表面摩擦磨损与润滑

690 合金管在不同法向载荷下的切向微动磨损性能研究

米雪[1]，唐攀[2]，沈平川[1]，郑斌[1]，陈果[1]，朱旻昊[2]

（1.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，成都 610213；
2.西南交通大学 机械工程学院，成都 610031）

摘 要：目的 通过 690 合金管/405 不锈钢块（线接触）的切向微动试验，探究 690 合金管在不同法向载荷作用下的切向微动磨损机制和损伤演变规律。**方法** 采用自制的多功能复合微动磨损试验机，研究法向载荷（10、20、40 N）对 690 合金传热管/405 不锈钢抗振条的切向微动磨损性能的影响。通过分析摩擦系数和耗散能，获得试验过程中的动力学信息，再通过光学显微镜、扫描电镜对磨痕进行微观分析，获得其磨损机制以及损伤演变规律。**结果** 当位移幅值为 100、200 μm，法向载荷为 10、20、40 N 时，690 合金管/405 不锈钢块的微动运行状态处于完全滑移区。随着法向载荷的增加，摩擦耗散能和摩擦力增大，690 合金管的损伤加剧，产生的磨屑增加，磨痕表面的剥落坑被磨屑覆盖而减少，摩擦系数呈下降趋势。沿微动方向，690 合金表面的磨损区域内 O、Fe、Ni 和 Cr 的含量呈锯齿变化；沿接触方向，690 合金管的磨损深度也呈现锯齿状，这都是 690 合金管和 405 不锈钢块均为非理想平面所致。**结论** 总体而言，随着法向载荷的增加，690 合金管和 405 不锈钢块的磨损体积增加，690 合金管主要的磨损机制为剥层和磨粒磨损。

关键词：690 合金管；405 不锈钢；法向载荷；切向微动；磨损机制；线接触

中图分类号：TH117.1 **文献标识码：**A **文章编号：**1001-3660(2020)11-0191-07

DOI：10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2020.11.021

Tangential Fretting Wear Characteristics of 690 Alloy Tubes under Different Normal Force

MI Xue[1], *TANG Pan*[2], *SHEN Ping-chuan*[1], *ZHENG Bin*[1], *CHEN Guo*[1], *ZHU Min-hao*[2]

(1.Science and Technology on Reactor System Design Technology Laboratory, Nuclear Power Institute of China, Chengdu 610213, China; 2.School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

ABSTRACT: The work aims to explore the tangential fretting wear mechanism and damage laws of 690 alloy tube through the tangential fretting wear tests of 690 alloy tube/405 stainless steel (tube-on-plate configuration). The effect of normal force (10 N, 20 N and 40 N) on tangential fretting wear of 690 alloy tube/405 stainless steel seismic strip was studied by self-made

收稿日期：2020-01-08；**修订日期：**2020-03-30

Received：2020-01-08；**Revised：**2020-03-30

基金项目：国家自然科学基金资助项目（51606180，11872060）

Fund：Supported by the National Natural Science Foundation of China (51606180, 11872060)

作者简介：米雪（1990—），女，博士，工程师，研究方向为微动磨损。

Biography：MI Xue(1990—), Female, Doctor, Engineer, Research foucs: fretting wear.

通讯作者：朱旻昊（1968—），男，博士，教授，研究方向为微动摩擦学。邮箱：zhuminhao@139.com

Corresponding author：ZHU Min-hao(1968—), Male, Doctor, Professor, Research foucs: fretting wear. E-mail: zhuminhao@139.com

引文格式：米雪，唐攀，沈平川，等. 690 合金管在不同法向载荷下的切向微动磨损性能研究[J]. 表面技术, 2020, 49(11): 191-197.

MI Xue, TANG Pan, SHEN Ping-chuan, et al. Tangential fretting wear characteristics of 690 alloy tubes under different normal force[J]. Surface technology, 2020, 49(11): 191-197.

multifunctional composite fretting wear tester. The friction coefficient and dissipated energy were analyzed to obtain the dynamics information during the test. Then, the wear scars were examined through optical microscope and scanning electron microscopy to obtain wear mechanism and damage laws. When the displacement amplitude was 100 μm and 200 μm and the normal force was 10 N, 20 N and 40 N, the fretting state of 690 alloy tube/405 stainless steel block was in the complete slip zone. With the increase of normal force, the friction dissipation energy and friction force increased, the damage of 690 alloy tube was intensified, the wear debris increased, the delamination pits on wear scar surface decreased due to be covered with wear debris and the friction coefficient showed the decrease trend. Along the fretting direction, the contents of O, Cr, Fe and Ni were serrated and the wear depth was also serrated along the motion direction due to the line contact, which was caused by non-ideal plane of 690 alloy tube and 405 stainless steel block. Overall, the wear volume of 690 alloy tube and 405 stainless steel block increases with the increase of normal force. The main wear mechanism of 690 alloy tube is delamination and abrasive wear.

