

水轮机转轮检修中的裂纹检测与修复技术研究

袁飞

贵州金元集团安顺水力发电厂, 贵州 安顺 561000

摘 要： 本文旨在探讨水轮机转轮检修中的裂纹检测与修复技术。水轮机作为水利发电中的关键设备，其工作稳定性直接关系到电站的安全运行和经济效益。然而，水轮机转轮叶片裂纹问题一直是该领域的重要挑战。本文分析了裂纹产生的原因，包括受力因素、泥沙损耗、超负荷工作等，然后介绍了裂纹检测技术，如超声波检测、渗透探伤等，并详细阐述了裂纹修复技术，包括磨削处理、碳弧气刨处理、全体热处理焊补等。通过这些技术手段，可以有效提升水轮机转轮的使用寿命和工作效率。

关 键 词： 水轮机；转轮检修；裂纹检测；裂纹修复

Research on crack detection and repair technology in the maintenance of water turbine runner

Yuan Fei

Anshun Hydropower Plant of Guizhou Jinyuan Group, Anshun, Guizhou 561000

Abstract： This paper aims to explore the crack detection and repair technology in the maintenance of the turbine runner. As the key equipment in water power generation, the working stability of water turbine is directly related to the safe operation and economic benefit of the power station. However, the problem of turbine runner blade crack has been an important challenge in this field. This paper analyzes the causes of crack, including stress factors, sediment loss, overload work, etc., and then introduces the crack detection technology, such as ultrasonic detection, penetration detection, etc., and expounds the crack repair technology, including grinding treatment, carbon arc gas planing treatment, all heat treatment welding repair, etc. Through these technical means, the service life and working efficiency of the turbine runner can be effectively improved.

Keywords： water turbine; wheel maintenance; crack detection; crack repair

水轮机是水利发电的核心设备之一，其转轮叶片作为关键部件，承担着将水流能量转换为机械能的重要任务。然而，由于受力复杂、工作环境恶劣等因素，转轮叶片容易出现裂纹，这不仅影响了水轮机的工作效率，还可能引发安全事故。因此，研究水轮机转轮检修中的裂纹检测与修复技术，对于保障电站的安全运行和提高经济效益具有重要意义。

一、裂纹产生的原因分析

（一）受力因素的影响

水轮机转轮叶片在工作过程中，始终置身于一个极其复杂且多变的力学环境中。它们不仅要承受来自水流的巨大冲击力，这种冲击力往往随着水流的流速、流量以及压力的变化而波动，给叶片带来持续且不均匀的负荷；同时，还要应对机械传动系统所带来的各种机械力，包括旋转时的离心力、叶片与转轮座之间的摩擦力以及因振动而产生的动态应力等。这些复杂的受力情况，无疑对水轮机转轮叶片的材料强度和结构稳定性提出了极高的要求。当水流力或机械力的强度超过叶片材料的承受极限时，叶片就可能出现局部应力集中现象。随着时间的推移，这种应力集中会逐渐累积并导致材料内部的微观结构发生变化，如晶粒错位、

微裂纹萌生等。一旦这些微裂纹扩展到一定程度，就会在叶片表面或内部形成可见的宏观裂纹。因此，受力因素是影响水轮机转轮叶片裂纹产生的主要原因之一，必须在水轮机设计和运行维护过程中给予高度重视^[1]。

（二）泥沙对转轮的损耗

在自然界的水体中，往往含有一定量的泥沙和其他杂质。当这些含有泥沙的水流通过水轮机时，泥沙颗粒会与转轮叶片发生频繁的碰撞和摩擦。这种物理作用不仅会导致叶片表面的材料逐渐磨损，还会在叶片表面形成微小的划痕和凹坑。随着时间的推移，这些微小的划痕和凹坑会逐渐扩大和加深，从而进一步加剧叶片的磨损程度。同时，由于泥沙颗粒的硬度和形状各异，它们在与叶片碰撞时还可能产生冲击力，导致叶片局部受到较大的应力。这种应力在叶片内部积累，最终可能引发裂纹的产生^[2]。此

