DOI: 10.3901/JME.2020.21.022

推力瓦热瞬态变形机理及抑制方法研究*

王悦昶^{1,2} 刘莹¹ 张高龙³ 王占朝⁴ 王玉明¹

(1. 清华大学摩擦学国家重点实验室 北京 100084;

2. 利兹大学功能表面研究所 利兹 LS2 9JT 英国;

3. 清华大学神经调控技术国家工程实验室 北京 100084;

4. 清华大学汽车安全与节能国家重点实验室 北京 100084)

摘要: 针对核主泵水润滑推力轴承在事故工况下的热瞬态过程,建立了热固耦合瞬态有限元分析模型。基于所建立模型,分析了常见两层和三层结构推力瓦热瞬态过程瓦面变形,重点分析了三层结构推力瓦隔热层厚度对瓦面变形的影响。随后,进一步探索了遏制瓦面凹变形的办法,阐明了热瞬态过程中瓦面温度场分布不均产生瓦面凹变形的主因。进一步提出一种新型包边式推力瓦,并仿真验证其能够有效降低热瞬态过程瓦面凹变形,为核主泵水润滑推力轴承的推力瓦设计提供了新思路。

关键词: 推力轴承; 推力瓦; 热瞬态; 瓦面变形

中图分类号: TH131

Research on Thermal Transient Deformation Mechanism and Suppression Method of Thrust Pad

WANG Yuechang^{1,2} LIU Ying¹ ZHANG Gaolong³ WANG Zhanchao⁴ WANG Yuming¹

(1. State Key Laboratory of Tribology, Tsinghua University, Beijing 100084;

2. Institute of Functional Surfaces, University of Leeds, Leeds, LS2 9JT UK;

3. National Engineering Laboratory of Neuromodulation, Tsinghua University, Beijing 100084;

4. State Key Laboratory of Automotive Safety and Energy, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract: Water lubricated thrust bearings in reactor coolant pumps (RCP) experience thermal transient processes during the accident conditions. A thermal-solid coupling model is developed for the thermal transient processes by finite element method. Based on the developed model, conventional double-layer and triple-layer thrust pads are analyzed to obtain the surface deformation during the thermal transient processes. In particular, the effect of the thickness of heat insulation layer in triple-layer pad on surface deformation is discussed. Subsequently, several suppression methods to reduce the concave deformation of the pad surface are analyzed. The simulations indicate that the leading mechanism of forming the concave deformation is the uneven distribution of tile surface temperature field during the thermal transient processes. With this understanding, a new type of thrust pad having the edge of the thrust pad surface wrapped is proposed, which is verified by simulation to efficiently reduce the concave deformation during the thermal transient processes. This work provides a new thought to design the thrust pad of the water lubricated thrust bearings in RCP.

Key words: thrust bearings; thrust pad; thermal transient; pad surface deformation

0 前言

屏蔽式核主泵是我国第三代核电站技术国产化的关键装备^[1]。相较于传统压水堆核电厂采用的轴

封泵,屏蔽泵中所有部件均在压力边界内部,无需轴封防止冷却剂泄漏,具有系统简化、安全性高的特点^[2]。在屏蔽泵中,叶轮推力及转子自重均由水润滑推力轴承承担,推力轴承的性能是影响核主泵可靠性的关键因素^[3]。

推力轴承在核主泵压力边界破口事故工况下,会经历热瞬态过程,温升剧烈^[4]。水润滑轴承润滑

* 国家重点基础研究发展计划(973 计划, 2015CB057303)和国家自然科学基金(51975315)资助项目。20200429 收到初稿, 20200605 收到修改稿

膜厚度为 10^{-5} m 量级，与推力瓦能够产生的轴向变形在同一量级，水膜的产生和保持易受到影响^[5]。相关研究^[6]表明，在热瞬态过程中推力瓦工作面发生凹变形，破坏推力轴承水膜形成能力，导致推力轴承难以重新启动工作或磨损失效。抑制推力瓦面凹变形是改善推力轴承在故障工况发生后，再启动要求的重要手段。目前有专利^[7-8]公开了基于更改轴瓦结构设计提升其抗热瞬态变形能力的方法。但关于推力瓦热瞬态变形过程的理论分析及对应机理尚少见公开报导。系统的分析推力瓦热瞬态过程的瓦面变形发展历程和对应机理对于经济、高效地抑制瓦面凹变形具有指导意义。

