

水轮机过流部件的修复技术与研究

车成龙

大唐甘肃发电有限公司碧口水力发电厂，甘肃 陇南 746412

[摘要]水轮机是水力发电系统里极为关键的动力设备，其过流部件像转轮、导叶、蜗壳等这些关键部分，在复杂的水力条件之下长期运转，往往受到空蚀、磨损还有腐蚀相互交织作用所产生的较为严重的损伤，进而使得机组的效率有所下滑，运行的稳定性也降低了。此项研究全面且细致地剖析了水轮机过流部件出现的主要损伤类型以及这些损伤形成的内在机理，着重对堆焊修复、热喷涂技术以及激光熔覆等当下主流的修复办法的工艺特性、适用的具体范围还有技术方面的经济性展开了深入探讨，并且从多个不同维度对修复层的性能评价指标体系、质量把控的方法以及在长期运行过程中所具备的耐久性都做了较为详尽的阐述。

[关键词]水轮机；过流部件；空蚀损伤；磨损机制；修复技术

DOI: 10.33142/hst.v8i10.18068

中图分类号: TK730

文献标识码: A

Repair Technology and Research on Overcurrent Components of Hydraulic Turbines

CHE Chenglong

Bikou Hydropower Plant of Datang Gansu Power Generation Co., Ltd., Longnan, Gansu, 746412, China

Abstract: The water turbine is an extremely critical power equipment in the hydroelectric power generation system. Its flow components, such as the impeller, guide vanes, volute shell, etc., operate for a long time under complex hydraulic conditions and are often subjected to severe damage caused by the interweaving of cavitation, wear, and corrosion, resulting in a decrease in the efficiency and stability of the unit. This study comprehensively and meticulously analyzed the main types of damage that occur in the overcurrent components of water turbines, as well as the underlying mechanisms of these damages. It focused on in-depth exploration of the process characteristics, specific scope of application, and technical economy of mainstream repair methods such as welding repair, thermal spraying technology, and laser cladding. It also provided a detailed explanation of the performance evaluation index system, quality control methods, and durability of the repair layer from multiple dimensions during long-term operation.

Keywords: water turbine; overcurrent components; cavitation damage; wear mechanism; repair technology

引言

近年来，我国西部地区虽然水资源十分丰富，而且水势落差也很大，但是由于经济不发达，并没有很好地对西部地区的水利资源进行有效的开发利用。进入新时代后，为了西部的发展，国家采用了将西部的水电资源向东部地区输送的办法。但由于西部水流资源具有高泥沙含量的特点，在水力发电厂，如果频繁地更换或者检修水轮机部件会造成整个电网不能正常运行，导致经济损失。随着我国环保要求的不断提高，开展长效、绿色、高能的水电过流部件防护措施迫在眉睫。对于高流速、高泥沙环境下对水轮机过流部件的磨损问题，采取相应的防护措施，减少磨损带来的各种问题，延长水轮机的寿命、提高效率。

1 水轮机过流部件的损伤类型与成因分析

水轮机过流部件于复杂的水力状况下持续运转，其损伤主要呈现空蚀以及磨损这两种类型，并且这两类损伤常常互相融合、一同发挥作用，使得材料失效的进程明显加快。

1.1 空蚀损伤

空蚀这一现象产生的原因在于，当水流中出现局部压力比饱和蒸汽压还要低的情况下，就会形成空泡。而之后，

这些空泡在高压区域发生溃灭，进而会产生强度高达数百兆帕的冲击波，同时还会形成高速微射流，这些会对过流表面不断地进行冲击，最终导致材料出现损失。像水轮机转轮叶片出口边还有导叶头部这类地方，其流速相对较高，并且压力变化也十分剧烈，所以特别容易出现空蚀破坏的情况。从宏观方面来看，空蚀损伤表现为材料表面出现凹坑、蜂窝状的孔洞，甚至还会出现大面积的剥落现象。而在微观层面，它还会伴随着加工硬化层的出现，以及裂纹的萌生与扩展等诸多特征。这些损伤一方面会改变流道原本的设计型线，另一方面还会增加水力损失，甚至还可能引发机组出现振动以及噪声等问题，在情况严重的时候，机组甚至需要停机来进行检修^[1]。空蚀的形成和水流的流速、压力分布状况、部件型线的设计情况以及材料自身所具备的抗空蚀性能都有着极为密切的关系。中国水力发电工程会所发布的相关研究报告表明，我国的多座水电站都存在着程度不一的空蚀问题，在高水头电站当中，这一问题的表现更是格外突出。

