

偏航制动摩擦片热力耦合计算及失效原因分析

王岳峰, 姜宏伟, 宁文钢, 王建华

(太原重工股份有限公司技术中心, 太原 030024)

摘要: **目的** 结合摩擦片的失效原因, 分析偏航制动摩擦片的接触面受力情况。**方法** 利用有限元法建立制动盘和制动器摩擦片的热力耦合接触模型, 设置摩擦片和制动盘的参数和材料性能, 研究不同压力、滑动速度、摩擦系数和环境温度下的制动器摩擦片应力和温度的分布情况。**结果** 得到了偏航压力、滑动速度、摩擦系数、环境温度对制动器摩擦片接触面的等效米塞斯应力和温度分布曲线, 摩擦片两侧区域属于等效应力和温度分布的交变集中区, 但靠近边缘, 等效应力和温度值略微减小。适当减小压力, 增大滑动速度, 减小摩擦系数, 有助于减小摩擦片接触面的等效米塞斯应力分布, 温度对摩擦片接触面的等效米塞斯应力分布基本无影响。得到了摩擦片接触面等效米塞斯应力和温度场与接触面位置的高斯分布曲线方程。通过将制动器摩擦片磨损失效照片和文中计算数据进行对比, 验证了有限元分析的正确性。**结论** 通过合理选择偏航压力、滑动速度、摩擦系数, 可以有效地缓解偏航制动器摩擦片的等效应力和温度分布的交变集中区, 进而达到延长摩擦片使用寿命的目的。

关键词: 制动; 摩擦片有限元; 耦合; 温度场; 应力场

中图分类号: TM614 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2018)02-0111-06

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.02.018

Thermo-mechanical Coupled Calculation and Failure Cause Analysis of Yaw Brake Friction Plate

WANG Yue-feng, JIANG Hong-wei, NING Wen-gang, WANG Jian-hua

(Technology Center of Taiyuan Heavy Industry, Taiyuan 030024, China)

ABSTRACT: The work aims to analyze force conditions on contact surface of yaw brake friction plate by referring to failure reason of the friction plate. Thermo-mechanical coupled contact model of brake disc and brake friction plate was established in finite element method. Parameters and material performance of the friction disc and brake disc were set. Stress and temperature distribution of the brake friction plate was studied provided with different pressure, sliding speed, friction coefficient and ambient temperature. Equivalent Mises stress and temperature distribution curves of the contact surface on the brake friction plate were obtained provided with yaw pressure, sliding speed, friction coefficient and ambient temperature. Both sides of the friction plate belonged to an alternating stress concentration zone of equivalent stress and temperature distribution, but were near edges, and equivalent stress and temperature values decreased slightly. Reducing pressure, increasing sliding speed and reducing friction coefficient helped reducing the equivalent Mises stress distribution of contact surface on friction plate. Temperature had no effect on the equivalent Mises stress distribution of contact surface on friction plate. Gauss distribution curve equation involving the equivalent Mises stress & temperature field and contact surface position of contact surface on friction plate was obtained.

收稿日期: 2017-10-09; 修订日期: 2017-11-15

Received: 2017-10-09; Revised: 2017-11-15

基金项目: 山西省重点研发计划项目 (201603D111017)

Fund: Supported by Key Research and Development Plan Project of Shanxi Province (201603D111017)

作者简介: 王岳峰 (1985—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为风电发电机组制动器接触表面工程。

Biography: WANG Yue-feng (1985—), Male, Master, Research focus: contact surface engineering of wind turbine generator brakes.

Correctness of finite element analysis was verified by comparing wear failure photos of the brake friction plate with calculating data in this paper. By choosing reasonable yaw pressure, sliding speed and friction coefficient, an alternating stress concentration zone of equivalent stress and temperature distribution can be effectively relieved for yaw brake friction plate, and service life of the friction plate can be prolonged.

