2016年3月 March 2016

文章编号: 1004-0609(2016)-03-0544-07



# 300 ℃氮气中交变载荷条件下 Inconel 690 合金的微动磨损特性

张晓宇,任平弟,蔡振兵,彭金方,刘建华,朱旻昊 (西南交通大学 机械工程学院,成都 610031)

摘 要:采用改进后的 PLINT 高温可控气氛的微动磨损试验机,研究 Inconel 690 合金在 300 ℃氦气及法向交变 载荷条件下的微动磨损机制和动力学特性。结果表明:微动运行行为与激振频率密切相关,微动的 F<sub>t</sub>-D 曲线呈现 摩擦力周期波动的平行四边形型特征,微动运行于滑移区。在 300 ℃氦气环境中,摩擦力的动态变化可以分为 5 个阶段,即跑合阶段、上升阶段、峰值阶段、下降阶段和稳定阶段。Inconel 690 合金的微动损伤行为强烈地依赖 于载荷、位移幅值、环境温度、气氛及激振频率等试验条件。从表面损伤形貌看,损伤微结构与试验参数密切相 关;由于交变法向力和切向力共同作用,微动产生叠加效应,使剥层现象更加突出。在 300 ℃氦气环境下,Inconel 690 合金的损伤机理主要表现为磨粒磨损和剥层。

关键词: Inconel 690 合金; 交变载荷; 微动; 高温; 叠加效应; 剥层 中图分类号: TH117.1 文献标志码: A

在核电系统中,蒸汽发生器是关键设备之一,由 于蒸汽发生器一回路和二回路热传导及高温高压介质 流致振动,使传热管与支撑部件之间产生微动磨 损<sup>[1-2]</sup>,导致传热管局部损伤甚至破裂,使用寿命降低, 危及核电安全。因此,防止蒸汽发生器传热管的破损, 提高核电设备安全性和使用寿命,是核电工程的重大 课题<sup>[3-4]</sup>。目前,对 Inconel 690 合金的研究主要集中 在大气环境下恒定载荷微动磨损方面<sup>[4-14]</sup>,而交变载 荷条件下微动磨损的研究很少。开展高温氮气中法向 交变载荷下微动磨损的试验研究,不仅对探索特殊工 况下的复杂微动损伤机理具有实际指导意义,而且也 能为核电设备抗微动损伤设计、运行安全性和使用寿 命具有重要应用价值。

## 1 实验

在 PLINT 试验机法向上外加电磁激振器进行微 动试验,试验机结构示意图如图 1 所示<sup>[7]</sup>。试验材料 为直径 19.05 mm、厚度 1.09 mm 的 Inconel 690 合金 管,表面粗糙度  $R_a$ =0.02  $\mu$ m。对偶件为 1Cr13 不锈钢 实心圆柱体(*d*=10 mm,  $R_a$ =0.02  $\mu$ m)。微动磨损试验参 数如下:法向恒定载荷( $F_n$ )分别为 20、50 和 100 N, 位移幅值(D)分别为 100、150 和 200 µm, 试验温度为 300 ℃,循环次数 3×10<sup>4</sup>次,切向频率为 2 Hz,法向 激振力  $F_{n1}=16 \sin(\omega t)$ ,法向激频率( $f_n$ )为 10 和 50 Hz。 在改进后 PLINT 高温氮气微动磨损试验机上,采用 圆柱/圆柱水平"十"字交叉接触方式进行微动磨损试 验。本试验中使用工业氮气纯度为98%,由气瓶(气压 均为 12 MPa, 流速 0.1 m<sup>3</sup>/min)向密封试验室输送氮气 40 min, 使试验室空气排出后开始试验, 实验过程中 用L型塑咀采样袋收集大量混合气体,通过Se-6000 型气相色谱仪检测混合气体(氧含量占 5%,氮含量占 95%)。试验前用丙酮清洗试样表面。试验结束后用扫 描电镜(SEM, FEI-S50 型)、台阶仪(AMBIOS XP-2 型)和 X 射线电子能谱仪(XPS, PHI-5702 型)等对磨斑 表面进行观测分析,利用 Hysitron 原位纳米力学测试 系统(Ti-900 Triboludenter 型)对磨痕剖面上微区的力 学性能进行测试。