KEY WORDS: 690 alloy tubes; 405 stainless steel; normal force; tangential fretting; wear mechanism; line contact

在压水堆核电厂中，蒸汽发生器是产生汽轮机所需蒸汽的换热设备，也是一、二回路的枢纽，是关键设备[1]。蒸汽发生器传热管内部高速流经的高温、高压流体，引起传热管的流致振动[2]（Flow-induced vibration-FIV），会使传热管与抗振条（或支撑板）接触处发生微动损伤[3-4]（微动磨损和微动疲劳），导致传热管壁因磨损而减薄，使用寿命显著降低[5-6]。据 EPRI 在 1994 年的报道，世界范围内有 50%以上的压水堆机组存在传热管微动磨损的情况，包括我国的秦山一期核电站[7]。微动磨损不仅使材料损伤，还加速裂纹的萌生和扩展，一旦在传热管上有贯穿裂纹形成，传热管将爆管。因此，开展传热管的微动磨损研究，防止蒸汽发生器传热管的破损，是核能安全工程的重大课题[8]。

韩国学者 Kim 等人[9-10]开展了 Inconel690 和 Inconel600 的切向微动损伤特性研究，其研究结果表明，Inconel690 比 Inconel600 具有更加优越的抗微动损伤性能。加拿大学者 Attia 等人[11-12]研究了传热管的冲切微动磨损特性，建立了一种基于剥层磨损理论的损伤计算模型。中国学者李杰等[13]研究了大气及溶液环境下传热管材料的微动损伤特性；张晓宇等[8,14]对比了 Inconel690 合金和 Incoloy800 合金的微动磨损特性；蔡振兵等人[15-18]不仅研究了传热管的冲击动力学行为，还开展了不同温度和水环境下传热管的微动损伤试验，其研究结果揭示了环境因素对于传热管微动损伤性能的影响。总体而言，对传热管的研究，主要集中在微动疲劳[19-20]、微动磨损[13,21-22]、应力腐蚀[23]、微幅冲击[24-25]和数值研究[26-27]等方面，且目前针对传热管微动磨损的研究多以点接触为主[8,14]，这与工程实际有一定的差距。在核电站中，传热管/抗振条的接触是线接触，而如今针对传热管/抗振条的线接触研究相对较少[17-18]。

本文选取 690 合金传热管和 405 不锈钢抗振条作为研究对象，在线接触条件下，开展了不同位移和法相载荷下 690 合金的切向微动特性研究。试验结束后，通过光学显微镜（OM，OLYMPUS BX50）、扫描电子显微镜（SEM，JEOL JSM-6610LV）与白光干涉仪（Contour GT-I）分析了微动磨损磨痕表面形貌，采用 EPMA（JXA-8230）分析了损伤区的元素分布。

1 试验材料和方法

通过线切割的方式将 690 合金管（外径 17.5 mm）加工成长度为 25 mm 的样品，将 405 不锈钢块加工为 12 mm×10 mm×4 mm 的试验样品。试验前，先后用煤油和无水酒精对加工后的样品进行超声清洗，除去加工过程中残留在样品表面的杂质。690 合金管的粗糙度约为 0.4 μm，405 不锈钢块的粗糙度约为 0.6 μm。690 合金管和 405 不锈钢块的弹性模量均为 208 GPa，屈服强度分别为 241 MPa 和 330 MPa。

试验设备选用自制的多功能复合微动试验机，如图 1 所示。690 合金管为下试样，并在驱动装置的作用下进行往复运行，405 不锈钢块为上试样，固定于传力臂上。试验开始前，对力传感器（法向载荷和摩擦力）进行数值标定，以确保所加法向载荷和采集摩擦力的准确性。试验过程中，通过砝码对 405 不锈钢块施加法向载荷（F_n），并通过高精度 PCB 力传感器实时采集微动过程中的摩擦力。试验参数如下：法向载荷（F_n）为 10、20、40 N；位移幅值（D）为 100、200 μm；试验温度（t）为室温（20~25 ℃），试验频率（f）为 5 Hz，试验循环次数（N）为 10^4 次。为保证试验数据的可靠性和重复性，每组试验重复 3 次。

