

沙坪水电站水轮机改造优化设计

向升¹, 郑静²

(1. 中国水利水电第七工程局有限公司, 四川 成都 610213; 2. 四川水利职业技术学院, 四川 成都 611231)

摘要: 基于沙坪水电站水轮机改造项目, 介绍了水轮机改造的优化设计过程。在基础模型转轮上, 运用 CFD 优化设计技术调整了转轮性能, 使新转轮能够满足机组改造的预期目标。阐述了沙坪水电站水轮机改造优化设计的整个过程。

关键词: 水轮机改造; 转轮 CFD 优化设计; 低负荷运行; 沙坪水电站

中图分类号: TV737; [TV734. 1]; TV7

文献标识码: B

文章编号: 1001-2184(2022)04-0103-05

Optimum Design of Turbine Rehabilitation for Shaping Hydropower Project

XIANG sheng¹, ZHENG Jing²

(1. Sinohydro Bureau 7 Co., Ltd, Chengdu, Sichuan 610213;

2. Sichuan Water Conservancy College, Chengdu, Sichuan 611231)

Abstract: Based on the turbine rehabilitation project of Shaping Hydropower Project, this paper elaborates the optimum design process of turbine rehabilitation. On the basic model runner, the CFD optimization design technology is used to adjust the runner performance so that the new runner can meet the expected target of unit rehabilitation.

Key words: turbine rehabilitation, CFD optimization design of runner; low-load operation

1 概述

沙坪水电站位于四川省九龙县, 装有 3 台单机额定出力为 55.67 MW 的立式混流式水轮机, 水轮机型号为 HL(A855) - LJ - 203, 机组于 2007 年投运。水轮机设计的最大水头为 181.2 m, 额定水头为 165 m, 最小水头为 163.2 m, 水轮机额定出力为 55.67 MW, 额定转速为 428.6 rpm。

机组自运行以来, 存在可连续稳定运行范围窄、额定出力不足、部分负荷区域振动大而无法运行、转轮叶片出现裂纹等问题。在低负荷运行情况下, 该机组振摆数据较大、波动亦大(如上机架垂直振动有时达到 1 mm), 尾水锥管振动明显(肉眼可观察到锥管振动)、水流撞击声大、尾水管涡带振动明显, 部分负荷段能感觉到楼板振动, 39 MW 负荷下基本不能运行。该机组不能带满负荷运行(即使带到满负荷也会降到 53 MW 左右)。

鉴于该机组存在的振动、裂纹、出力限制等问题, 已严重影响到机组的安全运行和电站的经济效益, 因此, 迫切需要对沙坪水电站水轮机进行升

级改造, 以满足电网对电站日益严格的运行要求。该电站业主和设计院经过多方咨询和充分的前期论证, 最终决定于 2021 年正式启动沙坪水电站水轮机升级扩容改造工程。

2 水轮机升级改造的目标

该电站于 2020 年即启动了水轮机升级改造的前期调研和咨询工作, 先后和国内外多个水轮机设备制造厂家就该电站水轮机存在的问题和升级改造方案开展了多次技术交流, 并具体考察了所属水轮机厂家的技术实力和制造能力, 最终确定了水轮机升级改造的目标: 通过更换水力性能优异的转轮和导水机构等零部件, 以达到提高机组运行稳定性、扩大可运行范围、提升效率、增大出力的升级改造目标。具体来讲, 即要求机组改造后能满足正常负荷区域(45%~100%额定出力)连续稳定运行, 以及长时间低负荷区域(小于 45%额定出力)安全稳定运行的特殊要求, 以满足电网调度组合工况的需求; 机组额定出力能提升 5% 至 58.45 MW; 水轮机效率应比原机组有所提升。

收稿日期: 2022-07-20

该项目于2021年启动了招标工作,共收到五家设备厂商的投标方案。经电站业主和咨询专家进行多次讨论和交流澄清,对设备厂商的技术方案和经济指标作了全方位的比较与权衡,最终确定由杭州睿博水电科技有限公司承接该电站的水轮机升级改造项目。改造前后水轮机主要参数对比情况见表1。

