

# 水电厂发电机碳刷磨损过快的原因及改进方法研究

陈志永

国家能源集团海控新能源有限公司 海南 东方 572600

**【摘要】**：水电厂发电机碳刷磨损过快，最主要原因是电流分布不均匀、弹射压力不当、运行环境恶劣等。要想解决这些问题，则可合理改进，改进方法包括碳刷材质与结构设计、弹簧压力合理调整至适宜范围、运行环境的改善、定期维护与监测等，这样可让碳刷的使用寿命进一步延长。本文针对水电厂发电机碳刷磨损过快问题展开系统性研究。通过分析碳刷磨损的异常类型，结合工程实践案例，从机械结构、运行环境、材料匹配三个维度揭示磨损过快的根本原因。提出优化弹簧压力控制、改进集电环表面处理工艺、选用适配性碳刷材料等改进方案。研究结果表明，综合运用材料科学与运行维护技术可显著延长碳刷使用寿命，为水电厂设备管理提供理论支撑。

**【关键词】**：水电厂发电机；碳刷磨损；集电环；弹簧压力；材料适配

DOI:10.12417/2811-0722.26.02.051

## 引言

水轮发电机组是水电厂的核心设备，其运行稳定性如何与电力供应的可靠性有着直接关系。碳刷是发电机励磁系统的重要部件，担负着将直流电流引入转子绕组的重要功能。但在实际运行过程中，部分水电厂发电机的碳刷很快出现异常磨损现象，这就提高了碳刷的更换频率，让维护成本显著提高，甚至还会带来设备故障。因此，对碳刷磨损过快的原因进行深入分析，并提出合理的针对性改进方法，对提高水电厂的运行经济性与安全性有着深远意义。

## 1 碳刷磨损异常类型分析

碳刷磨损出现异常现象，主要表现为三种类型，即“机械磨损、电弧磨损和化学磨损”。碳刷的机械性磨损主要是碳刷与集电环产生了直接摩擦，主要特征是碳刷表面出现了均匀的线性磨痕。当集电环的表面粗糙度大于  $Ra1.6$  时，则碳刷的单位面积压力会出现分布不均现象，这就让局部磨损速率加快。电弧磨损则由于接触不良所引发的异常现象，主要特征为碳刷的边缘出现了烧蚀坑洞，在集电环的表面形成了一层黑色的氧化层。化学磨损主要因为环境是高湿度，空气含水量大于  $25g/m^3$ ，碳刷材料中的石墨成分与水蒸气发生了自然反应，自动生成了氢氧化物，导致碳刷结构出现了疏松现象。

例如，某水电站3号机组在运行过程中，其数据显示碳刷所处环境的湿度高达  $28g/m^3$ ，碳刷磨损量则比日常干燥环境（ $8-15g/m^3$ ）高出了3倍。另外，碳刷颤振现象会让磨损现象加剧，当碳刷与集电环的间距超过  $2mm$  时，碳刷的振动幅度可达到  $0.5mm$ ，这样则会让接触面快速脱离，导致电弧出现放电现象。

## 2 水电厂发电机碳刷磨损过快的原因分析

### 2.1 机械结构因素

弹簧压力控制失当，也会引发碳刷磨损过快，这是直接诱因。恒压弹簧的压力，低于  $15kPa$  时，碳刷与集电环接触面积

会大幅降低，单位压力也会集聚于局部位置，造成“点接触”式磨损。如某水电站对碳刷的弹簧压力进行实测时，数据显示压力从  $20kPa$  降低至  $12kPa$  后，则显著提升了碳刷的磨损速率，并且磨损形态表现出显著的不均匀特征。相关人员也要重视集电环的表面处理工艺缺陷性，当集电环的外圆线速度高于  $60m/s$  时，未开螺旋沟槽的集电环的表面则容易形成一种气垫效应，会出现碳刷悬浮现象，会让接触的稳定性显著减小。例如，某水电站对集电环的表面进行螺旋沟槽的加工，形成宽  $3mm$ 、螺距  $10mm$  的沟槽，这样让碳刷的接触状态得到了有效改善，让接触稳定性明显提升。轴系不对称问题也会导致周期性的振动现象。若轴系偏心量大于  $0.1mm$  时，碳刷所承受的交流应力则会让材料出现疲劳现象，其接触面会出现裂纹扩展的现象，这会让碳刷的使用寿命受到严重影响。其抽水蓄能电站机组将数据调试后，表明轴系校正后，碳刷使用寿命则显著延长。