本文针对推力瓦热瞬态变形过程，采用商业有限元软件 ANSYS 建立了相应的热固耦合瞬态有限元分析模型。使用模型对文献中报道的两层和三层结构推力瓦开展热瞬态过程分析。基于分析结果阐释了推力瓦热瞬态变形过程机制并研究了抑制瓦面凹变形的的方法，最终提出一种新的包边式推力瓦结构，并通过所建立模型验证其抑制瓦面凹变形的有效性。

1 模型建立

推力瓦热固耦合瞬态模型采用有限元分析软件 ANSYS 建立，建模流程如图 1 所示。

图 1 热固耦合瞬态有限元模型建立流程

首先建立几何模型。推力瓦结构示意图如图 2 所示，可近似分为三层，其中上层为瓦面材料，中层为金属瓦基，下层为隔热层，当隔热层厚度设为 0 时即退化为两层结构推力瓦。推力瓦主要几何参数如表 1^[9]所示。瓦面和隔热层均假设为聚醚醚酮 (PEEK) 高分子材料，瓦基设为不锈钢，相关材料参

数见表 2^[10-11]。

图 2 推力瓦几何模型示意图

表 1 推力瓦主要几何参数

参数	数值
内径 R_i /m	0.24
外径 R_o /m	0.46
瓦面厚度 h_u /m	0.008
瓦基厚度 h_m /m	0.05
隔热层厚度 h_d /m	0~0.007

表 2 材料参数

参数	高分子材料	不锈钢
弹性模量 E /GPa	3.7	195
泊松比 μ	0.3	0.3
导热系数 λ /(W/(m K))	0.25	16.2
线膨胀系数 $\alpha_t/\times 10^{-5} \text{ m}^{-1}$	4.8	1.2
密度 ρ /(kg/m ³)	1 290	7 910
比热容 c /(J/(kg K))	1 338	500

建立几何模型并设置材料参数后进行实体网格划分。使用 ANSYS 提供的三维多物理场耦合单元 SOLID226 进行网格划分。由于热固耦合分析对网格形状并无精细要求，固采用自动网格划分策略，中等精度网格尺寸设置。

随后进行边界条件设置。热瞬态问题的热边界条件设置为推力瓦完全浸泡在高温水中，推力瓦各表面均设置为对流换热边界条件，对流换热系数采用水自然对流换热系数值取 $200 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ ^[12]。根据屏蔽泵的设计，高温水温设置为 $200 \text{ }^\circ\text{C}$ ^[2]。位移边界条件设置在推力瓦支点位置，即设推力瓦支点沿轴向位移为 0。该轴瓦采用的是中心支点支撑。

瞬态求解需要在 ANSYS 中设置分析类型为瞬态，并预设瞬态分析时长及时间步长。本文中热瞬态仿真持续时长设为 $7\ 200 \text{ s}$ ，时间步长设置为 1 s ，以确保最终推力瓦进入热稳态阶段。

提取每 10 s 的仿真结果开展推力瓦热瞬态过程分析。为了便于分析热瞬态过程中瓦面变形程度，定义瞬时瓦面变形为

$$f_t = u_{\max} - u_{\min} \quad (1)$$

式中, f_t 为瞬时瓦面变形, $u_{\max}$ 和 $u_{\min}$ 分别是瓦面瞬时弹性变形的最大值和最小值。需要指出的是, 该变量无法体现瓦面变形的“凹凸”性, “凹凸”性需要通过具体的瓦面变形云图体现。

2 典型推力瓦仿真结果分析

针对隔热层厚度 $h_d = 0 \text{ mm}$, 3 mm , 5 mm , 7 mm 分别进行热瞬态过程分析。图3以 $h_d = 0 \text{ mm}$ 和 $h_d = 7 \text{ mm}$ 为例, 给出了热瞬态过程瓦面温度最大最小值 ($T_{\max}$, $T_{\min}$) 及瞬时瓦面变形随时间的变化情况。可以看到, 瓦面温度最终趋近于高温水温度, 即系统达到热平衡。而在热瞬态过程初期 ($1\ 000 \text{ s}$ 以内), 瞬时瓦面变形波动较大, 且数值受隔热层厚度影响较大。随热瞬态过程发展, 两层结构推力瓦 ($h_d = 0 \text{ mm}$) 瞬时瓦面变形首先略微减小, 随后迅速增大到一极大值后减小至一最小值, 随后逐渐增大到一恒定值。三层结构推力瓦 ($h_d = 7 \text{ mm}$) 瞬时瓦面变形变化趋势与双层结构相同, 但是其在热瞬态初期的瞬时瓦面平面度的增加幅度远小于双层轴瓦。

