

水轮机转轮空蚀损伤修复技术及应用实例分析

李亚洲 高 亢 金 洋

黄河水利水电开发集团有限公司 河南 郑州 450000

摘 要：水轮机转轮是水轮机核心部件，其空蚀损伤会降低效率、缩短寿命、增加维护成本。修复技术包括传统补焊、喷涂修复技术，以及新型堆焊复合、激光、高分子材料修复技术。不同修复技术各有优缺点，适用于不同场景。通过某水电站补焊修复、某抽水蓄能电站激光修复实例，分析了技术应用效果。同时，指出修复技术存在耐久性、成本效益、标准化等问题，并提出相应解决对策。

关键词：水轮机转轮；空蚀损伤；修复技术；应用实例

1 水轮机转轮及空蚀损伤原理

1.1 水轮机转轮结构与工作原理

水轮机转轮作为水轮机的核心部件，其结构形式多样，常见的有混流式、轴流式、贯流式等。以混流式水轮机转轮为例，它主要由上冠、下环和叶片组成。上冠位于转轮的上部，起到连接和支撑的作用；下环则位于下部，与上冠共同构成转轮的流道边界；叶片是转轮的关键部分，其形状和角度经过精心设计，直接影响水轮机的效率和性能。水轮机转轮的工作原理基于水流能量与机械能之间的转换。当具有一定压力和流速的水流进入水轮机转轮时，水流对叶片产生作用力，推动转轮旋转。在这个过程中，水流的压力能和动能转化为转轮的机械能，进而带动发电机发电。不同类型的转轮适应不同的水头和流量条件，例如轴流式转轮适用于低水头、大流量的水电站，而混流式转轮则在中高水头水电站中应用广泛。

1.2 空蚀损伤产生机理

空蚀是水轮机转轮常见的损伤形式之一，其产生机理较为复杂。当水流通过水轮机转轮时，由于叶片形状、水流速度和压力的变化，水流中可能会产生局部低压区^[1]。当低压区的压力低于水的饱和蒸气压时，水会发生汽化，形成微小的气泡。这些气泡随着水流运动到高压区时，会迅速溃灭。气泡溃灭的瞬间会产生极高的压力冲击波和微射流，对转轮表面造成反复的冲击和破坏。水中的杂质、气体以及水流的不稳定流动等因素也会加剧空蚀的发生。

1.3 空蚀损伤对水轮机的危害

空蚀损伤对水轮机的危害是多方面的。首先，空蚀会导致转轮表面出现麻点、孔洞甚至蜂窝状的损伤，破坏转轮的几何形状，使水流的流动状态恶化，降低水轮机的效率。据统计，严重的空蚀可使水轮机效率降低5%-

10%，从而增加发电成本。其次，空蚀损伤会缩短水轮机的使用寿命，转轮表面的损伤会不断扩展，导致转轮的强度和刚度下降，增加转轮发生疲劳破坏的风险。一旦转轮出现严重的疲劳裂纹，可能会导致转轮破裂，引发严重的安全事故。另外，空蚀损伤还会增加水轮机的维护成本。为了修复空蚀损伤，需要定期停机进行检修和修复，这不仅会影响水电站的发电效益，还会增加人工、材料和设备等方面的费用。

2 水轮机转轮空蚀损伤修复技术

2.1 传统修复技术

2.1.1 补焊修复技术

补焊修复技术作为水轮机转轮空蚀损伤修复领域里一种应用颇为广泛且历史悠久的传统方法，发挥着重要作用。其核心原理在于借助专业的焊接设备，将与转轮材料成分相同或极为相近的焊材加热至熔化状态，随后精准地填充到转轮的损伤部位。通过这一过程，使原本因空蚀而受损的部位重新恢复至原有的形状和尺寸，从而保障水轮机转轮能够继续正常运行。补焊修复技术具备诸多显著优点，从操作层面来看，它相对简单易行，不需要过于复杂的设备和繁琐的流程，普通技术人员经过一定培训即可上手操作。在成本方面，由于设备和材料相对常见，价格较为亲民，使得整体修复成本较低。而且，修复后的转轮强度较高，能够承受较大的水流冲击和机械载荷。然而该技术也存在不容忽视的缺陷。补焊过程中，由于局部高温加热，会产生较大的热应力，这极易导致转轮发生变形，甚至产生裂纹，严重影响转轮的结构完整性。补焊层与基体金属的结合性能有时不够理想，在长期受到水流冲刷和复杂应力作用后，容易出现剥落现象，降低修复效果。补焊修复对操作人员的技能要求较高，焊接质量难以保证完全一致，不同操作人员修复的效果可能存在较大差异。

