

多泥沙河流水轮发电机组转轮泥沙磨损机理及防护技术研究

王子文

巴彦淖尔市河套水务水电开发有限公司 内蒙古 巴彦淖尔 015000

【摘要】：研究面向多泥沙河流的常见条件，从不同工况和影响要素两方面出发，旨在分析水轮发电机组转轮泥沙磨损的具体机理，探讨与之相应的有效防护技术。综合已有文献研究成果，参考水轮发电机组泥沙磨损防护实践可知，在小流量、大流量的非设计工况以及设计工况下，泥沙磨损状况存在显著的差异。同时，沙粒粒径、泥沙浓度、沙水速度以及金属材质等，均可作为要素影响机组转轮实际遭受的泥沙磨损。由此可得出研究结论，应正视水轮发电机组转轮在多泥沙河流条件下的泥沙磨损问题，采用更具针对性的技术方法开展防护，从而确保水轮发电机组稳定运作。

【关键词】：水轮发电；多泥沙河流；转轮磨损；转轮防护

DOI:10.12417/2811-0528.26.12.048

引言

在自然条件下，河流水流大多包含固体颗粒、其他杂质和悬浮沉淀物等，而中国境内河流的泥沙含量普遍较为丰富。加之在国内早期的高度发展阶段，城市规模扩大和工业化发展致使很多河流沿岸植被覆盖率逐步降低，水土流失一度带动河流泥沙含量激增。经长年治理，水土流失问题已经初步得到控制，而河流多泥沙的现状短期内难以得到彻底的改善。多泥沙河流将会为河流沿线水轮发电机组内部器件带来泥沙磨损问题，诸如机组转轮等，加速器件老化进度，缩短机组使用寿命。由此，应深入研究机组转轮面临的泥沙磨损问题，依托其内在机理指导防护工作有序开展。

1 多泥沙河流水轮发电机组转轮不同工况泥沙磨损

为更加全面地总结水轮发电机组转轮在多泥沙河流情况下的泥沙磨损机理，应重点关注非设计工况和设计工况带来的影响，从而增进对于泥沙磨损的认知，指导后续有关泥沙磨损影响要素和防护技术的分析研究。

1.1 非设计工况

1.1.1 小流量工况

含沙水流会磨损水轮机过流部件壁面，进而影响水轮机水力性能及运行安全，应优先从小流量工况和大流量工况两方面出发，分析非设计工况下的水轮发电机组转轮泥沙磨损状况^[1]。在小流量工况下，分析转轮各叶的高流面压力分布可知，不同转轮流面的压力分布基本相似，由进水边向出水边呈渐次递减状。同时，压力值均匀分布于径向，同时在圆周方向上明显呈对称状，压力所受的径向力偏小。该工况下，泥沙浓度分布的周向性较为良好，叶片正面的头部及尾部大范围均属于泥沙浓度较高区域。而叶片背面泥沙分布更少，仅临近下环的少部分区域泥沙浓度较高。

1.1.2 大流量工况

从压力分布出发分析，该工况与另外两种工况基本相近，不同点在于流量在该工况下达到最大，使得该工况下的转轮叶片面临着更大的整体压力。该工况下，水流从转轮的进口至出口同样呈递增态势，仅整体流速达到最高，基本不会出现漩涡或叶片脱流等状况。由于流量在该工况下达到最大，转轮叶片正面泥沙浓度较高的区域明显有所增多，叶片背面临近下环处的高浓度区域近乎小流量工况，高浓度区域的面积更小。相较于另两种工况，该工况下的转轮叶片泥沙磨损更为严重。

