

水力机械密封结构在高含沙水流中的磨损行为研究

缪应晓

广东粤水电装备集团有限公司 广东 511356

【摘要】：水力机械被广泛地应用到水利发电、农田灌溉、水资源调配等各个领域当中，水力机械密封结构的好坏直接关系到设备运行的效率以及使用寿命。高含沙水流中，泥沙颗粒会对密封端面造成磨粒磨损、冲蚀磨损等作用，使密封性能变差，泄漏量增大，严重时还会造成设备停机故障。本文以常用水力机械接触式机械密封为研究对象，从理论分析、实验测试、实际工况调研三方面入手，探究高含沙水流特性、密封结构参数对磨损行为的影响规律，揭示磨损机理，提出相应的优化措施，为高含沙水流工况下水力机械密封结构的设计、选型及维护提供理论依据和实践参考。

【关键词】：水力机械；机械密封；高含沙水流；磨损行为；优化措施

DOI:10.12417/2811-0722.26.06.019

1 引言

目前对于机械密封磨损的研究大多集中在清水或者普通含沙水流工况上，对于高含沙水流这种特殊的介质研究较少，对泥沙特性、密封结构参数和磨损行为之间的内在联系了解不够充分，不能满足工程实际需要。因此，开展水力机械密封结构在高含沙水流中磨损行为的研究，弄清磨损机理，改进密封设计，对于提高水力机械在高含沙水流中运行的可靠性，降低维护成本有重大的工程价值和理论意义。

2 水力机械密封结构与高含沙水流特性

2.1 水力机械密封结构组成

水力机械常用的接触式机械密封由动环、静环、弹簧、密封圈、轴套等组成。动环与轴同步旋转，静环固定在密封腔上，在弹簧预紧力和工作介质压力的作用下，动环与静环端面紧密接触，形成一层很薄的液膜，起到密封作用。动环和静环是密封的主要摩擦副，动环和静环的材料性能、表面精度都会影响到密封的效果以及磨损的程度。常用的摩擦副材料有碳化硅、石墨、氧化铝等，碳化硅因为硬度大、耐磨性好，在高含沙水流工况中应用较多。弹簧起到稳定的预紧作用，保证端面接触紧密；密封圈用来密封动环和轴、静环和密封腔的间隙，防止介质旁路泄漏。

2.2 高含沙水流特性

高含沙水流是特殊的一种非牛顿流体，它的物理性质、运动规律同低含沙水流有明显的不同，主要表现在以下几个方面。含沙量高，单位体积浑水中所含泥沙的质量或者体积远远大于普通水流，黄河及其支流年均含沙量可达 100 千克每立方米以上，汛期沙峰含沙量更高。泥沙颗粒组成复杂，有粗砂、细砂、粉砂、黏土等颗粒，细黏性颗粒直径小于 0.01 毫米，占比较大。高含沙水流流态分为两种，一种是高强度紊流，水流湍急，波动大；另一种是相对平静的流态，表面有清澈薄水层，下面有浓密泥浆状物质，泥沙呈群体沉降。另外，高含沙水流的黏度、密度随着含沙量的增加而增大，流动性变差，对密封

结构的冲刷、摩擦作用也变大。

3 高含沙水流中密封结构磨损机制

3.1 磨粒磨损

磨粒磨损属于高含沙水流中密封磨损的主要类型。当密封端面贴合运行的时候，进入端面间隙的泥沙颗粒被夹在动环和静环之间，随着动环的旋转，泥沙颗粒像磨料一样，在端面表面进行滑动、滚动摩擦，对密封面产生切削、刮擦的作用，使密封面出现划痕、凹坑等磨损痕迹。磨粒磨损的程度与泥沙颗粒的硬度、粒径、含沙量、密封面压力有关。泥沙颗粒硬度高、粒径大，对密封面的切削能力就强；含沙量高，单位时间里作用在密封面上的泥沙颗粒数就多，磨损速度就越快；密封面压力过大，会增大泥沙颗粒和密封面之间的接触应力，从而加剧磨损。另外，密封面表面粗糙度也会对磨粒磨损产生影响，表面越粗糙，泥沙颗粒就越容易附着在密封面上，磨损也就越严重。

