

# 石墨烯添加剂对水电机组润滑系统性能影响

欧 前<sup>1</sup>, 余 波<sup>2</sup>, 沈俊杰<sup>1</sup>, 赵俊杰<sup>1</sup>

(1. 西华大学 能源与动力工程学院, 四川 成都 610039; 2. 流体机械及工程四川省重点实验室, 四川 成都 610039)

**摘 要:**针对水电机组润滑系统中,常采用涡轮机油作为润滑、冷却介质的情况,将专门研发的石墨烯添加剂按一定比例加入水电机组润滑系统的涡轮机油中,通过现场试验研究其对润滑性能的影响。根据机组轴承瓦温监测数据,对比加入添加剂前后温度变化情况,间接反映石墨烯添加剂对水电机组润滑系统性能的影响。结果表明:所加入的石墨烯添加剂能改善涡轮机油减摩抗磨性能,为轴承润滑性能改善及轴瓦保护提供新思路。

**关 键 词:**石墨烯添加剂;涡轮机油;水电机组;润滑系统

中图分类号:TV734 文献标识码:A DOI:10.16146/j.cnki.rndlge.2021.06.016

[引用本文格式]欧 前,余 波,沈俊杰,等. 石墨烯添加剂对水电机组润滑系统性能影响[J]. 热能动力工程,2021,36(6):107-111. OU Qian, YU Bo, SHEN Jun-jie, et al. Effect of graphene additives on the performance of lubricating system of hydropower units [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2021, 36(6):107-111.

## Effect of Graphene Additives on the Performance of Lubricating System of Hydropower Units

OU Qian<sup>1</sup>, YU Bo<sup>2</sup>, SHEN Jun-jie<sup>1</sup>, ZHAO Jun-jie<sup>1</sup>

(1. School of Energy and Power Engineering, Xihua University, Chengdu, China, Post Code: 610039; 2. Sichuan Provincial Key Laboratory of Fluid Machinery and Engineering, Chengdu, China, Post Code: 610039)

**Abstract:** The turbine oil is often used as the lubrication and cooling medium in the lubrication system of hydropower units, Sographe additives specially developed are added to it in a certain proportion, and its influence on lubrication performance is studied through on-site tests. According to the temperature monitoring data of the bearing bush of the unit, the temperature change before and after adding the additive is compared, which indirectly reflects the influence of the graphene additive on the performance of the lubrication system of the hydropower unit. The results show that the added graphene additives can improve the anti-friction and anti-wear performance of turbine oil, and provide new ideas to improve the bearing lubrication performance and bearing protection.

**Key words:** graphene additives, turbine oil, hydropower units, lubrication system

## 引 言

在电站实际生产运行中,机组转动部件润滑系统的可靠性对机组安全生产具有重要影响。对于水

电机组的润滑系统来说,其轴承瓦温异常可直接影响电力生产的可靠性。因此,改善机组润滑系统的性能,对减小转动部件的摩擦损耗量、降低轴承瓦温和确保水电机组正常运行极具意义。在水电机组润滑系统中,大多使用汽轮机油作为润滑油,依照 GB

收稿日期:2020-06-19; 修订日期:2021-01-12

基金项目:四川省重点研发项目(2020YFG0350)

Fund-supported Project: Key R&D Project in Sichuan Province(2020YFG0350)

作者简介:欧 前(1993-),男,四川南充人,西华大学硕士研究生。

通讯作者:余 波(1965-),男,四川西昌人,西华大学教授。

11120-2011 标准,现称为涡轮机油<sup>[1]</sup>。

石墨烯由于独特的力学特性和自润滑性,使得它在润滑添加剂方面受到广泛的关注。许多研究表明适量石墨烯不但能减小摩擦系数,还能提升承载抗磨性能<sup>[2-11]</sup>。但是,石墨烯在润滑剂中难以分散,限制了其用途<sup>[12]</sup>。乔玉林等人<sup>[13]</sup>研究了石墨烯功能化修饰,以寻求预期可控的功能化修饰,增强分散性和稳定性。石墨烯经过修饰处理后,对比磨斑直径和平均摩擦因数,结果显示涡轮机油的润滑性能得到提高<sup>[14-15]</sup>。

