文章编号：1004-0609(2014)11-2777-07

不同温度下 690 合金传热管与抗振条的微动磨损特性

王文秀[1,2]，蔡振兵[1]，钱 浩[3]，李 晨[3]，谢永诚[3]，米 雪[1]，彭金方[1]，朱旻昊[1]

(1. 西南交通大学 材料先进技术教育部重点实验室 摩擦学研究所，成都 610031；
2.中国铁建重工集团有限公司，长沙 410100；
3. 上海核工程研究设计院，上海 200233)

摘 要：在卧式高温微动磨损试验机(PLINT TE77)上，采取线接触方式，研究 690 合金传热管/405 不锈钢抗振条在干态不同温度下的切向微动磨损特性。在试验参数为法向载荷 40 N、位移幅值 100 μm、频率 5 Hz 和循环次数 1×10^5 次的条件下，分别在 25、90、200 和 285 ℃这 4 种不同温度下进行切向微动磨损试验。结果表明：微动工况均处于滑移区，90 ℃时稳态摩擦因数最高；当温度升高到 200 和 285 ℃时，摩擦因数经过下降期后出现一个更加明显的下降阶段，这与界面的高温氧化有关。磨损机制是磨粒磨损、氧化磨损和剥层，磨痕表面在低温(25 和 90 ℃)时的氧化程度比高温(200 和 285 ℃)时的严重。90 ℃时的磨损量比其他温度时的都高，这可能与界面水蒸气蒸发和表面摩擦氧化有关。

关键词：690 合金；抗振条；微动磨损；蒸汽发生器；传热管
中图分类号：TH 117.1 **文献标志码**：A

Fretting wear behavior of alloy 690 heat transfer tubes against anti-vibration strip at different temperatures

WANG Wen-xiu[1,2], CAI Zhen-bing[1], QIAN Hao[3], LI Chen[3], XIE Yong-cheng[3],
MI Xue[1], PENG Jin-fang[1], ZHU Min-hao[1]

(1. Tribology Research Institute, Key Laboratory of Advanced Materials Technology,
Ministry of Education, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;
2. China Railway Construction Heavy Industry Co., Ltd., Changsha 410100, China;
3. Shanghai Nuclear Engineering Research and Design Institute, Shanghai 200233, China)

Abstract: Tangential fretting wear characteristics of alloy 690 tubes against 405 stainless steel plates were studied on a fretting wear tester (PLINT TE77) under the dry condition at different temperatures by linear contact. At the test parameters, such as normal load of 40 N, displacement amplitude of 100 μm, frequency of 5 Hz and cycle number of 1×10^5, the fretting wear test were carried out at 25, 90, 200 and 285 ℃. The results show that, the fretting condition are all running in gross slip regime. The friction coefficient at 90 ℃ reaches the highest steady state value, and it occurs a more obvious decrease stage after a period of decline while the temperature increases to 200 and 285 ℃, which is related with the high-temperature oxidation at the interface. The wear mechanisms are complex with abrasive wear, oxidation wear and delamination. The oxidation of the worn surface at low temperatures (25 and 90 ℃) is more serious than that at high temperatures (200 and 285 ℃). The wear volume at 90 ℃ is higher than that at the other temperatures, this may be related with the water vapor at the interface and the oxide film at the surface.

Key words: alloy 690; fretting wear; anti-vibration strip; steam generator; heat transfer tube

基金项目：国家杰出青年科学基金资助项目(51025519)；国家自然科学基金资助项目(51375407)；大型先进压水堆重大专项(2010ZX06004-18)
收稿日期：2014-01-17；**修订日期**：2014-07-20
通信作者：蔡振兵，副研究员，博士；电话：028-87600601；E-mail：caizb@swjtu.cn;czb-jiaoda@126.com

