

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2026.20250179

水轮发电机推力轴承纳米润滑油散热强化机理研究

贾先政¹, 王代春¹, 王 斌¹, 陈才龙¹, 段 娟²

(1. 中国长江电力股份有限公司白鹤滩水力发电厂, 四川 凉山 615421;

2. 昆明理工大学冶金与能源工程学院, 云南 昆明 650093)

摘要: 在水轮发电机组运行过程中, 推力轴承由于承力及摩擦等因素会产生大量余热, 润滑油散热效果差会导致烧瓦现象, 从而带来巨大经济损失, 纳米颗粒不仅能改善润滑油润滑特性还能增强润滑油换热过程。为此, 通过数值模拟仿真, 研究了不同浓度(0.1wt%、0.3wt%、0.5wt%)的纳米氧化铜颗粒强化推力轴承润滑油的散热效果。结果表明, 通过添加纳米氧化铜可强化润滑油的散热效率, 且纳米氧化铜浓度为0.5wt%时散热效果最佳。

关键词: 水轮发电机组; 推力轴承; 润滑油; 纳米氧化铜; 强化散热

中图分类号: [TV734.2⁺1]

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2026)01-0203-04

Research on Mechanism of Heat Dissipation Enhancement of Nano Lubricating Oil in Thrust Bearings of Hydroturbine Generators

JIA Xian-zheng¹, WANG Dai-chun¹, WANG Bin¹, CHEN Cai-long¹, DUAN Juan²

(1. Baihetan Hydropower Station, China Yangtze Power Co., Ltd., Liangshan 615421, China; 2. Faculty of Metallurgical and Energy Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China)

Abstract: In the operation of hydroelectric generating unit, thrust bearings generate a considerable amount of residual heat due to load-bearing, friction, and other factors. Poor heat dissipation performance of lubricating oil can give rise to the tile burning phenomenon, thus causing massive economic losses. Nanoparticles can not only improve the lubrication characteristics of lubricating oil but also enhance the heat transfer process of lubricating oil. Accordingly, through numerical simulation, this study examined the heat dissipation enhancement effect of lubricating oil in thrust bearings when reinforced by nano-copper oxide particles with different concentrations (0.1wt%, 0.3wt%, 0.5wt%). The results demonstrate that the addition of nano-copper oxide can enhance the heat dissipation efficiency of lubricating oil, and the most favorable heat dissipation effect is achieved when the concentration of nano-copper oxide is 0.5wt%.

Key words: hydroelectric generating unit; thrust bearing; lubricating oil; nano-copper oxide; enhanced heat dissipation

1 引言

推力轴承是水轮发电机的关键部件, 其散热效率直接影响机组运行稳定性。传统内/外循环冷却在高负荷或特殊工况下易出现散热不足, 导致轴瓦温度超限^[1-3]。在一些高海拔、高温或高负荷运行的水轮机组场景下, 传统散热方式可能难以满足需求^[4]。随着纳米技术的不断发展, 纳米

颗粒具有独特的物理和化学性质, 如纳米氧化铜颗粒具有高热导率、润滑等特性。纳米氧化铜颗粒强化散热技术可提供一种有效的解决方案, 保障水轮机组在特殊工况下的稳定运行。研究表明, 纳米氧化铜颗粒可提升传热效率并降低摩擦系数^[5-7]。为此, 本文通过数值模拟仿真, 研究了含有不同质量浓度纳米氧化铜颗粒的润滑油在推力轴承中的散热强化特性, 研究结果有助于深入了解纳米颗粒对轴承润滑和散热机理和强化性能

收稿日期: 2025-01-31, **修回日期:** 2025-03-11, **接受日期:** 2025-04-21

基金项目: 三峡金沙江云川水电开发有限公司宁南白鹤滩电厂科研项目(Z532302018)

作者简介: 贾先政(1994-), 男, 工程师, 研究方向为热能与动力工程, E-mail: jia_xianzheng@ctg.com.cn

通讯作者: 段娟(1989-), 女, 博士、讲师, 研究方向为水轮机智慧监测, E-mail: duanj@kust.edu.cn

的影响,为水轮机发电机推力轴承散热优化设计提供理论依据。

2 数值计算

2.1 试验模型

采用纳米氧化铜颗粒粒径为 40 nm,且分布均匀。纳米氧化铜具有高导热性,可将轴承处产生的热量更快地传导出,在润滑油中添加纳米氧化铜可强化整体推力轴承散热效率。仿真试验所采用纳米氧化铜浓度分别为原油、0.1wt%、0.3wt%、0.5wt%,因随时间推移,纳米氧化铜浓度越高沉降情况越明显,所以选用纳米氧化铜浓度不再增加。表 1 为实验室内测出的添加了不同浓度的纳米原油物性参数。

