

尾水管补气管结构强化改造及补气短管拆除可行性分析

尤军波 柳超

华电四川发电有限责任公司宝珠寺水力发电厂，四川 广元 628003

[摘要]尾水管补气系统是抑制水轮发电机组空化侵蚀、降低压力脉动及机组振摆的关键装置，其运行可靠性直接决定机组安全稳定水平。针对宝珠寺电站尾水管补气管因结构设计缺陷及材质性能不足，导致补气短管对应区域尾水锥管里衬钢板撕裂的严重隐患，开展了补气管优化改造及补气短管拆除可行性研究。补气管优化改造后，结构强度及抗腐蚀性能显著提升；拆除补气短管后，机组关键运行指标无明显波动，可实现安全稳定运行。该研究提出的补气管改造方案及补气短管拆除验证方法，不仅解决了宝珠寺电站的实际运行隐患，更为同类水轮发电机组补气系统优化及相关技术决策提供了可靠的工程参考。

[关键词]尾水管补气短管；优化改造；短管拆除

DOI: 10.33142/hst.v8i11.18313

中图分类号: TV734.

文献标识码: A

Feasibility Analysis of Strengthening the Structure of Draft Tube Air Supply Pipe and Dismantling the Short Air Supply Pipe

YOU Junbo, LIU Chao

Baozhusi Hydropower Plant of Huadian Sichuan Power Generation Co., Ltd., Guangyuan, Sichuan, 628003, China

Abstract: The tail water pipe air supply system is a key device for suppressing cavitation erosion, reducing pressure pulsation and unit oscillation in hydroelectric generators. Its operational reliability directly determines the safety and stability level of the unit. In response to the serious hidden danger of steel plate tearing in the lining of the tailwater cone pipe in the corresponding area due to structural design defects and insufficient material performance of the air supply pipe of Baozhusi Power Station, a feasibility study was carried out on the optimization and renovation of the air supply pipe and the removal of the air supply short pipe. After the optimization and renovation of the air supply pipe, the structural strength and corrosion resistance have been significantly improved; After removing the air supply short pipe, there is no significant fluctuation in the key operating indicators of the unit, and safe and stable operation can be achieved. The proposed renovation plan for the air supply pipe and the verification method for dismantling the air supply short pipe not only solve the practical operational hazards of Baozhusi Power Station, but also provide reliable engineering references for optimizing the air supply system and related technical decisions of similar hydroelectric generator units.

Keywords: tail water pipe air supply short pipe; optimization and renovation; short pipe dismantling

引言

尾水管作为水轮发电机组核心过流部件，兼具能量回收、引导水流平顺排出及抑制不稳定流态的关键功能。其中，补气系统通过主动引入空气，可有效缓解尾水管空化侵蚀、降低压力脉动幅值及机组振摆烈度，是保障机组安全稳定运行的重要辅助装置。宝珠寺电站自投产以来，4台机组多次发生尾水管补气短管对应区域尾水锥管里衬钢板撕裂、周边混凝土基础淘刷等严重故障，不仅大幅增加检修工作量与运维成本，更对机组安全稳定运行构成直接威胁，亟需通过改造予以解决。针对宝珠寺电站补气管存在的结构性缺陷，开展结构优化与材质升级研究，可直接解决该电站机组的运行隐患，缩短检修周期、提升机组运行可靠性与经济性。目前国

内仍有大量同类型老旧机组沿用传统尾水补气短管结构，普遍面临类似的运维难题，本研究提出的“结构优化+补气短管拆除”改造方案及验证方法，可为同类机组的补气系统升级改造提供直接的工程借鉴，具有显著的行业推广价值。当前国内外关于传统补气短管结构缺陷修复及“结构强化后拆除补气短管”的研究相对匮乏，现有研究多聚焦于补气系统的“强化与优化”，鲜少涉及“简化与拆除”的可行性验证，尤其缺乏针对特定电站故障案例的系统性改造与验证研究，本研究可填补该领域的工程实践空白。