2.1.2 喷涂修复技术

喷涂修复技术是借助特定设备,将金属或非金属粉末转化为特定状态并喷射到转轮损伤表面来实现修复的方法。具体操作是利用喷枪把粉末加热至熔化或半熔化状态,再以高速喷射到转轮损伤表面,形成具有一定厚度和性能的涂层,以此修复损伤。常用的喷涂方法有火焰喷涂、电弧喷涂和等离子喷涂等,不同方法在加热方式、喷涂速度和涂层质量上各有特点^[2]。该技术优点突出,它能在不破坏转轮整体结构的前提下修复损伤部位,避免了大规模拆卸和加工带来的高成本与长时间损耗,修复效率较高。而且,可根据实际需求选择不同材料形成喷涂层,改善转轮表面的耐磨、耐腐蚀等性能,延长转轮使用寿命。喷涂修复技术也存在一些缺点,喷涂层与基体金属的结合强度相对较低,当受到较大冲击或交变载荷时,涂层易脱落,影响修复的持久性。另外,喷涂过程中会产生大量粉尘和噪音,这不仅会污染环境,还可能对操作人员的健康造成危害。

2.2 新型修复技术

2.2.1 堆焊复合修复技术

堆焊复合修复技术是一种将堆焊工艺与复合材料巧妙结合的创新型修复方法。在修复过程中,首先会在转轮的损伤部位堆焊一层过渡层,这一过渡层起到了至关重要的作用,它能够显著提高堆焊层与基体金属的结合强度,确保后续堆焊的稳定性。之后,再堆焊一层具有特殊性能的复合材料层。复合材料层可以根据实际需求进行定制,赋予转轮表面更好的耐磨、耐腐蚀和抗空蚀性能,从而大大提升转轮在复杂工作环境下的适应能力。堆焊复合修复技术具有诸多显著优点,其修复质量高,能够使转轮表面的损伤得到彻底修复,恢复其原有的性能。结合强度好,过渡层和复合材料层与基体金属之间形成了牢固的结合,不易出现脱落等问题。性能可调性强,可以根据不同的工作条件和使用要求,选择合适的复合材料和堆焊工艺参数,使修复后的转轮表面性能得到显著提升。然而,该技术也存在一些局限性,它的设备和工艺要求较高,需要专业的堆焊设备和熟练的操作人员,这无疑增加修复的成本和难度。由于设备和材料的特殊性,成本相对较高,限制其在大规模应用中的推广。另外,该技术需要专业的技术人员进行操作,对技术人员的专业素养和经验要求较高。

2.2.2 激光修复技术

激光修复技术是利用高能量密度激光束作热源,对水轮机转轮空蚀损伤部位快速、精确修复的先进技术。修复时,激光束能迅速熔化修复材料并精准填充至损伤

处。该技术优点显著:加热速度快,能在短时间内让修复材料熔化,减少对转轮其他部位的热影响;热影响区小,可有效避免因过热导致的转轮变形与性能下降;修复精度高,能精确控制修复材料的填充位置与形状,使修复后转轮表面质量高、性能稳定;通过精确控制激光参数和修复材料添加量,可实现修复层与基体金属的良好冶金结合,确保修复层牢固可靠;还能实现自动化操作,大幅提高修复效率与质量一致性,降低人为因素对修复质量的影响。不过,激光修复技术也有不足:激光修复设备价格昂贵,前期投入成本高;设备维修成本也较高,且需专业技术人员维护保养;对操作环境要求严格,需在无尘、恒温等特定环境下进行,这增加了修复的难度与成本。

2.2.3 高分子材料修复技术

高分子材料修复技术是一种利用高分子材料独特的粘结性和可塑性,对水轮机转轮空蚀损伤部位进行修复的方法。常用的高分子材料有环氧树脂、聚氨酯等,这些材料具有良好的粘结性能和一定的机械强度。修复时,先将高分子材料与适量的固化剂按照一定比例混合均匀,然后通过涂抹的方式将其填充到损伤部位。经过一定时间的固化后,形成具有一定强度和性能的修复层,起到密封和保护的作用。高分子材料修复技术具有操作简单、修复速度快、成本低等优点。它不需要复杂的设备和专业的技术,普通工人经过简单培训即可操作。而且,修复过程相对较快,能够在短时间内完成对损伤部位的修复。高分子材料也存在一些明显的缺点。其耐高温、耐磨和耐腐蚀性能相对较差,在长期运行后,尤其是在高温、高流速等恶劣环境下,可能会出现老化、脱落等现象,影响修复效果。因此该技术适用于损伤程度较轻、对修复性能要求不高的场合,对于一些重要的、运行条件恶劣的水轮机转轮,可能需要结合其他修复技术使用^[3]。

3 水轮机转轮空蚀损伤修复技术应用实例分析

3.1 实例一

某水电站的水轮机转轮在使用一段时间后,出现了较为严重的空蚀损伤,主要表现在叶片表面出现大量的麻点和孔洞,部分区域甚至出现了蜂窝状的损伤。为了恢复水轮机的正常运行,该水电站决定采用补焊修复技术对转轮进行修复。在修复过程中,首先对转轮的损伤部位进行了清理和打磨,去除表面的锈蚀和杂质。然后根据转轮的材料和损伤情况,选择了合适的焊材和焊接工艺参数。焊接过程中,采用分段跳焊的方法,以减少热应力的产生。修复完成后,对修复部位进行了无损检