表1 改造前后水轮机主要参数对比表

项目	改造前	改造后
水轮机型号	HL(A855)-LJ-203	HL(L269S)-LJ-210
额定出力 /MW	55.67	58.45
额定转速 /rpm	428.6	428.6
额定水头 /m	165	165
最大出力 /MW	—	61.2
最大水头 /m	181.2	181.2
最小水头 /m	165	163.2
最优效率 /%	95.2	95.8
飞逸转速 /rpm	852	810
轴向水推力 /kN	1 520	1 134

3 水轮机改造优化设计方案的设定

鉴于水电站水轮机升级改造项目技术要求很高,通过升级改造,既要消除机组现有的缺陷,还要确保改造后的新旧机组完美匹配,安全稳定运行,不产生新问题,方能达到水轮机升级改造的预期目标。升级改造项目从客观上讲对业主、设计院、设备厂商都提出了很高的技术能力要求:自主研发的技术能力、合适的基础水力设计模型和完整的模型水轮机试验、CFD优化设计分析能力以及电站改造项目经验等都是至关重要的。

3.1 转轮水力设计采用的主要优化方法

在水轮机改造优化设计方面,各水轮机制造厂家都进行了很多研究。效率、出力、稳定性、空化性能是机组改造的主要优化方向。

水轮机的升级改造需要在一个合适的基础水力设计模型上,通过CFD优化设计技术,结合被改造电站的具体参数和改造要求,有针对性的进行优化提升,并对改造后的机组性能做出合理、准确的评估和预测,才能如期实现电站改造的目标^[1]。

(1)调整最优点位置的优化设计。机组额定出力提升时,其额定单位流量有所增大。为提高机组部分负荷工况的稳定性,将转轮最优单位流

量向部分负荷工况偏移可以降低机组部分负荷工况下尾水管涡带的能量^[2]。

(2)转轮叶片进水边的优化设计。转轮叶片进水边形状对转轮内部水流压力脉动、进水边空化、部分负荷工况脱流现象等影响较大。进行转轮CFD优化设计时,一定要有针对性地进行优化尝试,选取合适的叶片进口型线和倾角,使转轮对水流具有良好的适应性^[3]。

(3)进行转轮叶片出水边的优化设计以消除卡门涡诱发的振动。卡门涡通常出现在转轮叶片出水边,且稳定的卡门涡会成为机组振动的振源因素之一。优化转轮叶片出水边叶型可以避免卡门涡的产生,提高机组的稳定性能^[4]。

(4)优化活动导叶型线,使其与转轮叶片匹配,在转轮进口区域形成稳定、均匀的流场,以提高机组的效率和稳定性^[5]。

3.2 基础水力模型的确定

由于中小型水电站水轮机改造项目预算和周期的限制,一般情况下都不具备在改造实施前做模型水轮机试验的可能性,因此,一个完全相同或接近于改造项目实际运行工况的基础水力设计模型即成为电站成功改造的关键因素之一。

睿博公司出品的L269中水头模型转轮是睿博公司于2008年为挪威TjØrhom项目做的模型水轮机开发,于2008年年底在挪威NTNU水力机械模型试验室完成模型试验。模型试验的结果表明:该转轮具有比较优秀的水力设计,且其设计参数和沙坪水电站水轮机的运行工况接近。在进一步针对沙坪水电站水轮机的运行工况做CFD优化设计后,可以满足沙坪水电站的改造目标要求。

L269模型转轮的基本参数如下:

模型转轮编号:L269

推荐使用水头范围:120~200 m

模型转轮叶片数:13

转轮出口直径 D_2 :350 mm

转轮叶片进口直径 D_1 :390.1 mm

导叶相对高度 B_0/D_2 :0.26

导叶分布圆相对直径 D_p/D_2 :1.25

活动导叶数:24

固定导叶数:24

最优单位转速 n_{11}^* :70.3 rpm

最优单位流量 Q_{11}^* : $0.566 \text{ m}^3/\text{s}$

模型水轮机最优效率 η_{HM} : 95.41%

从模型水轮机的试验报告看:此 L269 模型水轮机和沙坪水电站的运行工况比较接近,模型水轮机的性能亦比较优秀,各项指标比较均衡。但是,由于原沙坪水电站水轮机流道尺寸与该模型水轮机存在一定差异,特别是电站改造后对于低负荷区域安全运行的特殊工况要求,水轮机设备厂商需要在此基础模型上通过 CFD 优化设计的方法对转轮设计做出适当调整,在水力设计和机械设计两个方面都需要进行优化提升,以使其更加切合沙坪水电站水轮机改造的初衷。

3.3 CFD 优化设计

3.3.1 蜗壳和尾水管的 CFD 分析

此次沙坪水电站水轮机改造项目中不包含已经埋入厂房混凝土的水轮机蜗壳和尾水管。因此,在进行水轮机改造设计时,需要对原蜗壳、尾水管流道进行一次 CFD 分析,以评判其对于新转轮的影响。

对比睿博 L269 基础模型水轮机,沙坪水电站原蜗壳进口尺寸和进口偏心距离更大。沙坪水电站固定导叶为 23 只,而睿博 L269 模型水轮机的固定导叶为 24 只。通常情况下,蜗壳尺寸的增大更有利于蜗壳座环区域的流场分布,有利于减少该部件的水力损失。CFD 分析计算的结果显示:沙坪水电站蜗壳的水力损失和睿博 L269 模型水轮机蜗壳的水力损失相当。沙坪水电站蜗壳压力分布情况见图 1。

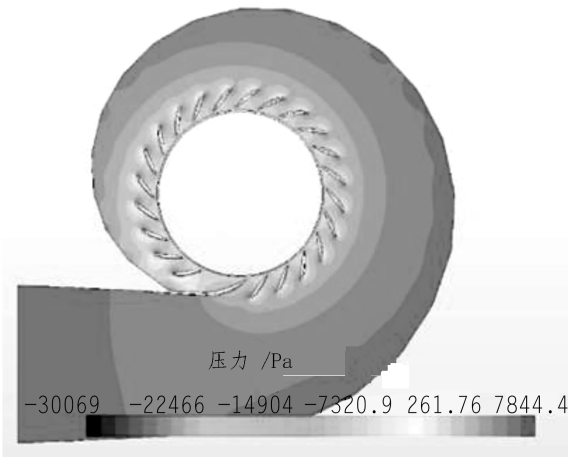


图 1 沙坪水电站蜗壳压力分布图

按照沙坪水电站原尾水管设计图,沙坪水电

站尾水管比 L269 模型水轮机尾水管深 10%。通常,更深的尾水管有利于减少机组部分负荷区域的水力损失和压力脉动。沙坪水电站的尾水管出口宽度与 L269 模型水轮机尾水管相当,但其长度比 L269 模型水轮机尾水管略短,致使其出口扩散角比较大。

图 2 显示了尾水管的水力损失与涡流数 S 之间的关系。涡流数 S 是一个无量纲数,用于描述水流流场的旋转运动情况。在水轮机设计中,涡流数向满负荷(正 S 值)和部分负荷(负 S 值)方向增加。与睿博 L269 参考模型水轮机相比较,沙坪水电站原尾水管的水力损失比睿博 L269 略大。在最优效率区域,即 $S=0$,二者的差别约为 0.05%。沙坪水电站尾水管与睿博 L269 模型尾水管水力性能比较情况见图 2。