1 电站简介

宝珠寺水电站位于四川省广元市三堆镇，是嘉陵江水系白龙江干流上已建的第二个梯级水电站。该电站是以发

电为主，兼有灌溉、防洪等效益综合利用的大型国家重点工程。宝珠寺电站装有4台17.5万kW混流式水轮发电机组，1996年第一台机组发电，1998年四台机组全部投产发电。目前电站的主要设备服役时间较长，已多次发生补气短管相关部位的尾水锥管里衬钢板撕裂的问题，严重影响机组的安全稳定运行。

宝珠寺电站机组补气方式有三种，一是主轴中心孔补气，二是尾水短管补气，三是顶盖真空破坏阀补气。其中尾水管为4H型，直锥段为钢板焊接的里衬（详见图1），它分两瓣，上下有分两段，为使机组安全稳定运行，上段里衬设有4根补气短管（详见图2），四周有环形通气腔，其进气管接至尾水平台。

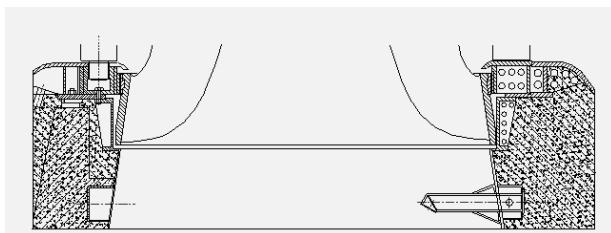


图1 尾水管剖面图

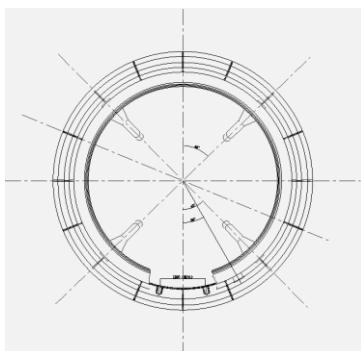


图2 尾水管俯视图

2 原尾水管补气系统问题分析

在过流部件气蚀检查时发现尾水管钢板脱落严重，凑合节、补气腔、尾水管里衬钢板掉落，多处混凝土基础被淘刷，详见图3。



图3 尾水管损坏情况

根据统计，4台机组自投运以来针对该部位的检修次数分

别达到5~7次之多，且检修频率越来越高，每次实际检修时间为15d左右。随着运行年限的增加，检修的难度越来越大。

尾水锥管损坏主要有以下几种因素有关：

(1) 强度不足，强度不足导致的部件损坏的机理是静态作用力比较大，使部件的静应力超过部件材料的断裂强度。在尾水管中，静态作用力只有来自水流的冲击。

(2) 疲劳破坏，众所周知，材料可以承受比较大的静应力，但比较小的动应力就可以使它发生疲劳破坏。在水轮机尾水管中是不可缺少动载荷的，特别是在非最优工况下，例如，涡带压力脉动，卡门涡、叶片频率的压力脉动、转轮进口冲击、脱流产生的压力脉动等。它们产生的动应力也可以达到可与静应力相比的程度。联系到上述水流和焊接对静应力的作用，分析认为，宝珠寺锥管完全具有产生疲劳破坏的条件，而且很可能是在静载荷和复杂动载荷联合作用下发生的疲劳破坏。

(3) 焊接质量，焊接质量可能带来的影响有：

①结构的整体性差，整体强度降低；

支管的焊接部位受力不均匀，可能出现很大的载荷和应力集中现象，加速支管的断裂速度。焊接对补气架的最大影响可能还是焊接对支管母材材质的影响，这是焊接对焊接结构带来的不可避免的副作用。经过焊接，特别是多次焊接后，母材将不可避免的出现脆化的倾向或结果，这种影响对比较薄的板材和管材更加突出一些，而材料的脆化就意味着疲劳强度的大幅度降低。