KEY WORDS: braking; friction plate finite element; coupling; temperature field; stress field

制动器是目前快速发展的大型风力发电机组上的重要设备。运用热力学和摩擦学理论分析风机制动系统摩擦副的应力、摩擦及磨损具有重要意义,并且对风机整体设备的安全稳定运行也起到至关重要的作用。由偏航制动器摩擦片非正常磨损等原因造成的风机事故占风机总事故的很大部分,而摩擦片非正常磨损的原因有摩擦片制作工艺、摩擦受力不均匀和装配精度等。

杨智勇等^[1]采用弹塑性热机耦合方法,通过有限元法和实验,研究了汽车制动器在制动过程中温度场和应力场的分布。Evtushenko^[2]等运用有限元法,研究了制动片的温度计算。Andreas^[3]运用有限元模型,研究了刚形体运动中瞬态温度场的分布。黄健萌等^[4]运用有限元法,建立了紧急制动工况下有移动热源的三维瞬态热-结构耦合计算模型,研究了制动过程中应力场和温度场的分布。Floquet 等^[5]研究了通风盘式制动器在制动过程中的数值仿真计算。Bosman^[6]分析了滑动接触界面的瞬态温度效应和热应力分布。徐中等^[7]运用有限元法,分别对二维和三维非光滑接触表面应力场进行了分析。Zagrodzki 等^[8]采用非线性瞬态方法,研究了具有热弹性摩擦副的制动系统。GAO 等^[9-10]采用基于快速傅立叶变化的方法,研究了接触表面的非光滑表面的接触问题。CHOI^[11]研究了制动片的瞬态温度弹性变形场。刘莹等^[12]对盘式制动器摩擦温度场的数值进行了分析。张庆金等^[13-15]研究了制动摩擦材料的发展现状。

分析可知,以上文献对制动器的研究较多,但针对风力发电机组偏航制动在低速重载工况下热力耦合的分析还相对较少。本文利用 ANSYS 对某大型风力发电机上的偏航制动器在偏航过程中的制动盘和摩擦片的热应力和温度应力进行数值模拟,以便对风机制动器的热力耦合分析提供依据。

1 有限元接触模型的建立

运用 ANSYS14.5 软件建立制动盘和制动器摩擦片的三维有限元模型,如图 1a,利用软件中热-应力模块对偏航制动器摩擦片在温度场下的应力场进行热力耦合分析。由于模型的几何形状呈上下和圆周对称,所以仅取三维模型的 1/6 建立二维有限元接触模

型,如图 1b,图中 v 为摩擦片的运动方向。在风机的实际运行过程中,由于制动盘磨损量极小,因此本文的边界条件将制动盘设定为刚性接触体,着重对制动器的摩擦片进行热力学分析。选取对摩擦片接触影响较大的因素,即偏航压力 p 、滑动速度 v 、接触面摩擦系数 μ 和环境温度 t 进行分析,选取参数见表 1。

有限元模型选用 8 节点 223 耦合单元类型,计算时间设置为 5 s,网格结点数为 15238。由于偏航状态转速较低,因此可将旋转速度等效为直线速度,模型着重研究与制动盘接触的摩擦片接触面的等效米塞斯应力分布及温度变化分布。

制动盘的材料为 Q235B,制动器摩擦片材料为复合树脂基,性能参数见表 2。表 2 中, E 为弹性模量, ζ 为泊松比, λ 为导热率, ρ 为密度, C 为比热容, α 为热膨胀系数。该有限元分析中, Q235B 为弹塑性材料。