1.2 设计工况

为了明确水轮机泥沙磨损特性，还应从设计工况出发深入分析^[2]。在设计工况下，机组转轮各页的压力分布较为均匀，实际分布情况与小流量工况下相仿。而该工况下的流量更多，故整体所受的压力更小。转轮不同流面出口处属于低压区域，尤其是长叶片背面尾部，同时该工况下的低压区域小于小流量工况。从泥沙浓度出发分析可知，设计工况下的状况近似于小流量工况，而泥沙量随着流量增加而增多。受此影响，相比于小流量工况，设计工况下转轮叶片正面泥沙浓度有所增加，特别是叶片背面临近下环区域的泥沙浓度明显增加，放大泥沙磨损的影响。

2 多泥沙河流水轮发电机组转轮泥沙磨损的影响要素

水轮发电机组转轮在多泥沙河流条件下的泥沙磨损将会受到多方面影响要素的作用，诸如沙粒粒径、泥沙浓度、沙水速度以及金属材质等，应更加深入地分析不同要素的具体影响，进一步探索泥沙磨损的机理。

2.1 沙粒粒径

在含沙水流条件下运行的水轮机,泥沙颗粒易引起过流部件材料磨损破坏,诱发不稳定流动甚至机械振动,严重影响电站的安全稳定运行及经济效益^[3]。一般而言,沙粒粒径增加将会同时致使切削和变形两种泥沙磨损的磨损量有所增加。而在流道内的沙水流动条件下,沙粒粒径增大将会减弱水流挟带沙粒运动的速度与冲击动能,减少泥沙磨损量。在转轮接近水流进口的位置,泥沙磨损更易产生冲刷作用,磨损效果更清晰。而沙水流动方向上的泥沙磨损呈现减弱状态,在更大的沙粒粒径下,磨损的实际减弱将会更为明显。以比转数 196 离心泵磨损试验为例,沙粒粒径产生的影响大致如下表所示。

表 1 比转数 196 离心泵磨损试验中沙粒粒径对磨损强度及特征的影响

粒径(mm)	磨损强度(mg/cm ² ·h)	磨损区域特征
0.05	12.3	全流道均匀磨损
0.5	28.7	叶片进口边集中冲刷
2.0	41.2	进口边严重凿坑,出口磨损减弱

2.2 泥沙浓度

在水轮发电机组转轮泥沙磨损过程中,泥沙浓度也是重要影响要素,作用于最终的磨损程度。以沙粒粒径相同为前提分析可知,沙水在不同泥沙颗粒浓度的多种情况下将会呈现出运动轨迹和磨损特性存在较大差异。随着泥沙浓度增大,机组转轮受到的泥沙磨损将会越发明显,表现出泥沙颗粒浓度对于磨损率的可观影响。而在实际的泥沙磨损范围方面,泥沙浓度增大实际可能带来的影响较为有限,最终的磨损位置并未跟随浓度增大而出现显著变化。

2.3 沙水速度

水轮机在多沙河流上运行时 would 面临十分严重的泥沙磨损问题,而沙水速度是影响泥沙磨损的关键要素,同样应深入总结分析^[4]。经数据计算分析可知,在相对固定的泥沙特性下,沙水在机组转轮内的速度越快,运动轨迹和冲击强度均会出现变化,则转轮所受的泥沙磨损程度越深。原因主要在于沙粒颗粒的单位时间冲击频次将会显著增大,带动动能传递效率同样大幅增强,从而使得更快的沙水速度将会为机组转轮带来更深的泥沙磨损深度,对流速较高区域带来尤为集中且明显的泥沙磨损问题。如泥沙浓度固定为 10kg/m³,而沙粒粒径固定为粒径 0.3mm,则沙水速度产生的影响大致如下表数据所示。