表 1 工作温度 323 K 润滑油属性

Tab. 1 Properties of lubricating oil at 323 K

氧化铜 浓度	导热 /(W·(m·K) ⁻¹)	比热 /(MJ·(m ³ ·K) ⁻¹)	密度 /(g·cm ⁻³)	粘度 /(MPa·s)
原油	0.156 2	1.399	0.852	34.136
0.1wt%	0.166 3	1.554	0.859	37.141
0.3wt%	0.173 3	1.445	0.874	38.411
0.5wt%	0.175 3	1.43	0.884	40.236

图 1 为某百万千瓦混流式水轮发电机组推力轴承的结构示意图。大型混流式机组通常采用双层巴氏合金瓦的支撑结构推力轴承^[8]。其结构包含冷却油进油管、推力头、镜板、推力瓦、基础环支柱、推力轴承油盆等部件。24 块推力轴瓦、24 根冷却油进油管及 6 个冷却油出油口为固定部件,均匀分布在油盆内,下方由推力瓦支柱支撑。整个镜板和轴瓦浸没在油盆的润滑油中。

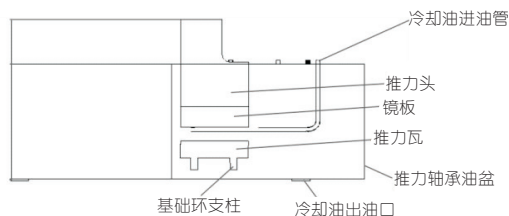


图 1 推力轴承结构侧剖图

Fig. 1 Side sectional view of thrust bearing structure

2.2 数值模型的建立

(1)连续性方程。即:

$$\frac{\partial t}{\partial \rho} + \nabla(\rho \vec{u}) = 0 \quad (1)$$

式中, t 为时间; ρ 为油的密度,假设其为一个不随温度变化的常数; ∇ 为矢量微分算子; $\vec{u}$ 为速度矢量。

(2)动量方程。对于 x 、 y 、 z 方向的动量方程分别为:

$$\frac{\partial(\rho u_x)}{\partial t} + \nabla(\rho u_x \vec{u}) = \mu \nabla^2 u_x - \frac{\partial p}{\partial x} + S_u \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho u_y)}{\partial t} + \nabla(\rho u_y \vec{u}) = \mu \nabla^2 u_y - \frac{\partial p}{\partial y} + S_v \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho u_z)}{\partial t} + \nabla(\rho u_z \vec{u}) = \mu \nabla^2 u_z - \frac{\partial p}{\partial z} + S_w \quad (4)$$

式中, u_x 、 u_y 、 u_z 分别为 u 在 x 、 y 、 z 方向上的分量; p 为流体微元上的压力; μ 为动力黏度; S_u 、 S_v 、 S_w 为动量方程的广义源项,代表除黏性力和压力梯度外作用在流体上的其他所有力或影响。

(3)能量方程。在圆柱坐标系下(推力轴承具有圆柱对称性),能量方程为:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho c_p \left(u \frac{\partial T}{\partial r} + v \frac{\partial T}{\partial z} \right) = k \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] + \mu \Phi \quad (5)$$

式中, c_p 为润滑油的比热容; T 为温度; u 、 v 分别为径向、轴向速度分量; r 为径向坐标; k 为润滑油的导热系数; Φ 为黏性耗散区数。

(4)效率分析。采用无量纲化分析理解不同参数间关系及对散热特性的影响,本文从散热效率、导热系数等方面阐述进行无量纲化分析:①散热效率计算。对所有出口温度数据采用归一化处理,设推力轴承原油出口温度为参考温度 $T_{\max}$,各工况冷却油出口温度为 $T_{\text{出口}}$,各工况中出现的最小出口温度为 $T_{\min}$,计算出归一化散热效率 $\bar{T}$:

$$\bar{T} = (T_{\text{出口}} - T_{\min}) / (T_{\max} - T_{\min}) \quad (6)$$

②出口流量。在推力轴承中润滑油的流动通道近似为管道流动,根据 Hagen-Poiseuille's law 可描述其流量与黏度关系:

$$Q = \frac{\pi R^4 \Delta P}{8 \mu L} \quad (7)$$

式中, Q 为出口流量; R 为管道半径(类比推力轴承内部润滑油通道等效半径); ΔP 为进出口压力差; L 为管道长度(等效于润滑油通道长度)。

由式(7)可知,在其他条件不变时,出口流量与运动黏度成反比。即运动黏度增大,润滑油内摩擦力增大,流动阻力增加,导致出口流量减小;反之,运动黏度减小,出口流量增大。