# 2 结果与分析

#### 2.1 微动运行规律

图 2 和图 3 所示分别为 300 ℃氮气环境下最大载 荷 *F*<sub>max</sub> 分别为 36、66 和 116 N, 位移幅值 *D* 为 200 µm,

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51075324,51305364);中央高校基本科研业务费专项资金科技创新项目(2682014CX037)

收稿日期: 2015-05-29; 修订日期: 2015-10-28

通信作者: 任平弟, 教授, 博士; 电话: 028-87603924; E-mail: rpd@swjtu.edu.cn



图1 高温可控气氛环境中微动磨损试验机示意图

Fig. 1 Schematic diagram of fretting wear test rig in high-temperature controlled-atmosphere environment: 1—Tube specimen; 2—Cylinder specimen; 3—Holder of tube specimen; 4—Holder of cylinder specimen; 5—Bolt; 6—Asbestos insulation; 7—Sample chamber; 8—Piston of hydraulic system; 9—Counterbalance weight; 10—Thermocouple; 11—Heater; 12—Nitrogen bottle; 13—Spring; 14—Connecting rod; 15—Pressure sensor; 16—Fixing bolts; 17—Adjusting screw nut; 18—Vibration exciter; 19—Mouting plate

激振频率 f<sub>n</sub>分别为 10 和 50 Hz 时, Inconel 690 合金在 不同循环次数下微动的 F<sub>t</sub>-D 曲线。微动运行行为与 激振频率密切相关, Inconel 690 合金从初始循环直至 试验结束, 微动的 F<sub>t</sub>-D 曲线表现出在法向交变载荷 作用下微动模式的叠加特征, 摩擦力呈周期变化的平 行四边形特征。根据微动图理论, 微动运行状态均处 于完全滑移状态。

#### 2.2 摩擦力

当最大载荷 F<sub>max</sub>=66 N、位移幅值 D=200 µm、径 向频率分别为 f=10 Hz 和 50 Hz 时,摩擦力随循环次 数演变曲线如图 4 所示。在高温氮气环境下,摩擦力 的动态变化分为 5 个阶段,即跑合阶段、上升阶段、 峰值阶段、下降阶段和稳定阶段。稳态摩擦力随激振 频率增加而增加。

#### 2.3 磨痕深度分析

图 5 所示为 300 ℃氮气环境中 Inconel 690 合金磨 痕的截面轮廓最大深度分别与位移幅值或载荷的关 系。由图 5(a)可见,300 ℃氮气环境中,当激振频率 为 10 Hz 或 50 Hz、最大载荷为 66 N 时,随位移幅值



图 2 300 ℃氮气环境中不同荷载下 *F*<sub>t</sub>-*D* 曲线随循环次数的变化(*f*<sub>n</sub>=10 Hz, *D*=200 µm)

**Fig. 2** Variation of  $F_t$ -D curves as function of number of cycle with different normal loads at 300 °C in nitrogen environment ( $f_n$ =10 Hz, D=200 µm): (a) N=1; (b) N=10; (c) N=100; (d) N=1000



图 3 300 ℃氮气环境中不同荷载下 Ft-D 曲线随循环次数的变化(fn=50 Hz, D=200 µm)

**Fig. 3** Variation of  $F_t$ –D curves as function of number of cycle with different normal loads at 300 °C in nitrogen environment ( $f_n$ =50 Hz, D=200 µm): (a) N=1; (b) N=10; (c) N=100; (d) N=1000





**Fig. 4** Relationship between friction force and cycle numbers at 300 °C in nitrogen environment ( $F_{\text{max}}$ =66 N, D=200 µm): (a)  $f_n$ =10 Hz; (b)  $f_n$ =50 Hz

增加, 磨痕的最大深度增加, 由于位移增加, 磨屑容 易被溢出、转移, 材料表面磨损严重。当载荷和位移 幅值不变,磨痕的最大深度和损伤程度随激振频率增加而增加。由图 5(b)所示,当激振频率为 10 Hz 或 50

Hz, 位移幅值为 100 μm 时, 磨痕的最大深度和损伤 程度随载荷增加而增加。当载荷和位移幅值一定时, 磨痕的最大深度随激振频率增加而增加, 这是因为激 振频率加快, 交变法向力作用明显加强, 材料表面磨 损加剧。因此, 在 300 ℃氮气环境中, 由于在高含量 氮气作用下, 氧化效应明显减弱, 氧化反应速率显著 降低, 氧化物磨屑的生成受到抑制, 磨屑极少, 绝大 部分裸露在磨痕表面,材料界面微凸体直接接触机会 增加,磨损严重。