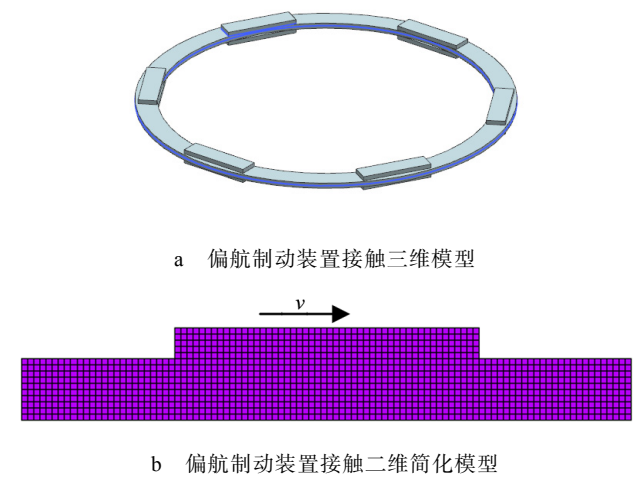


图 1 偏航制动装置接触模型

Fig.1 Contact model of yaw brake device: a) 3D model, b) 2D simplified mode

表 1 制动盘和摩擦片计算参数
Tab.1 Calculation parameters of brake disc and friction plate

Parameter	$t/^{\circ}\text{C}$	$v/(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$	p/MPa	μ
Value 1	15	4	3	0.3
Value 2	20	5	4	0.4

表 2 制动盘和摩擦片材料参数
Tab.2 Material parameters of brake disc and friction plate

Parameter	E/GPa	ζ	$\lambda/(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	$C/(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	$\alpha/(\times 10^{-5}\text{K}^{-1})$
Disc	175	0.3	48.46	7228	419	1.1
Friction plate	2.2	0.25	0.9	1550	1200	1

2 计算结果与分析

2.1 等效米塞斯应力分布和温度分布

图 2 为 $p=4\text{ MPa}$ 、 $t=20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $v=0.004\text{ m/s}$ 、 $\mu=0.4$ 时，摩擦片的等效米塞斯应力和温度分布云图。图 2a 中虚线方框为摩擦片初始位置，实线框为摩擦片运动 5 s 后的计算结果。可以看出，最大应力出现在摩擦片右下角处，随之向上和向左逐渐减小。这主要是由于在运动过程中，摩擦片上靠近运动方向的结点受到周边结点和运动方向的力相互作用，造成结点处内应力加强。从图 2b 可知（图 2b 中虚实线方框含义同图 2a），温度升高主要集中在摩擦片的接触表面，上部温度与环境温度几乎相同，这是因为热应力主要是由接触面的摩擦生热导致，并且在靠近运动方向上的热应力较大。接触面的等效米塞斯应力分布与温度分布规律一致。

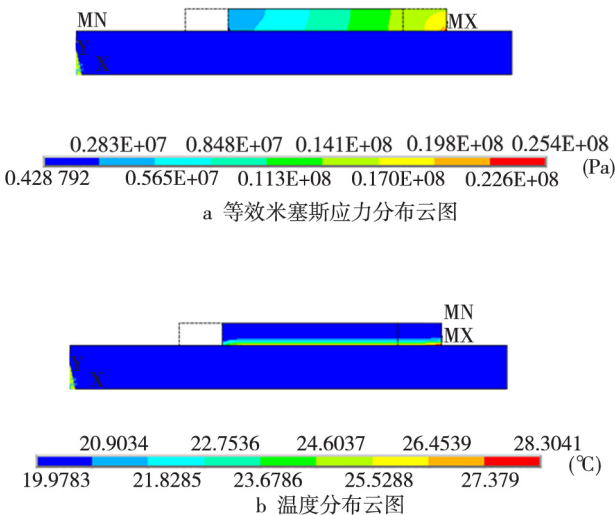


图 2 制动系统有限元等效应力和温度分布云图

Fig.2 Equivalent stress and temperature distribution nephogram of braking system: a) equivalent Mises stress distribution nephogram, b) temperature distribution nephogram