②支管与埋入部分的焊接、支管与里衬的焊接、支管与套管的焊接等。所有这些都会使支管根部的材质发生脆性变化，疲劳强度降低。

与补气架支管连接的里衬部分是补气架的支点和基础，它既受焊接和焊接质量的影响，也可能产生直接的影响，如：经过多次焊接的里衬材料（钢板）也会发生脆化效应，降低疲劳强度；如果里衬与混凝土的局部结合不好、有空隙，将降低支持刚度；如果里衬与支管的焊缝上存在裂纹，水和压力脉动将传递到里衬外侧，加速里衬局部的疲劳破坏。

3 补气管结构优化改造实施

根据现有的实际运行现状和资料、机组各次检修资料及原设计资料、原机组厂家资料等，同时参考了国内相似电站的改造经验，确定的改造方案（详见图4）如下：

(1) 拆除原补气短管。

(2) 原补气环腔采用混凝土浇实。

①将原有补气短管及以EL.481.85为中心上、下各55cm的锥管里衬及外侧深40cm混凝土凿除，凿除混凝土约9m³，锥管周边钢筋根据需要割除。

②在更换的尾水锥管不锈钢钢材上 EL.482.10 为中心，每隔约 2.16m 开设一直径 150mm 孔共 9 个，进行回填混凝土用，待混凝土回填完成后将孔封堵。

③恢复原锥管周边割除的钢筋；原补气腔内需增设一圈Φ32钢筋，并与周边凿出的原钢筋网可靠焊接。

④在更换的锥管顶设置回填灌浆系统共布置二根进、回浆管及一根排气管，沿补气管环形布置。回填灌浆系统采用可重复灌浆系统，灌浆管路均采用 φ38 可重复灌浆管。将灌浆进、出口设在尾水管进入廊道附近。

⑤混凝土回填用尾水锥管不锈钢钢材上预留的孔进行，回填混凝土用 C25 微膨胀混凝土（二级配）泵送混凝土。

⑥混凝土浇筑时应密切观察浇筑情况，确保浇筑密实。

⑦补气环向管槽顶部混凝土易脱空部位,采用预埋的回填灌浆系统进行回填灌浆。

⑧灌浆处理：灌浆采用 HGM-1 型高强无收缩灌浆料（该灌浆材料具有早强性高， $1\sim 3d$ 抗压强度可达 $30\sim 50MPa$ ；自流性高；耐久性强等特点），灌浆压力为 $0.15\sim 0.20MPa$ ，沿尾水管进入廊道一侧环向开始，在规定的压力下，灌浆孔停止吸浆，延续灌浆 $20min$ 结束灌浆；灌注时用手锤轻轻敲击钢板，增加浆液流动性，保证灌浆密实。

⑨为防止混凝土浇筑和回填灌浆时引起锥管变形，应对混凝土振捣和压力严格控制，发现问题及时解决，锥管变形应控制在厂家允许范围内。

⑩混凝土拆除需采用人工拆除。严禁采用爆破拆除。

(11)冬季尾水管内气温较低, HGM-1型高强无收缩灌浆料养护时间为7d, 回填灌浆3d后, 用锤击检查钢衬补修范围内是否存在空声, 判断钢衬与混凝土之间是否存在空腔。如若存在空声, 应仔细确定混凝土空腔大小, 需要补灌处割开钢衬, 补灌后焊接好钢板孔。

(3) 更换短管补气段尾水锥管，材质采用不锈钢（6cr），高度约为 1.0m，锥管分为四块。凿除的混凝土部分回填。

(4) 焊接工艺和质量

焊接质量对延长使用寿命有非常大的影响，应采取各种措施提高和保证焊接质量，例如：

- ①在一切可能的焊口处开焊接坡口。
 - ②所有焊口都应满焊并与两边的母材圆滑过渡。
 - ③注意采用适当的焊接工艺（例如分段、分层焊接控制焊接电流等），减小对母材的焊接热影响。
 - ④避免出现焊接缺陷，例如夹渣、气孔、裂纹、咬边等。