在压水堆核电站(PWR)中，蒸汽发生器(SG)是一、二回路进行热交换的枢纽设备。由于 SG 二次侧的流体使传热管与其支撑界面间(如抗振条或支撑板)发生接触损伤，导致传热管壁因磨损而减薄，降低了传热管的使用寿命，即发生了微动损伤[1−3]。对于微动这一近似为原位接触、振幅为微米量级的摩擦磨损运动，有文献在不同温度下进行了磨损特性的研究[4]，但相对较少。而对于蒸汽发生器传热管的微动磨损，其服役环境为高温。因此，在研究传热管的切向微动磨损特性时，应该研究不同温度下的磨损行为。这对揭示传热管的微动损伤行为十分必要[5−7]。690 合金是一种奥氏体型高铬的镍基合金，属于低层错能的面心立方结构。在一个很宽范围的腐蚀性水介质和高温气氛环境中具有优异的抗蚀性，具有高强度、良好的冶金稳定性和优良的制造性能[8−9]。本文作者针对 690 合金传热管与 405 不锈钢配副件的线接触方式，在 25、90、200 和 285 ℃这 4 种不同温度下，研究 690 合金的微动磨损机理和损伤特征。这对于核电站关键部件的国产化，提高设备稳定性和使用寿命具有实际应用价值，对微动摩擦学基础理论的应用具有重要意义。

1 实验

试验材料为外径 d17.48 mm、内径 d15.44 mm、长 25mm 的 690 镍基合金管，配副件为 10 mm×12.19 mm×4.028 mm 的 405 不锈钢块(取自抗振条)。690 合金管与 405 不锈钢抗振条为线接触。表 1 所列为 690 合金和 405 不锈钢的主要化学组成。

试验参数如下：法向载荷 F_n 选取 40 N；位移幅值 D 选取 100 μm。综合考虑试验机和实际工况的微动运行频率，试验频率 f 取为 5 Hz，试验循环周次 N 取 1×10^5，试验分别在 25、90、200 和 285 ℃、相对湿度为 50%~65%的大气环境中进行。温度变化选取的依据是：室温 25 ℃为常见微动磨损试验的温度，285 ℃为实测蒸汽发生器中传热管所处环境的温度，90 ℃为空气中水蒸气接近蒸发的临界温度，200 ℃为中间的温度梯度。为保证试验数据的可靠性，每次实验重复数不低于 3 次。

采用光学显微镜(OM，OLYMPUS BX50)和扫描电子显微镜(SEM，JOEL JSM−6610LV)进行损伤表面和剖面的磨痕形貌分析；结合 SEM 配置的电子能谱(EDX，OXFORD X−MAX50 INCA−250)进行局部微区成分分析；采用三维光学显微镜(Contour GT−I)进行接触损伤区的 2D 和 3D 表面轮廓分析，并获得磨损体积和磨损深度等试验数据。

2 结果与分析

2.1 F_t–D 曲线与摩擦因数曲线

微动的运行存在 3 个区域：部分滑移区、滑移区和混合区，分别与 3 种基本类型的 F_t–D 曲线对应[10]。图 1 所示当试验温度为 25、90、200 和 285 ℃时在循环次数为 100、1000、10000 和 100000 次的 F_t–D 曲线，所有 F_t–D 曲线完全打开，呈平行四边形。表明在本试验参数条件下，摩擦接触表面发生了相对运动，微动均运行于滑移区。

通常情况下，摩擦因数随循环次数的变化曲线可以分为 5 个阶段：初始跑合期−上升期−峰值−下降期−稳定期(见图 2)。从图 2 可以看出，在 25 ℃时，摩擦因数随循环次数的变化曲线分为上述 5 个阶段，在稳定阶段摩擦因数随循环次数的增加基本保持不变。分析其原因如下，在初始跑合期，由于试件接触表面膜被去除，摩擦因数较低；在上升期，因材料界面直接接触发生粘着，摩擦因数上升，材料组织结构变化；随着循环次数的增加，磨屑剥落并充当保护作用，粘着受到抑制，摩擦因数达到峰值后进入下降期；在稳定期，磨屑连续不段形成和排出，在微动过程中形成一个动态平衡[11−12]。90 ℃时，摩擦因数经过下降期后出现上升，最终趋于稳定。由于水蒸汽渗入接触区域对摩擦磨损会产生一定的影响[13]，由此推测可能是因为温度升高到 90 ℃时，试样表面的水分(来源于空气湿度)蒸发，相对于室温时摩擦化学作用被抑制，磨屑在接触区的集聚作用降低，磨屑的减磨作用也随之降低，摩擦因数随之上升，最后达到最大值。而在高温

