

核用 2.25Cr-1Mo 钢在不同环境下的微动磨损性能

王立闻¹, 陈旭东², 王俊², 冯铄², 汤瑞²,
莫堃¹, 官雪梅¹, 张强升³, 蔡振兵²

(1. 东方电气集团科学技术研究院有限公司, 成都 611731; 2. 西南交通大学 摩擦学研究所, 成都 610031; 3. 生态环境部核与辐射安全中心, 北京 100082)

摘要: **目的** 研究核用 2.25Cr-1Mo 钢在不同环境下的微动磨损性能。**方法** 采用自制的切向微动磨损试验设备, 在 4 种环境 (温室 RT/大气、RT/水、450 °C/大气和 450 °C/液态钠) 下对 2.25Cr-1Mo 钢进行了切向微动磨损试验。试验参数为: 法向载荷 20 N, 运动频率 5 Hz, 位移幅值 50 μm , 循环次数 10^5 和 2×10^5 。试验前, 采用维氏硬度计测量了 2.25Cr-1Mo 钢在室温和 450 °C 高温下的硬度。试验后, 采用 Bruker 白光干涉显微镜测量了磨痕的三维形貌并获得了截面轮廓和磨损量。采用扫描电子显微镜 (SEM)、能谱仪 (EDS) 分析磨痕表面和横截面的微观形貌以及摩擦化学反应。**结果** 2.25Cr-1Mo 钢在不同环境下表现出不同的磨损性能。450 °C 液态钠环境下的磨损量最大, 大于 450 °C 和室温大气环境下的磨损量; 室温水环境下的磨损最小。经过 10^5 微动循环后, 2.25Cr-1Mo 钢在 450 °C 液态钠和室温水环境下表现出最大和最小的磨损率, 分别为 $4.17 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ 和 $0.32 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ 。**结论** 2.25Cr-1Mo 钢在室温大气环境下的磨损机制为分层、剥落和氧化磨损; 随着温度升高到 450 °C, 大气环境下的氧化磨损加剧, 伴随着剥层和“锻造流线”; 室温水环境下的磨损机制为磨粒磨损和氧化磨损; 450 °C 液态钠环境下的磨损机制为磨粒磨损、黏着磨损和“锻造流线”, 同时钠的腐蚀协同作用也加速了材料的失效。

关键词: 2.25Cr-1Mo 钢; 传热管; 液态钠; 不同环境; 微动磨损; 磨损机制

中图分类号: TH117 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2023)03-0161-11

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2023.03.013



扫码查看文章讲解

Fretting Wear Properties of Nuclear 2.25Cr-1Mo Steel in Different Environments

WANG Li-wen¹, CHEN Xu-dong², WANG Jun², FENG Shuo², TANG Rui², MO Kun¹,
GUAN Xue-mei¹, ZHANG Qiang-sheng³, CAI Zhen-bing²

(1. DEC Academy of Science and Technology Co., LTD, Chengdu 611731, China; 2. Tribology Research Institute, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 3. Nuclear and Radiation Safety Center, MEE, Beijing 100082, China)

收稿日期: 2022-02-28; 修订日期: 2022-05-26

Received: 2022-02-28; Revised: 2022-05-26

基金项目: 四川省科技项目 (2022ZD0029, 2022JDJQ0019); 国家自然科学基金 (U2067221)

Fund: Sichuan Science and Technology Project (2022ZD0029, 2022JDJQ0019); National Natural Science Foundation of China (U2067221)

作者简介: 王立闻 (1983—), 男。

Biography: WANG Li-wen (1983-), Male.

通讯作者: 蔡振兵 (1981—), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为材料服役行为。

Corresponding author: CAI Zhen-bing (1981-), Male, Doctor, Researcher, Research focus: material service behavior.

引文格式: 王立闻, 陈旭东, 王俊, 等. 核用 2.25Cr-1Mo 钢在不同环境下的微动磨损性能[J]. 表面技术, 2023, 52(3): 161-171.

WANG Li-wen, CHEN Xu-dong, WANG Jun, et al. Fretting Wear Properties of Nuclear 2.25Cr-1Mo Steel in Different Environments[J]. Surface Technology, 2023, 52(3): 161-171.

ABSTRACT: In the steam generator of a sodium-cooled fast reactor, the fretting wear occurs between the heat transfer tubes and their anti-vibration bars due to the flow of the liquid sodium. In this study, the fretting wear behaviors of 2.25Cr-1Mo steel (candidate material for heat transfer tubes in sodium-cooled fast reactors) were investigated by using a self-made multi-atmosphere tangential fretting test rig. In order to simulate the actual working conditions of the heat transfer tube, a 450 °C/liquid sodium environment was set. Three comparative environments, room temperature (RT)/air, RT/water, and 450 °C/air, were used to comprehensively evaluate the wear behaviors of 2.25Cr-1Mo steel in different environments. The test adopts the form of tube/rod orthogonal point contact, and the test parameters are as follows: the normal load is 20 N; the frequency is 5 Hz; the displacement amplitude is 50 μm ; the number of cycles is 10^5 and 2×10^5 . Before the test, the hardness of 2.25Cr-1Mo steel at RT and 450 °C was tested by a Vickers hardness tester. After the test, the three-dimensional morphology of the wear scar was measured by Bruker white light interference microscope, and the cross-sectional profile and wear volume were obtained. Scanning electron microscope (SEM) and energy dispersive spectrometer (EDS) were used to analyze the micromorphology and tribo-chemical reaction of the wear scar surface and cross-sectional. Results show that the hardness of 2.25Cr-1Mo steel will decrease significantly at 450 °C, and exhibits different wear properties in different environments. The 2.25Cr-1Mo steel has the worst wear resistance in liquid sodium at 450 °C, while the best wear resistance in water at RT. The sodium reduces the lubricating oxide layer to metal, accelerating the wear, while the water lubricates and reduces wear. Therefore, the wear rate of 2.25Cr-1Mo steel is the largest in liquid sodium at 450 °C ($4.17 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$) and the smallest in water at RT ($0.32 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$). The wear resistance of 2.25Cr-1Mo steel in the air is affected by the temperature. In the first 10^5 cycles (early severe wear stage), the wear rate at RT is smaller, and in the last 10^5 cycles (late stable wear stage), the wear rate at 450 °C is even smaller. In the early stage of wear, the 2.25Cr-1Mo steel at high temperature is more easily deformed and peeled off under the combined action of thermal effect and mechanical force, so a larger wear volume is measured, while in the later stage of wear, the material under high temperature is more likely to produce a thicker "glaze layer" at the wear interface, which has lubricating and anti-friction properties. Finally, the main wear mechanism of 2.25Cr-1Mo steel in the air at RT is delamination, spalling and oxidative wear; as the temperature rises to 450 °C, the oxidative wear in the air intensifies, accompanied by delamination and "forging flow lines"; and in water at RT is abrasive wear and oxidative wear; and in liquid sodium at 450 °C is abrasive wear, adhesive wear and "forging flow lines", and the synergistic effect of sodium corrosion also accelerates the failure of the material.