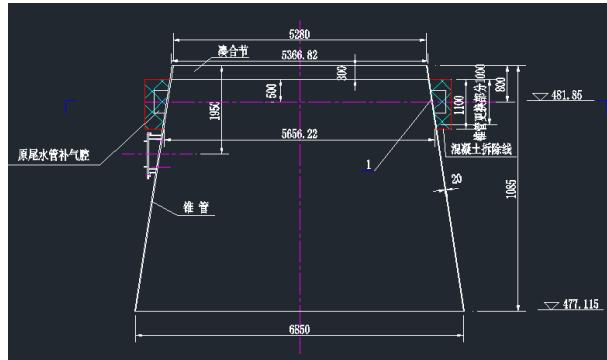


图 4 尾水管改造施工图纸

4 补气短管拆除验证

宝珠寺电站尾水补气短管在前期结构优化改造工程实施后，虽已有效解决了改造前存在的补气效率不足、结构稳定性欠佳等问题，基本达成了设计预期的补气稳压目标，保障了机组在常规工况下的安全稳定运行。然而，从长期运维角度分析，尾水补气短管作为机组尾水系统的附加补气结构，其固有属性决定了运维过程中的持续性成本与潜在风险：一方面，该结构每年机组检修期间均需开展全面的维护保养与性能检测工作，包括短管内壁探伤及焊接修复等，不仅占用大量检修工时与人力成本，还可能因部件老化、磨损等问题增加检修复杂度；另一方面，长周期运行下，短管与尾水主管的连接部位易出现应力集中等隐患，维护不及时可能诱发撕裂、振动加剧等次生问题，对机组安全运行构成潜在威胁。

从行业发展趋势来看，随着国内水轮发电机组设计制造技术、补气系统优化技术的不断迭代升级，取消尾水补气短管的无短管补气方案已成为先进机组的主流配置。多家国内大型水电厂的实践案例表明，在经过充分论证的前提下，拆除尾水补气短管不仅可简化系统结构、降低运维成本，还能通过优化机组流道形态减少局部水力损失，对提升机组运行效率具有积极意义。基于此，针对宝珠寺电站尾水补气短管是否具备拆除条件这一核心问题，课题组摒弃了传统研究中先通过多工况理论计算论证可行性的常规思路，采用“源头封堵-实测分析”的实证研究方法，直接通过对尾水补气短管进行源头封堵处理，系统监测并分析短管拆除（等效状态）后机组关键运行参数的变化规律，重点聚焦机组振摆特性、尾水管及转轮区域压力脉动等核心指标，以此验证尾水补气短管拆除的工程可行性与安全性。

对尾水补气短管进行源头封堵处理后，观察机组典型负荷（空载、低负荷、振动区上限负荷、较大负荷）下的振摆数据，具体情况如下：

表 1 空载振摆数据对比

	机组负荷	上导摆渡 X	上导摆渡 Y	推力摆渡 X	推力摆渡 Y	水导摆渡 X	水导摆渡 Y	上机架垂直振动	上机架水平振动	下机架垂直振动	下机架水平振动
	MV	UM	UM	UM	UM						
封堵前	17.78	360	358	541	558	322	297	40.24	55.02	48.58	17.68
封堵后	11.8	246.1	223	464	476.5	261.9	262.3	30.5	40.8	37.5	8.4

表 2 低负荷振摆数据对比

	机组负荷	上导摆渡 X	上导摆渡 Y	推力摆渡 X	推力摆渡 Y	水导摆渡 X	水导摆渡 Y	上机架垂直振动	上机架水平振动	下机架垂直振动	下机架水平振动
	MV	UM	UM	UM	UM						
封堵前	39.45	450	498	678	699	399	354	58.9	80.75	82.9	39.65
封堵后	44.2	252.7	232.6	463.2	464.3	236	239.4	26.4	40.3	43.6	8.7

表 3 振动区上限振摆数据对比

	机组负荷	上导摆渡 X	上导摆渡 Y	推力摆渡 X	推力摆渡 Y	水导摆渡 X	水导摆渡 Y	上机架垂直振动	上机架水平振动	下机架垂直振动	下机架水平振动
	MV	UM	UM	UM	UM						
封堵前	125.35	222	200	440	443	190	179	21.5	25.5	25.5	6.5
封堵后	116.1	220.2	201.9	452.6	450.1	193.4	195.2	22.8	36.1	35.1	8.6