2.2 压力 p 的影响

图 3 为 $t=20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $v=0.004\text{ m/s}$ 、 $\mu=0.4$ 时，摩擦片接触面的等效米塞斯应力和温度分布曲线。图 3a 中横坐标 x/d 为各接触点的 x 坐标值占总长 d 的比值，纵坐标 $SEQV$ 代表摩擦片接触表面的等效米塞斯应力值。从图中可以看出，随着 p 的增大，对应各接触点的等效米塞斯应力均变大，这主要是由于正压力增

大，接触表面的相互作用力加强。同时当 x/d 接近 1 时，等效米塞斯应力有减小的趋势，这是因为当周边没有约束时，摩擦片之间的内应力会减小。图 3b 中横坐标含义同图 3a，纵坐标 $TEMP$ 代表摩擦片接触面的温度值。从图中可以看出，随着 p 的增大， $x/d>0.3$ 区域的温度均升高，这主要是压力增大使得摩擦力增大，从而产生较高的热能。总体与文献[16]中摩擦界面温度变化梯度是一致的，但当 x/d 接近 1 时，温度略微降低，同图 3a 中原因一致。该结果也是对文献[16]中的温度变化梯度进行了局部修正。

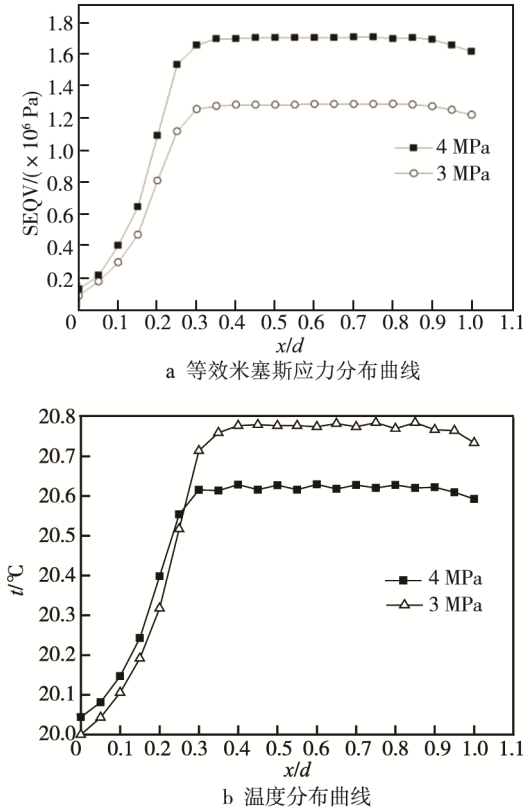


图 3 不同压力下接触面的等效米塞斯应力曲线和温度曲线
Fig.3 Equivalent Mises stress and temperature curves of contact surface under different pressure: a) equivalent Mises stress distribution nephogram, b) temperature distribution nephogram

2.3 滑动速度 v 的影响

图 4 为 $t=20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $p=4\text{ MPa}$ 、 $\mu=0.4$ 时，摩擦片接触表面的等效米塞斯应力和温度分布曲线。从图 4a 可以看出（图 4a 中横纵坐标含义同图 3a），当 $x/d<0.25$ 时，滑动速度 v 较大，对应的等效米塞斯应力略微减

小;但当 $x/d > 0.25$ 时,滑动速度 v 较大,对应的等效米塞斯应力也较大。这主要是因为滑动速度较大时,靠近接触表面运动方向的热能产生较多,温度升高较快,在热力学耦合作用下,对应的等效应力作用也相应增强。当 x/d 接近 1 时,两种滑动速度下等效米塞斯应力均有随之减小的趋势,这与图 3a 中等效应力的变化规律也是一致的。从图 4b 中可以看出(图 4b 中横纵坐标含义同图 3b),随着 v 的增大,对应 $x/d > 0.3$ 区域的温度也升高,这主要是由于滑动速度快,从而产生的热能也较高。当 x/d 接近 1 时,温度略微降低,原因同上述图 3a 中原因一致。