KEY WORDS: 2.25Cr-1Mo steel; heat transfer tube; liquid sodium; different environments; fretting wear; wear mechanism

钠冷快堆是第四代核反应堆中最具商业价值的堆型,也是中国核能技术实现闭式燃料循环和可持续发展的一个重要战略选择^[1-2]。其冷却剂钠具有和水、水蒸气和氧气发生剧烈反应的特点^[3]。当蒸汽发生器(SG)传热管破裂发生泄漏时,二回路的钠和三回路的水会发生剧烈的钠水反应,生成大量氢气并产生强烈的压力波,严重影响反应堆的正常运行^[4]。传热管的损伤机理和钠水反应事件一直是钠冷快堆设计必须考虑的因素^[5-6]。由冷却剂和结构之间的流致振动导致传热管与其抗振条之间的微动磨损是SG传热管的主要损伤形式之一^[7-9]。因此,研究传热管的微动磨损行为,明确其微动损伤机制,对提高反应堆的安全可靠性很有必要。

目前,国内外对SG传热管微动磨损的研究主要集中于压水堆。从传热管材料^[10-11]、试验环境^[12]、试验参数^[13]、数值计算^[14]等方面进行了大量的研究。钠冷快堆的SG长期在高温、热载荷、腐蚀介质环境中服役,其对传热管材料的要求更高。2.25Cr-1Mo钢具有良好的高温强度、抗蠕变性能及抗裂纹敏感性,是钠冷快堆SG传热管的主要候选材料^[15]。

2.25Cr-1Mo钢的组织^[16-17]、焊接性能^[18]、腐蚀性能^[19]以及抗蒸汽氧化性能^[20-21]已经得到了广泛的研究。但是,关于2.25Cr-1Mo钢微动磨损性能的研究相对较少。Pattnaik等^[22]研究了2.25Cr-1Mo钢的冲蚀磨损性能,结果表明,冲击速度的影响最大。Yu等^[23]研究了水温对2.25Cr-1Mo钢切向磨损性能的影响,结果表明,随着水温的增加,磨损量逐渐增加。笔者之前的工作研究了温度对2.25Cr-1Mo钢的切向和冲击磨损性能的影响,发现高温下磨粒磨损、氧化磨损和塑性变形是主要的磨损机制^[24-25]。综上所述,目前关于传热管微动磨损的研究主要集中于压水堆的蒸汽发生器,而对钠冷快堆SG传热管的研究较少。现有的报告只是在一种环境下进行研究,并没有对比不同环境下的磨损性能,也没有在液态钠环境下研究2.25Cr-1Mo钢的磨损性能。

本文以2.25Cr-1Mo钢和Gr5Cr12钢作为研究对象,开展了4种环境(RT/大气、RT/水、450 °C/大气和450 °C/液态钠)下2.25Cr-1Mo钢的切向微动磨损行为研究,探讨了2.25Cr-1Mo钢在不同环境下的磨损机理。

1 试验

试验材料为 2.25Cr-1Mo 钢 (外径为 16 mm, 内径为 11 mm), 其对磨副为 Gr5C12 钢, 均由东方电气集团科学技术研究院有限公司提供。摩擦副主要的化学成分见表 1。通过线切割设备将 2.25Cr-1Mo 钢管加工成长度为 55 mm 的试样, 将 Gr5C12 钢加工成直径为 9.5 mm、长度为 20 mm 的模拟柱面, 两者正交接触, 如图 1 所示。通过抛光机对加工好的样品进行打磨抛光以获得更好的表面 (试样及其摩擦副表面粗糙度约为 0.4 μm)。试验前, 用无水乙醇对样品进行超声清洗, 以除去样品表面的杂质。清洗后的样品通过维氏硬度仪 (施加载荷 3 000 g, 加载 15 s) 测试其硬度, 如图 2 所示。2.25Cr-1Mo 钢在室温下的硬度为 183.5HV, 在 450 ℃ 高温环境下的硬度为 154.1HV, 说明 2.25Cr-1Mo 钢的硬度在高温环境下会显著降低。

试验设备为自主研发的多气氛微动磨损试验机, 其原理如图 1 所示。该设备可以模拟换热器传热管的

实际工况, 还可以实现不同介质 (大气、水、液态金属)、不同温度 (RT 至 450 ℃)、不同载荷 (20、30、40 N)、频率 (5、10 Hz) 以及位移幅值 (10~100 μm) 下的切向微动磨损试验。设备详细的介绍可以参考笔者之前的工作^[26]。本文设置了 4 种环境下的试验, 分别为 450 ℃ 液态钠环境 (模拟真实工况)、450 ℃ 大气、室温大气和室温水环境 (3 种对比工况), 以研究 2.25Cr-1Mo 钢在不同环境下的微动磨损性能。具体的试验参数为: 法向载荷 20 N, 运动频率 5 Hz, 位移幅值 50 μm, 循环次数 10⁵、2×10⁵^[27-28]。每组试验重复 3 次, 取平均值, 以标准差为误差棒。

试验所用的商品级钠 (纯度>99.7%) 由山东默锐科技有限公司提供, 它的杂质如表 2 所示。每次试验使用新鲜钠。试验前后对设备进行清洗以去除残留钠。试验过程中, 在钠罐里保持 0.1 Pa 的氩气, 避免液态钠与空气接触。详细的试验步骤可以参考笔者之前的工作^[26]。试验后, 采用 Bruker 白光干涉显微镜对磨痕的三维形貌进行表征, 并结合 Vision64 软件获取磨痕的截面轮廓和磨损量 (3 次试验的平均值, 误

表 1 摩擦副的化学成分
Tab.1 Nominal compositions of tribo-pairs

Materials	Element							
	C	Mn	P	S	Si	Cr	Mo	Fe
2.25Cr-1Mo	0.05-0.15	0.30-0.60	≤0.025	≤0.025	≤0.50	1.90-2.60	0.87-1.13	Bal.
Gr5C12	≤0.15	0.30-0.60	≤0.035	≤0.035	≤0.50	4.00-6.00	0.45-0.65	Bal.

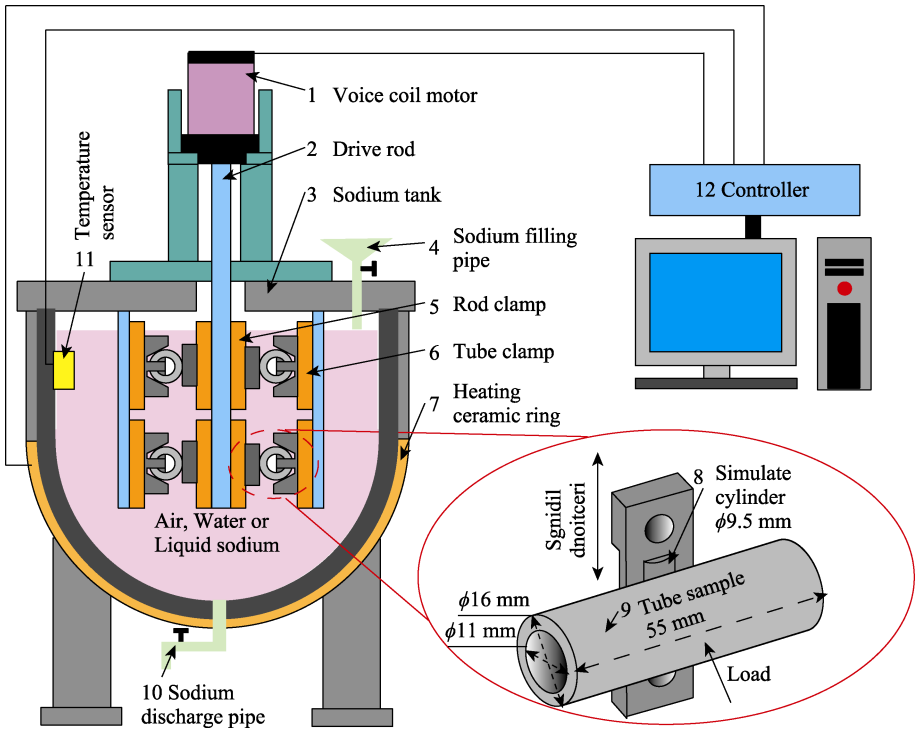


图 1 微动磨损试验设备示意图
Fig.1 Schematic diagram of the fretting wear test rig

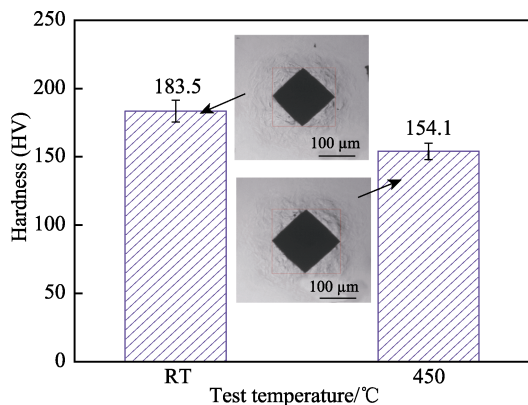


图 2 2.25Cr-1Mo 钢的硬度
Fig.2 Hardness of 2.25Cr-1Mo steel

表 2 测试中使用的商业级钠的成分
Tab.2 Composition of commercial-grade sodium used in the test

10 ⁻⁴ wt. %						
O	C	Fe	Cl	K	Ca	Pb
<100	<10	<10	<50	<400	<400	<50

差为 3 次测量的标准差)。采用扫描电子显微镜 (SEM)、能谱仪 (EDS) 分析磨痕表面和横截面的微观形貌以及摩擦化学反应, 揭示 2.25Cr-1Mo 钢在不同环境下的磨损机理。