表 4 大负荷振摆数据对比

	机组负荷	上导摆渡 X	上导摆渡 Y	推力摆渡 X	推力摆渡 Y	水导摆渡 X	水导摆渡 Y	上机架垂直振动	上机架水平振动	下机架垂直振动	下机架水平振动
	MV	UM	UM	UM	UM						
封堵前	166.7	194	180	396	402	155	148	21.7	23.3	28.8	7.2
封堵后	156.6	193.9	180.9	401.8	406.4	143	126.6	19.6	24.5	22.9	6.8

表 5 封堵前后瓦温数据对比

表 5 封堵前后比值数据对比						
	上导最高瓦温°C	上导最高油温°C	推力最高瓦温°C	推力最高油温°C	水导最高瓦温°C	水导最高油温°C
封堵前	46.78	23.04	30.24	24.19	45.12	43.44
封堵后	46.8	20.7	28.2	21.3	43.9	41.5

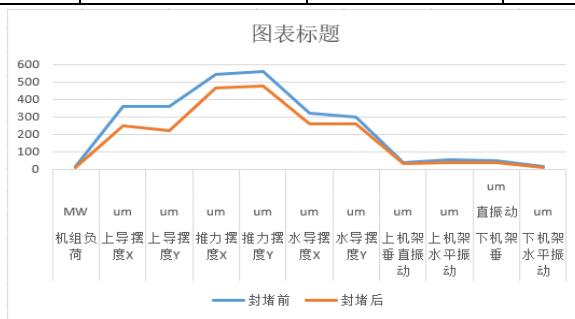


图 5 空载状态下，机组振摆略有降低

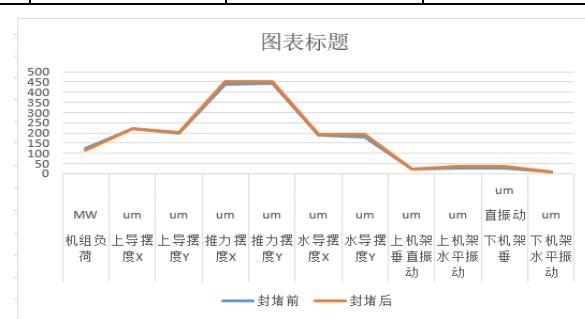


图 7 振动区上限状态下，机组振摆无明显变化

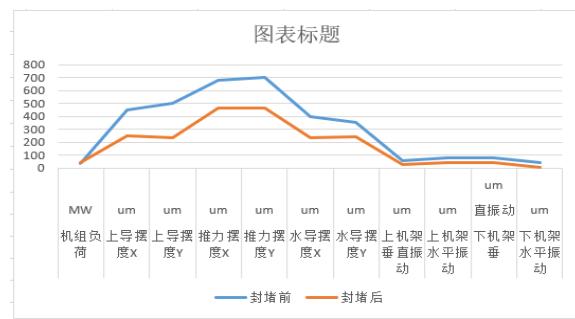


图 6 低负荷状态下，机组振摆有所降低



图 8 大负荷状态下，机组振摆无明显变化

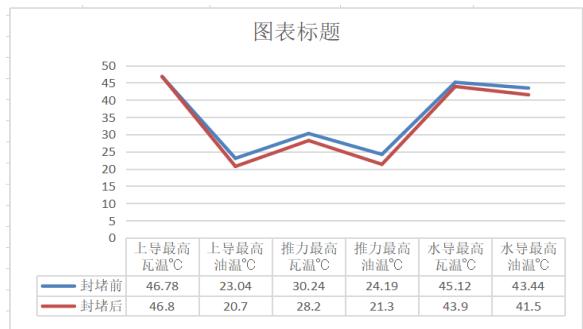


图9 封堵前后瓦温温度略有降低

现数据分析说明如下：

(1) 机组尾水补气管封堵后，其各部振摆值在各种工况下（空载、低负荷、振动区上限负荷、较大负荷），均在国家标准范围内。

(2) 机组尾水补气管封堵后，与封堵前数据比较在振动区上限负荷、大负荷工况时，其各部振摆平均值无明显变化；在空载、低负荷工况时，各部振摆平均值还有所降低。

(3) 机组尾水补气管封堵后，运行中各部轴瓦温度最大值，均在国家标准范围内。

(4) 机组尾水补气管封堵后，各部轴瓦温度最大值与封堵前比较，无明显变化。

因机组尾水补气管封堵后，机组仅有大轴补气、真空破坏阀补气途径，通过监视大轴补气情况发现：在机组高负荷（一般在 130MW 以上）运行时，机组大轴补气就会比较频繁。根据运行经验，这与其他尾水补气管未封堵机组情况类似。并无明显异常。

为了更好的监视 12F 机组尾水补气管封堵后的工况，增加开机后尾水人孔门处，倾听有无周期性敲打脉动声音要求。根据观察情况，周期性敲打脉动声音无明显异常。

5 结论与展望