3.2 冲蚀磨损

冲蚀磨损是高含沙水流高速流过密封间隙时，带入的泥沙颗粒对密封面、密封圈等部件造成冲击而引起的磨损。密封端面边缘、密封圈和轴接触处水流流速高，泥沙颗粒冲击动能大，长时间冲击会造成密封面麻点、凹陷，密封圈老化、破损。冲蚀磨损的强度和水流速度、泥沙颗粒质量、冲击角度有关。水流速度越高，泥沙颗粒的冲击动能就越大，冲蚀作用就越强；泥沙颗粒质量越大，冲击效果就越明显；当冲击角度为 45 度左右时，颗粒的垂直冲击和水平移除匹配度最好，冲蚀磨损最严重，此时射流诱发的空蚀作用也最强，沙粒和空蚀联合破坏会使材料表面产生较深的凹坑。

3.3 黏着磨损

黏着磨损多发生于密封端面贴合紧密、液膜破裂的时候。由于密封面之间存在摩擦产生的热量，从而引起局部温度的上升，使得动环和静环表面的材料出现软化现象，并且发生黏结，随着动环的转动，黏结的地方就会被撕裂掉一部分，造成材料

的损失。高含沙水流中黏着磨损一般比较轻,但是当磨粒磨损使密封面严重损坏、液膜不能形成的时候,黏着磨损就会加重,进一步破坏密封结构。

4 磨损行为实验研究

4.1 实验目的

通过对高含沙水流工况的模拟,分析含沙量、水流速度、密封压力、密封材料等对水力机械密封结构磨损行为的影响,定量分析磨损速率,探究磨损规律,为密封结构优化提供实验依据。

4.2 实验装置与材料

实验使用机械密封磨损实验台,由驱动系统、密封实验腔、高含沙水流循环系统、测量系统组成。驱动系统用来调节轴的转速,模拟水力机械运行时的转速工况;密封实验腔用来安装实验用机械密封,可以调节密封压力;高含沙水流循环系统用来配制不同含沙量的水流,保持水流循环稳定;测量系统由电子天平、表面粗糙度仪、显微镜等组成,用来测量密封环磨损量、表面粗糙度和磨损形貌。

实验选用水力机械常用的接触式机械密封,动环材料为碳化硅、石墨,静环材料均为碳化硅,弹簧预紧力可调,密封圈为氟橡胶。实验用的泥沙取自黄河中游河段,经过筛选后分为粗砂和细砂两种粒径,粗砂粒径为0.1~0.5毫米,细砂粒径为0.01~0.1毫米,实验用水为自来水,配制不同含沙量的高含沙水流。

4.3 实验方案

实验采用单因素变量法,分别改变含沙量、水流速度、密封压力、泥沙粒径、密封材料,其余参数保持不变,每个工况下运行时间均为100小时,按照国家标准要求,每隔4小时测量一次相关参数,实验结束后测量密封环磨损量、表面粗糙度,观察磨损形貌。实验参数设置如下表所示。

表1 实验参数设置

实验变量	变量取值	固定参数
含沙量 (kg/m ³)	50、100、200、300	水流速度 2m/s, 密封压力 0.3MPa, 细砂, 动环材料碳化硅
水流速度 (m/s)	1、2、3、4	含沙量 200kg/m ³ , 密封压力 0.3MPa, 细砂, 动环材料碳化硅
密封压力 (MPa)	0.1、0.2、0.3、0.4	含沙量 200kg/m ³ , 水流速度 2m/s, 细砂, 动环材料碳化硅
泥沙粒径	细砂 (0.01-0.1mm)、粗砂 (0.1-0.5mm)	含沙量 200kg/m ³ , 水流速度 2m/s, 密封压力 0.3MPa, 动环材料碳化硅