测和外观检查,确保修复质量符合要求。经过一段时间的运行监测,发现补焊修复后的转轮运行稳定,效率有所提高。但是,在运行一段时间后,部分补焊层出现了轻微的剥落现象,需要进一步加强对补焊层与基体金属结合性能的研究和改进。

3.2 实例二

某抽水蓄能电站的水轮机转轮在长期运行后,也出现了空蚀损伤问题。考虑到该电站对水轮机的运行效率和可靠性要求较高,决定采用激光修复技术对转轮进行修复。在修复前,对转轮的损伤部位进行了详细的检测和分析,确定了修复方案。修复过程中,利用高精度的激光设备,精确控制激光参数和修复材料的添加量,实现了对损伤部位的快速、精确修复。修复完成后,对修复部位进行了严格的检测和评估,结果显示修复层与基体金属实现了良好的冶金结合,表面质量高,性能稳定。经过一段时间的运行考验,激光修复后的水轮机转轮运行正常,效率得到有效恢复,且未出现修复层剥落等质量问题,证明激光修复技术在抽水蓄能电站水轮机转轮空蚀损伤修复中的可行性和优越性。

4 水轮机转轮空蚀损伤修复技术现存问题与对策

4.1 现存问题

耐久性问题:修复技术在长期运行后的耐久性是一个亟待解决的问题。例如,补焊修复层在长期受到水流冲击和交变载荷的作用下,容易出现剥落现象;喷涂修复层与基体金属的结合强度不足,在复杂的工作环境下容易脱落;高分子材料修复层在长期运行后会老化,导致性能下降。这些问题不仅会影响修复效果,还会增加后续的维护成本。**成本效益问题:**修复技术的成本效益也是需要关注的重点。修复过程中涉及的材料成本、设备成本和人工成本较高,尤其是新型修复技术,如激光修复技术和堆焊复合修复技术,其设备和材料成本更为昂贵。此外,修复效果与成本之间的平衡也是一个难题,一些修复技术虽然修复质量高,但成本过高,难以在大规模应用中推广。**标准化和规范化问题:**目前,水轮机转轮空蚀损伤修复技术在标准化和规范化方面存在明显不足。缺乏统一的修复质量标准和验收规范,导致不同修复单位和操作人员的修复质量参差不齐。这不仅会影响修复效果,还会给水电站的安全运行带来隐患。

4.2 解决对策

为了提高修复层的性能和耐久性,需要加强修复材料和工艺的研发。探索新型复合修复材料,如具有高强度、高耐磨性和良好耐腐蚀性的复合材料,以及开发与之相适应的修复工艺。例如,研究新型的堆焊材料和工艺,提高堆焊层与基体金属的结合强度和抗剥落性能;开发高性能的高分子修复材料,延长其使用寿命。优化修复技术的应用流程可以降低修复成本,提高成本效益。通过技术创新,如采用自动化修复设备和工艺,提高修复效率和质量的一致性,减少人工成本。同时实现规模化应用,降低设备和材料的采购成本^[4]。还可以建立修复成本评估模型,根据不同的修复需求和条件,选择最优的修复方案,实现修复效果与成本的最佳平衡。推动行业标准的制定是规范修复技术应用的关键。相关部门和机构应组织专家制定统一的修复质量标准和验收规范,明确修复过程中的技术要求、质量指标和检测方法。建立完善的修复质量检测 and 验收体系,加强对修复过程的监督和管理,确保修复质量符合要求。通过标准化和规范化,提高水轮机转轮空蚀损伤修复技术的整体水平,保障水电站的安全稳定运行。

结束语

水轮机转轮空蚀损伤修复技术对保障水电站安全稳定运行至关重要。传统与新型修复技术各有特点与局限,需根据实际情况合理选用。通过应用实例可看出不同技术的效果差异。当前修复技术面临耐久性、成本效益、标准化等问题,需加强材料与工艺研发、优化应用流程、推动行业标准制定。未来,应持续探索创新,提升修复技术水平,以更好地满足水电行业发展需求。

参考文献

- [1]马超,苏建民.水轮机转轮体侧孔加工工艺研究[J].技术与市场,2021,28(2):150,152.
- [2]高翼.水轮机转轮安装工艺优化[J].现代制造技术与装备,2024,60(10):119-121.
- [3]史广泰,朱玉枝,刘宗库,等.导叶开度对混流式水轮机转轮应力应变的影响[J].排灌机械工程学报,2020,38(11):1119-1124.
- [4]秦承鹏,朱红波,王鹏,等.水轮机转轮叶片力学分析研究[J].热力发电,2020,49(9):58-63,86.