口电站大容量四象限变频调速方案研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2018.
- [33] H. 霍瑟, 周丽莲. 高水头混流式水轮机转轮和水泵转轮的新技术[J]. 水利水电快报, 2007, 28(13): 29-31.

- [34] 庞立军, 吕桂萍, 刘晶石, 等. 高水头水泵水轮机转轮的抗振防裂纹设计[J]. 机械工程学报, 2013, 49(4): 140-147.
- [35] 徐用良. 混流式水泵水轮机转轮应力测试模型试验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- [36] 何玲艳. 水泵水轮机转轮动力特性研究与共振预测[D]. 北京: 中国农业大学, 2018.
- [37] 滕喜彬. 大型水泵水轮机组转子动力学模型研究[J]. 自动化应用, 2019(7): 107-109.
- [38] Egusquiza E, Mateos B, Escaler X. Analysis of runner stator interaction in operating pump-turbines[C]//21th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems. Lausanne: IOP, 2010: 9-12.
- [39] Egusquiza E, Valero C, Valentin D, et al. Condition monitoring of pump-turbines. New challenges[J]. Measurement, 2015, 67: 151-163.
- [40] 丁奇, 王立平, 胡雨天, 等. 织构化类金刚石薄膜的制备及其水润滑行为研究[C]//中国机械工程学会摩擦学分会会议论文集. 北京: 中国机械工程学会, 2009: 567.
- [41] 郝玉喜. 蒙乃尔合金表面激光改性层的制备及空蚀性能研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2012.
- [42] 方勇. 超音速火焰热喷涂 WC 抗磨蚀涂层关键技术研究与应用[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2016.
- [43] 文树洁, 熊欣, 张建. 海水抽水蓄能电站混流式水泵水轮机关键技术浅析[J]. 水电与抽水蓄能, 2017, 3(5): 11-18.
- [44] 杨宛利. 高水头混流式水泵水轮机空化特性研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2017.
- [45] Sato K, Shimojo S. Detailed observations on a starting mechanism for shedding of cavitation cloud[C]//Fifth International Symposium on Cavitation. Osaka: Cavitation Symposia, 2003: Cav03-GS-4-009.
- [46] Grekula M, Bark G. Experimental study of cavitation in a Kaplan model turbine[R/OL]. [2021-05-31]. <https://core.ac.uk/download/pdf/9412459.pdf>.
- [47] Roger E A. Some remarks on hydrofoil cavitation[J]. Journal of Hydrodynamics, 2012, 24(3): 305-314.
- [48] 杨静, 韩文福, 周喜军. 水泵水轮机比转速与空化系数统计分析[J]. 水利水电技术, 2019(3): 117-123.

## Key technologies of pump-turbine in underground pumped storage station using abandoned mine

ZHANG Baosheng<sup>1</sup>, CHEN Ning<sup>1</sup>, GAO Bo<sup>2</sup>, CHEN Fan<sup>2</sup>

1. School of Electrical and Power Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China

2. Electric Power Research Institute, State Grid Anhui Electric Power Co., Ltd., Hefei 230601, China

**Abstract** Underground pumped storage station (UPSS) using abandoned mine is a newly emerging technology, which has great significance to adjust the energy industrial structure of China in the future. Pump-turbine is the key equipment of UPSS. The characteristics of large drop, small space and poor water quality of UPSS requires the pump-turbine to be of ultra-high head, small volume and high corrosion resistance. Through the analysis of domestic and foreign research status, it is found that the research on pump-turbine in UPSS using abandoned mine is not comprehensive, the study on the corrosion mechanism of pump-turbine with mine water as working medium is not systematic, nor the transition process of pump-turbine frequently switching working conditions for new energy consumption is clear. Therefore, it is suggested to further develop a hydraulic model design optimization technology, research safe and stable operation technology in the transition process in frequent switching conditions, and study the coupling mechanism of corrosion-sediment wear-cavitation erosion and collaborative control technology.

**Keywords** abandoned mine; underground pumped storage station; pump-turbine ●



(责任编辑 刘志远)