本文以宝珠寺电站机组补气系统及尾水结构运行现状为研究出发点，围绕尾水管里衬撕裂故障诊断、结构优化及补气短管拆除可行性三大核心问题开展系统性研究，通过理论分析、结构改造及实证测试相结合的技术路径，形成以下主要结论：

第一，明确了尾水管里衬撕裂的核心诱因。通过对机组运行历史数据、结构应力分布及水力特性的综合分析，揭示了原尾水补气系统效率不足导致尾水管内出现周期性压力脉动，叠加里衬结构局部刚度薄弱的双重作用，是

诱发里衬撕裂故障的关键原因，为后续改造方案的制定提供了精准的理论依据。

第二，尾水管结构优化改造成效显著。针对故障诱因制定并实施了尾水管结构强化及补气系统优化方案，改造后机组在常规运行工况下，尾水管里衬结构应力水平控制在设计允许范围内，成功解决了里衬撕裂问题，实现了“保障结构安全、提升运行稳定性”的预期目标。

第三，验证了尾水补气短管拆除的工程可行性。在优化改造达标的的基础上，创新性采用“源头封堵-实测对比”的实证方法，通过对空载、低负荷、振动区上限负荷、较大负荷等典型工况机组运行参数进行监测，结果表明：封堵补气短管后，机组振摆幅值无明显变化，尾水管及转轮区域压力脉动特性无显著恶化，且系统运维成本降低约，同时消除了短管连接部位的潜在故障隐患，为同类电站补气短管拆除提供了直接的工程实践支撑。

在新能源大规模并网的能源结构转型背景下，我国水电站的功能定位已从传统的“基荷发电”向“调峰填谷、灵活调频”的综合能源调节方向转变，宝珠寺电站作为区域重要的调峰电站，其水轮机运行工况呈现出“水头波动范围扩大、负荷变幅加剧、运行时间碎片化”的显著特征，原设计转轮及尾水系统已难以适配当前“宽工况、高变幅”的运行需求，主要表现为变负荷过程中振动波动幅值增大、过流部件气蚀加剧等问题。基于此，提出以下展望：一是开展尾水系统与转轮的协同优化技改。二是构建基于运行大数据的状态预警体系。三是拓展多能互补场景下的适配性研究。

【参考文献】

- [1] 刘大恺.水轮机[M].北京:中国水利水电出版社,2003.
- [2] 于兰阶.水轮发电机组的安装与检修[M].北京:水利电力出版社,1992.
- [3] 陈秀芝.水轮发电机机械检修[M].北京:中国电力出版社,2009.
- [4] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局.水轮发电机组安装技术规范 GB/T8564-2003[S].北京:中华人民共和国国家标准,2003:2-3.

作者简介：尤军波（1986.2—），毕业院校：河北工程大学，所学专业：热能与动力工程，当前就职单位：宝珠寺水力发电厂，职务：工程管理部副主任，职称级别：动力工程师。