



位移幅值对690合金管/405不锈钢块切向微动磨损特性的影响

唐攀, 米雪, 沈平川, 白晓明, 黄擎宇, 陈果, 彭金方, 朱旻昊

Effect of Displacement on Tangential Fretting Wear Characteristics of 690 Alloy Tube/ 405 Stainless Steel Plate

TANG Pan, MI Xue, SHEN Pingchuan, BAI Xiaoming, HUANG Qingyu, CHEN Guo, PENG Jinfang, ZHU Minhao

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16078/j.tribology.2020024>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

690合金传热管在不同摩擦副条件下的微动磨损性能研究

Effect of Mating Material on Fretting Wear Behavior of 690 Alloy

摩擦学学报. 2020, 40(3): 314 <https://doi.org/10.16078/j.tribology.2019199>

碳纤维切向微动磨损特性研究

Fretting Wear Damage Characteristics of Carbon Fiber

摩擦学学报. 2019, 39(3): 330 <https://doi.org/10.16078/j.tribology.2018168>

自旋转磁极在合金管内表面精密抛光中的应用

The Application of Rotating Magnetic Pole in the Polishing of the Inner Surface of the Alloy Tube

摩擦学学报. 2018, 38(2): 189 <https://doi.org/10.16078/j.tribology.2018.02.009>

极化作用对6082铝合金在3.5%NaCl溶液中微动腐蚀行为的影响

Effect of Applied Potential on the Fretting Corrosion Behavior of 6082 Aluminum Alloy in 3.5% NaCl Solution

摩擦学学报. 2020, 40(4): 457 <https://doi.org/10.16078/j.tribology.2019209>

中碳钢/不锈钢磁场摩擦中磨屑的行为和作用

Behaviors and Effect of the Wear Debris during Friction between Medium-Carbon Steel and Stainless Steel with the Magnetic Field

摩擦学学报. 2019, 39(2): 188 <https://doi.org/10.16078/j.tribology.2018149>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16078/j.tribology.2020024

位移幅值对690合金管/405不锈钢块切向微动磨损特性的影响

唐攀¹, 米雪^{2*}, 沈平川², 白晓明², 黄擎宇², 陈果², 彭金方¹, 朱旻昊^{1*}

(1. 西南交通大学机械工程学院 摩擦学研究所, 四川 成都 610031;

2. 中国核动力研究设计院 核反应堆系统设计技术重点实验室, 四川 成都 610213)

摘要: 采用自制的微动磨损试验机, 开展了690合金管/405不锈钢的切向微动磨损试验, 研究了位移幅值(15、30、80和200 μm)对其微动磨损特性的影响. 试验结果表明: 当位移幅值改变时, 微动运行状态会发生改变. 当位移幅值为15 μm 时, 微动状态为部分滑移区, 此时摩擦系数最小, 磨损率最低, 微动损伤最轻微; 当位移幅值为30 μm 时, 微动运行于混合区, 摩擦系数明显高于部分滑移区; 而当位移幅值为80和200 μm 时, 微动运行于完全滑移区, 稳定阶段的摩擦系数与混合区的接近. 总体而言, 随着位移幅值的增大, 磨痕宽度增大, 磨损加剧, 磨损体积增加. 部分滑移区的磨损机制主要为黏着磨损和剥层, 混合区主要的磨损机制为剥层, 而完全滑移区的磨损机制主要为剥层磨损和磨粒磨损.

关键词: 690合金管; 微动磨损; 位移幅值; 摩擦系数; 磨损机制

中图分类号: TH117.3

文献标志码: A

文章编号: 1004-0595(2020)06-0754-08

Effect of Displacement on Tangential Fretting Wear Characteristics of 690 Alloy Tube/ 405 Stainless Steel Plate

TANG Pan¹, MI Xue^{2*}, SHEN Pingchuan², BAI Xiaoming², HUANG Qingyu², CHEN Guo²,
PENG Jinfang¹, ZHU Minhao^{1*}

(1. School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Sichuan Chengdu 610031, China

2. Science And Technology on Reactor System Design Technology Laboratory,
Nuclear Power Institute of China, Sichuan Chengdu 610213, China)

Abstract: The tangential fretting wear tests of 690 alloy tube/405 stainless steel were carried by a self-designed fretting wear test rig. The effect of displacement (15 μm , 30 μm , 80 μm , 200 μm) on fretting wear characteristics has been investigated. With the increase of amplitude, fretting wear tests were running in partial slip regime (15 μm), mixed slip regime (30 μm) and gross slip regime (80 μm and 200 μm), respectively. The friction coefficient of partial slip regime was lower associated with slight damage, while the friction coefficient of mixed slip regime and gross slip regime were relatively higher. Additionally, the steady values of mixed slip regime and gross slip regime were almost same. Generally, with the increasing displacement, the width of wear scar and wear volume increased. The main wear mechanisms of partial slip regime were adhesion wear and delamination, while the main wear mechanisms of mixed slip regime was delamination. And the main wear mechanisms of gross slip regime were delamination and abrasive wear.

Key words: 690 alloy tube; fretting wear; displacement; friction coefficient; wear mechanism

Received 11 February 2020, revised 5 April 2020, accepted 9 April 2020, available online 28 November 2020.

*Corresponding author. E-mail: xuefeinan@126.com; E-mail: zhuminhao@swjtu.cn, Tel: +86-28-87600715.

The Project was supported by the National Natural Science Foundation of China(U1534209, U51305364, 11905215 and 52005469)

Science and Technology on Reactor System Design Technology Laboratory.