2 结果与分析

2.1 不同环境下的磨损量

图 3a 显示了 2.25Cr-1Mo 钢在不同环境下经过 10⁵ 次切向微动磨损后磨痕的三维形貌, 图 3a 白色箭头标记线对应的磨痕截面轮廓如图 3b 所示。在室温中, 水环境下的磨痕表面比大气环境下的磨痕更光滑。因为水的流动性使磨损过程产生的磨屑从摩擦界

面排除, 如图 3a 所示。大气环境下, 更多的磨屑堆积在摩擦界面上, 形成较大锯齿状的截面轮廓, 如图 3b 所示。随着温度升高至 450 °C, 大气环境下的磨痕边缘发现较高的凸起, 如图 3a 所示。一方面是因为 2.25Cr-1Mo 钢在高温下的硬度更低, 材料在切向力的反复作用下向磨痕边缘流动; 另一方面, 产生的磨屑在高温下也更容易黏结, 从而堆积在磨痕边缘。其截面轮廓也显示出高于参考线的“凸峰”, 如图 3b 所示。在 450 °C 液态钠环境中, 磨痕的中心也发现较高的凸起, 如图 3a 所示。这是因为 2.25Cr-1Mo 钢在高温液态钠中具有一定的自焊特性^[29-30], 使得摩擦中心产生黏着。450 °C 液态钠环境下的磨痕截面也呈现出“W”型轮廓 (图 3b), 这是部分滑移 (黏着磨损) 的特征^[31]。室温大气、水和 450 °C 大气环境下的磨痕截面表现出“U”型轮廓, 这是完全滑移 (磨粒磨损) 的主要特征^[23-24]。说明液态钠改变了 2.25Cr-1Mo 钢的微动模式。室温水、大气环境以及 450 °C 大气、液态钠环境下的最大磨损深度分别为 3.8、7.6、23.5、26.3 μm, 如图 3b 所示。这说明温度对 2.25Cr-1Mo 钢的磨损深度有较大的影响。

随着循环次数增加到 2×10⁵, 不同环境下磨痕的三维形貌表现出与 10⁵ 次磨痕相似的特征, 如图 4a 所示。对应的磨痕截面轮廓如图 4b 所示, 磨痕的宽度和深度逐渐增加。室温水、大气环境下的最大磨损深度分别增加到 8.7 μm 和 11.9 μm, 增长率分别为 1.29 和 0.57。室温大气环境下最大磨损深度增长率更小, 可能是因为较多的磨屑堆积在磨损界面, 而在水环境下, 磨屑被排除到磨损界面之外, 导致较大的磨损深度增长率。450 °C 大气和液态钠环境下的最大磨损深度分别增加到 25.6 μm 和 32.7 μm, 增长率分别为 0.09 和 0.24。高温下最大磨损深度的增加率都较小。因为在高温下, 一方面材料在经过前 10⁵ 次循环后已经达到一个较大的磨损深度, 在后 10⁵ 次循环

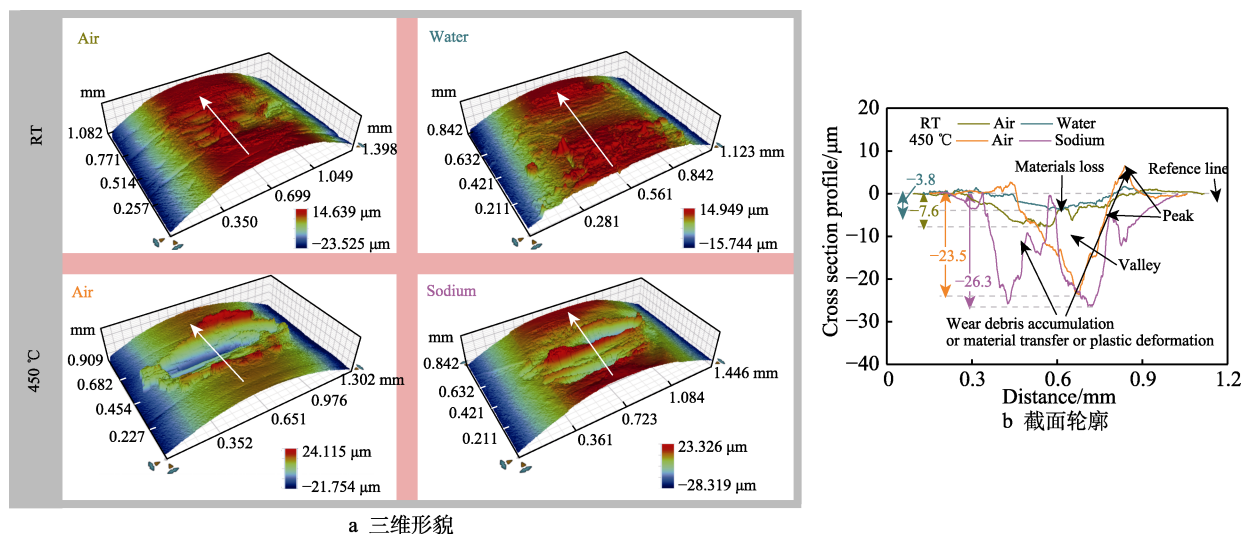
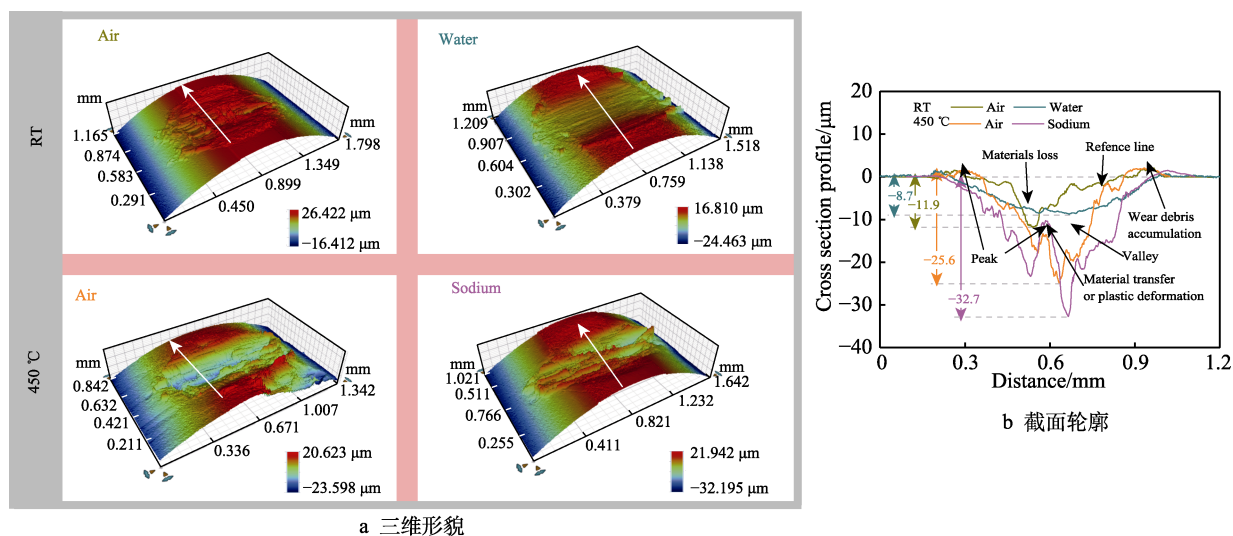