在对水电机组轴承润滑的相关研究中,常以温度、压力等来表征其润滑特性。王青华等人<sup>[16]</sup>通过对推力瓦进行流固耦合分析,研究了油膜厚度与温升、压力的关系,得出在瓦面方向,油膜越薄,升温越大;且油膜越薄的位置,应力和变形越大。张路等人<sup>[17-18]</sup>设计软件程序,计算了轴承的润滑性能。

通过现场试验,研究了石墨烯添加剂对涡轮机油润滑性能的影响。首先,按照特定的化学助剂和分散工艺制备得到石墨烯添加剂。其次,将石墨烯添加剂按一定的质量分数比均匀混合于水电机组涡轮机油中。最后,通过水电机组现场试验,对比加入石墨烯添加剂前、后瓦温的变化情况,得出石墨烯对涡轮机油润滑性能的影响结果。

## 1 石墨烯改性涡轮机油

石墨烯分子易产生团聚,为添加剂制备的重大阻碍。因此,使用化学与机械的工艺方式分散石墨烯。在实验室,将石墨烯以 0.3% 的质量分数添加到基油中,然后添加化学分散助剂,并用机械分散工艺分散石墨烯,制备得到石墨烯改性涡轮机油添加剂。

将石墨烯添加剂按 5% 的质量分数比加入涡轮机油中,得到改性涡轮机油。检测了改性涡轮机油的基本性能指标,结果如表 1 所示。检测结果表明,改性涡轮机油基本性能指标均满足标准。

表 1 改性涡轮机油基本性能指标

Tab. 1 Basic performance index of modified turbine oil

密度/ kg · m <sup>-3</sup>	黏度 指数	运动粘度 (40 °C) /mm <sup>2</sup> · s <sup>-1</sup>	闪点	倾点/°C
864.2	104	43.75	242	-30

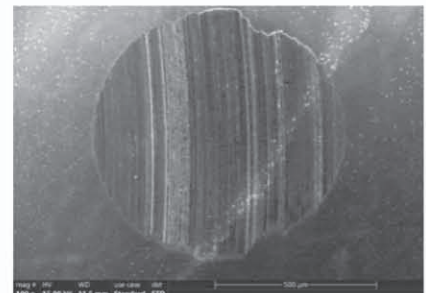
在实验室内,采用球磨机和极压试验机,检测原涡轮机油与改性涡轮机油的极压性能和摩擦性能;通过长磨试验,得到磨斑图,结果如表 2 所示。试验结果表明,改性涡轮机油性能得到大幅提升。最大无卡咬负荷,由原来的 411.6 N 提升至 627.2 N,改善幅度超 50%;摩擦系数由 0.101 降至 0.0767,改善幅度为 24%;同样,磨斑直径显著减小,改善幅度近 50%。这说明石墨烯均匀分散并填充于摩擦面,大幅度改善涡轮机油的润滑性能。

表 2 加入石墨烯添加剂前后性能对比

Tab. 2 Performance comparison before and after adding graphene additives

参数	原涡轮机油	改性涡轮机油
最大无卡咬负荷/N	411.6	627.2
摩擦系数	0.101 0	0.076 7
磨斑直径/μm	788	404

图 1(a)为原涡轮机油对应的磨斑图,图 1(b)为改性涡轮机油对应的磨斑图,两者相比较可见:改性前,有椭圆状磨斑,犁沟纹路清晰;改性后,只有较浅的圆形磨斑,且直径较小。



(a) 原涡轮机油



(b) 改性涡轮机油

图 1 长磨试验后磨斑图

Fig. 1 Wear pattern after long grinding test



## 2 润滑系统性能分析

将石墨烯添加剂按特定质量分数比加入水电机组轴承润滑系统涡轮机油中,进行现场试验。根据现场试验条件及机组特点,分别选定一台立式机组的水导轴承和一台卧式机组的径向推力轴承为试验部位。