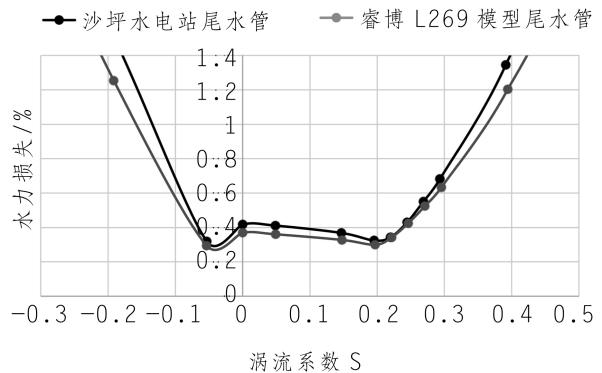


图 2 沙坪水电站尾水管与睿博 L269 模型尾水管水力性能比较图

3.3.2 活动导叶 CFD 优化设计

原沙坪水电站活动导叶数与睿博 L269 模型水轮机活动导叶数量一样,均为 24 个。在 CFD 优化设计中,活动导叶的分布圆按照沙坪水电站现有导叶分布圆 2 480 mm 设计,导叶高度按 480 mm 设计。

由于睿博 L269 模型水轮机为多年前的设计成果,其活动导叶采用的是常规对称型活动导叶,为比较传统的型线设计。在沙坪水电站水轮机改造过程中,设备厂家将采用水力性能更优的非对称型活动导叶型线,其水力性能比沙坪水电站的对称型活动导叶要好,更适用于沙坪水电站机组的改造。

活动导叶的 CFD 分析计算是在一个转轮叶片和一个活动导叶的耦合流场内进行的。CFD

分析计算结果显示:采用非对称型活动导叶后,比对称型活动导叶能更好地适应沙坪水电站机组稳定运行的要求。

图3显示了优化设计后的非对称型活动导叶应用到沙坪水电站时的流场压力分布情况。使用优化设计后的L269S活动导叶型线后,水力损失比原参考模型水轮机活动导叶型线减少了0.2%,相当于水轮机效率提升了0.2%。此外,更为重要的是,在新优化设计后的L269S活动导叶出口侧,流场的压力分布沿圆周方向更加均匀,其可以直接降低转轮进口与活动导叶之间的压力波动,降低转轮动态载荷,提高转轮运行的稳定性能。CFD优化设计后的非对称型活动导叶应用到沙坪水电站时的压力分布情况见图3。

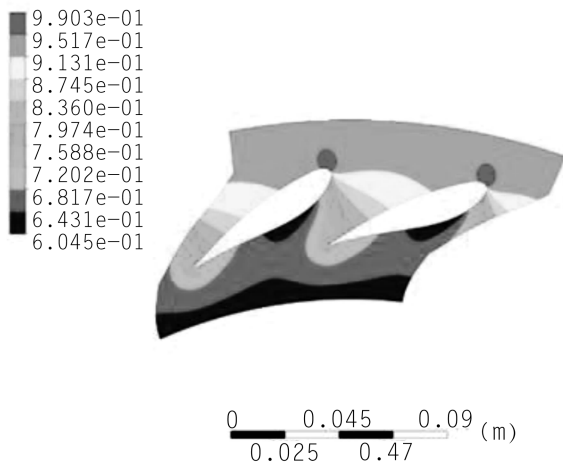


图3 CFD优化设计后的非对称型活动导叶应用到沙坪水电站时的压力分布图

3.3.3 转轮 CFD 设计优化和 FEA 分析

为满足沙坪水电站低负荷区域运行的特殊要求,提高机组运行的整体稳定性和安全性,进行转轮的CFD优化设计至关重要。经CFD优化设计后的L269S转轮参数如下(单位参数按 D_1 计算):

- 出口直径 D_2 为 1.894 m
- 进口直径 D_1 为 2.1 m
- 最优点流量 Q^* 为 30.5 m³/s
- 最优点水头 H^* 为 179.5 m
- 最优单位流量 Q_{11}^* 为 0.516 m³/s
- 最优单位转速 n_{11}^* 为 67.2 rpm
- 转速 n 为 428.6 rpm
- 额定出力为 58.45 MW

叶片数为 15

运用 CFD 和 FEA 技术,新 L269S 转轮叶片的型线按沙坪水电站运行要求进行了以下调整和优化设计,沙坪水电站 L269S 转轮叶片 CFD 压力分布情况见图 4。