图 3 不同环境下磨痕的特征 ($N=10^5$)

Fig.3 Characteristics of wear scars in different environments ($N=10^5$): a) 3D micrographs; b) cross-sectional profile

图 4 不同环境下磨痕的特征 ($N=2 \times 10^5$)Fig.4 Characteristics of wear scars in different environments ($N=2 \times 10^5$): a) 3D micrographs; b) cross-sectional profile

中材料可以用塑性变形来抵抗磨损; 另一方面有更多的磨屑黏结在摩擦界面而不是被排除^[24-25], 所以在 450 °C 大气和液态钠环境下的最大磨损深度增加都较小。

磨痕凹坑是材料去除、塑性变形和材料转移的总和。磨损体积只计算了低于参考线的“谷”的体积, 如图 3b 和图 4b 所示。图 5 显示了不同环境下 2.25Cr-1Mo 钢的磨损体积以及不同阶段下的磨损率。经过前 10^5 次微动循环后, 室温水环境下的磨损量最小, 仅有 $12.8 \times 10^4 \mu\text{m}^3$ 。这是因为水起到了很好的润滑作用^[13]。室温大气环境下的磨损量略微增加, 有 $43.4 \times 10^4 \mu\text{m}^3$ 。450 °C 高温下的磨损量显著增加, 大气和液态钠环境的磨损量分别达到了 $108.3 \times 10^4 \mu\text{m}^3$ 和 $139.1 \times 10^4 \mu\text{m}^3$, 如图 5a 所示。这可能是不同环境下, 2.25Cr-1Mo 钢在前期的剧烈磨损阶段表现出不同性能。图 5b 显示的不同环境下前 10^5 次的磨损率 (450 °C/钠 > 450 °C/大气 > RT/大气 > RT/水) 也证实了这一点。后 10^5 次微动循环后, 不同环境下的磨损

体积都增长缓慢, 磨损率都下降, 如图 5 所示。因为磨损早已进入稳定磨损阶段, 此时磨损率遵从 450 °C/钠 > RT/大气 > 450 °C/大气 > RT/水。说明不同阶段下, 2.25Cr-1Mo 钢在 450 °C 液态钠环境下表现出最差的磨损性能, 在室温水环境下的磨损性能最好。

2.2 不同环境下的微动磨损机理

2.2.1 磨痕表面分析

图 6—7 分别显示了 2.25Cr-1Mo 钢在不同环境下经过 10^5 和 2×10^5 次切向微动磨损循环后磨痕的 SEM 图和元素测试结果。可以发现, 在室温大气环境下, 磨痕表面有较多的分层、剥落和裂纹, 如图 6a 和图 7a 所示。这是因为材料在摩擦力的作用下, 次表层产生疲劳裂纹并最终扩展至表面, 形成材料的分层和剥落^[7,11]。在室温水环境下, 磨痕表面更加光滑, 呈现出大量的犁沟以及少量的裂纹, 如图 6b 和图 7b 所示。这与图 3—4 三维形貌结果一致。磨损与未磨损区域的 EDS 点扫描结果如图 6c 所示。磨损区域点 1

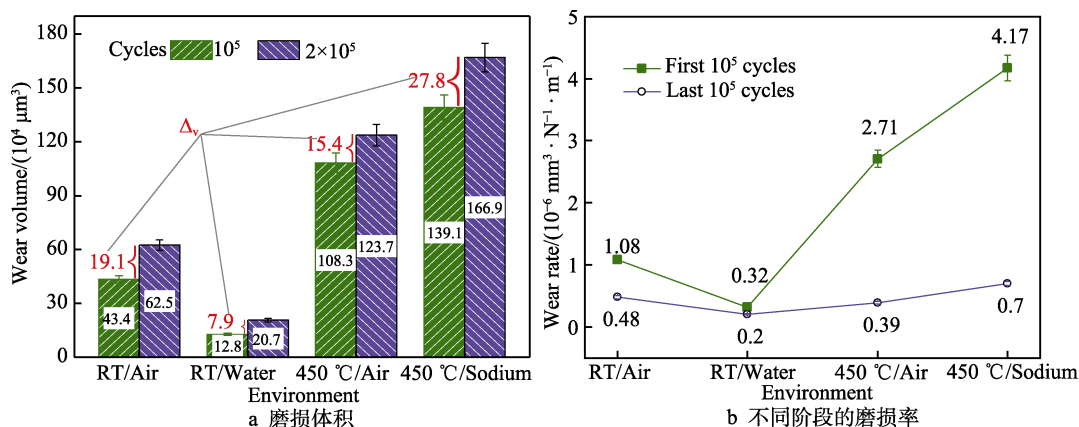


图 5 不同环境下的磨损数据

Fig.5 Wear data in different environments: a) wear volume; b) wear rate at different stages

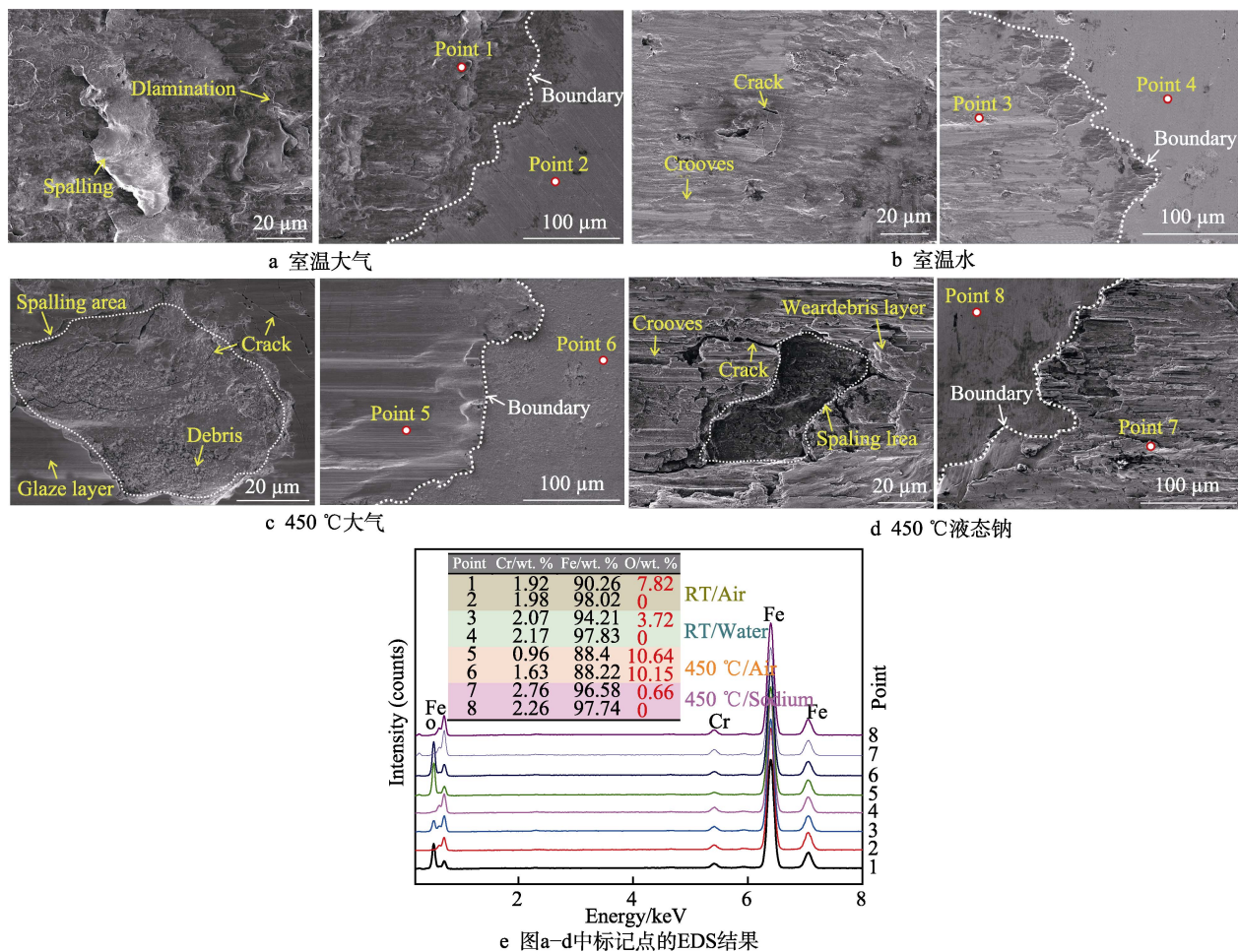
图6 不同环境下磨痕的 SEM 图和 EDS ($N=10^5$)