表 1 690 合金和 405 不锈钢的主要化学组成

Table 1 Main chemical compositions of alloy 690 and 405 stainless steel

Material	Mass fraction/%								
	Ni	Cr	Fe	Al	C	Si	Mn	S	P
Alloy 690	≥58.0	28.5−31.0	9.0−11.0	≤0.40	0.015−0.025	≤0.50	≤0.50	≤0.003	≤0.015
405 steel	≤0.60	11.5−14.5	Bal.	0.10−0.30	≤0.08	≤1.00	≤1.00	≤0.030	≤0.040

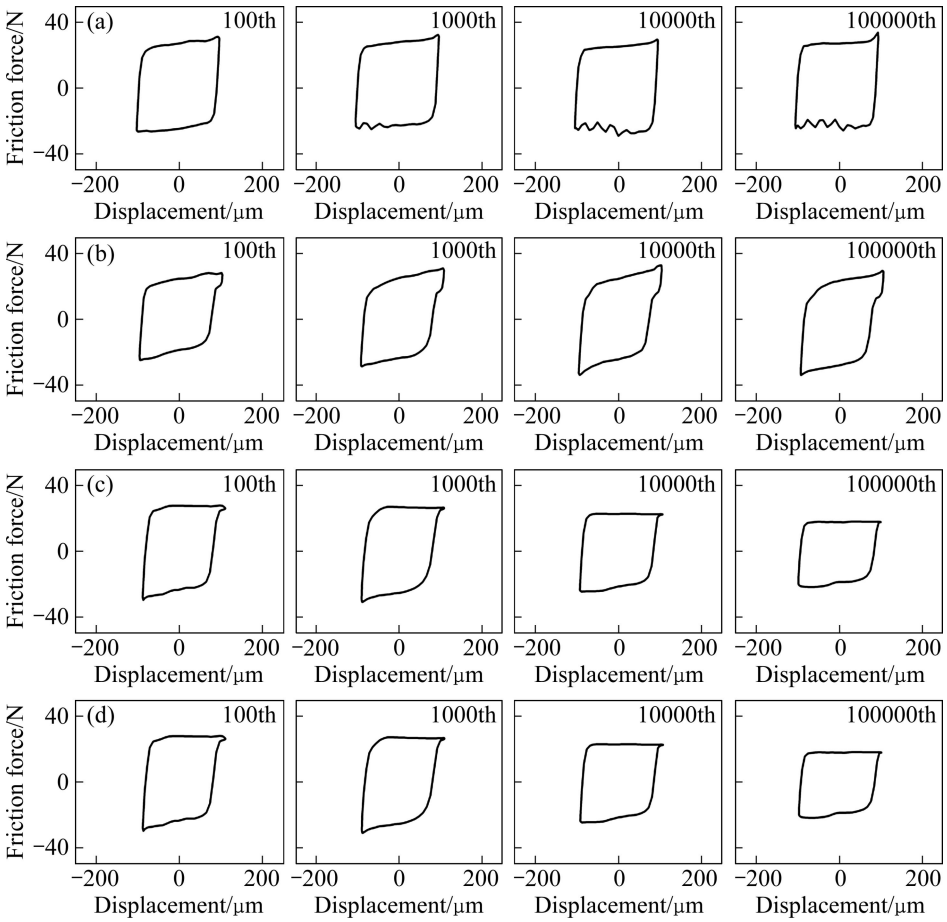


图 1　不同温度下 690 传热管/抗振条微动磨损的 F_t–D 曲线

Fig. 1　F_t–D curves of 690 alloy tubes/anti-vibration strip at different temperatures: (a) 25 ℃; (b) 90 ℃; (c) 200 ℃; (d) 285 ℃