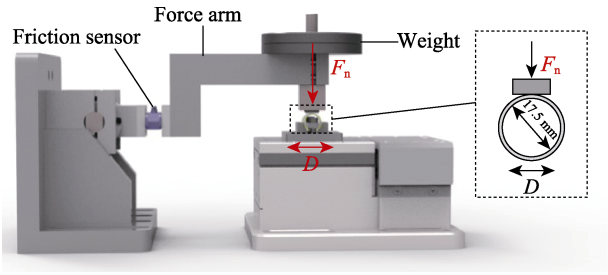


图 1 多功能复合微动磨损试验机示意图

Fig.1 Schematic diagram of fretting wear test rig

2　试验结果和分析

2.1　F_t-D 曲线分析

当 D=100 μm 时，不同法向载荷下的摩擦力-位移曲线（F_t-D 曲线）如图 2 所示。F_t-D 曲线为类平行四边形，表明微动运行状态处于完全滑移区[28]。由文献[29]可知，微动过程中，材料的损伤可以通过摩擦耗散能（E_i）来表征。耗散能即摩擦力所做的功，在 F_t-D 曲线图中，每个循环的耗散能等于该循环对应的 F_t-D 曲线所围面积。由图 2 可知，当 F_n=10 N 时，第 1000 个循环的摩擦耗散能最小，第 100 个循环和第 5000 个循环的耗散能接近。而当 F_n=20 N 和 F_n=40 N 时，第 100 个循环的耗散能最小，随着循环次数的增加，耗散能均增加。值得注意的是，当 F_n=40 N 时，第 1000 个循环、第 5000 个循环和第 10 000 个循环的耗散能之间差距较小。此外，当循环次数为 5000 和 10 000 时，F_n=20 N 的耗散能是 F_n=10 N 的两倍，而 F_n=20 N 的耗散能大约是 F_n=40 N 的 1/2。总体而言，随着法向载荷的增加，摩擦力和耗散能均增加，随着循环次数的增加，耗散能趋于稳定。因此可以推测，随着载荷的增加，690 合金管和 405 不锈钢块的损伤加剧，随着循环次数的增加，每个循环的 690 合金管和 405 不锈钢块的损伤趋于稳定。

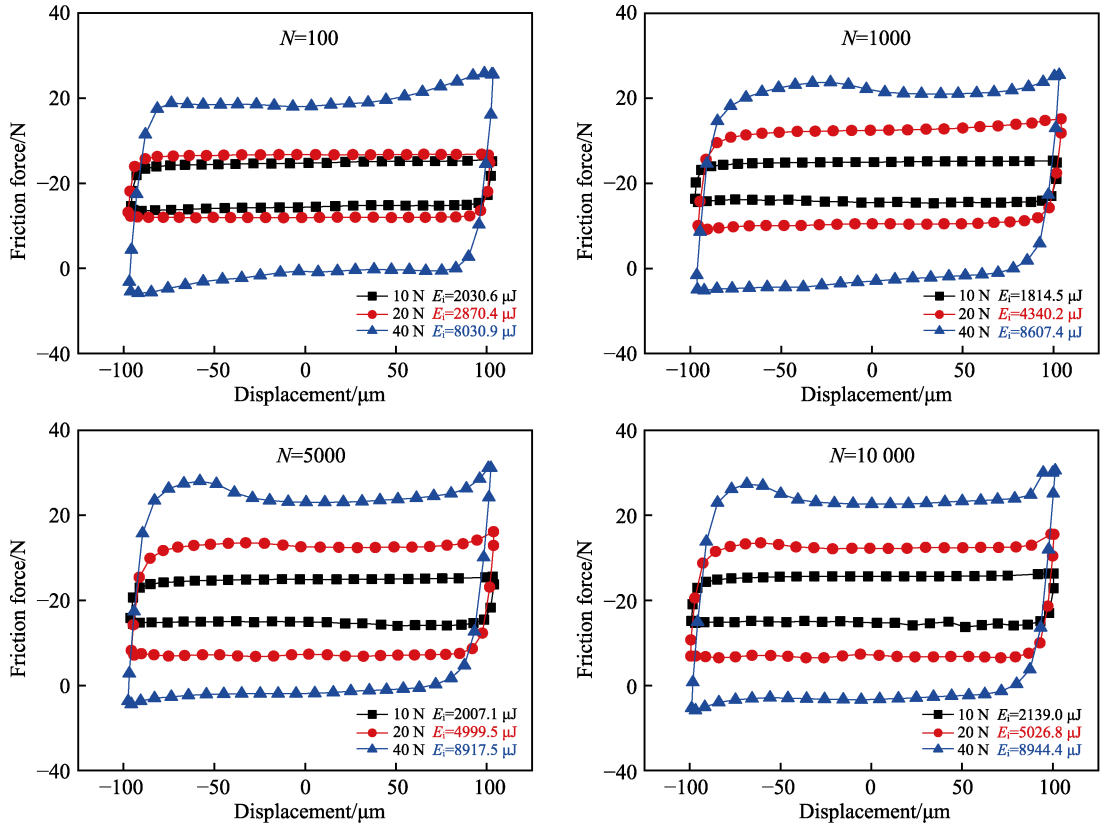


图 2　不同法向载荷下的 F_t-D 曲线（D=100 μm）

Fig.2 Results of F_t-D loops under different normal force (D=100 μm)