2.3 网格无关性验证

为降低计算工作量和提升结果准确性,仅针对浸没在润滑油内的流体和固体部分进行模拟。采用 Ansys Fluent 进行数值模拟,将物理模型导入软件中进行模型检验,使用数值仿真软件对网格模型进行数值模拟计算,见图 2。

通过对比 269×10^4 、 370×10^4 、 484×10^4 个

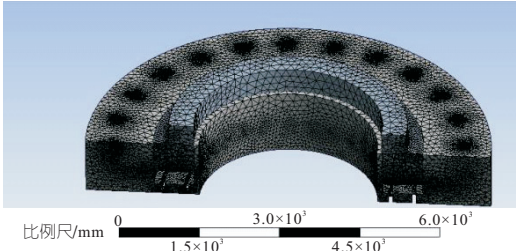


图 2 划分出的网格模型

Fig. 2 Mesh model of the simulation

网格的模拟结果(图 3),发现出口温度差异小于 5%,已达到网格无关性。为数值模拟的精准度与时间成本考虑,最终选用 370×10^4 个网格以保证精度与计算效率。

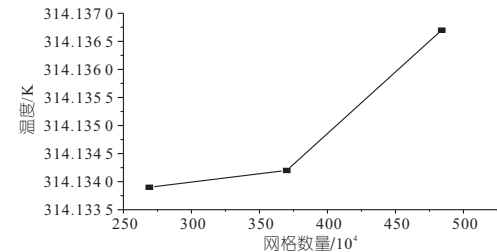


图 3 网格无关性验证

Fig. 3 Grid independence verification

2.4 方案设计

根据水轮发电机运行的相关规定^[9],推力轴承所使用的油浸式油盆的油温最低限值需遵循制造商的指示执行。该电站所用推力轴承冷却油为 L-TSA46 号,推力轴承瓦温为达到工作瓦温且不超过报警状态设为额定工况 323 K。结合水电站运行工程,不同方案纳米氧化铜浓度分别设为 0、0.1wt%、0.3wt%、0.5wt%。

2.5 边界条件

镜板上表面施加载荷为所承受的轴向载荷;镜板各表面设为旋转壁面,旋转方向为顺时针。在推力轴承的推力瓦和镜板处,根据实际情况设定温度边界条件,设定推力瓦温度为 323 K,镜板额定转速为 111.1 r/min,进口流量为 23.33 m³/h,所使用润滑油为 L-TSA46 且冷却油进口温度设为 300 K。根据不同工况设置初始油参数。在镜板与推力瓦间存在一层很薄的油膜,但本试验中不对油膜进行计算,故不予考虑,认为镜板与推力瓦相接。

3 计算结果与分析

3.1 压力结果分析

图 4 所选平面为推力轴承内部 xz 平面,因冷却油温度分布在推力轴承内基本呈对称分布,

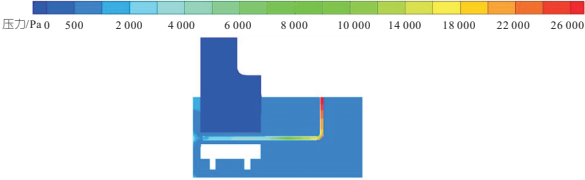


图 4 0.1wt%压力分布云图

Fig. 4 Pressure distribution contour at 0.1wt% concentration

所以均选择一侧截面。在推力轴承中,因镜板转速与冷却油进口速度一致,油盆内压力分布大致相同,故以 0.1wt% 为例进行分析。由图 4 可看出,压力整体分布呈现出一定的规律性,压力在轴承的承载区域内逐渐变化,从冷却油入口到出口处存在压力降,这表明润滑油在轴承内的流动是从高压区流向低压区,以实现轴承散热和润滑功能。