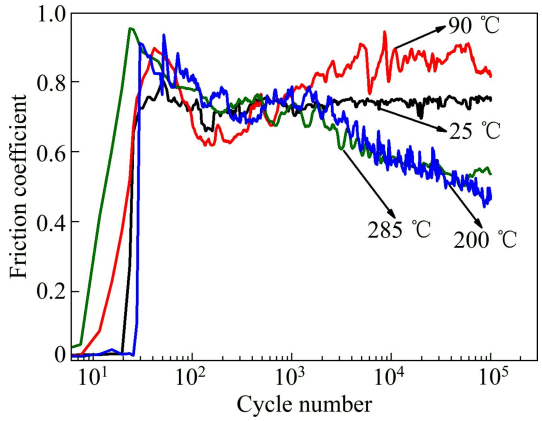


图 2　不同温度下的摩擦因数曲线

Fig. 2　Friction coefficient curves at different temperatures

(200 和 285 ℃)时，摩擦因数经过下降期后出现一个更加明显的下降阶段，这是因为温度升高后有不同于低温(25 和 90 ℃)的氧化行为[14−16]，材料表面氧化形成的氧化磨屑在接触界面间起到固体润滑作用，摩擦因数也随之降低。从摩擦因数演变过程来看，温度从 200 ℃提高到 285 ℃，摩擦因数变化不大。

2.2　磨痕形貌分析

磨痕在不同温度下的光学形貌如图 3 所示，其中每个分图上图所示为管试样磨痕，对应的下图所示为抗振条试样磨痕。从磨痕的全貌可以看出：从 25 ℃提高到 90 ℃，磨痕宽度增大，随着温度进一步升高到 200 和 285 ℃，磨痕宽度减小。在 90 ℃时，磨痕宽度最大，表明磨损最为严重，这与对应的最高稳态摩擦因数一致；但温度为 200℃时，磨痕中间位置出现未损伤区，这应该是在高温作用下 690 合金管发生了翘曲，导致接触中心区脱离接触；当温度提高到 285 ℃时，磨痕宽度有所降低，但磨痕形貌中出现了周期间隔的非损伤区，其形成原因尚不清楚，可能与摩擦自激振动有关。从光学形貌可见，不论是 690 合金管还是 405 不锈钢块均可见明显的犁沟特征，表面存在明显的磨粒磨损。

图 4 所示为不同温度下 690 合金管磨痕的 SEM 像。由图 4 可看出，在 25 和 90 ℃的条件下，磨痕表面被氧化磨屑层覆盖，表现为较多的磨屑堆积特征，90 ℃时可见磨屑层的片状剥落；在 200 和 285 ℃的条

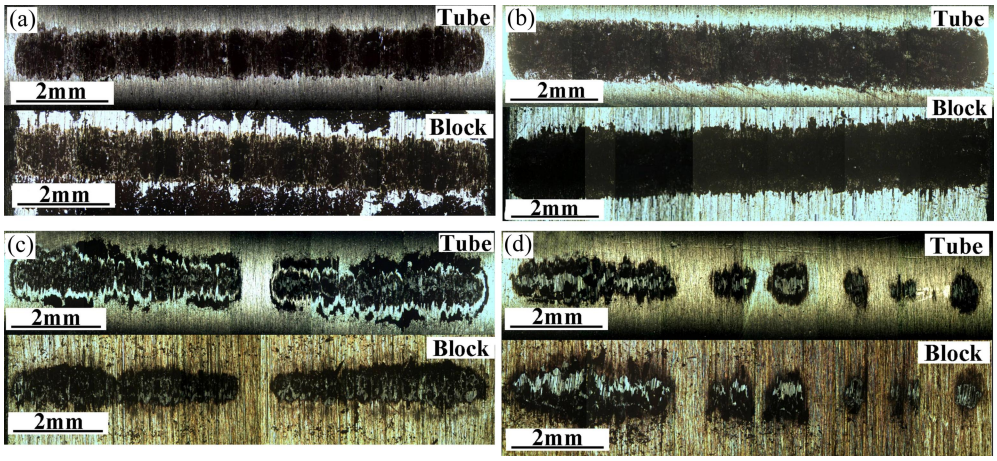


图 3 不同温度下管–块磨痕的光学形貌

Fig. 3 OM micrographs of wear scars for up-tube and down-block at different temperatures: (a) 25 ℃; (b) 90 ℃; (c) 200 ℃; (d) 285 ℃