2.2　摩擦系数曲线分析

不同载荷作用下 690 合金管/405 不锈钢块的摩擦系数曲线如图 3 所示。由图 3 可知，在大约 2000 个循环之前，摩擦系数随循环次数波动，可称为跑合期；在大约 2000 个循环之后，摩擦系数趋于稳定，称为稳定期。在切向微动试验的初始阶段，接触表面存在一层很薄的氧化物和污染物层，起到润滑作用，摩擦系数较小。随着试验的进行，氧化物和污染物层破裂，金属基体材料直接接触，接触面的材料发生塑性变形和粘着转移，摩擦系数急剧上升。同时，摩擦过程中会产生磨屑，磨屑可起到承载和润滑的作用，从而降低摩擦系数。随着磨损继续进行，磨屑的排出和形成达到相对平衡状态，磨损达到稳定阶段，这与图 2 的耗散能结果一致。

由图 3 还可知，在稳定期，法向载荷为 40 N 时的摩擦系数低于 10、20 N 的值。这种现象产生的原因可能是法向载荷较大时，接触界面间的排屑能力降低，残留在接触界面间的磨屑起承载和润滑作用，从而导致摩擦系数有所降低。当 D=100 μm 时，法向载荷为 10 N 和 20 N 下的摩擦系数基本相同，约为 0.7；当 D=200 μm 时，10 N 下的摩擦系数明显高于 20 N 下的值。此外，D=200 μm 时的摩擦系数大于 D=100 μm 的值，主要原因可能是随着位移幅值的增加，接触面积增大，摩擦系数升高。

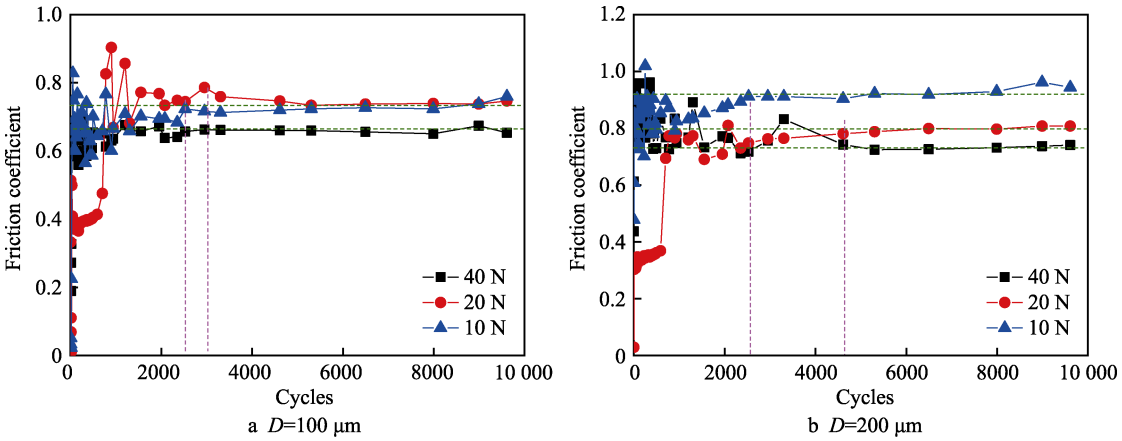


图 3　不同法向载荷作用下 690 合金管/405 不锈钢块的摩擦系数曲线
Fig.3 Friction coefficient curve of 690 alloy tube/405 SS block under different normal force

2.3　微动损伤机理分析

2.3.1　磨痕全貌分析

由图 4 的光学显微镜结果可知，690 合金管的磨痕表面基本被磨屑所覆盖。当 D=100 μm 时，磨痕中存在少量没有被磨屑覆盖的金属基体区域。这是由于 690 合金管和 405 不锈钢块是粗糙面而并非理想平面，当 690 合金管和 405 不锈钢块在法向载荷的作用下发生接触时，实际是两个接触面的微凸体间发生接触，致使接触区域并非完全连续。在微动过程中，先接触的微凸体先发生损伤，产生磨屑，同时，有些区域因未接触而未发生磨损。当 D=100 μm，690 合金管的损伤不及 D=200 μm 时严重，因此，存在部分区域的微凸体并未与 405 不锈钢块直接接触，这些区域的 690 合金并未被磨损，使得这些区域呈现金属本身的颜色。此外，随着法向载荷的增加，磨痕宽度增加，磨损加剧；随着位移幅值的增加，磨痕宽度也明显增大。