动环材料	碳化硅、石墨	含沙量 200kg/m ³ , 水流速度 2m/s, 密封压力 0.3MPa, 细砂
------	--------	---

4.4 实验方法

实验前,将密封环清洗干净,用电子天平测量其质量,精确至0.001g,用表面粗糙度仪测量密封端面粗糙度,用显微镜拍摄密封端面初始形貌。将密封环安装到实验腔中,调节弹簧预紧力,设定密封压力,配制所需含沙量的高含沙水流,启动循环系统,确保水流稳定。启动驱动系统,调节转速至设定值,开始实验,按照规定时间记录实验数据。实验结束后,停止设备运行,取出密封环,清洗干净、烘干后,再次测量其质量,计算磨损量,磨损量为实验前后质量差与密封面面积的比值。同时,测量密封端面粗糙度,用显微镜观察磨损形貌,分析磨损特征。

5 实验结果与分析

5.1 含沙量对磨损行为的影响

含沙量是影响密封磨损的关键因素之一。实验结果表明,随着含沙量的增加,密封环磨损量呈显著上升趋势。当含沙量从50kg/m³增加到300kg/m³时,碳化硅动环的磨损量从0.008mm增加到0.032mm,磨损速率提高了3倍。含沙量增加,单位体积水流中泥沙颗粒数量增多,进入密封端面间隙的泥沙颗粒也随之增加,磨粒磨损和冲蚀磨损的频率显著提高,导致密封面材料损失加快。当含沙量超过200kg/m³后,磨损量增长速率加快,这是由于高含沙水流的黏度增大,水流流动性下降,泥沙颗粒在密封间隙内停留时间延长,与密封面的摩擦、冲击作用更加充分。

5.2 水流速度对磨损行为的影响

水流速度对密封磨损的影响主要体现在冲蚀磨损和磨粒磨损两个方面。随着水流速度的提高,密封环磨损量呈指数增长趋势。当水流速度从1m/s增加到4m/s时,碳化硅动环的磨损量从0.006mm增加到0.035mm。水流速度提高一方面会增大泥沙颗粒的冲击动能,增强冲蚀磨损作用,尤其是对密封端面边缘和密封圈的冲击更为明显;另一方面,水流速度加快会提高泥沙颗粒在密封间隙内的运动速度,增加磨粒磨损的切削效率,同时会破坏密封端面液膜的稳定性,导致液膜变薄甚至破裂,加剧黏着磨损,进一步加快磨损速率。

5.3 密封压力对磨损行为的影响

密封压力对磨损行为的影响呈现先增大后趋于稳定的趋势。当密封压力从0.1MPa增加到0.3MPa时,碳化硅动环的磨损量从0.007mm增加到0.022mm;当密封压力超过0.3MPa后,磨损量增长缓慢,趋于稳定。密封压力增大,会提高动环与静环的贴合紧密度,增大泥沙颗粒与密封面的接触应力,增强磨粒磨损的切削作用,导致磨损量增加。但当密封压力达到一定

值后,密封端面液膜厚度趋于稳定,泥沙颗粒进入间隙的难度增大,同时密封面的磨损会形成一定的磨损面,接触应力不再显著增大,因此磨损量增长趋于平缓。

5.4 泥沙粒径对磨损行为的影响

泥沙粒径对密封磨损的影响显著,粗砂工况下的密封磨损量明显大于细砂工况。实验结果显示,在相同含沙量、水流速度和密封压力下,粗砂工况下碳化硅动环的磨损量为0.028mm,细砂工况下为0.022mm,粗砂工况磨损量比细砂工况高27%。因为粗砂颗粒粒径大、硬度高,对密封面的切削、冲击能力更强,更容易在密封面形成较深的划痕和凹坑;而细砂颗粒粒径小,冲击动能小,切削作用较弱,磨损相对轻微。此外,粗砂颗粒更容易堵塞密封间隙,导致水流流动不畅,加剧局部磨损。