国家自然科学基金项目(U1534209, U51305364, 11905215和52005469)和核反应堆系统设计技术重点实验室资助。

微动是紧密配合或间隙配合界面, 在外界交变载荷作用下, 发生位移幅值很小的相对运动. 微动不仅可以使材料表面发生损伤, 还会大大降低构件的疲劳寿命, 降低构件的可靠性. 根据位移幅值和载荷的不同, 微动运行状态可分为部分滑移区、混合区和完全滑移区, 且不同区域下材料的磨损机制存在区别^[1-3].

在压水堆核电站中, 蒸汽发生器(Steam generator, SG)是重要的一回路构件, 是防止含放射性物质的冷却剂向二回路泄漏的重要屏障. 在核电站运行过程中, 流致振动是不可避免的, 且由于设计安装的要求, SG传热管与其支撑板(或抗振条)之间会发生微动^[4-5]. 目前, 对SG传热管的微动损伤特性多以试验研究为主. Lee等^[6-7]研究对比了SG所用材料 Inconel 600、Inconel 690、Alloy 800与405、409、410不锈钢配副在室温水环境下的微动磨损特性, 试验所采用的接触方式为点接触和销盘试验, 其研究结果表明 Inconel 690/409 SS配副时磨损率最小, 而Alloy 800/410 SS配副时磨损最为严重. Kown等^[8-9]研究了 Inconel 690和 Inconel 600在室温和320 °C高温下的微动疲劳特性, 结果发现, 由于微动疲劳的存在, 690的疲劳寿命在室温环境下下降了40%, 在320 °C高温环境下下降了20%. 蔡振兵等^[10-13]采用线接触的试验方式发现690合金管

的微动磨损机制的微动磨损机制随着温度而改变, 当温度较低时, 主要的磨损机制为磨粒磨损和剥层; 当温度高于200 °C时, 主要的磨损机制为剥层、磨粒磨损和黏着磨损. 然而, 郭相龙等^[14]对690合金管的微动磨损研究发现磨损机制很大程度上取决于材料的摩擦配副. 目前针对SG传热管的不同微动区域的研究以点接触为主, 或者对表面进行了处理^[15-16], 这与工程实际有一定的差距. 本文作者以690合金管/405不锈钢块为研究对象, 在线接触的条件下, 研究不同位移幅值下690合金管的微动特性的影响, 探索在线接触条件下, 位移幅值对微动区域的影响.

1 试验材料和方法

采用线切割技术将690合金管(外径为18 mm)切割为长度为25 mm的试样, 将405不锈钢(405 SS)加工成12 mm×10 mm×4 mm的试样块. 在试验开始前, 将加工制备好的试样浸没在无水酒精中, 采用超声波清洗机对机械加工残留的杂质进行清洗. 为了更为准确地模拟实际工程中的表面损伤, 本文中所采用的试验试样均未进行任何表面处理(如表面剖光等), 保证试验试样的表面与工程使用中的一致. 表1列出了试验材料的主要化学成分.

表1 试验材料主要化学成分

Table 1 Main chemical compositions of the test material

Material	Mass fraction/%								
	Ni	Cr	Fe	Al	C	Si	Mn	S	P
Inconel 690	≥58	28.5~31	9~11	≤0.4	0.015~0.025	≤0.5	≤0.5	≤0.003	≤0.015
405 SS	≤0.6	11.5~14.5	Bal.	0.1~0.3	≤0.08	≤1	≤1	≤0.03	≤0.040

微动试验采用自制的微动磨损试验机, 其试验装置和试验原理如图1所示. 其中, 405不锈钢块为对上试样, 690合金管为对下试样. 在微动磨损试验过程中, 法向载荷通过砝码施加到405不锈钢块上; 通过驱动装置实现690合金管的切向往复位移, 驱动装置包括位移加载和采集部分, 位移加载是通过压电陶瓷作

动器实现, 并采用光栅位移传感器采集微动位移量, 采集与控制精度均高于1 μm, 满足微动磨损试验; 摩擦力通过PCB力传感器进行采集. 试验开始前对所有的传感器标定, 从而保证试验数据得准确性. 本文中的微动磨损试验参数如下: 法向载荷(F_n)为40 N; 位移幅值(D)为15、30、80和200 μm; 试验频率(f)为5 Hz; 微动循环次数(N)为 10^5 . 为保证具有可靠试验数据, 进行了重复试验, 试验次数不低于3次.

试验结束后, 采用扫描电子显微镜(SEM, JEOL JSW-6610LV)开展损伤区域形貌分析与剖面分析; 采用电子能谱仪(EDX, OXFORD X-MAX50 INCA-250)进行微区元素成分分析; 采用白光干涉仪(Bruker, ContourGT-I)对损伤区域三维形貌分析, 并测量磨损量.