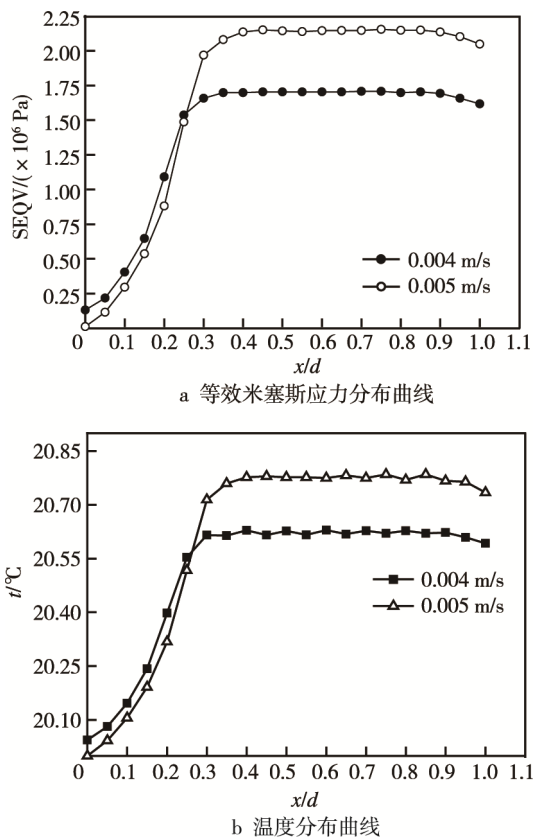


图4 不同速度下接触面等效米塞斯应力和温度分布曲线

Fig.4 Equivalent Mises stress and temperature distribution curves of contact surface at different speed: a) equivalent Mises stress distribution nephogram, b) temperature distribution nephogram

2.4 摩擦系数 μ 的影响

图 5 为 $t=20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $p=4\text{ MPa}$ 、 $v=0.004\text{ m/s}$ 时,摩擦片接触表面的等效米塞斯应力和温度分布曲线。从图 5a 可以看出(图 5a 中横纵坐标含义同图 3a),当摩擦系数 μ 较大时,对应的等效米塞斯应力也相应较大。这主要是因为摩擦系数增大时,摩擦力增大,相同位置的接触表面摩擦热能产生较多,在热力学耦合作用下,对应的等效应力作用也随之增加。当 x/d 接近

1 时,等效米塞斯应力有减小的趋势,这与图 3a 中等效应力的变化规律一致。从图 5b 中可以看出(图 5b 中横纵坐标含义同图 3b),随着 μ 的增大,对应的温度均不同程度升高,这主要是由于摩擦系数大,产生的热能较高。当 x/d 接近 1 时,温度略微降低,原因同上述图 3a 中原因一致。

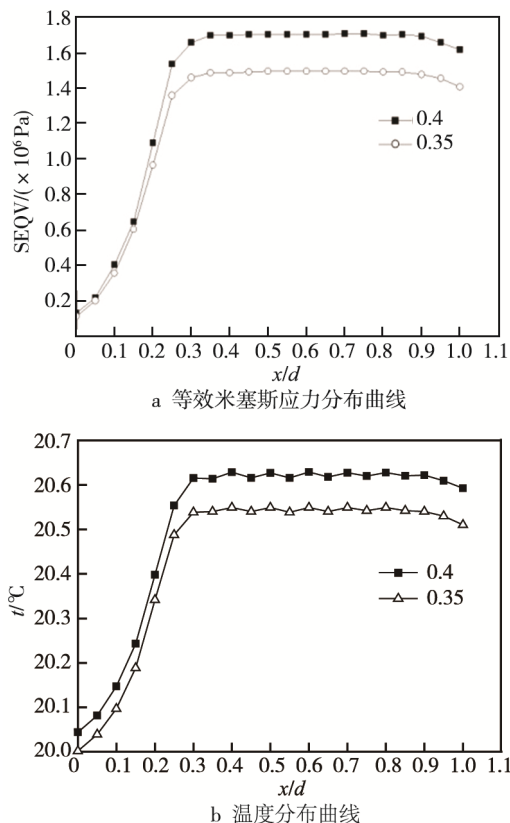


图5 不同摩擦系数下接触面等效米塞斯应力和温度分布曲线

Fig.5 Equivalent Mises stress and temperature distribution curves of contact surface at different friction coefficient: a) equivalent Mises stress distribution nephogram, b) temperature distribution nephogram