Fig.6 SEM images and EDS of wear scars in different environments ($N=10^5$): a) RT/air; b) RT/water; c) 450 °C/air; d) 450 °C/liquid sodium; e) EDS result correspond to the points marked in (a-d)

和点3均发现了氧元素的存在,未磨损区域点2和点4的氧含量为零。说明在室温环境下,2.25Cr-1Mo钢在大气和水环境中的摩擦过程都伴随着氧化磨损。图7a—b磨痕的线扫描结果也证实了这一点。因为水环境中的氧含量较小,所以氧化磨损较弱。此外,随着循环次数的增加,磨痕表面的氧含量增加,且磨屑上的氧含量更多,如图7e所示。

在450 °C大气环境下,磨痕表面附着一层光滑的“釉层”^[32],如图6c和图7c所示。这是高温下磨屑研磨、烧结的结果,在一定程度上起到了润滑减摩的作用^[33]。所以,高温大气环境下的磨损率在后 10^5 次循环中较小。图6e中点6的EDS结果显示,高温大气下未磨损区域的材料表面也含有较高的氧含量。图7c中的线扫描结果也显示磨痕区域和未磨损区域的氧含量浓度几乎一致。这可能是在升温过程(磨损开始之前)中材料已经发生了“预氧化”^[34]。随着循环次数的增加,氧化越来越严重,如图6e和图7e中的点5和点6所示。此外,高温下磨痕表面产生更多的裂纹和大面积的剥落坑,大量细小的磨屑颗粒遍布

在剥落坑中,如图6c所示。说明在磨损前期,材料在热影响和机械力的共同作用下更容易发生剥落。所以,高温大气环境下的磨损率在前 10^5 循环中较大。

在450 °C液态钠环境下,磨损表面也存在大量的犁沟和裂纹以及磨屑堆积层,如图6d和图7d所示。液态钠的流动性导致出现类似水环境下的犁沟现象,高温的热影响导致出现类似450 °C大气环境下的磨屑堆积现象。不同的是液态钠环境下的磨屑堆积层更粗糙,裂纹更多,而且没有450 °C大气环境的较小颗粒的磨屑。图6e和图7e的EDS结果显示,磨损表面含有极少的氧元素。图7d的线扫描结果也显示磨损区域与未磨损区域的氧含量几乎一致,说明在液态钠环境中很难发生氧化磨损。一方面是因为钠中的氧含量极低($<10^{-4}$),另一方面是因为钠会将氧化铁还原为金属^[35]。所以,在450 °C液态钠环境下2.25Cr-1Mo钢的磨损表面不会形成可以减摩润滑的“釉层”,取而代之的是磨粒磨损、黏着磨损主导的机械去除。热、力以及钠的特性共同导致2.25Cr-1Mo钢在450 °C液态钠环境下的磨损率最大,如图5b所示。

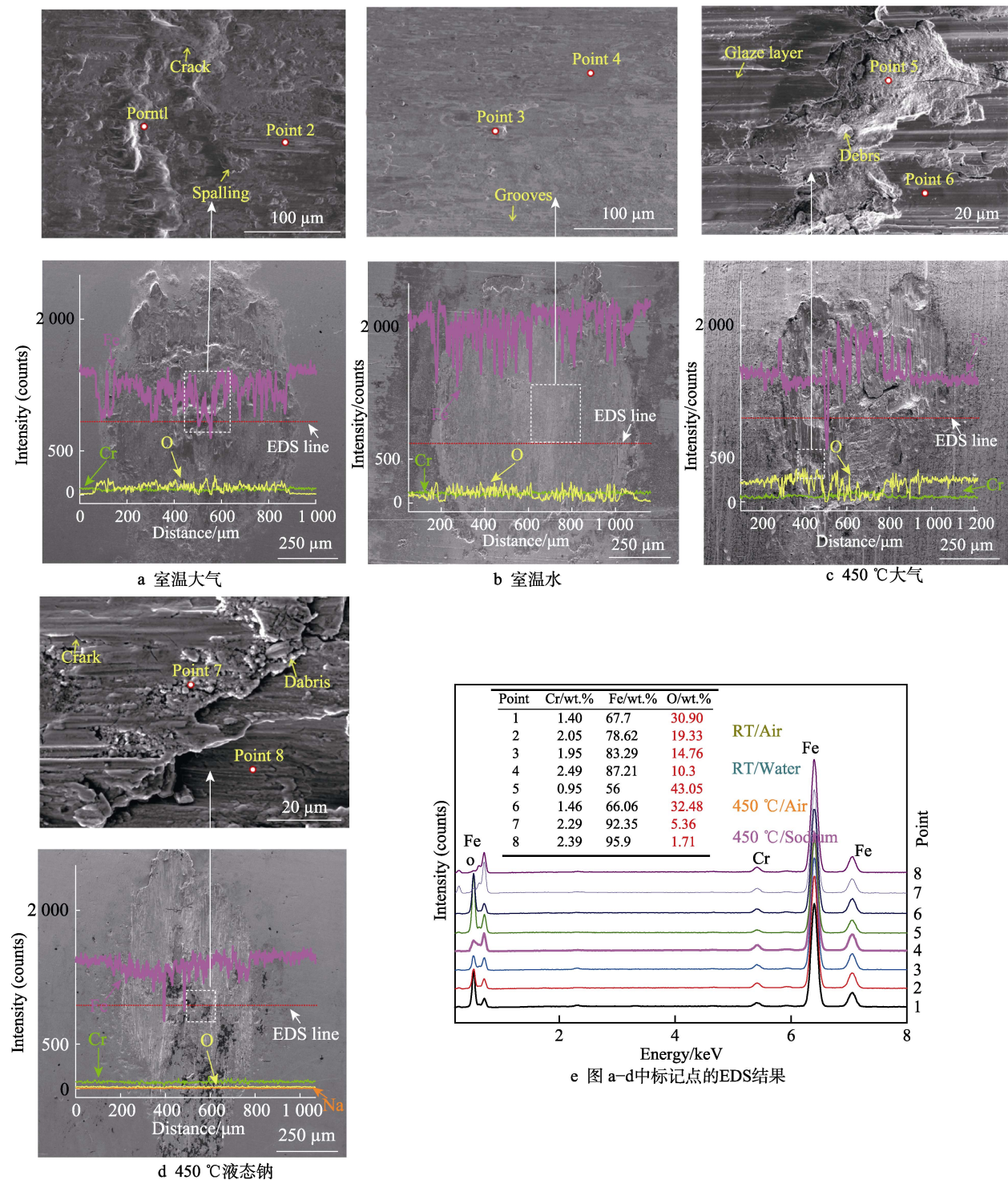


图 7 不同环境下磨痕的 SEM 图、线扫描和 EDS ($N=2\times10^5$)
Fig.7 SEM images, line scans and EDS of wear scars in different environments ($N=2\times10^5$): a) RT/air; b) RT/water; c) 450 °C/air; d) 450 °C/liquid sodium; e) EDS result correspond to the points marked in (a-d)