图3 不同隔热层厚度推力瓦瓦面温度及瞬时变形的变化

由于仅凭借瞬时瓦面变形无法判断推力瓦表面变形的凹凸形式, 因此以隔热层厚度 $h_d = 3 \text{ mm}$ 的推力瓦为例, 选取一系列瞬时瓦面平面度变化曲线关键点(图4), 绘制瓦面温度分布及变形分布云图如图5所示。结合图4和图5的结果表明, 热瞬态过程开始后, 推力瓦首先迅速形成凸变形(a), 随后进入凹变形阶段(b-c-d-e-f), 凹变形经过一个峰值(d)后, 逐渐变小, 随后重新进入凸变形阶段(f-g-h), 达到热平衡状态。

图4 瓦面热瞬态过程瞬时变形 ($h_d = 3 \text{ mm}$)

图5 部分关键点推力瓦瓦面温度分布和变形云图

为了进一步明确不同隔热层厚度的影响,图6进一步对比了不同隔热层厚度对应瞬时变形的仿真结果。表3列出了不同隔热层厚度瞬时瓦面变形变化曲线中的关键拐点值(b, d, f)及稳定值(h)。仿真结果表明,随隔热层厚度增加,瓦面热瞬态过程中凹变形峰值显著降低,凹变形持续的时间逐渐减小,其峰值出现的时间逐渐后延,而对进入稳态后的瓦面凸变形值无明显影响。

图6 不同隔热层厚度瞬时瓦面变形热瞬态过程曲线

表3 不同隔热层厚度瞬时瓦面变形曲线关键点值

隔热层厚度 h_d/mm	瞬时瓦面平面度 $f_t/\mu\text{m}$			
	关键点 b	关键点 d	关键点 f	关键点 h
0	6.6	92.1	15.5	75.2
3	11.9	33.2	16.3	75.8
5	11.7	27.3	16.8	75.3
7	11.0	23.4	17.1	74.7

3 瓦面凹变形抑制方法探究

第2节中的分析结果表明,推力瓦背部增加隔热层能够减小热瞬态过程中产生的凹变形幅值,但无法避免推力瓦出现凹变形阶段。考虑到水润滑推力轴承水膜较薄^[5-6],且推力瓦背部隔热层受限于轴向空间和加工难度不能无限加厚,有必要探究结构简单、便于加工并能消除推力瓦热瞬态过程中凹变形阶段的瓦面凹变形抑制方法。

3.1 推力瓦背部开槽

推力瓦背部开槽理论上能够改变推力瓦刚度,进而对瓦面变形产生影响。基于双层结构推力瓦,在金属瓦背设计了如图7a~7d所示的4种槽形,分别进行与前述工况相同的热瞬态分析。

图7 双层推力瓦背部不同槽型示意图

各槽型推力瓦结构与无槽型双层结构推力瓦瞬时瓦面变形仿真结果如图8所示。可以看到,四种槽形在热瞬态过程中所产生的瞬时变形波动及凹变形幅值相对于无沟槽的双层结构轴瓦有明显增大。因此,瓦背增加沟槽的设计并不能改善瓦面热瞬态凹变形的问题。

图8 双层推力瓦背面不同槽型瞬时瓦面变形对比

上述仿真结果说明,热瞬态过程推力瓦表面产生凹变形的机制应与轴瓦整体结构刚度关系不大,结合第2节中的瓦面温度分布云图可知,凹变形的产生应与热瞬态初期瓦面温度分布不均,即边沿位置温升显著高于瓦面内部密切相关。凹变形产生于热瞬态初期(1 000 s 以内),推力瓦表面的温度分布主要受到来自于瓦面热源的影响,而背部开槽的推力瓦,由于其增加了对流换热面积,其瞬时温度分布较无开槽结构轴瓦更高,从而带来瓦面更大的变

形。当推力瓦趋近热平衡状态,背部开槽轴瓦对刚度减小的作用则体现的较为明显,开槽轴瓦较无开槽轴瓦能够有更小的瞬时瓦面变形。基于上述分析,可以认为,热瞬态过程推力瓦凹变形形成过程中温度场,尤其是近瓦面温度场分布是关键影响因素。