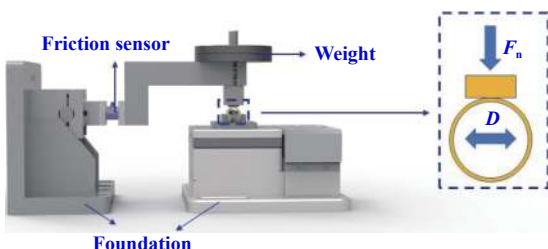


Fig. 1 Experimental rig and experimental schematic diagram

图1 试验装置及试验原理图

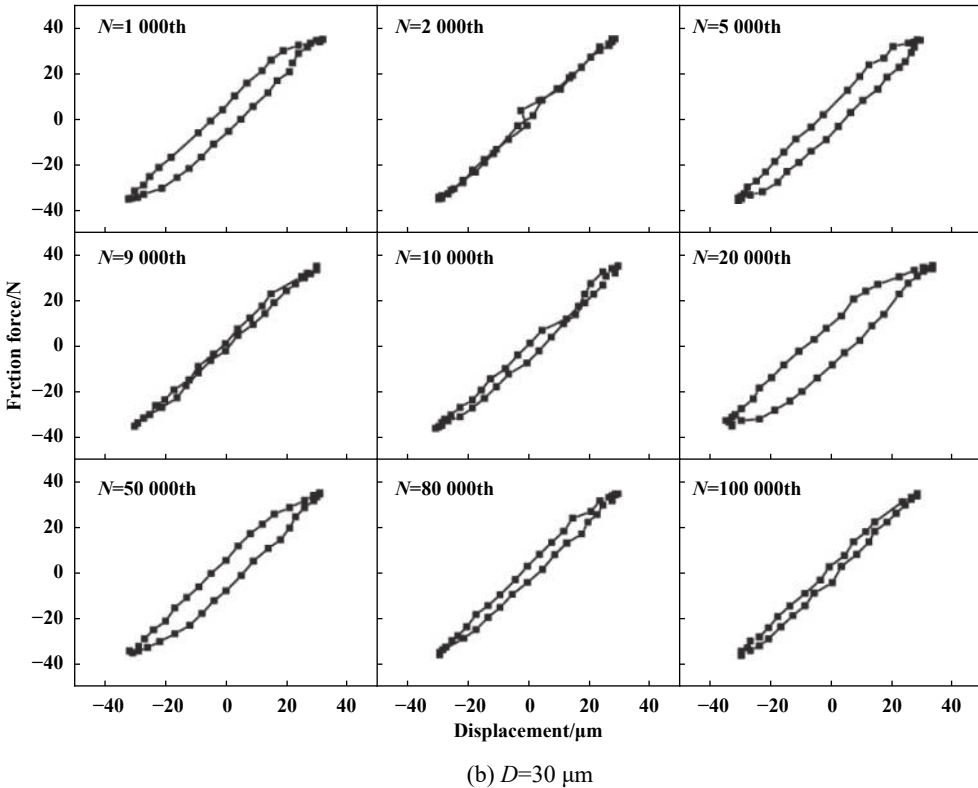
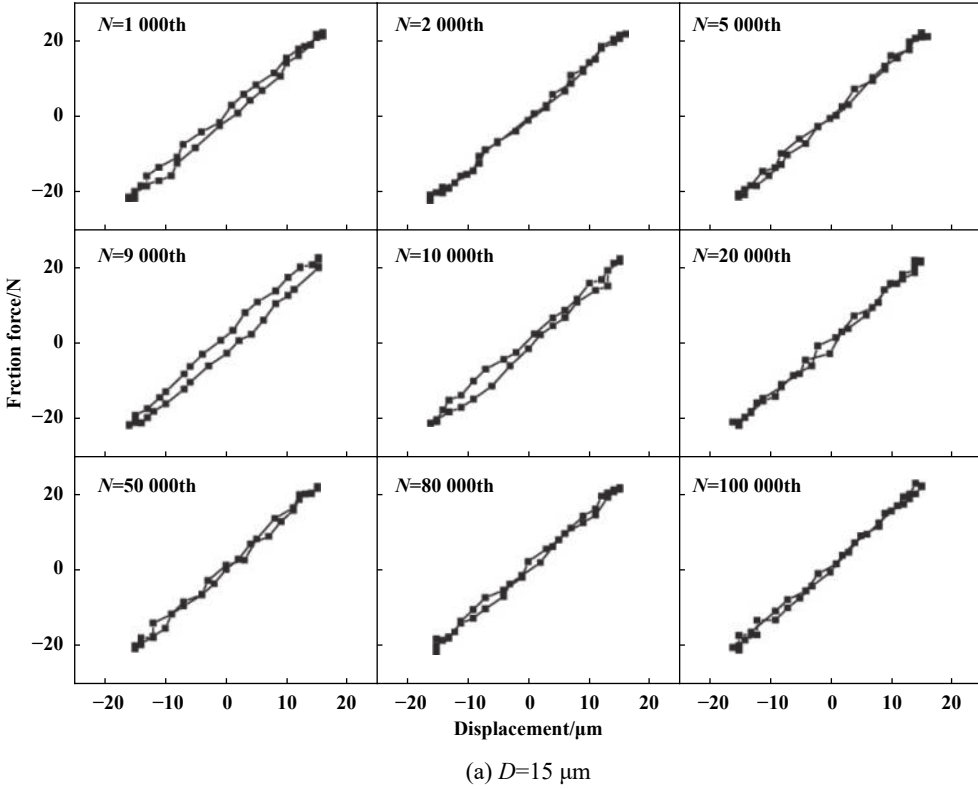
2 结果和分析

2.1 F_t - D 曲线与摩擦系数曲线

在微动过程中, F_t - D 曲线和摩擦系数是主要的动力学参数. 其中 F_t - D 曲线可反映材料的微动运动状

态, 当 F_t - D 曲线全为直线时, 表面微动状态为部分滑移区; 而当 F_t - D 曲线在直线和椭圆之间变化时, 表面微动运行于混合区; 当 F_t - D 曲线全为椭圆或者平行四边形时, 表明微动运行于完全滑移区^[17].