作者简介：袁飞（1991.09—），男，汉族，贵州省遵义市人，大专，助理工程师，研究方向：水轮发电机组检修。

外，泥沙的沉积也可能对叶片造成不利影响。沉积在叶片表面的泥沙会增加叶片的重量和负荷，导致叶片更容易出现疲劳和损伤。因此，泥沙对转轮的损耗是水轮机裂纹产生的一个重要原因，需要采取有效的措施来减少泥沙对叶片的磨损和冲击。

（三）超负荷工作

在追求高效能源利用和最大化发电量的背景下，水电站有时会选择让水轮机在超负荷状态下运行。这种超负荷工作模式虽然能够短期内提升电站的工作效率，但却对水轮机转轮叶片造成了极大的压力。超负荷运行时，水轮机转轮叶片需要承受比设计值更高的水流冲击力和机械应力。这些额外的应力超出了叶片材料的正常承载范围，导致叶片内部微观结构发生不可逆的变化，如晶粒间滑移、材料疲劳等。随着时间的推移，这些微观损伤逐渐累积，最终在叶片表面或内部形成宏观裂纹。此外，超负荷工作还可能加速叶片的磨损和老化过程，进一步降低其使用寿命^[3]。因此，虽然超负荷运行能够带来短期的经济效益，但从长远来看，它会对水轮机造成严重的损害，甚至引发安全事故。因此，水电站应合理规划运行计划，避免水轮机长时间处于超负荷状态。

二、裂纹检测技术

（一）超声波检测

超声波检测是一种非破坏性检测技术，广泛应用于各种工业领域的裂纹检测中。其原理是利用超声波在介质中传播时遇到不同界面会产生反射、折射和波形转换等特性，来检测工件内部的缺陷。在水轮机转子叶片的裂纹检测中，超声波探伤方法因其对裂纹等面积型缺陷的高检出率而备受青睐。特别是对于铸钢制的水轮机转子叶片，由于其厚度较大且内部结构复杂，传统的检测方法往往难以达到理想的检测效果。而超声波检测则能够穿透较厚的工件，准确检测出叶片内部的裂纹情况。在实际操作中，检测人员通常会先使用低频探头对叶片进行初步检测，以大致确定裂纹的位置和范围。随后，再使用高频探头对疑似裂纹区域进行更精确的定量检测，以获得裂纹的具体尺寸和形状等信息。这种方法不仅提高了检测的准确性，还为后续的修复和维护工作提供了有力的支持^[4]。

（二）渗透探伤

渗透探伤作为一种传统的无损检测技术，因其方法简单易行、结果直观明了而广泛应用于各种工业检测中。该方法主要利用特定的渗透剂，如荧光渗透剂或着色渗透剂，对工件表面进行涂覆。当渗透剂接触到工件表面的开口缺陷（如裂纹、气孔等）时，会迅速渗入缺陷内部。在水轮机等大型和不规则形状工件的裂纹检测中，渗透探伤技术展现出了独特的优势。检测人员只需将渗透剂均匀涂覆在工件表面，等待一段时间后，使用清洗剂去除表面多余的渗透剂，再施加显像剂。这样，缺陷内部的渗透剂就会在显像剂的作用下显现出来，形成清晰的缺陷图像。然而，值得注意的是，渗透探伤方法只能检查表面开口的缺陷，对于埋藏较深或闭合的裂纹则无法有效检测。因此，在实际应用中，检