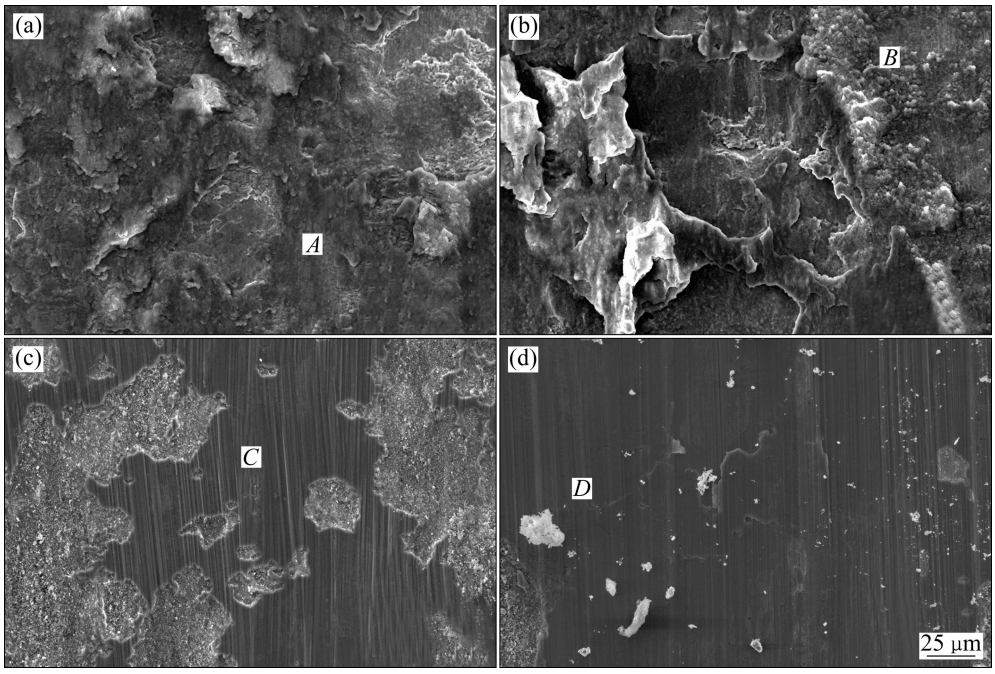


图 4 不同温度下 690 合金管磨痕的 SEM 像

Fig. 4 SEM images of wear scars of alloy 690 at different temperatures: (a) 25 ℃; (b) 90 ℃; (c) 200 ℃; (d) 285 ℃

件下，磨痕表面为犁沟和剥落坑，磨屑散落在剥落坑中。可见低温(25 和 90 ℃)与高温(200 和 285 ℃)表现出较大的差异，这与发生界面氧化行为的不同有关，在相对较低温度下的氧化是以摩擦氧化(Tribo-oxidation)为主，而在较高温度下转变为高温引起的普通氧化(Oxidation)为主，此推论还有待进一步关于摩擦氧化机理的分析来验证。另外，在 285 ℃的高温条件下，与 200 ℃相比，形貌特征没有本质变化，只是氧化磨屑层覆盖在整个接触区，局部 SEM 形貌表现出磨屑层剥落特征，此时没有磨屑的堆积现象。这可能是因为温度提高，氧化层厚度增大，表面脆性增大，在相同法向载荷作用下，高温试样表现出更厚的磨屑层覆盖特征。

不同温度下 690 合金管磨痕的 SEM 像对应位置的 EDX 谱如图 5 所示。在 25 ℃时的位置 *A* 和 90 ℃时的位置 *B*，磨屑堆积处检测到很高的 O 峰，相比于 200 ℃时的位置 *C* 和 285 ℃时的位置 *D* 处的 O 峰，其相对量较高，这也说明较低温度和较高温度不同时合金的氧化行为，即在较低温度条件下，磨屑在摩擦过程中逐渐被氧化，由于摩擦过程具有很高的活化作用，