图1为不同位移幅值下的 F_t - D 曲线. 为了更加真实



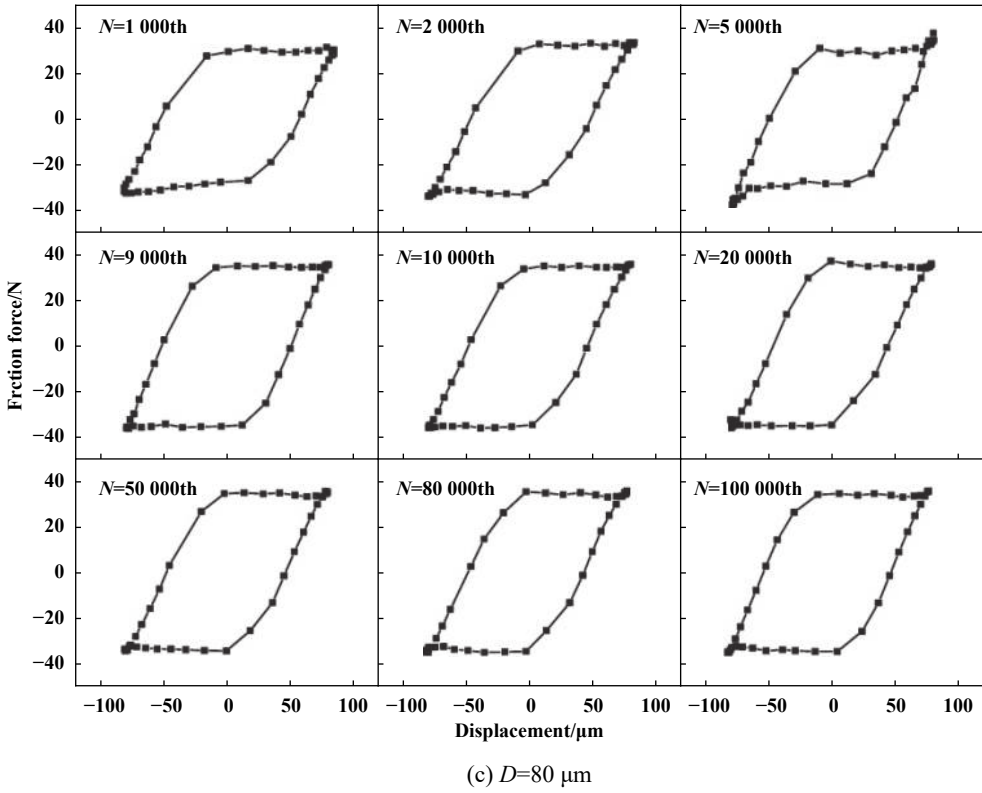


Fig. 2 F_t - D curves under different displacements

图 2 不同位移幅值下 F_t - D 曲线

完整地反应690合金管微动磨损运行状态, 特选取9个循环进行 F_t - D 作图. 当 $D=15 \mu\text{m}$ 时, F_t - D 曲线基本为直线, 表明微动状态于部分滑移. 当 $D=30 \mu\text{m}$ 时, F_t - D 曲线出现了明显的椭圆和直线型交替过程, 这表明微动区域为混合区. 当 $D=80 \mu\text{m}$ 时, F_t - D 曲线全为平行四边形, 表明微动状态为完全滑移; 在约5 000次后, 摩擦力保持稳定.

如图3所示, 部分滑移区($D=15 \mu\text{m}$)和混合区($D=30 \mu\text{m}$)的摩擦系数经历上升阶段后即进入稳定阶段; 而完全滑移区($D=80 \mu\text{m}$ 和 $D=200 \mu\text{m}$)的摩擦系数

经历上升阶段后又出现了下降和上升阶段, 最后才进入了稳定阶段. 进一步分析可以发现, 部分滑移区进入稳定阶段所需要的循环次数最少, 不到1 000个循环, 混合区次之, 完全滑移区最多, 超过10 000个循环. 混合区与完全滑移区稳定阶段的摩擦系数基本相等约为0.85, 比部分滑移区稳定阶段的摩擦系数大0.3. 这可能是由于部分滑移区接触面间的相对运动主要靠弹性变形来协调, 切向摩擦力较小^[18].