测人员需要根据工件的具体情况和检测要求，选择合适的检测方法和工具，以确保检测的准确性和可靠性^[5]。

三、裂纹修复技术

（一）磨削处理与碳弧气刨处理

在水轮机转轮叶片的裂纹修复过程中，磨削处理和碳弧气刨处理是两种常用的方法。这两种方法的选择主要取决于裂纹的大小和深度。对于较小的裂纹，磨削处理是一种高效且经济的选择。检测人员可以使用专业的磨削工具，如砂轮或磨光片，对裂纹区域进行精细的打磨。通过逐层去除裂纹周围的材料，可以有效地消除裂纹并恢复叶片表面的平整度。这种方法不仅操作简单，而且对叶片材料的损伤较小。然而，对于较大的裂纹，特别是那些深度较大的裂纹，磨削处理可能无法满足要求。此时，需要采用碳弧气刨处理方法。这种方法利用高温的碳弧来熔化并去除裂纹及其周围的材料。通过多次碳弧气刨处理，可以逐步消除裂纹并形成相对平滑的修复面^[6]。虽然这种方法对叶片材料的损伤较大，但它在处理大型裂纹时具有更高的效率和可靠性。

（二）整体热处理焊补

整体热处理焊补技术是一种高效且可靠的裂纹修复方法，尤其适用于小型水轮机转轮的裂纹修复。在进行补焊时，技术人员会采用常规的焊接技术，对裂纹区域进行精确的焊接修补。这一过程不仅要求焊接技术熟练，还需要对焊接参数进行严格控制，以确保焊接质量和修补效果。完成焊接后，为了进一步提升修补区域的金属结构机能，并减小焊接过程中产生的残留应力，技术人员会对整个转轮进行热处理。热处理过程包括加热、保温和冷却等步骤，通过这些步骤可以有效地改善修补区域材料的微观结构，提高其力学性能和抗疲劳性能。值得注意的是，整体热处理焊补方法虽然效果显著，但其操作复杂且成本较高，因此更适用于小型转轮的裂纹修复^[7]。对于大型转轮或裂纹情况较为复杂的转轮，可能需要考虑其他更为适合的修复方法。

四、裂纹修复工艺的精细性

（一）选择抗裂性能好的焊材

在水轮机转轮叶片的裂纹修复工艺中，焊材的选择扮演着举足轻重的角色。由于水轮机转轮叶片长期在恶劣环境下工作，既要承受巨大的水流冲击力，又要应对复杂的机械应力，因此，选择抗裂性能，尤其是抗疲劳损伤性能卓越的焊材，是确保修复后叶片强度和耐久性的关键。抗裂性能好的焊材在焊接过程中能够有效抑制裂纹的产生和扩展，这对于修补区域的完整性和稳定性至关重要^[8]。同时，这些焊材还具备出色的力学性能和抗疲劳性能，能够在长期运行中持续承受复杂的水流力和机械力的作用，从而确保叶片的可靠性和安全性。在选择焊材时，技术人员必须综合考虑叶片的材质、裂纹的类型和位置，以及修复工艺的具体要求。通过深入分析和比较，选择出与叶片材料具有良好相容性和匹配性的焊材，以确保焊接接头的质量和性能。科学合理的焊

材选择不仅能够提高裂纹修复的质量和效果，还能在水轮机转轮叶片的长期稳定运行提供有力保障。

（二）清除干净所有缺陷

在进行水轮机转轮叶片的裂纹修复时，仅仅关注裂纹本身的处理是远远不够的。为了确保修复后的叶片能够恢复并超越原有的强度和耐久性，技术人员必须秉持严谨细致的态度，彻底清除掉坡口边缘的所有其它潜在缺陷。这些缺陷，无论是微小的裂纹、夹渣还是气孔，都可能在未来的运行中成为安全隐患，对叶片的整体性能构成威胁。因此，在处理裂纹的同时，技术人员必须利用放大镜、内窥镜等检测工具，对坡口边缘进行全方位的细致检查，确保不遗漏任何一处可能的缺陷。清除缺陷的过程需要借助专业的工具和设备，如砂轮、磨光机等。技术人员需要运用这些工具对坡口边缘进行精细的打磨和修整，直至所有潜在的缺陷都被彻底消除。这一步骤虽然耗时费力，但它是确保修复质量的关键所在，为后续的焊接和热处理工作奠定了坚实的基础^[9]。只有经过这样严格的处理，修复后的叶片才能拥有足够的强度和可靠性，满足长期运行的要求。