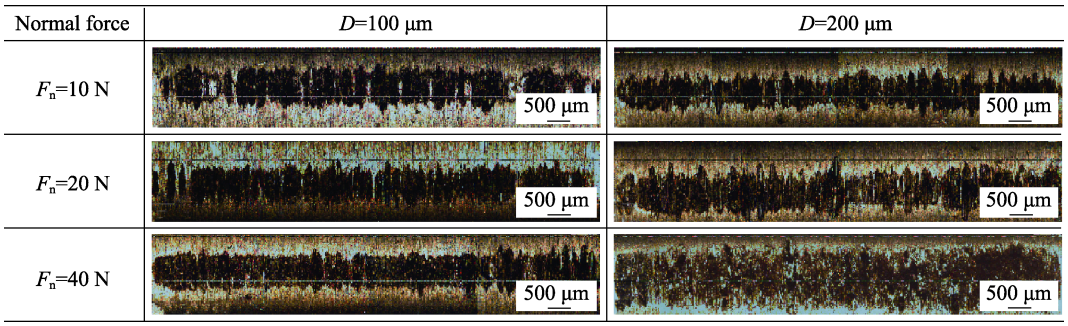


图 4　690 合金管的 OM 形貌图
Fig.4 Optical microscope of 690 alloy tube

2.3.2　磨痕扫描电镜分析

由图 5 的 690 合金管扫描电镜分析结果可知，690 合金管的磨痕表面存在大量的剥落坑，磨屑堆积于剥落坑中。随着法向载荷的增加，磨痕的宽度和覆盖在磨痕表面的磨屑增加，磨损加剧。由图 5a—5d 可知，当 F_n=10 N 和 F_n=20 N 时，磨痕表面存在细小的磨屑堆积于剥落坑中，表面相对粗糙。由图 5e 和图 5f 可知，当 F_n=40 N 时，磨痕表面较光滑，未观察到明显的剥落坑，反而有堆积在磨痕表面的磨屑。这是由于载荷的增加，磨损加剧，产生的磨屑增加，未排出的磨屑将剥落坑填满，并在磨痕表面形成一层紧实的磨屑层。

2.3.3　磨痕 EPMA 分析

当试验参数为载荷 Fn=20 N、位移 D=100 μm 时，690 合金管的 EPMA 线扫描测试结果如图 6 所示。沿微动方向，扫描包含磨痕的整个区域，扫描路径为图 6 中黄色箭头所示。在磨损区域的 Fe 和 O 含量明显高于未磨损区域，而磨损区的 Cr 和 Ni 含量低于未磨损区域。值得注意的是，在部分磨损区域内检测到的 Ni 和 Cr 的含量基本和未磨损区一致，这表明在接触区中存在未磨损的区域，此结果与图 4 的光学显微镜结果相符。这可能和接触形式有关，较高的微凸体先接触而产生磨损和氧化，所以 O 和 Fe 的含量较高，Cr 和 Ni 的含量较低，而较低的微凸体因未接触而未被磨损和氧化，O 和 Fe 的含量较低，Cr 和 Ni 的含量与基体基本相同，最终使得各个元素的变化呈现锯齿状。根据以上 SEM 和 EPMA 的分析结果可推断，690 合金管的磨损机制主要为剥层和磨粒磨损。