其氧化以摩擦氧化为主，而在较高温度条件下，在摩擦开始前表面就形成了一层氧化物，磨损发生在氧化物之间，摩擦氧化反而被抑制，所以其氧峰相对较低[14−16]。

2.3　损伤分析

对 690 合金管的磨痕表面进行二维和三维形貌分析，测得磨痕平均磨损深度和磨损体积对比的直方图如图 6 所示。由图 6 可看出，室温 25 和 90 ℃时的平均磨损深度和磨损体积显著提高，高温(200 和 285 ℃)时平均磨损深度和磨损体积显著下降。这可能是因为温度提高到 90 ℃时，试样表面的水分(来源于空气湿度)蒸发，相对于室温时摩擦化学作用被抑制，磨屑在接触区的集聚作用降低，磨屑的减磨作用也随之降低，所以形成了较深的磨损轮廓。高温下可能是因为在试样表面形成了氧化物，氧化物对磨损有减缓作用，所以随着温度的进一步增加，平均磨损深度和磨损体积显著下降。

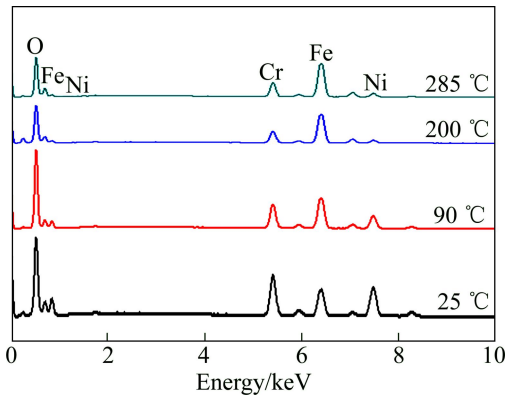


图 5　不同温度下 690 合金管磨痕的 EDX 谱

Fig. 5　EDX spectra of wear scars of alloy 690 at different temperatures

2.4　剖面分析

690 合金管磨痕剖面的光学形貌如图 7 所示。从图 7 中虚线圈出的磨损范围可以看出，25 和 90 ℃时的磨损范围较宽，且 90 ℃时的磨损较为严重，存在大块的磨屑堆积。高温(200 和 285 ℃)下的磨损比低温(25 和 90 ℃)下的磨损轻微，但存在各自不同的特征。200 ℃时磨痕的两边缘出现隆起，磨痕深度较大；285 ℃时磨痕深度有所降低，出现了负磨损峰，即磨屑堆积峰高于接触表面。

690 合金管磨痕剖面的 SEM 形貌如图 8 所示。由图 8 可知，25 和 90 ℃时的磨痕表面都存在不平整的磨屑坑，90 ℃时的磨屑坑较大且堆积的磨屑较多。200