表 2 沙水速度对水轮发电机组转轮泥沙磨损的影响

流速 (m/s)	磨损深度(mm/年)	冲击动能增幅 (%)
10	1.2	基准值
20	5.8	320

30	8.3	690
----	-----	-----

2.4 金属材质

除去多泥沙河流条件下的沙水自然要素,水轮发电机组转轮的金属材质同样会对泥沙磨损的程度与效果产生较为显著的影响,应作为重要影响要素纳入分析范围,从而对机组转轮泥沙磨损形成更为全面的认知。在沙水条件相对固定的情况下,转轮金属材质的选择主要影响转轮表面在泥沙颗粒冲击下的受磨损速率,同时也会作用于泥沙磨损破坏转轮的具体方式。通过提升金属材质的韧性和材料硬度,机组转轮表面受泥沙颗粒冲击产生的微裂纹扩展速度将会降低,从而使得转轮整体的抗泥沙磨损性能显著增强,减弱泥沙磨损对于机组转轮的实际影响。

3 多泥沙河流流水轮发电机组转轮泥沙磨损的有效防护技术

针对多泥沙河流条件下的水轮发电机组转轮,实际地应用泥沙磨损防护技术时,应重点关注抗磨损设计、抗磨材料选用、制造安装保障、定向维护检修以及数据智能开发等多个方面,更加科学地确保泥沙磨损防护的最终质效。

3.1 在设计上增强机组转轮抗磨损能力

泥沙磨损的影响在水轮机的设计和参数选择中是一个不可忽视的问题,因而在设计上增强机组转轮抗磨损能力显得更为关键^[5]。在设计层面,应优先关注如何尽量避免泥沙进入水轮机组,减少水流整体的泥沙含量,而从源头出发实现针对泥沙磨损的有效防护。如周边环境条件允许,可以通过规划大型水库使得多泥沙河水所含的泥沙及早沉积,减少实际进入机组转轮的泥沙量。如条件不允许,则可尝试预设多泥沙河水沉沙地,通过预处理河水控制转轮所受的泥沙磨损程度。同时还应关注水轮机选型,综合水力发电运行过程中的水头范围、实际出力、运行需求以及过机泥沙特性等多方面因素全面考量,从而增强水轮机机组选型的适配性和针对性,确保所选水轮机转轮在设计参数层面可以适应水电站所在多泥沙河流环境。

3.2 优选抗磨材料实现有效的磨损防护

针对水轮发电机组转轮泥沙磨损实施有效防滑,还应重视并优选抗磨材料,由此实现有效的磨损防护,控制泥沙磨损可能产生的多方面影响。实际筛选抗磨材料时,应优先考虑抗磨损性能,同时综合可修复性、涂层厚度、施工可行性、涂层尺寸公差以及涂层可移除性等因素全面考量,以便确保所选抗泥沙磨损材料适配水电站实际需求,进而保障磨损防护的有效性。针对抗磨损性能,主要应关注材料在韧性、强度以及耐疲劳等方面的表现,确保其力学性能可以达到基本要求。针对机组转轮更易磨损的部分,还应兼顾抗空蚀与抗磨损,为泥沙磨

损后的修复作业创造有利条件。具体应关注更易受到泥沙磨损影响的部分,参考转轮叶片、导叶以及转轮室等具体位置的特性,在确保抗磨损性能的前提下实现更具针对性的表面防护措施。同时,泥沙磨损防护措施应在安全性、环保性等方面表现良好,尽量在更简便的操作下完成防护施工作业。

3.3 确保并提升水轮机组制造安装质量

多泥沙河流含有大量泥沙,不可避免地沿岸的水电站造成泥沙磨损破坏,严重影响水轮机寿命^[6]。因而还应确保并提升水轮机组制造安装质量,一方面确保转轮制造的精准度,另一方面通过正确安装减缓泥沙磨损对机组转轮产生的具体影响。在水轮机组制造环节,制造加工作业前的无损检测较为关键,如发现存在缺陷则应实施修复后再投入加工环节,确保制造转轮所用材料本身质量达标,从而保障机组转轮的抗泥沙磨损性能。再如针对机组转轮部件的表面,还应兼顾光洁度确保与表面粗糙度控制,减缓泥沙磨损对转轮各部件带来的负面影响。在水轮机组安装作业中,主要从严依照有关标准规范执行各作业环节,尤其应关注转轮部分的实际安装质量,确保其抗泥沙磨损性能可以达到设计参数预期。