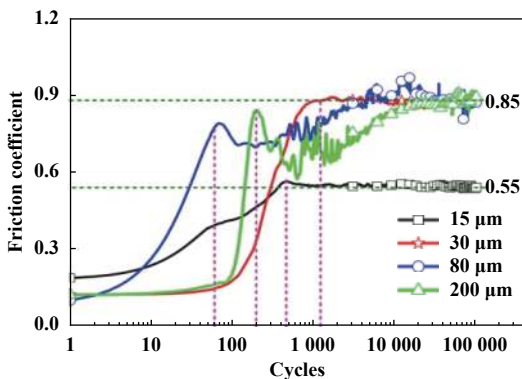


Fig. 3 Friction coefficient curves under different displacements

图 3 不同位移幅值下摩擦系数曲线

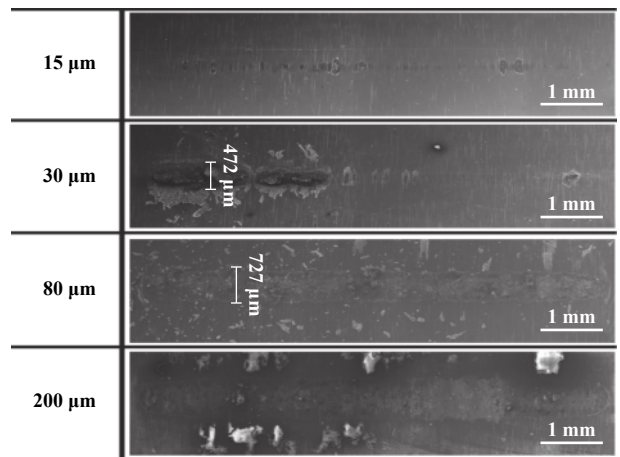


Fig. 4 SEM micrographs of worn 690 alloy tube under different displacement

图 4 不同位移幅值下690合金磨痕表面扫描电镜照片

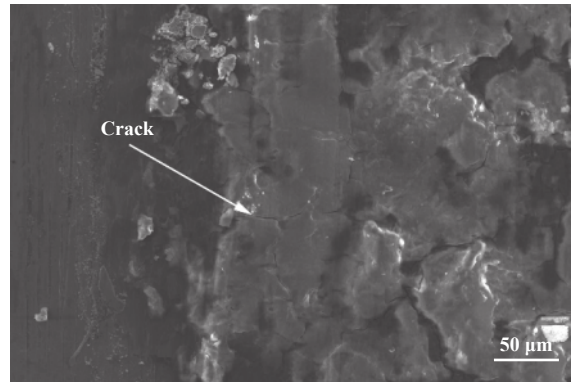
2.2 磨痕形貌分析

从图4的扫描电镜结果可以看出,当 $D=15\ \mu\text{m}$ 和 $D=30\ \mu\text{m}$ 时,磨痕并不连续,中间有断开现象,这是由于试验为线接触模式且表面未经任何处理导致的.此外,由图2可知,当 $D=15\ \mu\text{m}$ 时,微动处于部分滑移区,磨痕存在黏着区域和滑移区域^[19],不同于点接触,线接触的黏着区域并未处于磨痕的中心,而是分段出现黏着区和滑移区.通过磨痕全貌可以看出,当微动磨损运行于部分滑移时,磨痕宽度较小,表面磨屑较少;当微动区域为混合区和完全滑移区时,磨痕宽度明显增大,磨屑明显增多,且有大量的磨屑堆积于磨痕边界.当 $D=30\ \mu\text{m}$ 时,磨痕宽度约为 $472\ \mu\text{m}$,磨损明显大于 $D=15\ \mu\text{m}$ 时;而 $D=80\ \mu\text{m}$ 时,磨痕宽度达到了 $727\ \mu\text{m}$,基本是 $D=30\ \mu\text{m}$ 的1.5倍.总体而言,随着位移幅值的增加,磨痕宽度增加,磨损加剧.

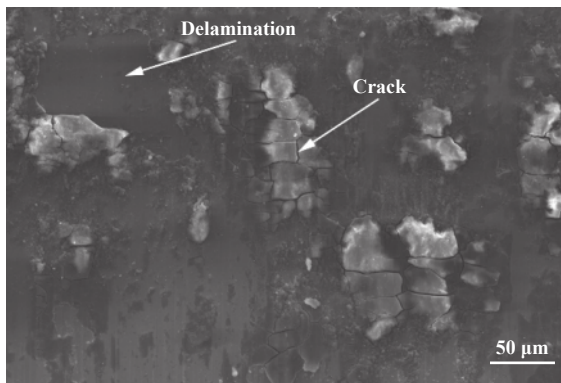
由图5(a)可知,当 $D=15\ \mu\text{m}$ 时,磨损是分段出现的,且磨损区域周围较光滑,能观察到剥落坑,磨痕表面存在少量的磨屑,可推测主要的磨损机制为黏着磨损和剥层,损伤表面未发现裂纹存在.当 $D=30\ \mu\text{m}$ 时,磨屑紧实呈块状,覆盖于磨痕表面,难以辨认磨损机制,由于出现了大量的表面裂纹,可以推测主要的磨损机制为剥层.当 $D=80\ \mu\text{m}$ 时,有明显的剥落坑出现,有剥层裂纹,且有平行于微动方向的梨沟,主要的磨损机制为剥层和磨粒磨损.当 $D=200\ \mu\text{m}$ 时,表面有大量的剥落坑,有细小的磨屑松散分布在接触中心,主要的磨损机制为剥层和磨粒磨损.总体而言, $D=15\ \mu\text{m}$ 时磨损较轻微,且随着位移的增大,主要的磨损机制由黏着磨损转变为剥层;当 $D=30\ \mu\text{m}$,由于微动运行状态为混合区,是疲劳和磨损相竞争的状态,剥层现象明显,且磨屑在反复的碾压作用下变得紧实且结成块状,覆盖于磨屑表面.



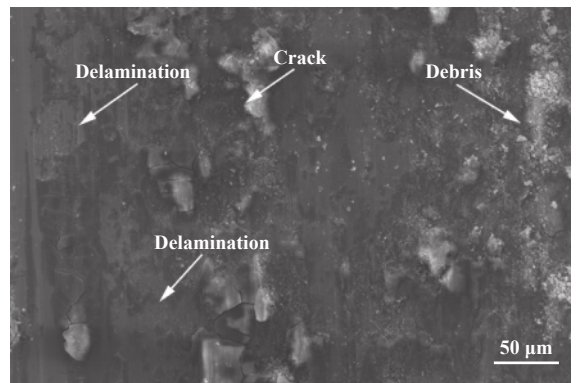
(a) $D=15\ \mu\text{m}$



(b) $D=30\ \mu\text{m}$



(c) $D=80\ \mu\text{m}$



(d) $D=200\ \mu\text{m}$

Fig. 5 SEM micrographs of worn 690 alloy under different displacement

图5 不同位移幅值下690合金的损伤表面形貌扫描电镜测试结果

2.3 磨痕表面元素成分分析

由图6可知,所有试验参数下的共同损伤特征如下:磨损区域Ni、Cr峰低于未磨损区域;O、Fe峰高于未

磨损区域.结果表明磨损区域发生了摩擦氧化反应和材料的转移.当 $D=15\ \mu\text{m}$ 时,Fe峰明显高于其他位移幅值的,而Fe元素来自于405 SS,这说明在该位移幅