2.2.2 磨痕截面分析

磨损 2×10^5 次的样品被选择制成截面来进一步探究和验证 2.25Cr-1Mo 钢在不同环境下的磨损机理。图 8 显示了室温大气和水环境下磨痕截面的 SEM 图像和元素分析结果。从磨痕的截面来看,在室温大气环境下发现了分层裂纹、剥落坑以及磨屑堆积层,如图 8a—b 所示。这与图 6a 和图 7a 的表面结果一致。

元素的面扫描结果也显示磨屑堆积层富含氧和铁元素,说明磨屑堆积层主要是铁和氧的化合物,如图 8b 所示。所以,2.25Cr-1Mo 钢在室温大气环境下的磨损机制主要有分层、剥落和氧化磨损。室温水环境下的磨痕的截面如图 8c—e 所示。可以看出,水环境下的截面几乎没有磨屑堆积层,取而代之的是平行于滑动方向的犁沟以及少量的分层裂纹。元素面扫描结果

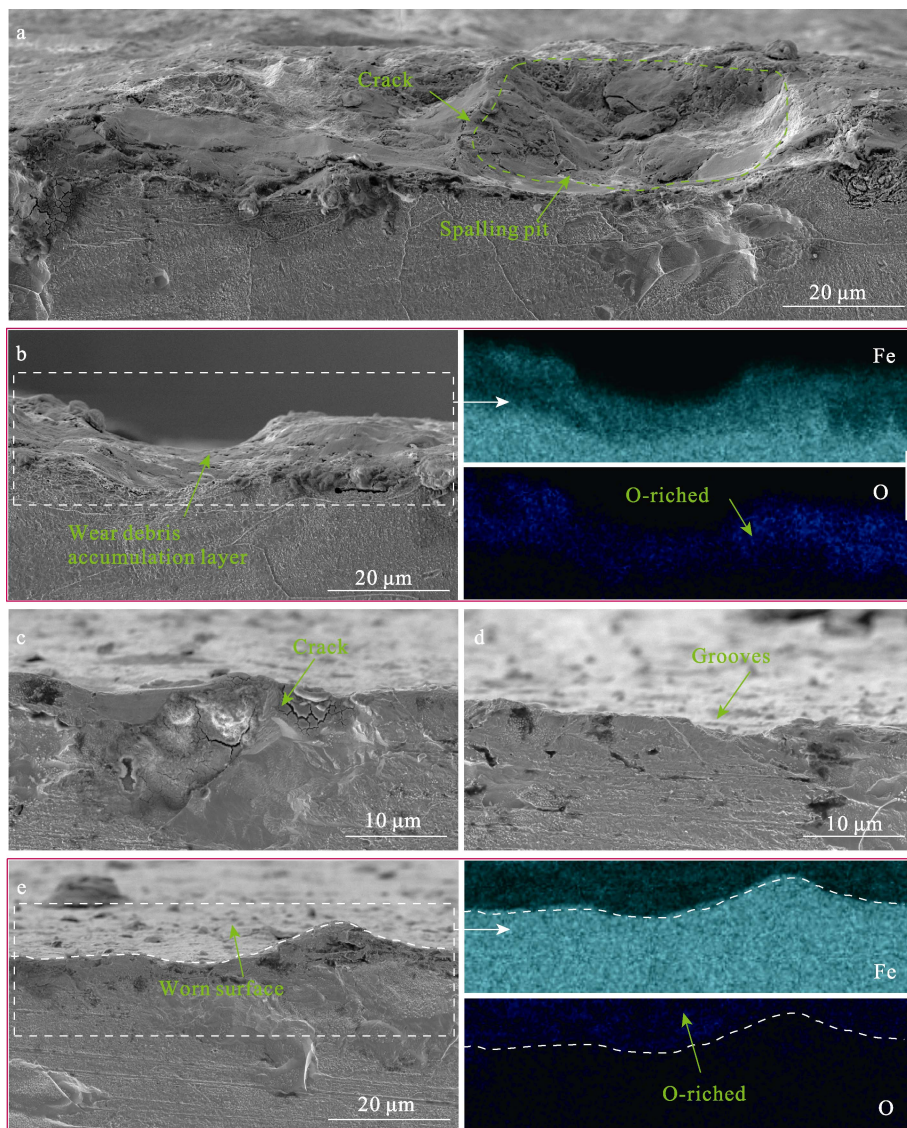


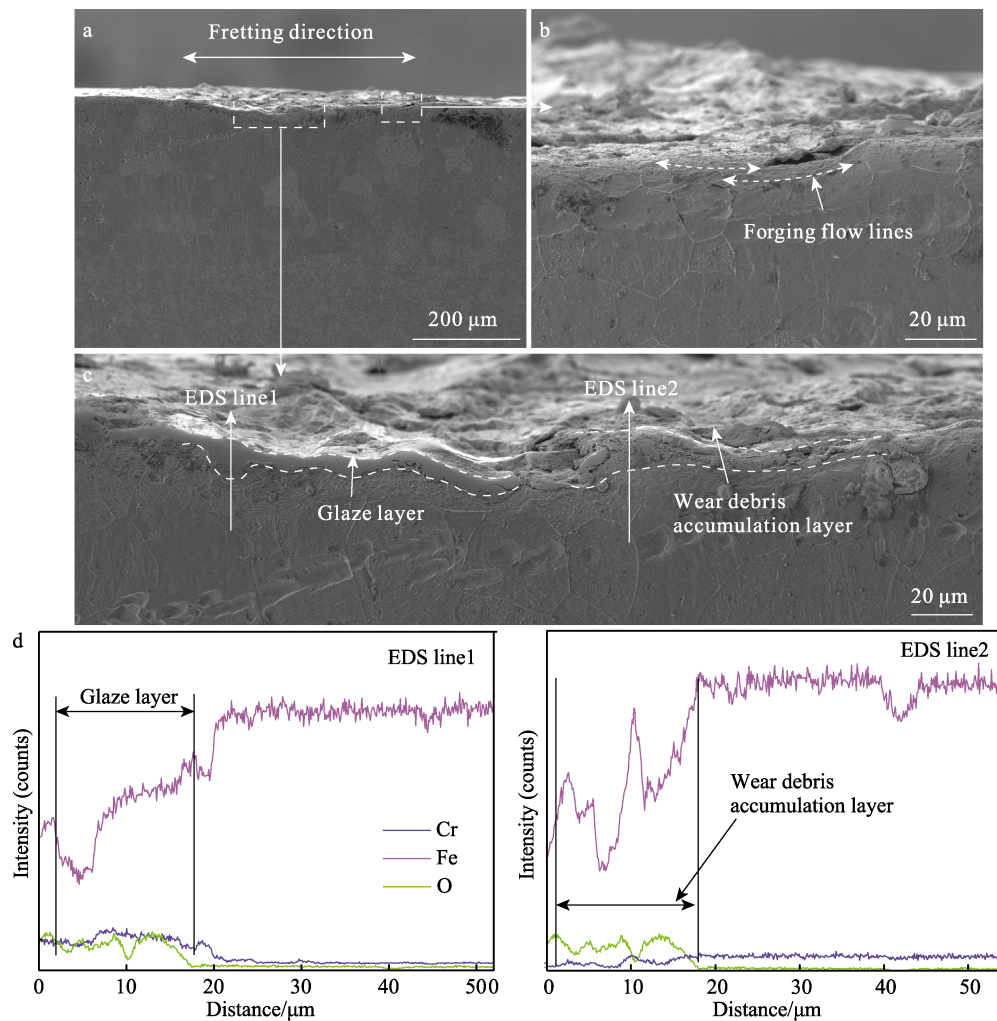
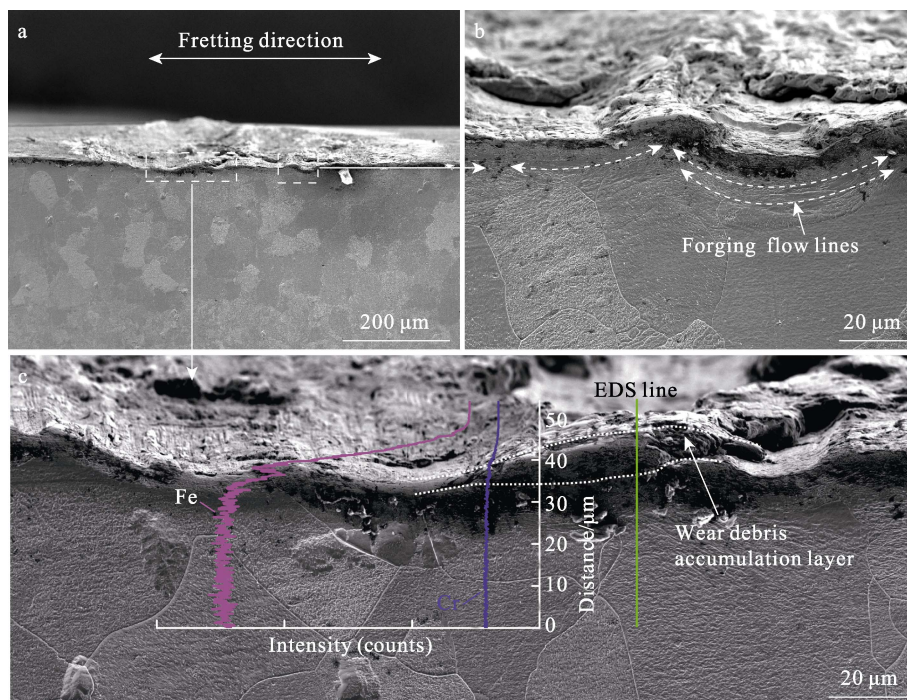
图8 室温下磨痕截面的SEM图和EDS ($N=2 \times 10^5$) (a—b 大气, c—e 水)
Fig.8 SEM image and EDS of wear scar cross-sectional at RT ($N=2 \times 10^5$): a-b) air; c-e) water