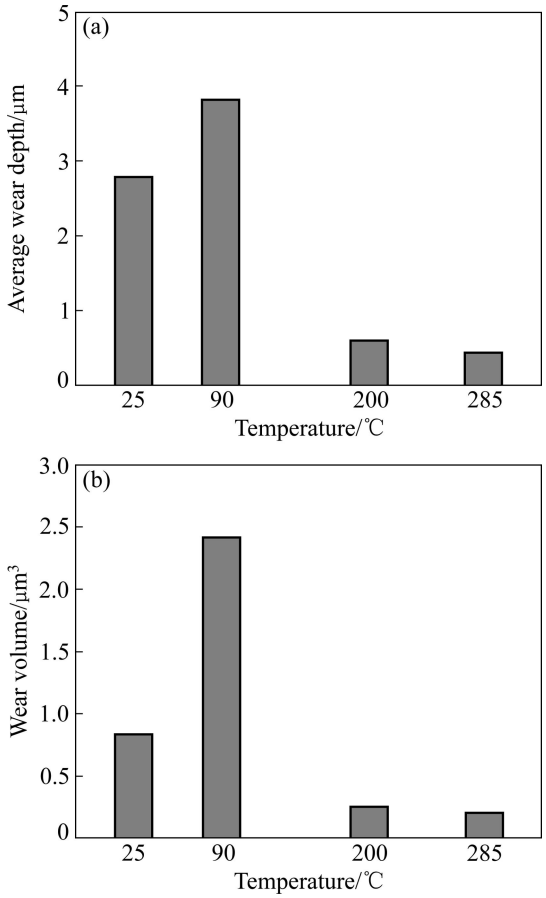


图 6　不同温度下 690 合金管磨痕的平均磨损深度和磨损体积

Fig. 6　Average wear depth (a) and wear volume (b) of wear scars of alloy 690 at different temperatures

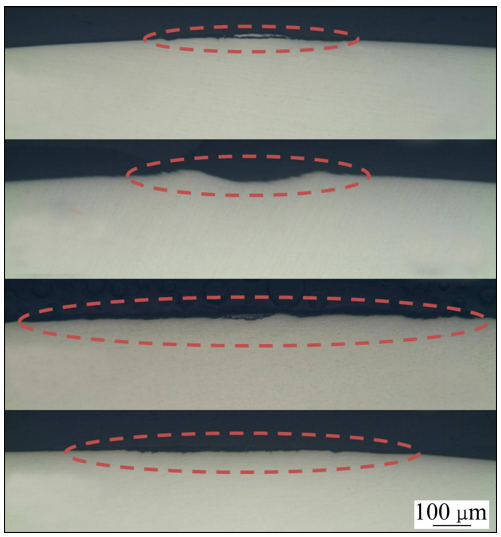


图 7　不同温度下 690 合金磨痕剖面的光学形貌

Fig. 7　OM micrographs of cross-sections of alloy 690 at different temperatures

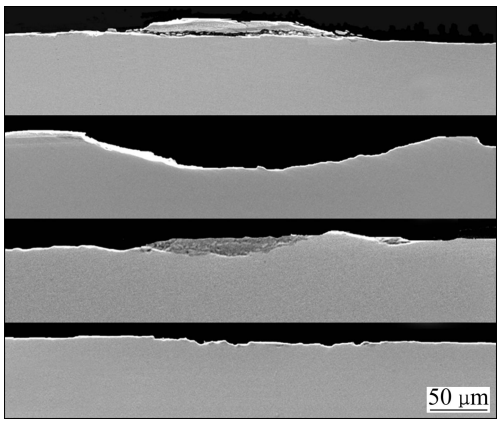


图 8 不同温度下 690 合金磨痕剖面的 SEM 像

Fig. 8 SEM images of cross-section of alloy 690 at different temperatures

℃时磨痕的两边缘出现隆起，可能是由于磨损过程中材料向两边转移；285 ℃时，可清楚地观察到紧密磨屑层下的空隙和颗粒状的磨屑，这可能是因为微动处于滑移状态，在较小载荷的情况下，磨损过程中产生尺寸较大的硬质颗粒没被压碎，新生成的磨屑覆盖其上，循环多次后磨屑越来越多，形成紧密的磨屑层，最终会产生磨屑层剥落。

3 结论

1) 本研究中微动工况处于滑移区，90 ℃时的稳定摩擦因数最高，在高温(200 和 285 ℃)条件下，摩擦因数经过下降期后出现一个更加明显的下降阶段，这与界面高温氧化有关。在低温(25 和 90 ℃)条件下以摩擦氧化为主，而在高温条件下转变为以高温引起的普通氧化为主。

2) 不同温度下 690 合金管的磨损机制有磨粒磨损、氧化磨损和剥层，磨痕表面在低温条件下的氧化程度较高，摩擦氧化严重。90 ℃时的磨损量最高，这可能是室温(25 ℃)时界面水蒸汽作用和高温(200 和 285 ℃)时表面氧化物降低了磨损所致。

REFERENCES

[1] 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 worldwide difficulties in the field of nuclear power equipment and structures for a long term[J]. Nuclear Power Engineering, 2000, 21(3): 222−231.