### 2.2 运行环境因素

温度控制若失去平衡也会对碳刷的氧化膜产生决定性影响。碳刷与集电环的接触面的最佳工作温度为  $60-90^{\circ}C$ ，在这一区间可生成氧化膜，并且氧化膜有着明显的润滑作用。当冷却系统出现故障时，则会让接触面的温度快速提升，当升至  $110^{\circ}C$  时，碳刷氧化膜的分解速率远远超过了生成速率时，碳刷会与金属基体导热直接摩擦，碳刷的磨损量会快速增加。油雾对碳刷造成污染，也会让其化学磨损加剧，当推力轴承油挡密封失去效应时，润滑油则会渗进碳刷的接触区，会迅速与碳粉形成一种黏性混合物，会将刷握的排粉通道堵塞住，让碳刷出现散热不良现象。例如，某水电站在检修过程中，发现其油污区的碳刷磨损量比清洁区域高出太多。因为大量粉尘的积累出现了散热不良的问题，而运行环境的粉尘浓度超过  $0.5mg/m^3$  时，碳刷与集电环的接触面则会形成一种绝缘层，导致局部温度快速升高，当高至  $30^{\circ}C$  时，会让材料迅速氧化。如某水电站加装了空气过滤系统后，碳刷的运行速度会大幅降低，让其

使用寿命显著延长了。

### 2.3 材料匹配因素

碳刷的材质与运行工况若出现不匹配现象,也会出现磨损。D172型碳刷的额定电流密度若为 $0.12\text{A}/\text{mm}^2$ 时,若实际电流的密度超出这一数值区域时,碳刷表面若出现烧蚀斑点,会加剧磨损。碳刷型若混用后,也会导致电流分配不均匀,型号不同的碳刷电阻率有个性化差异时,并联碳刷组中的电流分配出现偏差时,也会让碳刷承受过高电流,而出现提前失效现象。集电环的材料硬度若不匹配,也会对碳刷的寿命产生直接影响。当集电环的表面硬度比碳刷硬度低时,集电环的磨损速率会快速提升,表面会形成凹凸不平的接触面,会让碳刷磨损加剧。如某水电站将铸铁的集电环作了替换,更换为合金钢的材质后,集电环的磨损量会明显降低,会相应延长碳刷的使用寿命。

### 2.4 维护管理不当因素

若维护管理不当,也会让碳刷的磨损进程进一步加快。检修周期若设置不合理,也会让碳刷出现过度磨损现象。若碳刷长度磨损至极限值以下,仍在持续运行时,则会导致弹簧的分布失去平衡,触发接触不良现象。如某水电站因检修计划的调整,未对磨损的碳刷及时更换,这就让集电环的表面出现了深沟槽,显著增加了后续的修复成本。相关人员若对碳刷的清洁维护标准执行不到位,如未及时清理碳刷架积尘,则会对其散热效果造成直接影响。统计显示,积尘厚度大于 $2\text{mm}$ 时,碳刷的运行温度会显著升高,会加剧碳刷的磨损速率。若备件管理很混乱,相关人员在维护中应用了劣质碳刷,这类碳刷的物理性能与原厂件存在个性化差异,某些性能未达标,如耐磨性、导电性等,就会出现碳刷使用后磨损异常的现象,严重者可导致停机。另外,维护人员的技能水平若参差不齐,或操作过程中不规范,也会让碳刷的安装角度出现偏差,让碳刷的接触压力出现分布不均现象,导致局部的磨损。

## 3 水电厂发电机碳刷磨损过快的改进方法分析

### 3.1 机械结构优化

相关人员在弹簧压力进行动态调整时,可通过可调式恒压弹簧,再配以压力传感器、PLC控制系统等,这一系统可对发电机的负载变化实时感知,并根据预设的逻辑快速而精准地将弹簧压力进行调整,这样可让其稳定控制在 $18\text{--}22\text{kPa}$ 的理想区间。如某水电站设置了此应用方案后,碳刷与集电环的接触压力分布不均,可能会引发设备的故障风险。将集电环的表面处理工艺改进后,其镀覆 $0.05\text{mm}$ 厚铬合金层,这样会让其硬度达到HRC60,显著增强其耐磨性。相关人员还可引入激光刻蚀技术,对碳刷加工后,可形成微米级凹坑,这些微米级的凹坑可将润油膜存储起来,在碳刷与集电环相对运动时,起到很好的润滑作用,让摩擦系数显著降低。相关人员还可将轴系对

中精度得以加强,利用高精度激光对中仪来进行动态校正,可将轴系偏心量精准控制在 $0.05\text{mm}$ 以内。如某水电站进行轴系改造后,碳刷的振动幅度显著降低了,大幅提升了碳刷的稳定性,在运行中,碳刷与集电环紧密接触,让振动导致的磨损现象大幅减小了。