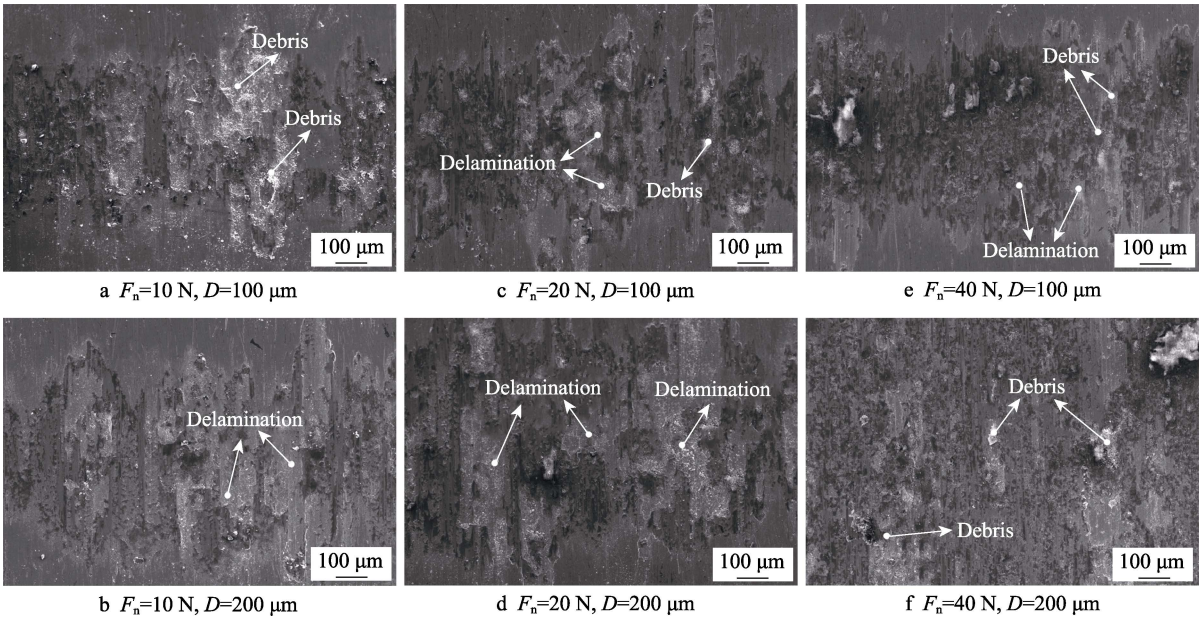


图 5　690 合金管磨痕的 SEM 结果

Fig.5 SEM micrographs of wear scar of 690 alloy tube

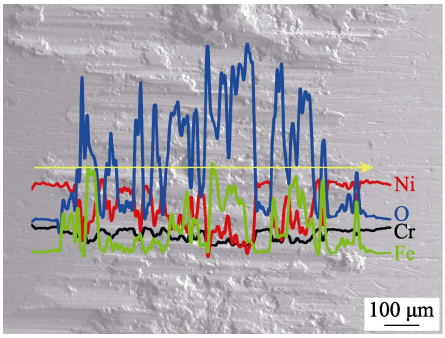


图 6　690 合金管沿微动方向的 EPMA 线扫描结果（F_n=20 N，D=200 μm）

Fig.6 EPMA analysis of 690 alloy tube along the fretting direction (F_n=20 N, D=200 μm)

2.4　磨损量分析

2.4.1　三维形貌及二维轮廓分析

图 7 所示为 690 合金管的二维轮廓及三维形貌分析测试结果。如图 7 所示，沿着接触方向，磨损深度呈现锯齿状。这是由于 690 合金管与 405 不锈钢并非理想平面，当两者接触时，并不能实现理想的线接触，而是在一条线上的微凸体进行接触，较高的微凸体先接触而被磨损，较低的微凸体未产生接触而被保护起来，致使磨损不均匀，这与 OM 和 EPMA 的结果一致。由白光干涉测试结果可知，当法向载荷和位移幅值增加时，磨痕宽度和深度也表现为增长趋势。

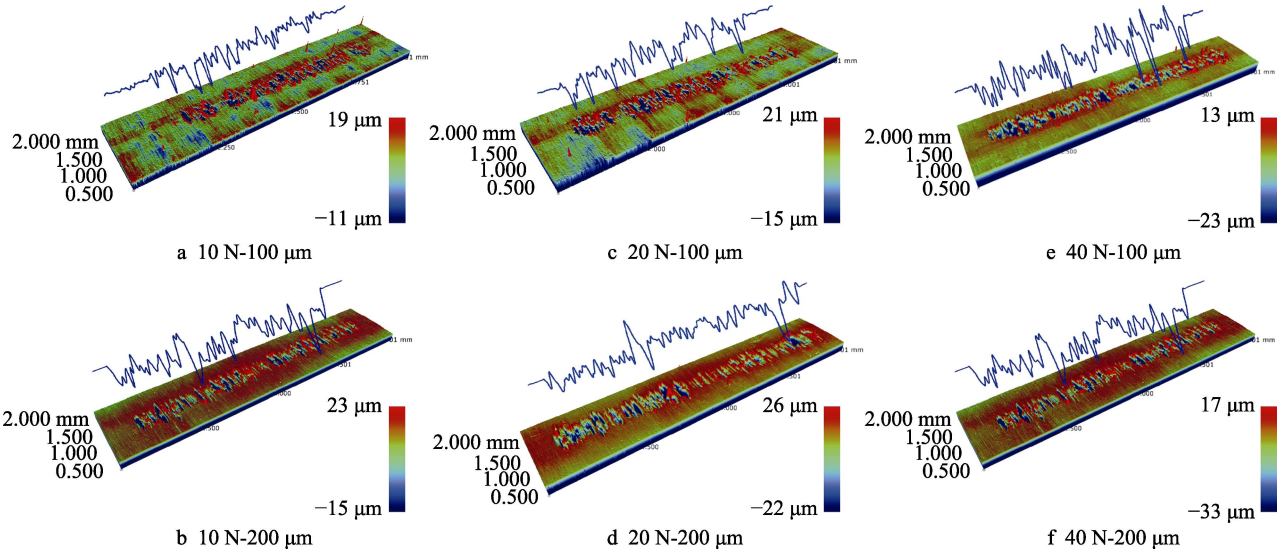


图 7　690 合金管的二维轮廓和三维形貌图

Fig.7 2D profiles and 3D micrographs of fretted 690 alloy tubes

2.4.2　磨损体积分析

图 8 为 690 合金管与 405 不锈钢块的磨损体积测试结果。相同位移幅值下，随着法向载荷增大，磨损体积均呈现出增长趋势，且 405 不锈钢块的磨损体积远大于 690 合金块的磨损体积。由分析测试结果可知，法向载荷与磨损体积之间并未表现出等比例增长的关系，这与图 2 中耗散能的结果不符。这是由于磨屑覆盖于磨痕表面难以去除，使得难以测得真实的磨损体积。本文所得到的磨损体积只可用于定性分析，而不能用于定量分析。