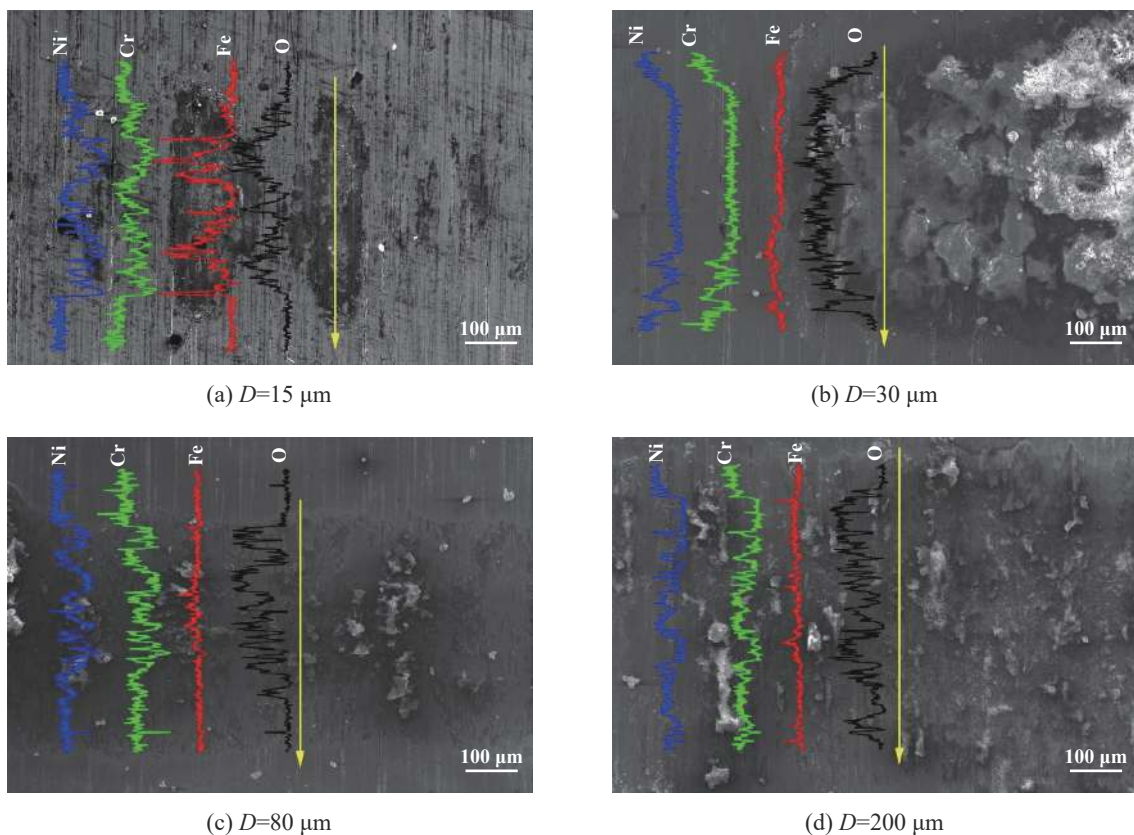


Fig. 6 EDX results of worn 690 alloy under different displacement

图 6 不同位移幅值下690合金磨损表面EDX结果

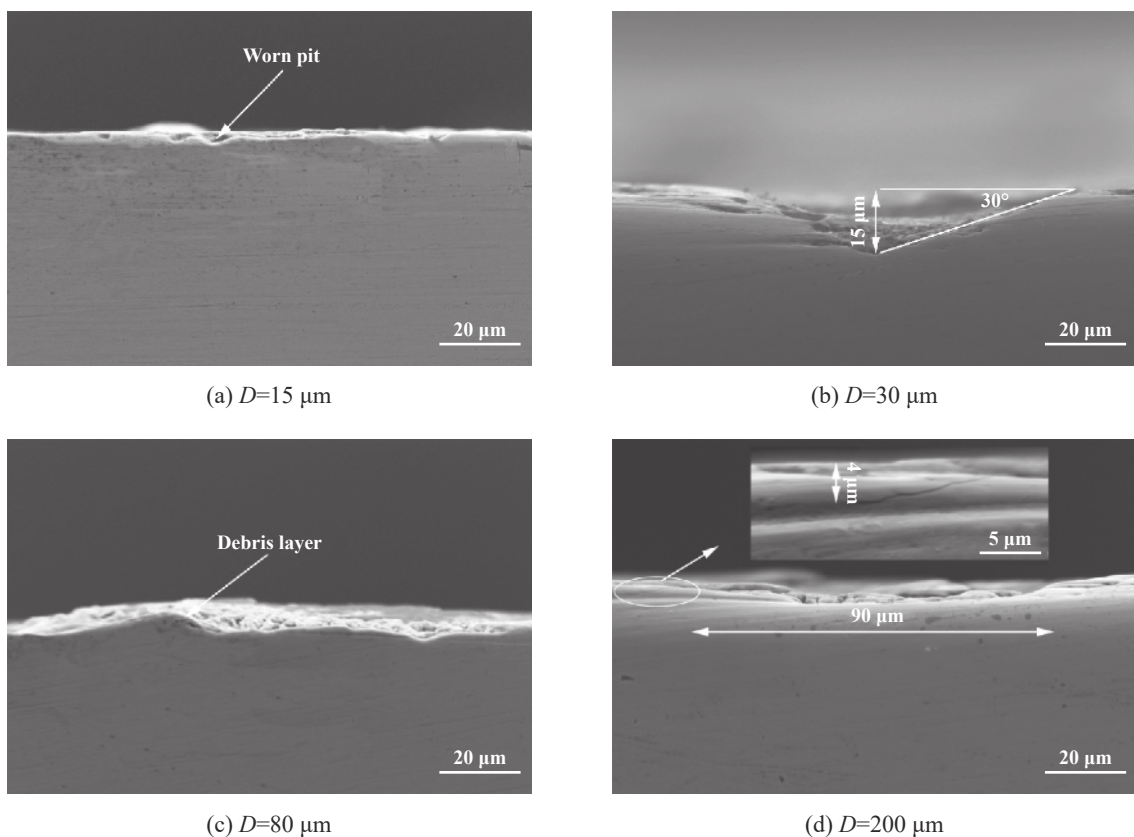


Fig. 7 Cross-section results of 690 alloy under different displacement

图 7 不同位移幅值下690合金的剖面结果

值下, 405 SS发生了转移, 即发生了黏着磨损, 此结果与图5一致。

2.4 剖面分析

图7所示为不同位移幅值下690合金管的剖面分析结果。在部分滑移区, 尽管可以观察到少量的磨损坑, 但磨损表面还保证了相对的完整性, 相对于其他工况下, 损伤最为轻微; 位移为30 μm 时, 出现了深度接近15 μm 的磨损坑, 磨坑边缘与表明角度大约为30度, 且磨损坑中有堆积的磨屑; 位移为80 μm 时, 磨痕表面观察到磨屑层覆盖于磨屑表面; 位移为200 μm 时, 磨损坑的宽度最大接近90 μm , 且磨损坑边缘可以观察到有裂纹存在, 裂纹深度接近4 μm , 扩展方向沿平行于表面方向, 推测为剥层裂纹。

2.5 磨损体积分析

图8为690合金管的微动磨损体积和磨损率。由测量数据可知, 随着位移幅值的增大, 磨损体积和磨损率均随之增大。位移从15 μm 增至30 μm , 磨损体积增大了约3倍, 磨损率增长了约0.000 7; 位移从80 μm 增至200 μm 时, 磨损体积增大了3倍, 磨损率增长了约0.048; 而当位移从30 μm 增至80 μm 时, 磨损率体积增大到约14倍, 磨损率增大到约5.5倍。对比磨损率和磨损体积的变化趋势可知, 位移从30 μm 增大到80 μm 时, 690合金管的微动磨损量发生了显著的变化。结合微动运行工况可知, 部分滑移区的磨损量最小且磨损率最低, 是微动磨损损伤最轻微的区域, 而完全滑移区磨损体积和磨损率最高, 是磨损最严重的区域, 由混合区向完全滑移区过渡的过程中, 微动磨损出现了明显加剧的情况。

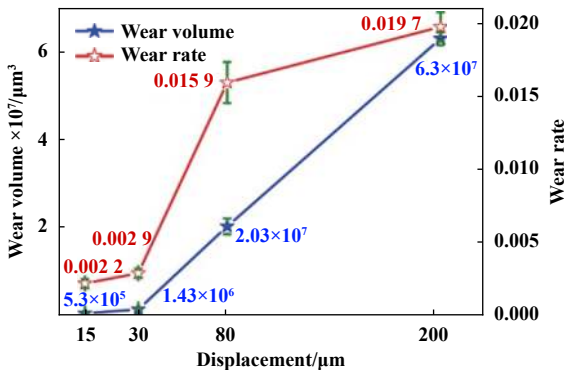


Fig. 8 Wear volume and wear rate of 690 alloy tube

图8 690合金管微动磨损体积和磨损率

3 结论

a. 随着位移的增大, 690合金管/405不锈钢管的运

行状态由部分滑移区向混合区和完全滑移区转变; 磨损体积和磨损率增加。

b. 当微动运行于部分滑移时, 稳定阶段的摩擦系数最小, 而混合区和完全滑移区的却基本相同。

c. 当微动运行于部分滑移区时, 690合金管主要的磨损机制为黏着磨损和剥层; 当微动处于混合区时, 690合金管主要的磨损机制为剥层; 而当微动为完全滑移区时, 690合金管主要的磨损机制为剥层和磨粒磨损。

参考文献

- [1] Zhu Minghao, Zhou Zhongrong. Composite fretting wear mechanism of GCr15 bearing steel[J]. Material of Mechanical Engineering, 2003, 27(2): 10–13 (in Chinese) [朱旻昊, 周仲荣. GCr15轴承钢的复合微动磨损行为研究[J]. 机械工程材料, 2003, 27(2): 10–13]. doi: 10.3969/j.issn.1000-3738.2003.02.004.