### 3.2 运行环境控制

相关部门可构建温湿度闭环控制系统,可将PT100温度传感器和湿度探头精心安装在碳刷架处,这些传感器可对接触面的温度和湿度变化精准监测。可以变频风机来灵活调节通风量,当接触面温度高于 $90^\circ\text{C}$ 时,系统会自动开启冷却喷雾装置,精准控制温度低于 $85^\circ\text{C}$ 。适宜的温度可让碳刷与集电环的接触面形成相对稳定的氧化膜,这些氧化膜有很强的润滑作用,可让两者间的直接摩擦得以降低,最大程度减少碳刷的磨损现象。相关人员可引入油雾隔离方案,将双层迷宫密封加装在推力轴承油挡处,并配以负压抽吸装置。双层迷宫密封可将润滑油的泄漏现象有效阻挡,负压抽吸装置可将泄漏的油雾进一步抽走,让油雾浓度显著降低,让油污对碳刷的侵蚀现象显著降低,防止因油污导致的接触不良和化学磨损现象。建立粉尘清扫机制,相关人员可利用压缩空气脉冲清灰系统,每24小时全面吹扫碳刷架,同时在机房入口设置风淋室,防止人员带入粉尘。实施后,运行环境的粉尘浓度的稳定性显著降低,防止大量粉尘聚集在碳刷的接触面,从而形成绝缘层,让局部温度上升、材料出现氧化现象,这样则显著减少散热不良问题、磨损加剧问题等。

### 3.3 材料匹配升级

水电部门可开展碳刷材料的定制化研发,对于出现的高负荷工况,科研人员通过大量的实验和研究,可研发出金属石墨复合型材料,其含铜量为15%。这样的材料与传统材料相比,其导电性能有了大幅提升,对于高负荷工况下对电流传输方面的实际要求可以得到更好地满足。同时,这种材料的耐磨性能也明显提高了,可让碳刷在高强度的摩擦环境下,有效延长其使用寿命。例如,某水电站引入这种新型材料后,碳刷的更换周期明显延长,让碳刷的更换频率与维护成本显著降低,让设备的运行效率及可靠性显著提升了。相关部门还可建立碳刷型号标准化管理体系,制定详细的《碳刷选型技术规范》,将不同转速、电流密度下的适配型号进一步明确。管理部门实施统一化的采购管理,对于碳刷的质量和规格等严格管控,防止出现碳刷型号混用现象。这样也可让碳刷性能更具一致性、稳定性,防止因型号不适配而出现一些问题,如电流分配不均、磨损异常等。相关人员可对集电材料组合进一步优化,可引入分段式集电环设计,并依托高速区及低速区的不同工作特点,在高速区采用铜基合金,借助其很好的导电性能和耐磨性能来优化使用。在低速区,可应用钢基合金,兼顾经济性。如某水电站进行优化和改造后,集电环的整体使用寿命进一步延长,这

样也会让其维护成本显著降低,让设备的可靠性、经济性等显著提升。

### 3.4 维护管理优化

相关部门将检修周期规划进一步完善,根据碳刷的实际磨损情况、使用时长等来制定合理的检修计划。定期安排专业人员检测和测量碳刷,若碳刷长度与极限值高度接近时,则要及时予以更换,防止因过度磨损出现接触不良,导致设备出现故障,让后续修复成本大幅降低,让集电环的使用寿命得以延长。强化清洁维护标准执行,制定详细、严格的清洁流程,明确清洁的频率、方法和标准。相关人员要对碳刷架的积尘定期清理,可规定积尘厚度不得高于1mm,让碳刷的散热效果更好。可安排专人来负责碳刷的清洁工作,以保障其清洁质量。加强备件管理,建立严格的备件检验制度,对于刚购置的碳刷等备件,要对其物理性能全面检测,包括相关指标,如耐磨性、导电性等,让备件质量可达标,严禁让劣质的碳刷入厂,要从源头上监管质量,以确保设备的可靠运行。管理部门可对维护技术人

员定期进行培训与考核,可邀请行业内专家来授课,向技术人员传授先进的维护技术和实践维护经验,以提升维护人员的技能水平。同时,还要对碳刷的安装操作进一步规范,安装角度的偏差要精准控制在极小范围内,确保接触压力分布更均匀,让局部磨损减小,让碳刷的使用效率及寿命全面提升。

## 4 结语

综上所述,水电厂发电机碳刷磨损过快问题涉及机械设计、材料科学、运行维护等多学科交叉领域。文章系统分析磨损异常类型,揭示机械结构失配、环境控制失效、材料适配性不足、维护管理不当等根源,提出结构优化、环境管控、材料升级、维护管理优化等综合解决方案。实践表明,采用定制化碳刷材料、构建智能监控系统、实施全生命周期管理,可显著提升碳刷运行可靠性。未来,随着新材料与智能技术的深度融合,碳刷系统将向长寿命、低维护、零排放方向演进,为水电行业绿色转型提供关键技术支撑。

### 参考文献:

- [1] 张智泉.大型水轮发电机集电环碳刷温度过高分析及处理[J].四川水力发电,2023,44(S2):85-89.
- [2] 胡祥甫,王亮.关于发电机集电环碳刷温度过高原因分析及处理[J].上海大中型电机,2023,(02):9-11.
- [3] 周奇.发电机碳刷及刷架积灰的原因与对策分析[J].电子技术,2022,54(01):234-235.
- [4] 李宗霖,王金宝.双馈风力发电机碳刷异常磨损原因分析和改进策略[J].炭素,2022,(04):26-29.