2.5 温度 t 的影响

图 6 为 $p=4\text{ MPa}$ 、 $v=0.004\text{ m/s}$ 、 $\mu=0.4$ 时,摩擦片接触表面的等效米塞斯应力和温度分布曲线。从图 6a 可以看出(图 6a 中横纵坐标含义同图 3a),当环境温度 t 升高时,对应的等效米塞斯应力基本不变,这主要是因为相比上述其他变量,环境温度对等效应力的影响较小。当 x/d 接近 1 时,等效米塞斯应力有随之减小的趋势,这与图 3a 中等效应力的变化规律一致。从图 6b 中可以看出(图 6b 中横纵坐标含义同图 3b),随着环境温度 t 的升高,接触面对应的温度也升高,这主要是由于摩擦片产生的热能与环境温度发生了热交换。当 x/d 接近 1 时,温度略微降低,原因同上述图 3a 中原因一致。

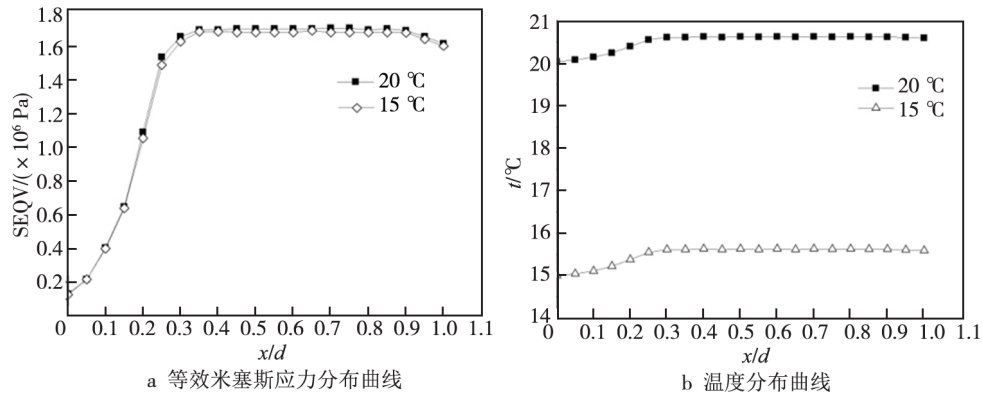


图 6 不同温度下接触面等效米塞斯应力和温度分布曲线

Fig.6 Equivalent Mises stress and temperature distribution curves of contact surface at different temperature: a) equivalent Mises stress distribution nephogram, b) temperature distribution nephogram

2.6 摩擦片接触面等效米塞斯应力和温度分布方程的表征

对图 3—6 中摩擦片接触面等效米塞斯应力和温度分布进行高斯拟合, 得到如下公式:

$$\sigma_1 = -5.17 \times 10^7 + \frac{3.5 \times 10^8}{5.24 \times \sqrt{\frac{\pi}{2}}} \times e^{-2 \times \left(\frac{x}{d}\right)^{\frac{0.67}{5.24}}} \quad (1)$$

$$\sigma_2 = 3.97 + \frac{116.85}{5.63 \times \sqrt{\frac{\pi}{2}}} \times e^{-2 \times \left(\frac{x}{d}\right)^{\frac{0.65}{5.63}}} \quad (2)$$