### 2.1 立式机组

在立式机组中,水导轴承是水电机组润滑系统的重要部件之一。鉴于其主要承受径向力,受力较单一,且油箱容量适中,因此以水导轴承为试验对象。

四川某电站,装机容量 $2 \times 10.5$  MW,年发电量约 $9.8 \times 10^7$  kW·h,转轮型号 ZZD407-LH-300,额定水头 20.7 m,额定转速 187.5 r/min,电站在系统中具有一定的调峰作用。

为排除环境温度和头变动等干扰,现场试验持续半年以上。通过对机组历史运行数据的调查,机组有功功率处于 5500~7 000 kW 时,水导轴承瓦温在 59℃ 左右,已接近预警上限,不利于机组安全运行。

为对照试验结果,选择同一台机组,加入石墨烯添加剂进行试验。通过监测的温度数据与该机组历史运行记录做对比分析,从而确定石墨烯添加剂的润滑效果。

试验中,每一小时读取温度数据。电站主要由功率变动带动瓦温变化。因此,利用水导瓦温和机组有功功率间的散点图进行分析,石墨烯添加剂加入前、后结果如图 2 所示。

将图 2(a)与图 2(b)作对比,可明显看出:机组在加入石墨烯添加剂后,同样在有功功率为 5 500~7 000 kW 时,瓦温维持在 58℃ 左右,比未添加石墨烯添加剂时,瓦温平均下降 1℃ 以上。

以轴瓦温度反映润滑效果,结果表明:石墨烯添加剂能减小摩擦系数、降低温度和保护摩擦面;同时,涡轮机油的散热性能也得到增强。

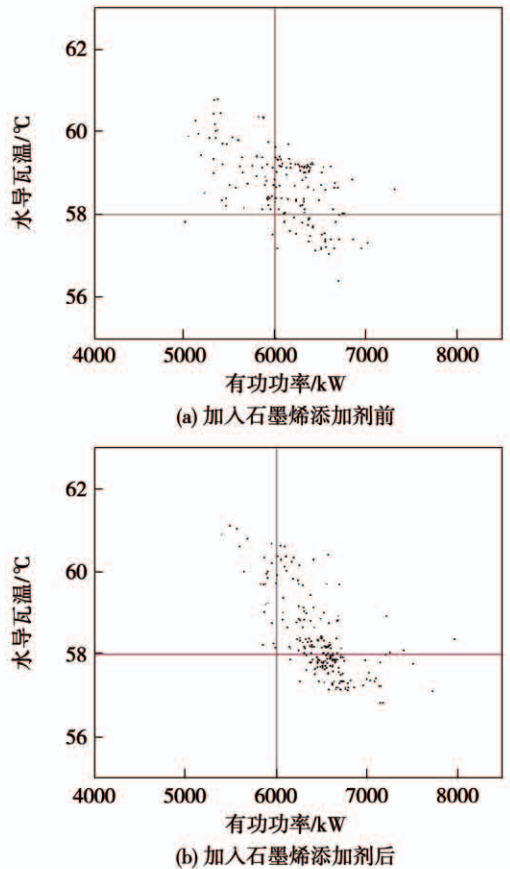


图 2 试验前、后瓦温随功率变化图

Fig. 2 Variation diagram of tile temperature along with power before and after test

### 2.2 卧式机组

在卧式机组中,径向推力轴承受荷载较大,加之径向推力轴承油箱容量适中,因此适合开展现场试验研究。

云南某电站,装机容量为 $2 \times 1.25$  MW,转轮型号为 HLD358C-WJ-84E,额定水头 98 m,额定转速 750 r/min,电站在系统中担任基本负荷。

加入石墨烯添加剂之前,该机组已带 1 000 kW 负荷运行 24 h 以上,推力瓦温维持在 54.5℃ 附近。试验开始时,维持机组带 1 000 kW 负荷,加入石墨烯添加剂,并连续记录一小时,其推力瓦温度随时间的变化如图 3 所示。