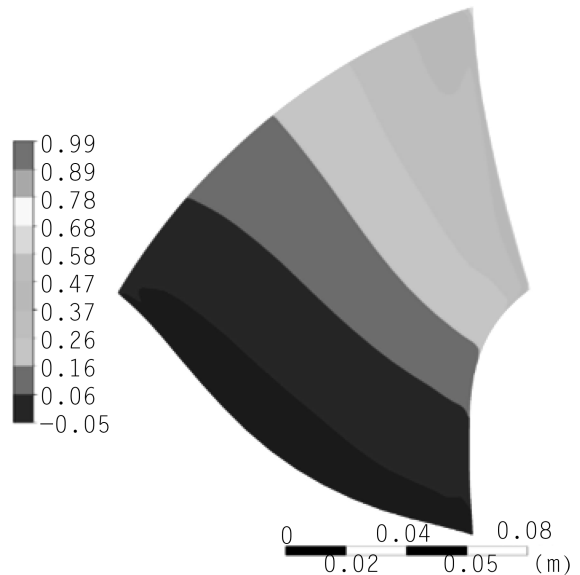


图4 沙坪水电站 L269S 转轮叶片 CFD 压力分布图

调整最优工况点到比较低的单位转速和较低的单位流量上,以满足机组在低负荷区域运行的稳定性要求。

在转轮进口尺寸上,比原沙坪水电站机组转轮适当放大,在抗汽蚀性能上有所提高。

增强了转轮在高水头低负荷区域的进口汽蚀性能,使其背部脱流区远离沙坪水电站的最高运行水头线,拥有足够的安全余量。

将转轮叶片数调整为 15,有利于降低转轮进口压力波动,提高转轮运行的稳定性能。

转轮叶片数调整为 15 后,提高了出水边抗汽蚀性能,更有利于满足沙坪水电站的最小装机汽蚀系数。

转轮叶片数调整为 15,更能避免转轮进口内压力波动和蜗壳内压力波动的共振,有利于提高转轮运行的稳定性能。

转轮叶片厚度的适当增加,能够提高转轮在极低负荷条件下运行的刚强度,降低其应力水平;同时,适当增厚的叶片出水边能提高转轮在水中的固有频率,避免共振风险。当然,增厚的叶片出水边会使转轮效率有所下降。

沙坪水电站转轮叶片出水边在参考模型转轮

出水边上适当进行了延长,有利于提高出水边的汽蚀性能。

沙坪水电站转轮叶片头部的适度优化,能够提高转轮在高水头运行时进口的抗汽蚀性能,使叶片背部脱流区远离机组运行范围。

与此同时,对沙坪水电站转轮叶片的进口边角度和型线厚度进行了优化设计,以确保高水头低负荷和低水头高负荷运行时的进口汽蚀性能。

转轮经 CFD 优化设计后,需要对转轮进行 FEA 分析,以便对其应力、应变、固有频率、动态应力、疲劳寿命等做出评估和校核,确保转轮机械结构安全可靠。必要时,需要重新调整其叶片或上冠下环型线,使转轮在水力性能和机械强度上达到平衡。

4 L269S 转轮性能预测

水轮机在进行 CFD 优化设计的同时可以获得机组性能的预测。

4.1 水轮机效率

水轮机效率的预测以 L269 模型水轮机试验结果为基础进行。根据对沙坪水电站机组原蜗壳、尾水管进行的 CFD 分析,以及活动导叶和转轮的 CFD 优化设计结果,对原模型水轮机的效率水平进行了调整,并预测新 L269S 水轮机的最优效率为 95.8%。

L269 模型水轮机最优效率试验结果为 95.41%。

沙坪水电站 L269S 水轮机水力效率的调整:

蜗壳座环 0%

尾水管 -0.05%

活动导叶优化 +0.2%

转轮叶片优化 -0.3%

止漏环设计 -0.05%

安全余量 -0.4%

总效率调整 -0.6%

最终将 L269S CFD 模型水轮机最优效率调整为 94.81%。

沙坪水电站真机最优效率为(按莫迪公式换算)95.8%。

4.2 运行范围

对于经过 CFD 优化设计后的沙坪水电站 L269S 水轮机,设备厂家提出了 34%~100% 额定出力的连续稳定运行范围,该连续稳定运行范

围比改造合同中规定的 45%~100% 额定出力范围宽。将低于 34% 额定出力的低负荷区域定义为临时运行区域。由于混流式水轮机天然固有的水力特性,机组在低负荷区域运行时其汽蚀、涡带和动态应力会增大,对转轮寿命存在负面影响。因此,必须对在该低负荷区域的临时运行时间有一定限制,以避免机组因长期运行在恶劣工况下损坏,例如叶片裂纹。因此,在设定机组连续稳定运行范围时需要充分考虑水轮机的水力性能,结合电站运行工况需求合理设定。

4.3 汽蚀性能

图 5 中的曲线显示的是转轮叶片汽蚀趋势,从图中可以看出:在设计尾水位高程 2 004 m 工况下,转轮在正常负荷运行区域其需求的尾水位高程比设计尾水位高程低,没有出现汽蚀的风险。L269S 转轮汽蚀性能见图 5。

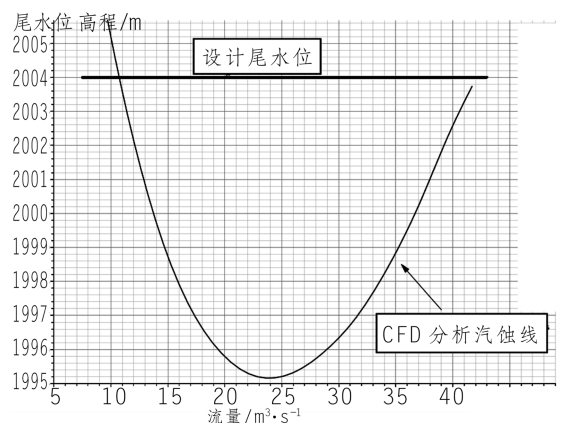


图 5 L269S 转轮汽蚀性能示意图

5 结 语

沙坪水电站水轮机改造业已完成并投入运行,机组出力满足设计要求,运行平稳,达到了改造优化的目的。

2004 年,中国国内的水电站总装机容量就超过了 1 亿 kW,时至今日,很多机组已经进入升级改造周期。沙坪水电站水轮机存在的运行问题在国内众多中小型混流式水轮机机组中具有一定的典型性。沙坪水电站水轮机的改造优化,可以为国内中小型水电站水轮机改造提供一定的参考和借鉴。

参考文献:

- [1] 彭忠年,等.混流式水轮机水力设计技术的研究和应用[J].中国水利水电科学研究院学报,2018,16(5):479-486.

(下转第 111 页)

分台阶开挖揭露岩性较好时改为全断面施工。

3.6 加强超前地质预报,用于指导后续施工

该工程运用美国 TRT 仪器进行超前地质预报^[5],预判隧洞掘进前方的围岩变化情况,经详细分析后编辑地质超前简报用于指导现场施工;使用 100B 钻机在掌子面施工深度为 30 m 的超前勘探孔 3 个,分别布置在易垮塌区的上半幅,顶拱 1 个,两侧各 1 个,分别对钻孔速度、声音、出水颜色和钻渣等情况进行详细记录,结合地质勘探资料做出正确的判定;现场钻工可根据钻孔速度和掌子面揭露的情况分析、控制钻孔的深度、间排距和装药量,以减少因爆破振动对周边围岩的扰动。及时跟踪,确保超前地质预报桩号每次搭接 20 m,100B 勘探孔桩号每次搭接 5 m,以保证连续性地指导施工。

4 结 语

固增水电站通过上述施工技术的研究与实施,成功地处理了本次突泥突水事件。处理过程中未发生安全事故,处理完成后该部位未再发生塌方变形等事件。总结、完善灾害处理经验并将其用于指导后续未开挖洞段的施工,减少不良地