1.2 磨损与冲蚀损伤

磨损主要源于水流中夹带的泥沙、砾石等固体颗粒对

过流部件表面产生的机械撞击以及微观切削作用,这种情况在多泥沙河流电站里较为常见。依据颗粒运动的方式以及作用原理方面的差异,磨损能够划分成冲刷磨损、撞击磨损还有磨粒磨损等多种不同的形式,在实际的运行过程中,往往是多种磨损机制同时存在的。过流表面在长时间受到磨粒的作用之下,会出现厚度变薄、表面粗糙度增大的情况,甚至还会产生宏观变形,这会使得水轮机的水力效率大幅度降低。冲蚀损伤更多地和水流本身所携带的能量有着关联,高流速的水流针对材料表面所产生的机械作用,再加上有可能诱发出来的化学腐蚀,这两者共同促使部件出现失效的情况,这种损伤在含沙水流的条件下表现得格外突出。根据中国水利水电科学研究院所获取的观测数据来看,黄河上游部分水电站水轮机过流部件每年的磨损量最高能够达到3~5mm,这对机组的正常运行造成了极为严重的影响。

2 常用修复技术方法

为了使损伤部件的外形尺寸得以恢复,并且让其表面性能有所提升,在当下的实际操作当中,堆焊、热喷涂以及激光熔覆等多种多样的修复技术得到了广泛的应用。而这些不同的方法,各自都有着不一样的适用条件以及各不相同的工艺特点,所以得依据具体的损伤状况以及经济性方面的要求来做出合理的挑选。

2.1 堆焊修复技术

堆焊技术乃是借助熔敷焊接材料于部件表面,进而形成有一定厚度以及特定性能的熔覆层,此乃实现局部尺寸得以恢复以及表面获得强化的一种传统方式。其中,手工电弧堆焊还有钨极氩弧堆焊这两种方法,在实际应用当中是比较常见的,它们所使用的设备相对简单,而且操作起来也颇为灵活,尤其适合在现场开展修复作业,对于那些尺寸偏大的部件来说更是如此^[2]。不过,在堆焊的过程中,热输入的量往往比较大,这就容易引发工件出现变形的情况,同时还会导致残余应力有所增加,热影响区的显微组织也会发生变化,甚至有可能会产生裂纹,或者在后续使用过程当中出现剥落的现象。近些年来,随着相关技术的不断开发,像低热输入脉冲焊以及冷金属过渡这类技术已经逐步发展起来,这些新技术在很大程度上有效地缓解了之前所存在的那些问题,从而给堆焊修复带来了全新的工艺方面的选择。依据国内某一家大型水电维修企业所出具的技术报告来看,该企业在对转轮叶片进行修复时采用了新型药芯焊丝来进行堆焊操作,经过这样的处理之后,其使用寿命相比于采用传统焊条所达到的效果而言,能够提高百分之三十以上。

2.2 热喷涂技术

热喷涂是借助热源把喷涂材料加热到熔融或者半熔融的状态,之后再以高速喷射的方式将其沉积到经过相应处理的基体表面,进而形成涂层。该技术涵盖了火焰喷涂、电弧喷涂以及高速氧燃料喷涂等多种不同的工艺,而每一种方法都有着自身特定的适用场景以及技术方面的特点。

热喷涂层有着孔隙率相对较高的情况,并且其与基体主要是以机械结合的方式来实现的,不过其施工时的温度是比较低的,工件出现的热变形程度也较小,而且涂层材料可供选择的范围是比较广泛的,能够用于制备耐磨、抗空蚀以及防腐蚀等类型的涂层。为了提升涂层的结合强度以及致密性,通常需要配套去做重熔或者是封孔处理等方面的工作,这在一定程度上使得工艺的复杂性有所增加。依据中国表面工程协会所做的相关统计来看,在水轮机过流部件的修复工作当中,热喷涂技术的应用比例大概占到了全部修复工作量的百分之二十五左右,它无疑是一种极为重要的表面工程技术手段。