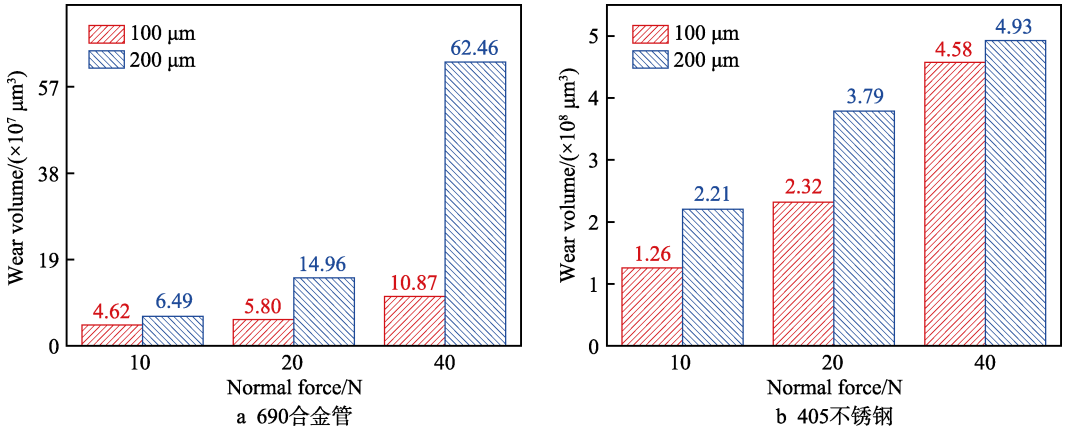


图 8　不同法向载荷下的磨损体积

Fig.8 Wear volume under different normal force: a) 690 alloy tube; b) 405 SS plate

3　结论

1）当法向载荷为 10、20、40 N，位移幅值为 100、200 μm 时，690 合金管与 405 不锈钢块的切向微动磨损运行区域均处于完全滑移区，主要的磨损机制为剥层和磨粒磨损。

2）随着法向载荷增大，摩擦耗散能增加，690 合金管磨损加剧，磨损体积、磨痕深度与磨痕宽度均呈现上升趋势。

3）沿微动方向，690 合金表面的磨损区域内 O、Fe、Ni 和 Cr 的含量呈锯齿变化；沿接触方向，690 合金管的磨损深度也呈锯齿状。这都是由于 690 合金管和 405 不锈钢块均非理想平面所致。

参考文献：

[1] ATTIA H. Fretting fatigue and wear damage of structural components in nuclear power station-fitness for service and life management perspective[J]. Tribology, 2006, 39(2): 1294-1304.

[2] 车宏龙，雷明凯. 蒸汽发生器传热管的微动磨损损伤及预测模型[J]. 中国核电, 2013, 6(2): 115-119.
CHE Hong-long, LEI Ming-kai. Fretting wear damage of steam generator tubes and its prediction modeling[J]. China nuclear power, 2013, 6(2): 115-119.

[3] RUBIOLO P R, YOUNG M Y. On the factors affecting the fretting-wear risk of PWR fuel assemblies[J]. Nuclear engineering and design, 2009, 239(1): 68-79.

[4] 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): 27-32.
DING Xun-shen. Fretting wear and protection of steam generator tubes[J]. Nuclear safe, 2006(3): 27-32.

[5] 丁训慎. 核电厂蒸汽发生器设计中的安全问题[J]. 核安全, 2005(2): 1-6.
DING Xun-shen. The design safety of steam generators in NPP[J]. Nuclear safe, 2005(2): 1-6.

[6] 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): 221-231.
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): 221-231.

[7] KANG K S, KUPCA L. Assessment and management of ageing of major nuclear power plant components important to safety: Steam generators[R]. Vienna: IAEA, 1999.

[8] 张晓宇，任平弟，张亚非，等. Incoloy 800 合金的高温微动磨损特性[J]. 中国有色金属学报，2010，20(8): 1545-1551.
ZHANG Xiao-yu, REN Ping-di, ZHANG Ya-fei, et al. Fretting wear behavior of Incoloy 800 alloy at high temperature[J]. The Chinese journal of nonferrous metals, 2010, 20(8): 1545-1551.