#### 2.4 磨痕形貌分析

图 6 所示为 300 ℃氮气环境下 Inconel 690 合金磨 痕的 SEM 像。当最大载荷为 36 N、激振频率为 10 Hz 时,由图 6(a)可以看出,磨痕的整个表面较平整,在



### 图 5 300 ℃氮气环境下 Inconel 690 合金磨痕的最大深度与位移幅值或载荷的关系

**Fig. 5** Relationship between depth maximum depth of wear traces of Inconel 690 alloy and displacement amplitudes or normal loads at 300 °C in nitrogen environment: (a)  $F_{\text{max}}$ =66 N; (b) D=100  $\mu$ m



图 6 300 ℃氮气中 Inconel 690 合金磨痕的 SEM 像(D=100 µm)

**Fig. 6** SEM images of worn scars of Inconel 690 alloy at 300 °C in nitrogen environment (D=100 µm): (a)  $F_{max}$ =36 N,  $f_n$ =10 Hz; (b)  $F_{max}$ =66 N,  $f_n$ =10 Hz; (c)  $F_{max}$ =36 N,  $f_n$ =50 Hz; (d)  $F_{max}$ =66 N,  $f_n$ =50 Hz

磨痕中心,可以观察到厚厚的磨屑层覆盖于接触区, 同时可以观察到平行于摩擦方向的较浅犁沟痕迹;随 最大载荷增加到 66 N 时,磨痕整个接触区域表面平 整,磨痕中心区域几乎没有细小磨屑,仅观察到少量 剥落坑和大量较深的犁沟痕迹(见图 6(b)),这是因为 载荷增加,相应切向力分量增加,切向力起到主导作 用,同时在 300 ℃氮气环境下,由于高含量氮作用, 降低了氧含量,氧化磨损轻微,形成的氧化磨屑较少 且薄,导致材料表面两体直接接触,磨痕表面损伤严 重。

当最大载荷为 36 N、位移幅值为 100 μm、激振 频率为 50 Hz 时,可以观察到较深平行于摩擦方向的 犁沟痕迹、剥落坑以及少量的细小磨屑散布在剥落坑 区域(见如图 6(c));随最大载荷增加,磨痕中心区域可 以观察到较大尺寸的剥落坑、犁沟痕迹以及塑性流动 特征,材料表面损伤严重(见图 6(d));当载荷一定时, 随激振频率增加,剥落坑的数量、尺寸以及塑性流变 现象特别明显(见图 6(b)和(d)),这可能是因为载荷和 激振频率较大,在法向交变载荷作用下产生叠加效应 特性显著增强。因此,300 ℃氮气环境下 Inconel 690 合金的磨损机制是以磨粒磨损与剥层为主<sup>[15]</sup>。

#### 2.5 剖面损伤形貌分析

图 7 所示为 Inconel 690 合金在 300 ℃氮气环境中 磨痕横截面的 SEM 像。在磨损区由上到下分别为呈 疏松态细小磨屑的磨屑层、在交变载荷作用下晶粒结 构发生显著变化(产生塑性变形)形成塑变层以及基体 层<sup>[16-17]</sup>。

图 8 所示为磨痕横截面上距上表面不同深度区域 进行纳米压痕测试获得的力-位移曲线(测试区域见图 7(b)中 Q<sub>A</sub>、Q<sub>B</sub>以及 Q<sub>C</sub>区域)。当测试深度相同时(100 nm), Q<sub>A</sub>区域需要施加的载荷最大, Q<sub>B</sub>区域相对较小, 而 Q<sub>C</sub>区域最小。图 9 所示为图 8 中不同力-位移曲线 计算获得的纳米压痕硬度值。Q<sub>A</sub>区域附近的纳米压痕 硬度明显比 Q<sub>B</sub>区域和 Q<sub>C</sub>区域(基体层)高。因此,通 过对磨痕横截面(Q<sub>A</sub>区域)的晶粒结构形貌观察以及该 区域的较高纳米压痕硬度值<sup>[18]</sup>,发现材料在交变载荷 条件下的摩擦过程中,由于加工硬化作用更容易形成



图 7 Inconel 690 合金在 300 ℃氮气环境下磨痕剖面的 SEM 像(F<sub>max</sub>=116 N, f<sub>n</sub>=50 Hz, D=200 µm)