质洞段的开挖塌方,促进了施工进度,确保了该工程长达 11.06 km 引水隧洞的开挖未出现一般及以上安全事故,降低了施工成本。

参考文献:

- [1] 陈东. 纳米混凝土在不良地质隧洞支护中的应用[J]. 人民长江, 2009, 40(10): 32-33.
- [2] 张野, 刘政儒, 田兴举. 跟管钻进大管棚搭接在地下管廊暗挖下穿特大风险源施工中的应用[J]. 建筑技术, 2020, 51(7): 809-812.
- [3] 邢彦波. 水电站进水口边坡超前锚筋束的施工情况分析[J]. 硅谷, 2012, 5(20): 145, 160.
- [4] 张剑波, 吴长庚, 刘竹. 南俄 5 水电站引水隧洞固结灌浆工程施工技术浅析[J]. 四川水利, 2020, 41(5): 35-37.
- [5] 刘康. 综合超前地质预报在隧道工程中的应用[J]. 四川建材, 2020, 46(11): 75-76.

作者简介:

郭 益(1976-),男,四川眉山人,副局长兼项目经理,高级工程师,从事水利水电工程施工项目管理工作;
戚绍礼(1987-),男,四川南充人,项目总工程师,工程师,学士,从事水利水电工程施工项目管理工作;
王军红(1985-),男,甘肃渭源人,项目副总工程师,工程师,学士,从事水利水电工程施工项目管理工作。

(责任编辑:李燕辉)

(上接第 54 页)

通过对尹河跌水建筑物水泥基渗透结晶型防水涂料施工工艺和相关参数的应用研究,确保了结构物外观质量,提升了施工质量,积累了相关施工经验,为水工建筑物混凝土结构致密防渗性能、抗腐蚀性能、美观度等的提升,以及该防水材料在水工建筑物中的推广起到了一定的探索作用。

参考文献:

- [1] 李亮, 宁博. 引江济淮工程三河跌水设计方案比选[J]. 治淮, 2019, 68(4): 20-21.
- [2] 何大亮. 桥梁裂缝处治中水泥基渗透结晶的应用研究[J]. 交通世界, 2021, 28(19): 123-124.
- [3] 李广彦. 水泥基渗透结晶型防水材料制备及其自修复性能

[D]. 华南理工大学, 2018.

- [4] 杨斌. 水泥基渗透结晶型防水材料及其产品合格判定[J]. 中国建筑防水, 2017, 34(24): 1-5.
- [5] 胡雄飞, 危青, 钟小帅. 水泥基渗透结晶型防水涂料在某码头工程中的应用[J]. 中国水运(下半月), 2012, 12(9): 219-220.

作者简介:

李 银(1989-),男,湖北当阳人,项目副经理,工程师,学士,从事水利水电工程及市政工程施工技术与管理工作;
王明阳(1997-),男,重庆市人,项目技术质量部副主任,从事建筑工程的施工技术与管理工作;
任 勇(1996-),男,四川南充人,项目技术质量部副主任,助理工程师,学士,从事水利水电工程及市政工程施工技术与管理工作。

(责任编辑:李燕辉)

(上接第 107 页)

- [2] 冯凯,等. 天生桥一级水电站水轮机改造研究[J]. 大电机技术, 2021, 51(6): 56-67.
- [3] 童正权. 龚嘴电站改造工程水轮机增容及改善运行稳定性水力研究[J]. 水电站机电技术, 2012, 35(6): 8-9, 20.
- [4] 尹国军,等. 大朝山电站水轮机转轮卡门涡共振分析[J]. 水电站机电技术, 2005, 28(4): 80-82.
- [5] 刘胜柱,等. 混流式水轮机导叶与转轮的匹配关系[J]. 西安

理工大学学报, 2004, 20(1): 1-4.

作者简介:

向 升(1971-),男,重庆开州人,副总经理,高级工程师,学士,从事水利水电工程设计及技术管理工作;
郑 静(1971-),女,四川成都人,副教授/高级工程师,学士,从事水电站水力机械和电气工程(一次部分)教学与研究工作。

(责任编辑:李燕辉)