（三）控制焊接缺陷

在裂纹修复的焊接过程中，对焊接参数的严格控制是确保修复质量的关键环节。焊接参数，包括焊接电流、电压、焊接速度以及焊接温度等，每一个细节都直接影响着焊缝的最终质量和性能。为了避免在焊接过程中产生新的缺陷，技术人员需要对这些

焊接参数进行精确无误的设定，并在整个焊接过程中进行严格的监控和调整。通过细致地调整焊接电流和电压的大小，技术人员可以精准地控制焊缝的熔深和熔宽，从而确保焊缝具有足够的强度和良好的密封性。同时，合理的焊接速度和温度也是避免焊缝产生裂纹、夹渣、气孔等缺陷的重要因素。技术人员需要根据焊接材料的特性和焊接工艺的要求，选择适当的焊接速度和温度，以确保焊缝的成形质量和性能。此外，在焊接过程中，技术人员还需要保持高度的警惕性，密切关注焊缝的成形情况，及时发现并处理任何异常现象^[10]。通过严格的焊接参数控制和精细的焊接操作，技术人员可以确保焊缝的质量达到设计要求，从而提高裂纹修复的整体效果，为水轮机转轮叶片的长期稳定运行提供有力保障。

五、结论

水轮机转轮叶片裂纹问题是水利发电领域的重要挑战。本文通过分析裂纹产生的原因，介绍了裂纹检测技术和修复技术，为水轮机转轮检修提供了科学依据和技术支持。通过合理的裂纹检测和修复，可以有效提升水轮机转轮的使用寿命和工作效率，保障电站的安全运行和经济效益。未来，随着技术的不断进步，裂纹检测和修复技术将更加智能化和高效化，为水利发电事业的发展提供更有力的保障。

参考文献

- [1]高福林,王兴光.盐锅峡水电站水轮机转轮磨蚀修复技术应用[J].水电站机电技术,2023,46(10):67-69.DOI:10.13599/j.cnki.11-5130.2023.10.021.
- [2]张浩.赵山渡水电站灯泡贯流式水轮机检修技术[J].水电站机电技术,2023,46(06):110-112.DOI:10.13599/j.cnki.11-5130.2023.06.036.
- [3]赵杭.基于流固耦合的超高水头冲击式水轮机转轮寿命预测研究[D].重庆科技学院,2022.DOI:10.27854/d.cnki.gcqkj.2022.000033.
- [4]毛伟杰.水轮机转轮故障诊断研究与应用系统集成[D].华中科技大学,2022.DOI:10.27157/d.cnki.ghzku.2022.002931.
- [5]岳林林.混流式水轮机转轮叶道涡流动特性及结构动力学分析[D].华中科技大学,2022.DOI:10.27157/d.cnki.ghzku.2022.005694.
- [6]范鹏飞,杨庆山,占鹏.碳化硅加热器在水电站水轮机转轮拆装中的应用[J].云南水力发电,2022,38(04):213-215.
- [7]冯亚君.混流式水轮机转轮下环螺旋密封流动特性及其对机组性能的影响研究[D].西安理工大学,2021.DOI:10.27398/d.cnki.gxalu.2021.000556.
- [8]何严希.混流式水轮机空化流动特性与流固耦合研究[D].华中科技大学,2021.DOI:10.27157/d.cnki.ghzku.2021.003470.
- [9]袁帅.多泥沙河流水电站水轮机转轮内部流动及磨损研究[D].西华大学,2019.DOI:10.27411/d.cnki.gscgc.2019.000008.
- [10]庞希斌,彭硕群,祝加勇,等.水泵水轮机转轮裂纹成因分析及处理[J].水电站机电技术,2019,42(02):51-54.DOI:10.13599/j.cnki.11-5130.2019.02.016.