3.2 新型包边式推力瓦

基于第3.1节的分析,要解决推力瓦的热瞬态凹变形问题,必须均匀化热瞬态初期推力瓦表面的温度分布。而热瞬态过程中温度分布的均匀能力由热扩散系数($a=\lambda/\rho c$)表征。根据表2中的热导率、比热容和密度数据,可计算高分子材料的热扩散系数为 $1.45\times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$,远低于不锈钢的热扩散系数 $4.10\times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$,即高分子材料均温能力更差,更容易集聚热量,产生局部高温。而在推力瓦上表面边缘位置,侧面和推力瓦表面的热量同时导入推力瓦边缘位置,其传入的热量要显著高于推力瓦表面内部。综上可知,高分子材料推力瓦表面边缘必然在热瞬态过程初期温度显著高于推力瓦表面中心温度。

由于推力瓦热瞬态过程热源形式无法改变,因此解决该问题的直接方法可以考虑提高推力瓦表面边缘位置材料的热扩散系数。基于这一思想,本文提出了在推力瓦表面采取不锈钢基体包围高分子材料瓦面的包边式结构,使得推力瓦边缘为热扩散系数更高的材料,如不锈钢瓦基材料。该结构推力瓦示意图如图9所示。

图9 包边式结构推力瓦表面结构示意图

针对图9所示推力瓦表面结构,开展了基于双层和三层推力瓦结构的热瞬态过程分析,分析结果如图10所示。包边结构显著降低了双层结构的热瞬态凹变形量,并且达到了与无包边三层推力瓦结构相近的抑制效果。采用包边结构与无包边结构三层推力瓦抑制热瞬态凹变形的能力相近。而在趋近稳态时,包边结构能够产生更显著的瓦面凸变形。

图10 包边结构推力瓦瞬时瓦面变形

为了进一步了解包边结构推力瓦的热瞬态凹变形,根据图10的曲线,选择包边结构双层推力瓦在 $t=100 \text{ s}$,包边结构三层推力瓦在 $t=400 \text{ s}$ 时的仿真结果,绘制瓦面变形及温度分布(图11)。可以看到,双层推力瓦凹变形主要来自于包边不锈钢部分变形,而三层推力瓦的凹变形主要来自于高分子材料区域的四角位置,而推力瓦面内部区域变形程度较为均匀。

图11 包边结构推力瓦瓦面变形分布及其温度分布

根据图11中包边双层推力瓦凹变形云图,若能消除不锈钢包边带来的整体凹变形,即可避免推力瓦在热瞬态过程中发生凹变形。一种可行的方法是,在推力瓦加工时,对包边部分预加工形成预置的斜面,如图12所示,斜面倾斜深度应为微米级,图中所示斜面仅为该方法的示意图,未非实际需加工的斜面尺寸。此微米级斜面对轴瓦热瞬态过程中的对流换热及导热等过程没有影响,但由于瓦面变形均为微米级,此微米级斜面能够有效抵消不锈钢部分瓦面的变形,使得不锈钢包边表面变形后也无法高于高分子材料区域,从而达到消除热瞬态过程凹变形阶段的目的。

图 12 包边结构斜面布置示意图

增加斜面结构后, 包边结构推力瓦热瞬态过程瞬时瓦面变形的计算只需考虑瓦面高分子材料区域。相应的瞬时瓦面变形变化曲线如图 13 所示。可以看到, 只考虑高分子材料区瞬时瓦面变形, 无论是双层结构还是三层结构, 包边结构推力瓦均不存在最大凹变形点 d 及凹变形向凸变形转折的拐点 f 。可以注意到, 斜面包边结构能够使双层结构推力瓦热瞬态凹变形量比三层推力瓦结构更小。因此, 斜面包边结构双层推力瓦结构可作为一种抑制推力瓦热瞬态凹变形的新型设计。

图 13 斜面包边结构推力瓦瞬时瓦面变形

4 结论

本文针对核主泵水润滑推力轴承在事故工况下的热瞬态过程, 建立了热固耦合瞬态有限元分析模型。基于所建立模型, 分析了常见两层和三层结构推力瓦热瞬态过程瓦面变形, 重点分析了三层结构推力瓦隔热层厚度对瓦面变形的影响。随后, 进一步探索了抑制瓦面凹变形的办法, 提出了一种新型包边式推力瓦, 主要结论如下。

(1) 造成推力瓦热瞬态过程中凹变形阶段的主要原因是组合材料推力瓦表面温度在热瞬态过程初期分布不均, 瓦面边缘温度远高于瓦面中心。

(2) 推力瓦背面隔热层越厚, 其热瞬态过程中凹变形最大值越小, 在考虑推力瓦安装空间及加工难度的条件下, 仅依靠隔热层无法达到消除凹变形

阶段的目的。

(3) 基于促进推力瓦表面在热瞬态过程中快速均温的思路, 提出斜面包边结构, 能够在仅使用不含隔热层的双层结构推力瓦的条件下, 达到消除推力瓦热瞬态过程凹变形阶段的目标。