- [2] Zhu Minghao, Li Zheng, Zhou Zhongrong. Composite fretting wear of low carbon steel[J]. Material Engineering, 2004, (10): 12–15 (in Chinese) [朱旻昊, 李政, 周仲荣. 低碳钢的复合微动磨损特性研究[J]. 材料工程, 2004, (10): 12–15]. doi: 10.3969/j.issn.1001-4381.2004.10.003.
- [3] Zhou Zhongrong, Luo Weili. Recent development in fretting wear research[J]. Tribology, 1997, 17(3): 272–280 (in Chinese) [周仲荣, 罗唯力. 微动摩擦学的发展现状与趋势[J]. 摩擦学学报, 1997, 17(3): 272–280]. doi: 10.3321/j.issn:1004-0595.1997.03.015.
- [4] Tang Hui. Fretting damage, One of world-wide difficulties in the filed of nuclear power equipment and structures for a long-term[J]. Nuclear Power Engineering, 2000, 21(3): 221–226 (in Chinese) [唐辉. 世界核电设备与结构将长期面临的一个问题--微动损伤[J]. 核动力工程, 2000, 21(3): 221–226]. doi: 10.3969/j.issn.0258-0926.2000.03.008.
- [5] Ding Xunshen. Fretting wear and protection of steam generator tubes[J]. Nuclear Safety, 2006, (3): 31–6 (in Chinese) [丁训慎. 蒸汽发生器传热管的微振磨损及其防护[J]. 核安全, 2006, (3): 31–6]. doi: 10.16432/j.cnki.1672-5360.2006.03.007.
- [6] Lee Y H, Kim H K, Kin H D, et al. A comparative study on the fretting wear of steam generator tubes in korean power plants[J]. Wear, 2003, 255(7–12): 1198–1208. doi: 10.1016/S0043-1648(03)00147-9.
- [7] Jeong S H, Cho C W, Lee Y Z. Friction and wear of Inconel 690 for steam generator tube in elevated temperature water under fretting condition[J]. Tribology International, 2005, 38(3): 283–288. doi: 10.1016/j.triboint.2004.08.012.
- [8] Jeung H K, Chung I S, Yoon D H, et al. A study on fretting fatigue characteristics of Inconel 690 at high temperature[J]. Tribology International, 2011, 44(11): 1483–1487. doi: 10.1016/j.triboint.2010.11.006.
- [9] Park D K, Woo S W, Yoon D H, et al. A study on fretting fatigue