也显示氧元素主要集中在磨损的表面,如图8e所示。因此,2.25Cr-1Mo钢在室温水环境下的磨损机制主要为磨粒磨损和氧化磨损。

450℃大气环境下的磨痕截面如图9a所示。磨损的次表面在沿着微动方向有一些材料变形的纹路,也被称为“锻造流线”^[36],如图9b所示。一方面是因为材料在高温下硬度会降低,更容易变形,另一方面是因为法向力的反复挤压作用,材料在次表层逐渐产生这种结构,也有学者称这种结构为摩擦转变层^[37]。此外,450℃大气环境下磨痕截面有一层厚度大约为20 μm的“釉层”和磨屑堆积层,均富含氧元素,如图9c—d所示。这和图6d、图7d的结果一致。因此,2.25Cr-1Mo钢在450℃大气环境下的磨损机制主要为氧化磨损和剥落,伴随着“锻造流线”。

450℃液态钠环境下的磨痕截面如图10a所示。

与450℃大气环境下的磨痕截面相似,磨痕次表面也发现了“锻造流线”,这是高温热效应和机械力共同作用的结果,如图10b所示。不同的是,液态钠环境下的磨痕截面的磨屑堆积层没有氧元素,而是富含基体本身的铁和铬元素,如图10c所示。这与图6e和图7e的结果一致。证实了液态钠环境下几乎不发生氧化磨损。这主要是液态钠对2.25Cr-1Mo钢的腐蚀作用,腐蚀不仅会去除材料表面自带的氧化层,也会一直存在整个磨损过程,阻止材料表面氧化物的形成,加剧磨损。此外,2.25Cr-1Mo钢在液态钠中的自焊性和高温下其硬度的降低共同导致磨损中心的材料更容易黏附在一起,造成磨损中心区域的截面轮廓较高,如图10a、图3b和图4b所示。因此,2.25Cr-1Mo钢在450℃液态钠环境下的磨损机制主要为磨粒磨损、黏着磨损和“锻造流线”,同时伴随着液态钠的腐蚀作用。

图 9 450 °C 大气环境下磨痕截面的 SEM 图和 EDS ($N=2 \times 10^5$)Fig.9 SEM image and EDS of wear scar cross-sectional in air at 450 °C ($N=2 \times 10^5$)图 10 450 °C 液态钠环境下磨痕截面的 SEM 图和 EDS ($N=2 \times 10^5$)Fig.10 SEM image and EDS of wear scar cross-sectional in liquid sodium at 450 °C ($N=2 \times 10^5$)

3 结论

1) 环境对 2.25Cr-1Mo 钢的磨损性能影响很大。前 10^5 次循环中, 磨损率从大到小依次为 450 °C 液态钠>450 °C 大气>室温大气>室温水; 后 10^5 次循环中, 不同环境下的磨损率均下降, 磨损率遵循 450 °C 液态钠>室温大气>450 °C 大气>室温水。

2) 室温大气环境下, 2.25Cr-1Mo 钢的磨损机制为分层、剥落和氧化磨损; 随着温度升高至 450 °C, 磨损机制主要为氧化磨损和剥层, 并伴随着“锻造流线”。2.25Cr-1Mo 钢在室温水环境下的磨损机制为磨粒磨损和氧化磨损。

3) 2.25Cr-1Mo 钢在 450 °C 液态钠环境下的磨损机制为磨粒磨损、黏着磨损和“锻造流线”, 钠的腐蚀协同作用加速了材料的快速磨损。

参考文献:

- [1] SAKAMOTO Y, GARNIER J C, ROUAULT J, et al. Selection of Sodium Coolant for Fast Reactors in the US, France and Japan[J]. Nuclear Engineering and Design, 2013, 254: 194-217.
- [2] 张东辉, 杨洋, 赵佳宁. 中国实验快堆的主要技术创新和工程经验[J]. 原子能科学技术, 2020, 54(S1): 194-198.
ZHANG Dong-hui, YANG Yang, ZHAO Jia-ning. Main Technical Innovation and Engineering Experience of China Experimental Fast Reactor[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2020, 54(S1): 194-198.
- [3] AOTO K, UTO N, SAKAMOTO Y, et al. Design Study and R&D Progress on Japan Sodium-Cooled Fast Reactor [J]. Journal of Nuclear Science and Technology, 2011, 48(4): 463-471.
- [4] 张媛媛, 段天英, 杨建伟. 钠冷快堆蒸汽发生器泄漏探测方法研究[J]. 仪器仪表用户, 2020, 27(10): 48-51.
ZHANG Yuan-yuan, DUAN Tian-ying, YANG Jian-wei. The Study of the Methods of Leak Detection in Steam Generator of the Sodium-Cooled Fast Reactor[J]. Instrumentation, 2020, 27(10): 48-51.
- [5] JEONG J Y, KIM T J, KIM J M, et al. Analysis of Micro-Leak Sodium-Water Reaction Phenomena in a Sodium-Cooled Fast Reactor Steam Generator[J]. Korean Journal of Chemical Engineering, 2009, 26(4): 1004-1008.
- [6] 向阳, 谭超, 陈云龙, 等. 钠冷快堆蒸汽发生器内钠水反应事故的仿真方法[J]. 中国科学技术大学学报, 2020, 50(4): 428-435.
XIANG Yang, TAN Chao, CHEN Yun-long, et al. Simulating Method of Sodium-Water Reaction Accident in Steam Generator of Sodium-Cooled Fast Reactor[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2020, 50(4): 428-435.
- [7] CAI Zhen-bing, LI Zheng-yang, YIN Mei-gui, et al. A Review of Fretting Study on Nuclear Power Equipment [J]. Tribology International, 2020, 144: 106095.
- [8] 胡英俊, 黄小波, 高玉魁. 喷丸处理对铝合金微动磨损及抗腐蚀性能的影响[J]. 表面技术, 2020, 49(7): 238-244, 254.
HU Ying-jun, HUANG Xiao-bo, GAO Yu-kui. Effect of Shot Peening on Fretting Wear and Corrosion Resistance of Zirconium Alloy[J]. Surface Technology, 2020, 49(7): 238-244, 254.
- [9] 刘丽艳, 王一鹏, 朱勇, 等. 蒸汽发生器 U 形管湍流抖振及微动磨损研究[J]. 振动与冲击, 2021, 40(8): 35-40.
LIU Li-yan, WANG Yi-peng, ZHU Yong, et al. A Study on Turbulent Buffeting and Fretting Wear of U-Tube of a Steam Generator[J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40(8): 35-40.
- [10] ZHANG Xiao-yu, LIU Jian-hua, CAI Zhen-bing, et al. Experimental Study of the Fretting Wear Behavior of Incoloy 800 Alloy at High Temperature[J]. Tribology Transactions, 2017, 60(6): 1110-1119.
- [11] LIAO Jia-peng, WU Xin-qiang, TAN Ji-bo, et al. Fretting Corrosion Fatigue of Alloy 690 in High-Temperature Pure Water[J]. Corrosion Science, 2018, 133: 423-431.
- [12] MI Xue, XIE Hai, TANG Pan, et al. Effect of Environmental Condition on the Chemical Behavior of 690 Alloy during Fretting Wear[J]. Tribology International, 2020, 146: 106202.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 潘相相. 钠冷快堆蒸汽发生器主材研究进展[J]. 世界有色金属, 2017(9): 181-183.
PAN Xiang-xiang. Development of Steam Generator Main Materials for Fast Reactor[J]. World Nonferrous Metals, 2017(9): 181-183.
- [16] LIU J, HAO X J, ZHOU L, et al. Measurement of Microstructure Changes in 9Cr-1Mo and 2.25Cr-1Mo Steels Using an Electromagnetic Sensor[J]. Scripta Materialia, 2012, 66(6): 367-370.
- [17] LATELLA B A, HUMPHRIES S R. Young's Modulus of a 2.25Cr-1Mo Steel at Elevated Temperature[J]. Scripta Materialia, 2004, 51(7): 635-639.
- [18] 金卿, 王迎君, 郭太平. 2.25Cr-1Mo-0.25V 钢制加氢反应器用埋弧焊焊材试验研究[J]. 中国重型装备, 2022(1): 23-27.
JIN Qing, WANG Ying-jun, GUO Tai-ping. Test and Research on Submerged Arc Welding Material of 2.25Cr-