3.2 速度结果分析

图 5 为速度分布云图,图 6 为速度随纳米氧化铜浓度变化图。由图 5 可看出,在推力轴承中润滑油的速度分布呈现一定规律,整体趋势相似,在润滑油入口处速度较快,随着油的扩散,速度逐渐降低,这是因为润滑油的流动需克服摩擦阻力等因素逐渐降低速度,在推力轴承出口处设置润滑油流速监测点。由图 6 可看出,随着纳米氧化铜的浓度增加,速度逐渐降低,且纳米氧化铜浓度为 0.5wt% 时的出口速度最低,这是由于运动黏度的增加,导致流动性变差,阻力增加,从而使运动速度降低。

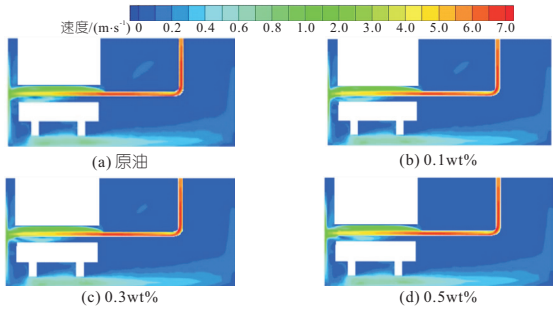


图 5 速度分布云图

Fig. 5 Velocity distribution contours

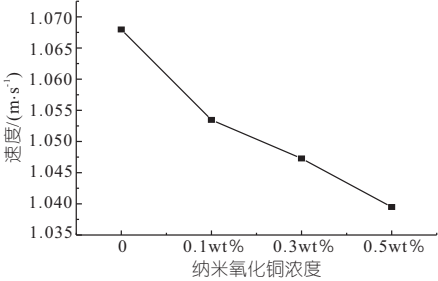


图 6 速度随纳米氧化铜浓度变化图

Fig. 6 Velocity variation with nano-copper oxide concentration

3.3 温度分析

图 7 为不同浓度纳米氧化铜颗粒润滑油温度分布云图。由图 7 可看出,随着冷油由入口处进入推力轴承油盆内,推力瓦内层和镜板内孔处温度逐渐降低,越靠近进油管出口处的温度越低,且由镜板旋转带动冷油在油盆内运动。由于对流换热作用,冷油因密度较大在油盆内自然下沉,热油上升,所以油盆内上方温度较下方温度高。在纳米氧化铜颗粒浓度从原油递增的过程中,其温度分布为低温部分逐渐增多,散热效率在逐渐提高。

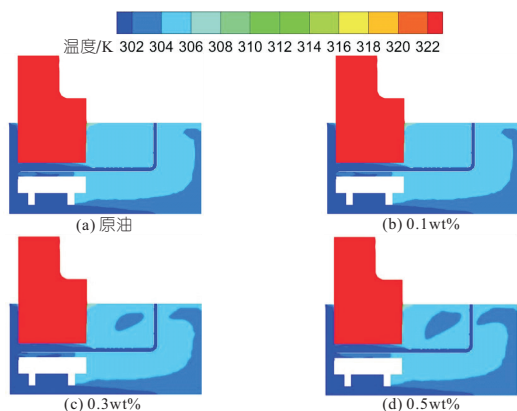


图 7 不同浓度纳米氧化铜颗粒润滑油温度分布云图

Fig. 7 Temperature distribution contours of lubricating oil with different nano-copper oxide concentrations

3.4 无量纲量与散热效率分析

图 8 为温度、散热效率随不同纳米氧化铜浓度变化图。由图 8(a)可看出,纳米氧化铜颗粒的加入会使出口温度较原油降低。出口温度随着浓度的增加而降低,当浓度达到 0.5wt% 时推力轴承出口温度达到最低。由图 8(b)可看出,在采用归一化处理散热效率后所有浓度均提高散热效率,且 0.5wt% 的散热效率最高,随着浓度的增加散热效率逐渐变得平缓。这与采用添加纳米氧化铜的润滑油喷雾冷却传热效率提升趋势高度吻合^[5]。