**Fig. 7** SEM images of wear scar cross-section of Inconel 690 alloy at 300 °C in nitrogen environment ( $F_{max}$ =116 N,  $f_n$ =50 Hz, D=200 µm): (a) SEM image of wear scar cross-section; (b) Partially enlarged SEM image of zone 1 in Fig.7(a); (c) Partially enlarged SEM image of zone 2 in Fig.7(b); (d) Partially enlarged SEM image of zone 3 in Fig.7(c)



图8 纳米压痕试验典型的力-位移曲线

Fig. 8 Typical force-displacement curve on nano-indentation test



Fig. 9 Nano-indentation hardness tests

塑性变形层。

### 3 结论

 1) 微动的 F<sub>t</sub>-D 曲线表现出在法向交变载荷作用 下微动模式的叠加特征,摩擦力呈周期变化的平行四 边形特征,微动运行于完全滑移状态。

 2) 在 300 ℃氮气环境中,摩擦力的动态变化可 以分为5个阶段,即跑合阶段、上升阶段、峰值阶段、 下降阶段和稳定阶段。

3) 在 300 ℃氮气环境中, Inconel 690 合金微动 行为运行于滑移区时,试验参数对微动损伤行为产生 重要影响。在磨痕表面呈现较大尺寸的剥落坑、犁沟 痕迹以及塑性变形特征,材料表面损伤严重,这是因 为在法向交变载荷作用下叠加效应特性显著增强。 Inconel 690 合金的磨损机制主要表现为磨粒磨损与剥层。

#### REFERENCES

周仲荣,朱旻昊.复合微动磨损[M].上海:上海交通大学出版社,2004.

ZHOU Zhong-rong, ZHU Min-hao. Composite fretting[M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2004.

- [2] ZHU M H, Zhou Z R. Composite fretting wear of aluminum alloy[J]. Key Engineering Materials, 2007, 353/358(6): 868–873.
- [3] LOW M B J. Fretting problems and some solutions in power plant machinery[J]. Wear, 1985, 106(3): 315–336.
- [4] 唐 辉. 世界核电设备与结构将长期面临的一个问题—微动 磨损[J]. 核动力工程, 2000, 21(3): 222-231.
   TANG Hui. Fretting damage, one of world wide difficulties in the field of nuclear power equipment and structures for a long term[J]. Nuclear Power Engineering, 2000, 21(3): 222-231.
- [5] 叶 毅,任平弟,张晓宇,郭 洪,李长香.高温大气和N2中 Inconel690/1Cr13 不锈钢的微动磨损特性[J].中国有色金属 学报,2013,7(23):1900-1906.

YE Yi, REN Ping-di, ZHANG Xiao-yu, GUO Hong, LI Chang-xiang. Fretting wear behavior of Inconel690/1Cr13 stainless steel in high-temperature air and nitrogen[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals Society, 2013, 7(23): 1900–1906.

[6] 张晓宇, 任平弟, 张亚非, 朱旻昊, 周仲荣. Incoloy800 合金 的高温微动磨损特性研究[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(8): 1545-1551.

ZHANG Xiao-yu, REN Ping-di, ZHANG Ya-fei, ZHU Min-hao, ZHOU Zhong-rong. Fretting wear behavior of Incoloy800 alloy at high temperature[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2010, 20(8): 1545–1551.

[7] 向红先,任平弟,张晓宇,刘建涛,李 放.交变载荷条件下
 NC30Fe 合金微动损伤特性研究[J].摩擦学学报,2014,34(4):
 437-445.

XIANG Hong-xian, REN Ping-di, ZHANG Xiao-yu, LIU Jian-tao, LI Fang. Fretting damage behavior of NC30Fe nickel-based alloy under alternating load conditions[J]. Tribology, 2014, 34(4): 437–445.

- [8] HONG J K, KIM I S. Environment effects on the reciprocating wear of Inconel690 steam generator tubes[J]. Wear, 2003, 255(9): 1174–1182.
- [9] CHUNGA I, LEE M. An experimental study on fretting wear behavior of cross-contacting Inconel 690 tubes[J]. Nuclear Engineering and Design, 2011, 241(5): 4103–4110.
- [10] SUNG H J, CHUN W C, LEE Y Z. Fretting and wear of Inconel 690 for steam generator tube in elevated temperature water under fretting condition[J]. Tribology Internation, 2005, 38(4):

283-288.