2.3 激光熔覆技术

激光熔覆技术把高能激光束当作热源,让同步送来的合金粉末或者丝材和基体表面的薄层一同熔化并且快速凝固,进而形成与基体冶金结合的熔覆层。激光熔覆所涉及的热影响区较为狭窄,工件出现的变形情况较少,其涂层组织呈现出细小且均匀的状态,结合强度也相对较高,特别契合那些对精度以及性能有着较高要求的修复情形。虽然设备投入以及维护方面的成本颇高,不过激光熔覆技术在修复水轮机那些关键的过流部件时,展现出了颇为突出的优势,当下已然成为研究以及应用领域中的热点所在。通过对激光工艺参数加以优化,同时对粉末成分做出相应调整,能够进一步对熔覆层的抗空蚀性能以及耐磨损性能予以改善^[3]。国内有某研究团队专门针对水轮机转轮研发了激光熔覆合金粉末,凭借这一成果,修复之后的抗空蚀性能得以提高两倍多,此项技术也已成功在多个大型水电站的实际维修工作当中得到运用。

2.4 其他修复与强化方法

除上述所提及的主要技术之外,电镀、化学镀、复合轧制以及高分子复合材料衬护等一系列方法,也会在特定的一些条件下被运用到水轮机过流部件的修复工作以及防护事宜当中。就好比说,电镀硬铬这种方式,其能够在相关表面打造出具备高硬度特性的镀层,进而对抗空蚀性能起到改善的作用,不过它同时也存在着环境污染方面的诸多问题;通过超音速火焰喷涂所制备而成的碳化钨涂层,自身拥有着极为出色的耐磨性能,并且已经成功地在水轮机抗磨板、迷宫环等诸多部件上得到了实际的应用。在着手去选择具体的修复方法之时,务必要全面且细致地考量诸如损伤的具体类型、部件所采用的材质情况、实际的运行条件以及成本与效益等方面的诸多因素,通常而言,仅仅依靠单一的技术往往是难以达成理想修复效果的,很多时候都需要将多种不同的技术相互配合起来一同使用才行。在国内的某一规模颇为可观的水电站开展修复工作的过程当中,其采用了热喷涂作为打底操作,然后再结合激光熔覆来处理表面,从而形成了一种复合工艺,最终收获了相当不错的技术经济方面的效益。

3 修复效果评估

对修复完成之后的部件展开科学且系统的成效评估,

这无疑属于确保该部件能够安全并可靠地运行的一个极为关键的环节。就评估所涉及的内容而言，其囊括了修复层的基本性能状况、工艺方面的质量情况以及长期的耐久性表现等诸多不同方面。并且，与之相应地，还需要去着手建立起一套完整的评价体系，同时制定出相关的技术标准。

3.1 修复层性能评价指标

对修复层性能加以评价时，往往会涵盖力学性能、微观组织以及抗环境损伤能力等诸多指标。就常见的力学性能来讲，这其中便包含了涂层和基体的结合强度、自身所具备的硬度、韧性还有残余应力的状态等情况；在对微观组织展开分析的时候，那么主要会去关注涂层的均匀程度、缺陷的分布状况以及界面的结合情形等方面；抗空蚀以及耐磨性能要想知晓其具体状况，那就得依靠标准化的实验来开展测试工作，就好比利用振动空蚀实验机以及磨粒磨损试验机所获取的数据，就可以实现对不同修复工艺优劣情况的定量比较^[4]。除此之外，修复层和基材之间的匹配性，像热膨胀系数、电化学电位等等这些方面，同样也需要被纳入到评价体系当中，如此一来才能有效防止出现电化学腐蚀或者界面失效之类的状况。参照国内某一家检测机构所出具的测试报告来看，运用激光熔覆技术来对水轮机部件加以修复之后，其结合强度能够达到传统堆焊技术所达成强度的两倍还多，由此也就展现出了极为出色的机械性能。