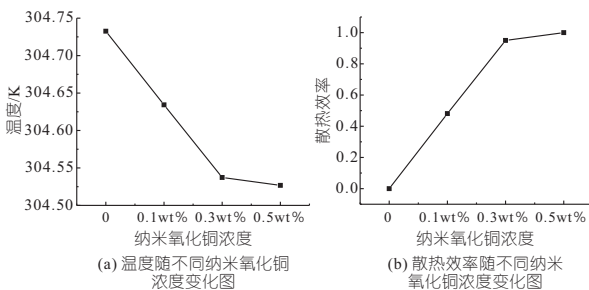


图 8 温度、散热效率随不同纳米氧化铜浓度变化图

Fig. 8 Temperature and heat dissipation efficiency variation with different nano-copper oxide concentrations

综上所述,在本文构建的无量纲量关系中,随着浓度增加, $\bar{T}$ 的值逐渐增大,表明出口温度相

对参考温度升高,这与预期的散热效率随浓度提升而提高的趋势相符。散热效率也逐渐平稳,当浓度达到 0.5wt% 后,出口温度的降低速率变慢。由表 1 可知,纳米氧化铜颗粒的加入改变了润滑油整体的传热性质,导热系数整体呈上升趋势,但也改变了冷却油的动力粘度等流动特性,进而影响流量。纳米氧化铜浓度增加会导致粘度增加,但明显对散热的强化效果强于粘度增加带来的负面影响,能够更有效地将热量带走,随着动力粘度增大,使冷却油流量减小导致出口温度的降低速率变慢。高浓度颗粒增加了冷却油的流动阻力,动力粘度增大,润滑油粘度增加降低流量,将影响热量的有效带出。

4 结论

- 纳米氧化铜可有效强化推力轴承散热,0.5wt% 浓度时散热效率最优。
- 高浓度(>0.3wt%)下黏度增加对流动的负面影响需平衡。
- 未来研究可进一步探索纳米氧化铜颗粒在润滑油中的分散稳定性及对推力轴承的磨损影响。

参考文献:

- 赵霖, 闵占奎, 刘秀良, 等. 某水电站推力轴承温度过高原因分析及处理[J]. 机械研究与应用, 2022, 35(3): 132-133. (ZHAO L, MIN Z K, LIU X L, et al. Cause analysis and treatment of overheat of thrust bearing in a hydropower station[J]. Mechanical research & application, 2022, 35(3): 132-133. (in Chinese))
- 万玉倩, 田子勤. 三峡左岸电站 VGS 机组推力瓦温偏高及改善措施[J]. 人民长江, 2009, 40(2): 26-28, 106. (WAN Y Q, TIAN Z Q. Causes of high temperature of VGS unit's thrust bearing in left bank power station and improvement measures [J]. Yangtze River, 2009, 40(2): 26-28, 106. (in Chinese))
- 张奇. 600MW 大型水轮发电机组推力轴承瓦温和油温高原因分析及处理[J]. 华电技术, 2015, 37(10): 54-57, 78-79. (ZHANG Q. Reason analysis and treatment of high temperature of thrust bearing bush and oil for 600 MW large-scale hydroelectric generating unit[J]. Huadian technology, 2015, 37(10): 54-57, 78-79. (in Chinese))
- 陈凌芝. 藏木水电站发电机选型与结构设计[D]. 西安: 西安理工大学, 2015. (CHEN L Z. High altitude area zangmu hydro-generator design[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2015. (in Chinese))

(下转第 226 页)

4 结 论

a. 考虑风光电源后,水库调度不确定性显著提高,但通过模型优化可有效平抑风光出力波动,实现水电与风光互补,为电网提供稳定出力。

b. 在考虑风光电源后,应重点关注丰、平水年的蓄泄策略,汛前水位应考虑提前消落且将消落深度加大,以预留出更多库容灵活应对与风光互补需求和发电需求。

参考文献:

- [1] 井志强, 王义民, 王学斌, 等. 水风光多能互补运行中多主体损益关系分析[J]. 水力发电学报, 2022, 41(11): 56-67. (JING Z Q, WANG Y M, WANG X B, et al. Analysis of multi-entity profit and loss relationship in hydro-windsolar power complementary operation[J]. Journal of hydroelectric engineering, 2022, 41(11): 56-67. (in Chinese))
- [2] 吴钰姝, 申建建, 程春田. 融合高精度气象数据的水风光系统长短期嵌套消纳调度方法[J/OL]. 电网技术, 2025: 1-11. (2025-05-09). <https://link.cnki.net/doi/10.13335/j.1000-3673.pst.2025.0056>. (WU Y S, SHEN J J, CHENG C T. Long-term and short-term nesting dispatch method for hydro-wind-photovoltaic system with integrated high-precision meteorological data[J/OL]. Power system technology, 2025: 1-11. (2025-05-09). <https://link.cnki.net/doi/10.13335/j.1000-3673.pst.2025.0056>. (in Chinese))
- [3] 鲜于虎成, 黄显峰, 张艳青, 等. 考虑短期波动与弃电风险的水光互补系统中长期双层嵌套优化调度[J]. 电工技术学报, 2023, 38(21): 5781-5793. (XIAN YU H C, HUANG X F, ZHANG Y Q, et al. Medium-and long-term double-layer nested optimal scheduling of hydro-PV complementary system considering short-term power fluctuation and curtail-
- ment risk[J]. Transactions of China electrotechnical society, 2023, 38(21): 5781-5793. (in Chinese))
- [4] ÁVILA L, MINE M R M, KAVISKI E, et al. Evaluation of hydro-wind complementarity in the medium-term planning of electrical power systems by joint simulation of periodic streamflow and wind speed time series: A Brazilian case study[J]. Renewable energy, 2021, 167: 685-699.
- [5] 冉洪伟, 任琰琰, 吴星烨, 等. 考虑风光不确定性的水库多目标优化调度[J]. 水电能源科学, 2025, 43(7): 213-217. (RAN H W, REN Y Y, WU X Y, et al. Multi-objective optimal scheduling of reservoirs considering wind and photovoltaic uncertainties[J]. Water resources and power, 2025, 43(7): 213-217. (in Chinese))
- [6] 张振东, 唐海华, 覃晖, 等. 风光水互补系统发电效益-稳定性多目标优化调度[J]. 水利学报, 2022, 53(9): 1073-1082. (ZHANG Z D, TANG H H, QIN H, et al. Benefit-stability multi-objective optimal operation of wind-solar-hydropower hybrid system[J]. Journal of hydraulic engineering, 2022, 53(9): 1073-1082. (in Chinese))
- [7] 齐帅, 王现勋, 曾坤, 等. 水风光打捆模式下新能源占比对水电机组效率的影响[J]. 长江科学院院报, 2023, 40(1): 43-50. (QI S, WANG X X, ZENG K, et al. Influence of new energy ratio on hydropower unit efficiency under hydro-wind-solar bundling mode[J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 2023, 40(1): 43-50. (in Chinese))
- [8] 张敬萌, 黄炜斌, 王峰, 等. 大型风光水混合能源互补发电系统的优化调度研究[J]. 中国农村水利水电, 2019(12): 181-185, 190. (ZHANG X S, HUANG W B, WANG F, et al. Research on the optimal scheduling of large wind-PV-hydro hybrid energy complementary power generation system[J]. China rural water and hydropower, 2019(12): 181-185, 190. (in Chinese))

(上接第 206 页)

- [5] 黄龙, 王雨娇. 氧化铜纳米流体喷雾冷却传热性能实验研究[J]. 低温工程, 2024(3): 56-63. (HUANG L, WANG Y J. Experimental study on influence of spray cooling on heat transfer of copper oxide nano-fluid[J]. Cryogenics, 2024(3): 56-63. (in Chinese))
- [6] SHEIKHOLESLAMI M, REZAEIANJOUYBARI B, DARZI M, et al. Application of nano-refrigerant for boiling heat transfer enhancement employing an experimental study[J]. International journal of heat & mass transfer, 2019, 141: 974-980.
- [7] 宋小云. 球形氧化物颗粒的制备及其抗磨减磨性能[D]. 济南: 济南大学, 2014. (SONG X Y. Preparation of Spherical Oxide Particles and Their Anti-
- Wear Properties[D]. Jinan: University of Jinan, 2014. (in Chinese))
- [8] 张杨. 水轮发电机组推力轴承散热系统研究综述[J]. 水电站机电技术, 2018, 41(1): 10-14, 71. (ZHANG Y. Overview of research on heat dissipation system of thrust bearing of hydrogenerator unit[J]. Mechanical & electrical technique of hydropower station, 2018, 41(1): 10-14, 71. (in Chinese))
- [9] 国家能源局. 水轮发电机运行规程: DL/T 751-2001[S]. 北京: 中国电力出版社, 2014. (National Energy Bureau of the People's Republic of China. Specification of Operation for Hydro-generators: DL/T 751-2014[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2014. (in Chinese))