参 考 文 献

- [1] 孙汉虹. 第三代核电技术 AP1000[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
SUN Hanhong. The third generation nuclear power technology[M]. Beijing: China Power Press, 2010.
- [2] 史涛锋. 屏蔽主泵与湿绕组主泵的对比研究[J]. 发电设备, 2015, 29(5): 370-372.
SHI Taofeng. Contrastive study on AP1000 canned motor RCP and wet winding motor RCP[J]. Power Equipment, 2015, 29(5): 370-372.
- [3] 王永峰, 杜广波, 李浩. AP1000 核电关键设备的制造特点及国产化[J]. 能源技术, 2010, 31(1): 28-33.
WANG Yongfeng, DU Guangbo, LI hao. Summarizing of manufacturing characteristic of AP1000 nuclear power key equipment and its localization[J]. Energy Technology, 2010, 31(1): 28-33.
- [4] 刘延浩. 某屏蔽电机失水和提速工况的瞬态热仿真及安全评估[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2019.
LIU Yanhao. Transient thermal simulation and safety assessment of a canned motor under water loss and speed increase conditions[D]. Harbin: Harbin University of Science and technology, 2019.
- [5] 宋智翔, 刘莹, 郭飞, 等. 屏蔽式核主泵水润滑可倾瓦推力轴承推力盘的离心效应[J]. 机械工程学报, 2018, 54(1): 127-135.
SONG Zhixiang, LIU Ying, GUO Fei, et al. Influence of centrifugal deformation of thrust collar in water lubricated tilting-pad thrust bearings of nuclear canned pump[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(1): 127-135.
- [6] 李梦启, 王伟光, 李藏雪, 等. 核主泵水润滑推力轴承试验的磨损颗粒研究[J]. 润滑与密封, 2016, 41(9): 113-120.
LI Mengqi, WANG Weiguang, LI Zangxue, et al. Study on wear debris in water lubricated thrust bearing of nuclear main pump after rig test[J]. Lubrication Engineering, 2016, 41(9): 113-120.
- [7] 王伟光, 李藏雪, 李伟, 等. 抗瞬态变形一体式水润滑推力瓦: CN206754139U[P]. 2017-12-15.

- WANG Weiguang, LI Zangxue, LI Wei, et al. Anti-transient deformation integrated water-lubricated thrust pad: CN206754139U[P]. 2017-12-15.
- [8] 王伟光, 李藏雪, 李伟, 等. 抗瞬态变形分层式水润滑推力瓦: CN206655907U[P]. 2017-11-21.
- WANG Weiguang, LI Zangxue, LI Wei, et al. Anti-transient deformation layered water-lubricated thrust pad: CN206655907U[P]. 2017-11-21.
- [9] 宋智翔. 计入惯性力和界面滑移影响的水润滑轴承性能研究[D]. 北京: 清华大学, 2018.
- SONG Zhixiang. Research on water-lubricated tilting-pad thrust bearing considering inertia force and boundary slip[D]. Beijing: Tsinghua University, 2018.
- [10] 付国太, 刘洪军, 张柏, 等. PEEK 的特性及应用[J]. 工程塑料应用, 2006(10): 69-71.
- FU Guotai, LIU Hongjun, ZHANG Bai, et al. PEEK features and applications[J]. Engineering Plastic Application, 2006(10): 69-71.
- [11] 董光能, 陈志澜, 谢友柏, 等. PEEK 塑料摩擦销的温度场理论计算[J]. 摩擦学学报, 2000(1): 36-39.
- DONG Guangneng, CHEN Zhilan, XIE Youbai, et al. Theoretical calculation of temperature field of PEEK plastic friction pin[J]. Tribology, 2000(1): 36-39.
- [12] 黄焕椿. 热工技术词典[M]. 上海: 上海辞书出版社, 1994.
- HUANG Huanchun. Thermal technology dictionary[M]. Shanghai: Shanghai Lexicographical Publishing House. 1994.

作者简介: 王悦昶, 男, 1993 年出生。主要研究方向为流体密封技术。

E-mail: y.wang1@leeds.ac.uk

刘莹(通信作者), 女, 1965 年出生, 博士, 副教授。主要研究方向为机械设计及理论、流体润滑技术。

E-mail: liuying@mail.tsinghua.edu.cn