[9] LEE Y H, KIM H K, KIM H D, et al. A comparative study on the fretting wear of steam generator tubes in korean power plants[J]. Wear, 2003, 255(7): 1198-1208.

[10] 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.

[11] ATTIA H. A generalized fretting wear theory[J]. Tribology international, 2009, 42(9): 1380-1388.

[12] ATTIA H, GESSESSE Y B, OSMAN M O M. New par-

ameter for characterizing and correlating impact-sliding fretting wear to energy dissipation—Experimental investigation[J]. Wear, 2007, 263(1): 419-429.

[13] 李杰. 大气及溶液环境下传热管材料微动磨损行为及损伤机制[D]. 北京: 北京科技大学, 2017.
LI Jie. The fretting wear behavior and damage mechanism of heat exchange tube materials in air and solution environment[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2017.

[14] 张晓宇. 核电蒸汽发生器传热管切向微动磨损机理研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2013.
ZHANG Xiao-yu. Studies on tangential fretting wear mechanisms of steam generator tubes in nuclear power systems[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2013.

[15] CAI Z B, PENG J F, QIAN H, et al. Impact fretting wear behavior of alloy 690 tubes in dry and deionized water conditions[J]. Chinese journal of mechanical engineering, 2017, 30(4): 819-828.

[16] SUN Y, CAI Z B, CHEN Z Q, et al. Impact fretting wear of Inconel 690 tube with different supporting structure under cycling low kinetic energy[J]. Wear, 2017, 376: 625-633.

[17] 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: 582-590.

[18] 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.

[19] 郑劲松, 赵丽娜, 厉淦. 接触应力和高温环境对 Inconel690 合金微动疲劳寿命的影响[J]. 材料保护, 2015, 48(3): 27-30.
ZHENG Jing-song, ZHAO Li-na, LI Gan. The effect of contact force and temperature on the fatigue life of Inconel 690 alloy[J]. Materials protection, 2015, 48(3): 27-30.

[20] KWON J D, JEUNG H K, CHUNG I S, et al. A study on fretting fatigue characteristics of Inconel 690 at high temperature[J]. Tribology international, 2011, 44: 1483-1487.

[21] 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, 36(10): 1328-1334.
LI Jie, LU Yong-hao. Displacement amplitude effects on the fretting wear behavior and mechanism of Inconel600 alloy[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2014, 36(10): 1328-1334.

[22] ZHANG X, REN P, PENG J, et al. Fretting wear behavior of Inconel690 in hydrazine environments[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2014, 24(2): 360-367.

[23] HUR D H, LEE D H. Effect of solid solution carbon on stress corrosion cracking of alloy 600 in a primary water at 360 ℃[J]. Materials science & engineering A, 2014, 603: 129-133.

[24] 阳荣, 蔡振兵, 林映武, 等. 690合金管在室温干态下的冲击微动磨损特性研究[J]. 摩擦学学报, 2015, 35(5): 525-530.
YANG Rong, CAI Zhen-bing, LIN Ying-wu, et al. Investigation on impact fretting wear behavior of alloy 690 tube at dry and room temperature[J]. Tribology, 2015, 35(5): 525-530.

[25] 蔡振兵, 邓小剑, 阳荣, 等. 690合金在去离子水和干态下的微幅冲击磨损行为研究[J]. 振动与冲击, 2015, 34(4): 14-18.
CAI Zhen-bing, DENG Xiao-jian, YANG Rong, et al. Micro-amplitude impact wear behavior of 690 alloy under deionized water and dry conditions[J]. Journal of vibration and shock, 2015, 34(4): 14-18.

[26] 冯志鹏, 臧峰刚, 张毅雄. 传热管流体诱导振动特性的数值研究[J]. 原子能科学技术, 2014, 48(10): 1807- 1813.
FENG Zhi-peng, ZANG Feng-gang, ZHANG Yi-xiong. Numerical study on flow induced vibration characteristics of heat transfer tube[J]. Atomic energy science and technology, 2014, 48(10): 1807-1813.

[27] 唐力晨, 谢永诚, 景益, 等. 抗振条面内接触刚度对蒸汽发生器传热管流致振动的影响[J]. 原子能科学技术, 2016, 50(4): 645-652.
TANG Li-chen, XIE Yong-cheng, JING Yi, et al. Influence of in-plane contact stiffness of anti-vibration bar on flow-induced vibration of heat-transfer tube in steam generator[J]. Atomic energy science and technology, 2016, 50(4): 645-652.

[28] 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 wear[M]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 2004.

[29] FOUVRY S, KAPSA P, ZAHOUANI H, et al. Wear analysis in fretting of hard coatings through a dissipated energy concept[J]. Wear, 1997, 203: 393-403.