- life for the Inconel alloy 600 at high temperature[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2010, 240(10): 2521–2527. doi: [10.1016/j.nucengdes.2010.05.013](https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2010.05.013).
- [10] Mi X, Wang W X, Xiong X M, et al. Investigation of fretting wear behavior of Inconel 690 alloy in tube/plate contact configuration[J]. *Wear*, 2015, 328-329: 582–590. doi: [10.1016/j.wear.2015.04.003](https://doi.org/10.1016/j.wear.2015.04.003).
- [11] Mi X, Cai Z B, Xiong X M, et al. Investigation on fretting wear behavior of 690 alloy in water under various temperatures[J]. *Tribology International*, 2016, 100: 400–409. doi: [10.1016/j.triboint.2016.05.012](https://doi.org/10.1016/j.triboint.2016.05.012).
- [12] Wang Wenxiu, Cai Zhenbing, Qian Hao, et al. Fretting wear behavior of alloy 690 heat transfer tubes against anti-vibration strip at different temperatures[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2014, (11): 85–91 (in Chinese) [王文秀, 蔡振兵, 钱浩, 等. 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, (11): 85–91]. doi: [10.19476/j.ysxb.1004.0609.2014.11.011](https://doi.org/10.19476/j.ysxb.1004.0609.2014.11.011).
- [13] Mi Xue, Xie Hai, Peng Jinfang, et al. The effect of mating material on the fretting wear behavior of 690 alloy[J]. *Tribology*, 2020, 40(3): 314–321 (in Chinese) [米雪, 谢海, 彭金方, 等. 690合金传热管在不同摩擦副条件下的微动磨损性能研究[J]. *摩擦学学报*, 2020, 40(3): 314–321]. doi: [10.16078/j.tribology.2019199](https://doi.org/10.16078/j.tribology.2019199).
- [14] Guo X, Lai P, Tang L, et al. Fretting wear of alloy 690 tube mated with different materials in high temperature water[J]. *Wear*, 2018, 400-401: 119–126. doi: [10.1016/j.wear.2018.01.001](https://doi.org/10.1016/j.wear.2018.01.001).
- [15] Xin Long, Li Jie, Lu Yonghao, et al. Fretting wear properties of Inconel 690 alloy at elevated temperature[J]. *Tribology*, 2015, 35(4): 470–476 (in Chinese) [辛龙, 李杰, 陆永浩, 等. Inconel690合金高温微动磨损特性研究[J]. *摩擦学学报*, 2015, 35(4): 470–476].
- [16] Li Jie, Lu Yonghao. Displacement amplitude effect on the fretting wear behavior and mechanism of Inconel 600 alloys[J]. *Journal of University of Science and Technology*, 2014, (10): 1328–1334 (in Chinese) [李杰, 陆永浩. 位移幅值对 Inconel600合金微动磨损性能和机制的影响[J]. *北京科技大学学报*, 2014, (10): 1328–1334]. doi: [10.13374/j.issn1001-053x.2014.10.008](https://doi.org/10.13374/j.issn1001-053x.2014.10.008).
- [17] Zhu Minhao. Investigations on the running and damage mechanisms of radial and composite fretting[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2001(in Chinese) [朱旻昊. 径向与复合微动的运行和损伤机理研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2001].
- [18] Wang Mengjie, Peng Jinfang, Zhuang Wenhua, et al. Fretting wear damage characteristics of carbon fiber[J]. *Tribology*, 2019, 39(3): 330–339 (in Chinese) [王梦婕, 彭金方, 庄文华, 等. 碳纤维切向微动磨损特性研究[J]. *摩擦学学报*, 2019, 39(3): 330–339]. doi: [10.16078/j.tribology.2018168](https://doi.org/10.16078/j.tribology.2018168).
- [19] Cai Zhenbing, Yang Sha, Lin Xiuzhou, et al. Oxidation behavior in different humid environments induced by torsional fretting wear[J]. *Tribology*, 2010, 30(6): 527–531 (in Chinese) [蔡振兵, 杨莎, 林修洲, 等. 扭动微动条件下含水气氛对氧化行为的影响[J]. *摩擦学学报*, 2010, 30(6): 527–531]. doi: [10.16078/j.tribology.2010.06.006](https://doi.org/10.16078/j.tribology.2010.06.006).