6 密封结构优化措施

6.1 优化密封材料

优先选用硬度高、耐磨性好、抗冲蚀能力强的密封材料作为摩擦副。动环和静环可选用碳化硅、氮化硅等陶瓷材料,这类材料硬度高、耐磨性优异,能够有效抵抗泥沙颗粒的切削和冲击。对于磨损严重的工况,可在密封端面采用表面涂层技术,如金刚石涂层、TiN涂层等,进一步提高密封面的硬度和耐磨性。密封圈选用耐磨损、耐老化的氟橡胶或聚四氟乙烯材料,避免因密封圈磨损导致的旁路泄漏,同时增强密封圈与轴、密封腔的贴合度,减少泥沙颗粒进入密封间隙。

6.2 优化密封结构设计

优化密封端面结构,在密封端面开设环形沟槽或螺旋沟槽,一方面可以储存部分泥沙颗粒,减少泥沙颗粒与密封面的接触面积,降低磨粒磨损;另一方面可以促进密封端面液膜的形成和稳定,减少黏着磨损。沟槽尺寸需根据含沙量和泥沙粒径合理设计,避免沟槽堵塞。合理设计弹簧预紧力,控制密封

压力在0.2-0.3MPa之间,既能保证密封端面贴合紧密,又能避免密封压力过大导致的磨损加剧。采用多弹簧结构,使密封压力分布均匀,减少密封端面的局部磨损。在密封腔入口设置过滤装置,拦截部分大粒径泥沙颗粒,减少进入密封间隙的泥沙量,降低磨损。过滤装置需定期清理,避免堵塞影响水流流通。此外,可采用迷宫-机械混合密封结构,平衡泄漏量与摩擦损耗,提高密封性能。

6.3 优化运行维护策略

在高含沙水流汛期,合理调整水力机械运行参数,降低水流速度,减少冲蚀磨损。对于含沙量过高的工况,可采取停机避让措施,避免密封结构过度磨损。定期对密封结构进行检查和维护,及时清理密封间隙内的泥沙颗粒,检查密封环、密封圈的磨损情况,发现磨损严重时及时更换。定期对密封端面进行打磨、抛光处理,恢复密封面的表面精度,减少磨粒磨损。同时,保持密封系统的清洁,避免杂质进入密封间隙,加剧磨损。对于大型水力机械,可引入智能监测技术,通过嵌入式传感器检测密封温度、振动等参数,实时评估密封状态,及时发现磨损隐患。

7 结论

本文通过理论分析和实验研究,系统探讨了水力机械密封结构在高含沙水流中的磨损行为,得出以下结论:高含沙水流中,密封结构的磨损主要由磨粒磨损和冲蚀磨损主导,黏着磨损为辅,三者相互作用加速密封失效;含沙量、水流速度、泥沙粒径与密封磨损量呈正相关,密封压力对磨损量的影响先增大后趋于稳定,碳化硅材料的耐磨性显著优于石墨材料。含沙量超过200kg/m³、水流速度超过3m/s、泥沙粒径大于0.1mm时,密封磨损速率显著加快;密封压力控制在0.2-0.3MPa时,密封性能与磨损程度达到平衡。通过优化密封材料、结构设计和运行维护策略,能够有效降低密封磨损,提高密封结构在高含沙水流中的运行可靠性。

参考文献:

- [1] 范少英,胡光乾.小浪底工程泄洪孔洞高速高含沙水流取水方式研究[J].陕西水利,2026,(01):100-102.
- [2] 赵伟佳,王纳纳.黄河高含沙水流在线光电测沙仪的研发与应用优化分析[J].中国设备工程,2025,(24):241-243.
- [3] 杨忠勇,李林,孙诗为,等.两坝间河道高含沙水流驱动的下游船闸阀门井水位异常特征分析[J].长江科学院院报,2024,41(09):79-85+92.
- [4] 郭万欣,王玲军.高含沙水流对小浪底电站机组主轴密封的影响及应对措施[J].水电与新能源,2023,37(03):57-59.
- [5] 孙国勇,张逸军,张润强,等.高含沙水流混流式水轮机磨蚀的数值预测与分析[J].排灌机械工程学报,2022,40(12):1197-1203+1226.