由图 3 可知,在加入石墨烯添加剂之后,推力瓦温度在 5 min 内迅速下降至 53℃,然后温度稍有回升,之后基本维持在 53.5℃。其前期温度迅速下降

的原因,除涡轮机油润滑性能得到改善产生效果之外,石墨烯添加剂在加入前的温度比油槽内油温低 $35 \sim 45 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,在加入油槽之后也使得油温迅速下降。其后,石墨烯添加剂均匀分散到涡轮机油中,不再产生热交换,瓦温基本维持在 $53.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

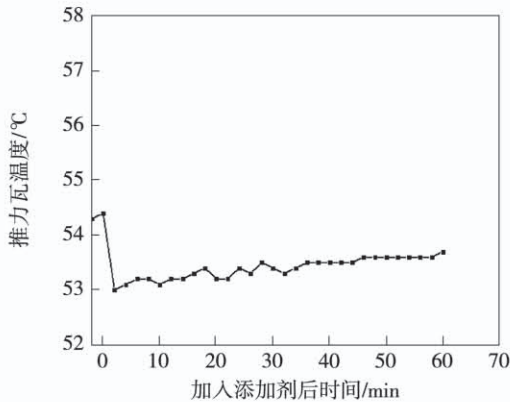


图3 加入石墨烯添加剂后瓦温度变化图

Fig. 3 Temperature change diagram of tile after adding graphene additive

机组维持在 $1\ 000 \text{ kW}$  负荷运行 $18 \text{ h}$ 后,再回访该电站时,瓦温仍然基本维持在 $53.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

试验结果表明:添加石墨烯添加剂之后,能使瓦温约降低 $1 \sim 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,这说明石墨烯添加剂能改善涡轮机油润滑性能。

### 3 结论

通过研究表明,特定配方的石墨烯添加剂能在一定程度上提升涡轮机油润滑性能。

(1) 加入石墨烯添加剂的涡轮机油性能有所改善,呈现出摩擦系数减小、磨斑直径减小和承受的最大无卡咬荷载增大等特征,起到减摩抗磨效果。

(2) 在现场试验中,添加石墨烯添加剂后,对轴瓦产生了降温效果,表明石墨烯添加剂改善了涡轮机油润滑性能。

(3) 通过添加特定配方的石墨烯添加剂改善涡轮机油润滑性能,为解决水电机组轴瓦温度过高问题提供了新的思路。

该研究成果通过进一步的改进优化,不仅可以

应用于水电机组润滑系统,也可以应用于火电、核电等领域的旋转机械轴承润滑系统中。

### 参考文献:

- [1] 国家质量检验检疫总局. 涡轮机油:GB 11120-2011[S]. 北京:中国标准出版社,2011.  
State Administration of Quality Inspection and Quarantine. Turbine oil: GB 11120-2011[S]. Beijing: China Standard Press,2011.
- [2] MAO H Y, LU Y H, LIN J D, et al. Manipulating the electronic and chemical properties of graphene via molecular functionalization[J]. Progress in Surface Science,2013,88(2): 132-159.
- [3] PARK S, Kim S. Effect of carbon blacks filler addition on electrochemical behaviors of  $\text{Co}_3\text{O}_4$ /graphene nanosheets as a supercapacitor electrodes[J]. Electrochimica Acta,2013,89: 516-522.
- [4] GONG Z Q, WANG C M, CUI H Z, et al. Effect of graphene on the microstructure and properties of nickel-based tungsten carbide coatings by laser cladding[J]. Powder Metallurgy Technology, 2019,37(5):323-331.
- [5] SHI Q, TANG H, ZHU H, et al. Synthesis and tribological properties of Ti-DOPED  $\text{NbSe}_2$  nanoparticles[J]. Chalcogenide Letters, 2014,11(5):199-207.
- [6] SHI Q, YANG J, PENG W X, et al. Synergetic effect of  $\text{NbSe}_2$  and  $\text{Cr}_2\text{Nb}$  on the tribological and electrical behavior of Cu-based electrical contact composites[J]. Rsc Advances, 2015, 5(122): 100472-100481.
- [7] LEE J H, KIM S H, CHO D H. Tribological properties of chemical vapordeposited grapheme coating layer[J]. Metals Mater,2012,50(3): 206-211.
- [8] 蒲吉斌,王立平,薛群基. 石墨烯摩擦学及石墨烯基复合润滑材料的研究进展[J]. 摩擦学学报,2014,34(1): 93-112.  
PU Ji-bin, WANG Li-ping, XUE Qun-ji. Research progress of graphene tribology and graphene-based composite lubricating materials[J]. Journal of Tribology,2014,34(1): 93-112.
- [9] 乔玉林,崔庆生,臧艳,等. 石墨烯润滑油添加剂的减摩抗磨性能[J]. 装甲兵工程学院学报,2014,28(6):97-100.  
QIAO Yu-lin, CUI Qing-sheng, ZANG Yan, et al. Anti-friction and anti-wear properties of graphene oil lubricating additives[J]. Journal of Academy of Armored Force Engineering,2014,28(6):97-100.
- [10] 王万平,屈文山,赵建国. 可溶性石墨烯的制备及其润滑性能研究[J]. 炭素技术,2015,34(6): 17-20.