- 1Mo-0.25V Steel Hydrogenation Reactor[J]. China Heavy Equipment, 2022(1): 23-27.
- [19] CALLAGHAN M D, HUMPHRIES S R, LAW M, et al. Energy-Based Approach for the Evaluation of Low Cycle Fatigue Behaviour of 2.25Cr-1Mo Steel at Elevated Temperature[J]. Materials Science and Engineering: A, 2010, 527(21-22): 5619-5623.
- [20] 李晨光, 包汉生, 李莉, 等. 核能用 2.25Cr-1Mo 钢水蒸气氧化行为[J]. 钢铁, 2021, 56(1): 91-96, 112.
LI Chen-guang, BAO Han-sheng, LI Li, et al. Steam Oxidation Behavior of 2.25Cr-1Mo Steel for Nuclear Power[J]. Iron & Steel, 2021, 56(1): 91-96, 112.
- [21] 张伟, 李晨光, 白银, 等. 温度对 2.25Cr-1Mo 钢抗蒸汽氧化性能的影响[J]. 锅炉技术, 2021, 52(5): 44-50, 78.
ZHANG Wei, LI Chen-guang, BAI Yin, et al. Effect of Temperature on Steam Oxidation Resistance of 2.25Cr-1Mo Steel for Nuclear Power Plants[J]. Boiler Technology, 2021, 52(5): 44-50, 78.
- [22] PATTNAIK A B. Erosive Wear Analysis of Normalised and Thermally Aged 2.25Cr-1Mo Steel Using Taguchi Experimental Design[J]. Indian Journal of Engineering and Materials Sciences, 2014, 21(4): 379-386.
- [23] YU Yan-qing, CHEN Xu-dong, YANG Ling-yun, et al. Investigation on Fretting Wear Behavior of 2.25Cr-1Mo Tube in Water at Various Temperatures[J]. Wear, 2021, 476: 203727.
- [24] CHEN Xu-dong, WANG Li-wen, YANG Ling-yun, et al. Effects of Temperature on the Fretting Wear Behavior of 2.25Cr-1Mo Tubes Against Gr5C12 Rods[J]. Materials (Basel, Switzerland), 2020, 13(15): 3388.
- [25] CHEN Xu-dong, WANG Li-wen, YANG Ling-yun, et al. Investigation on the Impact Wear Behavior of 2.25Cr-1Mo Steel at Elevated Temperature[J]. Wear, 2021, 476: 203740.
- [26] CHEN Xu-dong, FENG Shuo, WANG Li-wen, et al. Effect of QPQ on the Fretting Wear Behavior of TP316H Steel at Varying Temperatures in Liquid Sodium[J]. Journal of Nuclear Materials, 2022, 562: 153583.
- [27] GUO Xiang-long, LAI Ping, TANG Li-chen, et al. Effects of Sliding Amplitude and Normal Load on the Fretting Wear Behavior of Alloy 690 Tube Exposed to High Temperature Water[J]. Tribology International, 2017, 116: 155-163.
- [28] MING Hong-liang, LIU Xing-chen, ZHANG Zhi-ming, et al. Effect of Normal Force on the Fretting Wear Behavior of Inconel 690 TT Against 304 Stainless Steel in Simulated Secondary Water of Pressurized Water Reactor[J]. Tribology International, 2018, 126: 133-143.
- [29] YOKOTA N, SHIMOYASHIKI S. Investigation of Self-Welding Rate of Structural Materials in Liquid Sodium[J]. Nuclear Technology, 1988, 81(3): 407-414.
- [30] CHUN E J, LEE Su-jin, SUH J, et al. Influence of Metallic Sodium on Repair Weldability for Type 316FR Stainless Steel[J]. Journal of Welding and Joining, 2017, 35(1): 79-88.
- [31] 李玲, 麻诗韵, 阮晓光, 等. 加载相位差对微动磨损影响的数值模拟研究[J]. 表面技术, 2018, 47(9): 93-100.
LI Ling, MA Shi-yun, RUAN Xiao-guang, et al. Numerical Simulation of the Effect of Loading Phase Difference on Fretting Wear[J]. Surface Technology, 2018, 47(9): 93-100.
- [32] VIAT A, DE BARROS BOUCHET M I, VACHER B, et al. Nanocrystalline Glaze Layer in Ceramic-Metallic Interface under Fretting Wear[J]. Surface and Coatings Technology, 2016, 308: 307-315.
- [33] KIRK A M, SUN W, BENNETT C J, et al. Interaction of Displacement Amplitude and Frequency Effects in Fretting Wear of a High Strength Steel: Impact on Debris Bed Formation and Subsurface Damage[J]. Wear, 2021, 482-483: 203981.
- [34] MESSAADI M, KAPSA P. Wear Behavior of High Chromium Sintered Steel under Dynamic Impact-Sliding: Effect of Temperature[J]. Tribology International, 2016, 100: 380-387.
- [35] BARKER M G, WOOD D J. The Corrosion of Chromium, Iron, and Stainless Steel in Liquid Sodium[J]. Journal of the Less Common Metals, 1974, 35(2): 315-323.
- [36] YU Zhong-di, CHEN Ming-hui, LI Feng-jie, et al. Synergistic Effect of Corrosion and Wear of the 316 Stainless Steel in Molten Zinc Alloy at 460 °C[J]. Corrosion Science, 2020, 165: 108411.
- [37] 沈明学, 刘鹏, 周琰, 等. 轮轨界面摩擦学转变结构层特性及其研究进展[J]. 摩擦学学报, 2021, 41(5): 773-788.
SHEN Ming-xue, LIU Peng, ZHOU Yan, et al. Characteristics of Tribological Transition Layers at Wheel-Rail Interface and Its Research Progress[J]. Tribology, 2021, 41(5): 773-788.

责任编辑: 万长清