[2] 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 Safety, 2006(3): 27−32.

[3] 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.

[4] 金云学, 王小丫, 童强强, 陈洪美, Jung-moo LEE. 温度对铸态 SiC_p/A356 复合材料滑动摩擦磨损特性的影响[J]. 中国有色金属学报, 2014, 24 (1): 179−187.
JIN Yun-xue, WANG Xiao-ya, TONG Qiang-qiang, CHEN Hong-mei, Jung-moo LEE. Effect of temperature on friction and wear characteristics of as-cast SiC_p/A356 composite[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2014, 24(1): 179−187.

[5] 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.

[6] HONG Seung-mo, KIM In-sup. Impact fretting wear of alloy 690 tubes at 25 ℃ and 290 ℃[J]. Wear, 2005, 259(1/6): 356−360.

[7] 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[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]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2010, 20(8): 1545−1551.

[8] 宋立秋. 核电蒸发器传热管用材料的发展[C]//2011 年全国高品质特殊钢生产技术研讨会文集, 西宁, 2011: 358−362.
SONG Li-Qiu. Development of materials used in nuclear power evaporator tubes[C]//2011 Collected Works of the Production Technology Symposium of National High-quality Special Steel, Xining, 2011: 358−362.

[9] 李茂林, 浦承皓, 李 禅, 陈阳阳, 金 刚. 传热管用 Inconel 690 合金概述[J]. 现代制造技术与装备, 2013(3): 37−40.
LI Mao-lin, PU Cheng-hao, LI Chan, CHEN Yang-yang, JIN Gang. A general overview of inconel alloy 690 about heat-transfer tube[J]. Modern Manufacturing Technology and Equipment, 2013(3): 37−40.

[10] ZHU M H, ZHOU Z R. On the mechanisms of various fretting wear modes[J]. Tribology International, 2011, 44(11): 1378−1388.

[11] 刘捍卫, 邱绍宇, 朱旻昊, 黄鹃鹏, 周仲荣. 1Cr13 不锈钢部分滑移区和滑移区的高温微动磨损特性[J]. 核动力工程, 2005, 26(4): 394−396.

LIU Han-wei, QIU Shao-yu, ZHU Min-hao, HUANG Kun-peng, ZHOU Zhong-rong. Fretting behaviour of 1Cr13 stainless steel from room temperature to 400 ℃ in gross slip regime and slip[J]. Nuclear Power Engineering, 2005, 26(4): 394−396.

[12] 周前国. 690 合金材料的微动磨损特性研究[J]. 工程材料应用, 2010, 37(3): 394−396.
ZHOU Qian-guo. Research on fretting wear behavior of alloy 690 materials[J]. Engineering Materials Applications, 2010, 37(3): 394−396.

[13] 徐　进, 朱旻昊, 刘捍卫, 陈建敏, 周仲荣. 湿度、温度及润滑油对粘结 MoS_2 固体润滑涂层微动磨损寿命的影响[J]. 机械工程材料, 2003, 27(9): 21−23.
XU Jin, ZHU Min-hao, LIU Han-wei, CHEN Jian-min, ZHOU Zhong-rong. Influence of relative humidity, temperature, oil lubrication on the fretting wear life of bonded solid lubricant coating[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2003, 27(9): 21−23.

[14] PARK Gi-sung, KIM Gyung-guk, KIM Seon-jin. Sliding wear behaviors of steam generator tube materials in high temperature water environment[J]. Journal of Nuclear Materials, 2006, 352: 80−84.

[15] DEL GIACCO M, WEISENBURGER A, SPIELER P, ZIMMERMANN F, LANG F, JIANU A, MUELLER G. Experimental equipment for fretting corrosion simulation in heavy liquid metals for nuclear applications[J]. Wear, 2012, 280/281: 46−53.

[16] HONG Jin-ki, KIM In-sup. Environment effects on the reciprocating wear of Inconel 690 steam generator tubes[J]. Wear, 2003, 255: 1174−1182.

(编辑　龙怀中)