- WANG Wan-ping, QU Wen-shan, ZHAO Jian-guo. Preparation of soluble graphene and its lubricating properties[J]. Carbon Technology, 2015, 34(6): 17-20.
- [11] 田浩亮, 郭孟秋, 王长亮, 等. 氧化石墨烯改性自润滑耐磨涂层的组织与耐磨机理[J]. 稀有金属材料与工程, 2017, 46(7): 1881-1886.
- TIAN Hao-liang, GUO Meng-qiu, WANG Chang-liang, et al. Structure and wear mechanism of graphene oxide modified self-lubricating wear-resistant coating[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2017, 46(7): 1881-1886.
- [12] JIA Z, CHEN T, WANG J, et al. Synthesis characterization and tribological properties of Cu/reduced graphene oxide composites[J]. Tribology International, 2015, 88: 17-24.
- [13] 乔玉林, 赵海朝, 臧艳, 等. 石墨烯的功能化修饰及作为润滑添加剂的应用研究进展[J]. 化工进展, 2014, 33(S1): 216-223.
- QIAO Yu-lin, ZHAO Hai-chao, ZANG Yan, et al. Research progress of functional modification of graphene and its application as a lubricating additive[J]. Progress in Chemical Industry, 2014, 33(S1): 216-223.
- [14] 王宏跃, 钱善华, 黄传辉, 等. 石墨烯对蓖麻油润滑性能影响的试验研究[J]. 润滑与密封, 2017, 42(10): 48-52.
- WANG Hong-yue, QIAN Shan-hua, HUANG Chuan-hui, et al. Experimental study on the effect of graphene on the lubricating properties of castor oil[J]. Lubrication and Sealing, 2017, 42(10): 48-52.
- [15] 王莹, 顾正鹏, 崔玲玲, 等. 氧化石墨烯对钛合金表面水润滑性能的影响[J]. 常州大学学报(自然科学版), 2019, 31(3): 57-62.
- WANG Ying, GU Zheng-peng, CUI Ling-ling, et al. Effect of graphene oxide on the water lubrication performance of titanium alloy surface[J]. Journal of Changzhou University (Natural Science Edition), 2019, 31(3): 57-62.
- [16] 王青华, 冯波, 李冬冬, 等. 基于CFD的水泵水轮机推力轴承润滑性能流固耦合研究[J]. 水力发电, 2020, 46(2): 75-78, 118.
- WANG Qing-hua, FENG Bo, LI Dong-dong, et al. Fluid-solid coupling research on the lubrication performance of thrust bearing of pump turbine based on CFD[J]. Hydroelectric Power, 2020, 46(2): 75-78, 118.
- [17] 张路. 水轮机推力轴承润滑性能分析[D]. 天津: 天津大学, 2008.
- ZHANG Lu. Lubrication performance analysis of thrust bearing of hydraulic turbine[D]. Tianjin: Tianjin University, 2008.
- [18] 余谱. 水轮机径向滑动轴承润滑特性研究[D]. 浙江: 浙江大学, 2014.
- YU Pu. Research on the lubrication characteristics of radial sliding bearings of hydraulic turbines[D]. Zhejiang: Zhejiang University, 2014.

(孙嘉忆 编辑)