其中: σ_1 为摩擦片接触面等效米塞斯应力分布方程的应力值, σ_2 为摩擦片接触面温度分布方程的温度值, x/d 为接触面上坐标值与接触总长的比值。

从该公式可以得出, 不同工况下的等效应力和温度均服从高斯分布。

2.7 偏航制动摩擦片的失效实例

图 7 为某风场偏航制动器摩擦片的磨损照片。图 7a 中 1[#]摩擦片的右侧失效较严重, 这可能与偏航时的运动方向有关。从第 2.1 小节中的分析可知, 靠近运动方向前部的等效应力和热应力较大, 可能造成摩擦片较严重的失效。

图 7b 中 2[#]摩擦片的左右两侧相对磨损较严重, 这可能是由于在频繁的偏航换向运动过程中, 靠近摩擦片左右两侧的区域属于等效应力和温度梯度集中区, 长期的疲劳等效应力和温度应力造成了摩擦片失效。

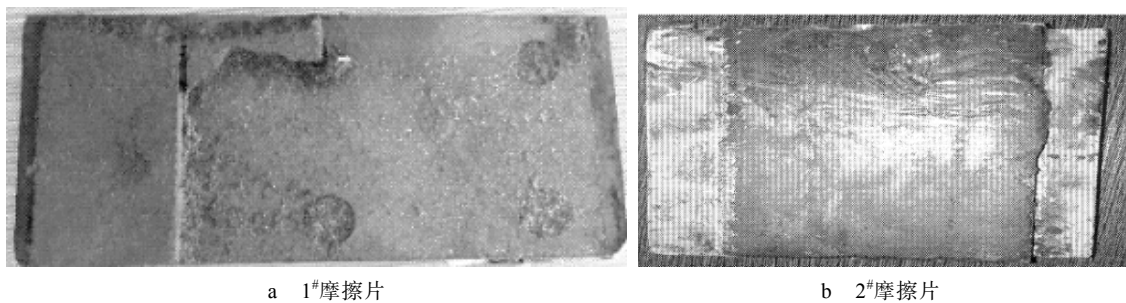


图 7 某风场偏航制动摩擦片的磨损照片

Fig.7 Wear photos of yaw brake friction plates (a) 1[#] friction plate and (b) 2[#] friction plate in a wind field

3 结论

1) 得到了偏航压力 p 、滑动速度 v 、摩擦系数 μ 、环境温度 t 对制动器摩擦片接触面的等效米塞斯应力和温度分布曲线, 摩擦片两侧区域属于等效应力和温度分布的交变集中区, 但靠近边缘, 等效应力和温度值略微减小。

2) 适当减小偏航压力 p , 增大滑动速度 v , 减小摩擦系数 μ , 有助于减小摩擦片接触面的等效米塞斯

应力分布, 但温度对接触面的等效米塞斯应力分布基本无影响。

3) 接触面等效米塞斯应力和温度服从高斯分布, 不同工况下的等效应力和温度数值均可按拟合曲线方程计算得出。

4) 根据有限元分析结果, 偏航制动器摩擦片的磨损失效与摩擦片两侧的交变等效应力和温度梯度有关。

5) 摩擦界面的温度变化梯度与文献[16]中是一致

的,证实了本文的计算分析是正确的。但对于接触边缘,温度略微降低,该结果也是对文献[16]中的温度变化梯度进行了局部修正。

参考文献:

- [1] 杨智勇, 韩建民, 李卫京, 等. 制动盘制动过程的热机耦合仿真[J]. 机械工程学报, 2010, 46(2): 88-92.
YANG Zhi-yong, HAN Jian-min, LI Wei-jing, et al. Thermo-mechanical Coupling Simulation of Braking Process of Brake Disc[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(2): 88-92.
- [2] EVTUSHENKO O O, IVANYK E H, HORBACHOVA N V. Analytic Methods for Thermal Calculation of Brake[J]. Materials Science, 2000, 36(6): 857-862.
- [3] DRAGANIS A. Finite Element Modeling of Transient Thermomechanical Rolling Contact Featuring Mixed Control of the Rigid Body Motion[J]. Journal of Tribology, 2016, 139(1): 503-520.
- [4] 黄健萌, 高诚辉, 唐旭晟, 等. 盘式制动器热-结构耦合的数值建模与分析[J]. 机械工程学报, 2008, 44(2): 145-151.
HUANG Jian-meng, GAO Cheng-hui, TANG Xu-sheng, et al. Numerical Modeling and Analysis of the Thermal-structure Coupling of the Disc Brake[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(2): 145-151.
- [5] FLOQUET A, DUBOURG M C. Realistic Braking Operation Simulation of Ventilated Disk Brake[J]. Journal of Tribology, 1996, 118(3): 152-176.
- [6] BOSMAN R, ROOIJ D M B. Transient Thermal Effects and Heat Partition in Sliding Contacts[J]. Journal of Tribology, 2010, 132(3): 401-410.
- [7] 徐中, 王岳峰, 仲强, 等. 含多粗糙峰涂层等效应力的有限元分析[J]. 机械工程学报, 2011, 47(15): 101-106.
XU Zhong, WANG Yue-feng, ZHONG Qiang, et al. Finite Element Analysis for the Equivalent Stress on Multi-asperity Coating[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(15): 101-106.
- [8] ZAGRODZKI P, LAM K B, BAHKALI E A, et al. Non-linear Transient Behavior of a Sliding System with Frictionally Excited Thermoelastic Instability[J]. Journal of Tribology, 2001, 123(4): 699-708.
- [9] GAO J Q, LEE S C, AI X L, et al. An FFT-based Transient Flash Temperature Model for General Three-dimensional Rough Surface Contacts[J]. Journal of Tribology, 2000, 122(4): 876.
- [10] SSTANLEY H M, KATO T. An FFT-based Method for Rough Surface Contact[J]. Journal of Tribology, 1997, 119(3): 481-485.
- [11] CHOI J H, LEE I. Finite Element Analysis of Transient Thermoelastic Behaviors in Disk Brakes[J]. Wear, 2004, 257(1-2): 47-58.
- [12] 刘莹, 周启兴. 盘式制动器摩擦温度场的数值模拟[J]. 南昌大学学报(工科版), 2012, 34(3): 258-263.
LIU Ying, ZHOU Qi-xing. Simulation of the Friction Temperature Field for Disc Brake[J]. Journal of Nanchang University (Engineering & Technology), 2012, 34(3): 258-263.
- [13] 张庆金, 鲍久圣, 阴妍, 等. 制动摩擦材料的研究与发展现状[J]. 表面技术, 2016, 45(11): 32-40.
ZHANG Qing-jin, BAO Jiu-sheng, YIN Yan, et al. Research and Development of Brake Friction Materials[J]. Surface Technology, 2016, 45(11): 32-40.
- [14] 罗玲, 姚冠新, 陶飞. 填料粒度对汽车制动摩擦材料性能的影响[J]. 表面技术, 2016, 45(2): 97-102.
LUO Ling, YAO Guan-xin, TAO Fei. Effect of Filler Size on Performance of Automotive Brake Friction Materials[J]. Surface Technology, 2016, 45(2): 97-102.
- [15] 刘强, 林乃明, 邹娇娟, 等. 改善钢铁材料摩擦学行为的表面织构研究现状[J]. 表面技术, 2016, 45(5): 41-50.
LIU Qiang, LIN Nai-ming, ZOU Jiao-juan, et al. Recent Developments in Improving Tribological Behaviors of Iron and Steel via Surface Texturing[J]. Surface Technology, 2016, 45(5): 41-50.
- [16] ZHU Zhen-cai, PENG Yu-xing, SHI Zhi-yuan, et al. Three Dimensional Transient Temperature Field of Brake Shoe during Hoist's Emergency Braking[J]. Applied Thermal Engineering, 2009, 29(5): 932-937.