- [11] YUN J Y, PARK M C, SHIN, G S, HEO J H, KIM D I, KIM S J. Effects of amplitude and frequency on the wear mode change of Inconel 690 SG tube mated with SUS 409[J]. Wear, 2014, 313: 83–88.
- [12] LI J, LU Y H. Effects of displacement amplitude on fretting wear behaviors and mechanism of Inconel 600 alloy[J]. Wear, 2013, 304(1/2): 223–230.
- [13] MI X, WANG W X, XIONG X M, QIAN H, TANG LC, XIE Y C, PENG J F, CAI Z B, ZHU M H. Investigation of fretting wear behavior of Inconel 690 alloy in tube/plate contact configuration[J]. Wear, 2015, 328/329: 582–590.
- [14] ZHANG Xiao-yu, REN Ping-di, ZHONG Fa-chun, ZHU Min-hao, ZHOU Zhong-rong. Fretting wear and friction oxidation behavior of 0Cr20Ni32AlTi alloy at high temperature[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2012, 22(4): 825–830.
- [15] JAE Y Y, GYEONG S S, DAE I K, HO S L, WOONG S K, SEON J K. Effect of carbide size and spacing on the fretting

wear behavior of Inconel 690 SG tube mated with SUS 409[J]. Wear, 2015, 338/339: 252-257

- [16] 辛 龙, 李 杰, 陆永浩. Inconel 690 合金高温微动磨损特性 研究[J]. 摩擦学学报, 2015, 35(4): 470-476.
   XIN Long, LI Jie, LU Yong-hao. Fretting wear properties of inconel 690 alloy at elevated temperature[J]. Tribology, 2015, 35(4): 470-476.
- [17] 王文秀,蔡振兵,钱 浩,李 晨,谢永诚,米 雪,彭金方, 朱旻昊. 不同温度下 690 合金传热管与抗振条的微动磨损特 性[J]. 中国有色金属学报, 2014, 24(11): 2777-2783.
  WANG Wen-xiu, CAI Zhen-bing, QIAN Hao, LI Chen, XIE Yong-chen, MI Xue, PENG Jin-fang, ZHU Min-hao. Fretting wear behavior of alloy 690 heat transfer tubes against anti-vibration strip at different temperatures[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2014, 24(11): 2777-2783.
- [18] QIAN L M, LI M, ZHOU Z R, YANG H, SHI X Y. Comparison of nanoindentation hardness to microhardness[J]. Surface Coating Technology, 2005, 195(4): 264–271.

# Fretting wear behavior of Inconel 690 alloy under alternating load conditions at 300 ℃ in nitrogen environment

ZHANG Xiao-yu, REN Ping-di, CAI Zhen-bing, PENG Jin-fang, LIU Jian-hua, ZHU Min-hao

(School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**Abstract:** The fretting wear mechanisms and kinetic behaviours of Inconel690 alloy were investigated on the improved PLINT fretting rig under alternating loads conditions in high-temperature controlled-atmosphere environments. The results show that the fretting running behaviors are closely related to the normal excitation frequency. In parallelogram shaped  $F_t$ -D curves, the friction fluctuates periodically, and accordingly the fretting runs in the slip regime (SR). Five stages of friction force curves can be observed at 300 °C in nitrogen environment, including initial stage, ascending stage, peak value stage descending stage and steady stage. The fretting wear behaviors for Inconel 690 alloy strongly depend on the normal load, displacement amplitude, temperature, atmosphere, excitation frequency and other test conditions. The super position effect of fretting wear behavior due to the combined effect of alternating normal force and tangential force is produced, so that delamination phenomenon becomes much more prominent. The abrasive wear and delamination are the major mechanisms of Inconel 690 at 300 °C in nitrogen environment.

Key words: alternating load; fretting wear; high temperature; superposition effect; delamination

Corresponding author: REN Ping-di; Tel: +86-28-87603924; E-mail: rpd@swjtu.edu.cn

(编辑 龙怀中)

**Foundation item:** Projects (51075324, 51305364) supported by the National Natural Science Foundation of China; Project (2682014CX03) supported by the 2014 Scientific and Technological Innovation Funds of the Central Universities **Received date:** 2015-05-29; **Accepted date:** 2015-10-28