3.2 质量控制与工艺优化

修复过程中的质量把控，乃是确保涂层性能维持稳定且使用起来更为可靠的极为关键之处。这一质量把控涵盖了诸多环节，像工艺参数的监控、无损检测以及后续的机械加工等等。运用超声检测、渗透检测这类手段，能够颇为有效地将涂层内部的气孔、裂纹还有未结合的区域给识别出来。建立起工艺参数和涂层性能之间的映射关联，便可以对能量输入、送粉速度、扫描策略等这些关键变量予以进一步的优化处理。国内一些主要的水电维修企业，已经慢慢开始引入智能化管理系统了，借助该系统能够对修复过程展开实时的监控，并且把其中的关键数据都记录下来，这就为达成质量追溯以及工艺优化给予了强有力的支持。某一家维修企业所开发出来的工艺参数优化系统，让修复质量的合格率提高了百分之十五以上，这无疑大大提升了维修工作的技术水平。

3.3 修复后的耐久性分析

修复部件的耐久性要借助实验室加速试验以及实地运行考核相互结合的方式来展开综合评定。实验室试验能够较快地对涂层体系与工艺加以筛选，然而实际运行工况却复杂得多，水流态、泥沙含量还有运行调度方式都会对损伤速率产生影响。针对修复后的部件开展定期检测并跟踪其性能，构建寿命预测模型，这对于合理安排检修周期、降低运行风险有着重要的指导价值。诸多实践案例说明，优秀的修复工艺能让部件寿命延长超过一倍，经济效益颇为突出。依据中国电力企业联合会所发布的行业报告来看，采用先进修复技术的水轮机大修周期可以从原先的三年

延长到五年以上，这使得电站的运行维护成本大幅降低。

4 水轮机过流部件的修复技术未来研究方向

未来水轮机过流部件修复技术研究应当朝向新材料、新工艺以及智能化、绿色化等方向推进，这需要产学研用各个方面力量一同努力，以此来推动技术层面的创新以及在工程当中的实际应用。开发新型高熵合金、金属基复合材料这类高性能熔覆材料，可让修复层的综合性能得到进一步提升，在工艺层面适宜去探索增减材复合制造以及柔性机器人现场修复等先进技术，以此来提高修复精度以及适应性，把大数据和人工智能技术结合起来，去构建修复工艺决策支持系统还有寿命预测平台，能够达成修复过程的智能化管控，发展那些低能耗且低排放的绿色修复技术是契合可持续发展关键要求的，与此要强化修复技术标准以及行业规范方面的建设工作，推动技术的推广与应用，国内某研究机构当下正在着手开发的水轮机修复专家系统，将材料选择、工艺制定以及质量评估等诸多功能都集成到了一起，给修复工作给予了较为完备的技术支撑，这些研究方向有着相当重要的理论价值，并且还会为水电行业创造颇为可观的经济效益以及社会效益。

5 结语

水轮机过流部件的修复技术在保障水电设备安全、稳定且高效地运行方面起着极为重要的作用，其对于延长设备的使用寿命以及降低运行成本而言，有着不容忽视的意义。当下，像堆焊、热喷涂还有激光熔覆这类修复方法，在实际的应用当中已经取得了颇为显著的成效，然而面对那些处于更高水头以及更恶劣水质条件下的机组运行需求，依旧需要不断地去深化与之相关的基础研究以及技术创新工作。借助多学科的交叉融合以及产学研用的紧密结合方式，持续提升修复技术在可靠性、经济性以及环境友好性等方面的水准，这对于我国水电事业实现可持续发展来讲，有着十分深远的意义。在未来，需要进一步强化基础理论的研究工作，完善技术标准体系，并积极推动智能化技术的应用，以此来为我国水电设备维修行业技术的不断进步给予源源不断的动力。

[参考文献]

- [1]李琛玺.液压冲击器冲击性能的影响研究[D].甘肃:兰州理工大学,2024.
 - [2]高东玲,柴红强.基于 PumpLinx 液压破碎锤流场仿真与计算[J].液压气动与密封,2024,44(9):31-37.
 - [3]李琛玺,杨国来,李全军,等.液压冲击器系统供油压力对冲击性能的影响研究 [J]. 液压气动与密封,2025,45(3):16-22.
 - [4]张宇婷,胡波.水轮机过流部件的修复技术与研究[J].化工管理,2024(2):113-115.
- 作者简介：车成龙（1996.10—），男，毕业院校：江西水利职业学院，所学专业：电力系统及其自动化，当前就职单位：大唐甘肃发电有限公司碧口水力发电厂，职务：苗家坝水电站技术员，职称级别：助理工程师。