3.4 以定向检修维护确保机组转轮运作

为确保水轮发电机组转轮的常态稳定运作,还应关注定向检修维护的价值,通过提升针对性增强检修维护成效,针对泥沙磨损实现有效防护。具体的检修实践中应参考有关标准规范的要求,重点关注机组转轮的实际运作状态,如发现运作异常应及时停止水轮机组的运行,组织技术人员检查机组转轮是否因泥沙磨损而出现故障,从而定向指定科学的检修维护方案,增强检修维护的针对性和有效性,及时在泥沙磨损所致的故障出现后实现有效的修复与处理。定向检修维护作业后,还应由负责的技术人员记录转轮在泥沙磨损下出现的故障或破坏情

况,留存检修维护记录,为后续类似故障或破坏再次发生后制定检修维护计划的过程提供明确且有效的依据。

3.5 智能化开发利用泥沙监测所得数据

通过有效地监测并分析泥沙相关数据,可以得到不同工况下泥沙磨损情况,从而进一步分析具体的磨损情况^[7]。在本地部署的人工智能支撑下,进一步智能化开发利用泥沙监测所得数据将成为可能,可以为泥沙磨损防护相关的决策提供更多依据。一方面是泥沙颗粒采样监测,应定期针对流经水轮发电机组转轮部分的水流实施采样,在专业实验室开展深入分析,连续留存可全面覆盖含沙量、沙粒粒径、泥沙成分以及泥沙形貌等数据记录。另一方面是泥沙监测所得数据的开发与利用,具体可以在本地部署人工智能模型,将上述大量数据作为训练集输入模型,实现有效的数据训练。由此,后续可以在模型中输入定期监测数据,即可经由人工智能模型预判转轮部件受泥沙磨损情况,输出对应的预判性分析结论,指导预防性检修维护工作有序开展。

4 结语

综上所述,在国家深入推进生态文明建设的新形势下,水力发电在国家能源框架内的重要性日渐凸显,属于需要重点关注并发展的能源供给方式。在水力发电实际的运作过程中,水轮发电机组是较为核心的物质基础,事关发电的稳定性和有效性。水轮发电机组所处的运作环境较为复杂,机组内关键组件更容易遭遇磨损或故障,尤其是机组转轮,更是应增强防护力度,有效延长转轮的使用寿命。在多泥沙河流的条件下,泥沙磨损对水轮发电机组转轮的负面影响较为突出,应优先由此出发增强对其机理的研究与分析,针对性采用有效的技术开展防护,确保水轮机组整体的稳定运作。

参考文献:

- [1] 黄剑峰,姚激,张蕾蕾.基于冲蚀-动网格耦合的混流式水轮机泥沙磨损演化特性研究[J].水动力学研究与进展(A辑),2024,39(2):234-243.
- [2] 王彤,李晓飞,郭鹏程,等.泥沙粒径对轴流式水轮机磨损特性的影响[J].排灌机械工程学报,2024,42(8):802-809.
- [3] 周鹏,孙淑贞,郭鹏程,等.分流叶片对混流式水轮机泥沙磨损特性影响的数值研究[J].水动力学研究与进展(A辑),2024,39(5):767-776.
- [4] 刘小兵,覃蓓,邓万权,等.冲击式水轮机泥沙磨损试验测试系统研发[J].西华大学学报(自然科学版),2024,43(3):18-24.
- [5] 陈阳,马韧韬.高水头电站水轮机泥沙磨损评估及抗磨蚀综合措施[J].水利水电工程设计,2024,43(2):48-51.
- [6] 曾心成,郭志伟,钱忠东.混流式水轮机大开度下的转轮抗泥沙磨损设计[J].中国农村水利水电,2023,(4):302-308.
- [7] 张绒.基于CFD的水轮机导叶泥沙磨损研究[J].云南水力发电,2023,39(1):224-227.