

316L 不锈钢在 Saline 溶液中的微动磨蚀行为研究*

阎建中, 吴荫顺, 李久青, 张琳
(北京科技大学 材料科学与工程学院, 北京 100083)

摘要: 采用球-平面接触微动磨损试验设备考察了轧制固溶 316L 不锈钢在 Saline 溶液中的微动磨蚀行为。研究表明, 316L 不锈钢的微动过程存在显著的阶段性: 微动初期为磨合期; 第一稳定阶段摩擦副处于高摩擦应力状态, 伴随着不锈钢表面缝隙腐蚀与弹塑性损伤的积累; 第二过渡阶段和第二稳定阶段不锈钢表面呈微断裂剥层特征, 腐蚀引起的微断裂不可忽视。不锈钢微动损伤表面形貌同微动损伤速率之间存在对应关系。

关键词: 316L 不锈钢; 微动磨蚀; Saline 溶液

中图分类号: TG113.2

文章标识码: A

文章编号: 1004-0595(2000)04-0244-04

微动是常见的一种材料损伤形式, 并且具有很强的破坏性^[1]。人们对材料微动损伤行为已进行了较为广泛的研究^[2-4]。微动是同时涉及粘着、磨料、腐蚀及疲劳的特殊损伤形式^[5], 且随微动过程的进行微动磨损特性常常发生改变, 并与材料微动损伤机制存在某种对应关系^[6,7]。因此考察微动随时间的变化对揭示材料损伤机制有重要意义。本文作者采用球-平面接触微动试验设备, 考察轧制固溶 316L 不锈钢在 Saline (0.9% NaCl) 溶液中的微动磨蚀行为及其在不同损伤阶段的损伤机理。

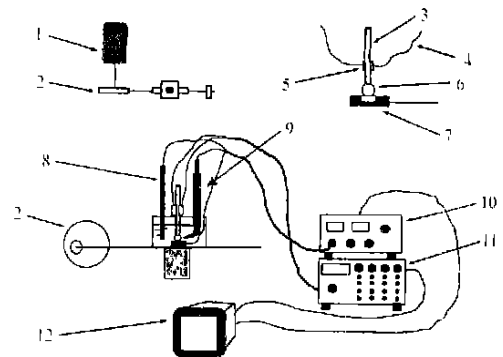
1 试验部分

试验材料为轧制固溶 316L 不锈钢, 经 1050 保温 2 h 后水淬, 其组成为: 12.45% Ni, 17.61% Cr, 2.29% Mo, 0.021% C, 1.05% Mn, 0.69% Si, 0.031% P, 余量为 S 和 Fe (质量分数)。

将轧制固溶 316L 不锈钢制成 $\phi 10$ mm 的试盘, 试盘的侧面和背面涂敷环氧树脂加以密封, 背部焊接导线。试盘的暴露表面经粒度 $2.5 \mu\text{m}$ 的金刚石研磨膏机械抛光, 试验前在丙酮溶液中用超声波清洗, 暴露面积为 0.785 cm^2 。偶件为 $\phi 6$ mm 的 Si_3N_4 陶瓷球, 其性能参数为: 密度 3.18 g/cm^3 , 硬度 1500 HV , 弹性模量 300 GPa , 断裂韧性 8 MPa 。

微动试验装置如图 1 所示。该装置由无级调速电机驱动, 通过偏心轮调整微动振幅, 通过加载杆对试样加载, 加载杆上安装应变片, 通过微动测试系统 (应

变片-电阻应变仪-微机) 测定摩系数。试验条件为室



1. Adjustable motor, 2. Modifiable eccentric wheel,
3. Loading rod, 4. Leads, 5. Resistance strain pieces,
6. Ceramic ball, 7. Stainless steel disc as working electrode,
8. Carbon bar as auxiliary electrode,
9. Reference electrode (saturated calomel electrode+ Luggin probe),
10. CR-3 corrosion measurement apparatus,
11. Strain gauge, 12. PC monitor

Fig 1 Schematic drawing of test apparatus for fretting corrosion

图 1 微动试验装置示意图

1. 调速电机, 2. 可调偏心轮, 3. 加载杆, 4. 导线,
5. 电阻应变片, 6. 陶瓷球, 7. 不锈钢圈片 (工作电极),
8. 碳棒 (辅助电极), 9. 参比电极 (饱和甘汞电极+ 鲁金毛细管),
10. CR-3 型腐蚀测试仪, 11. 应变仪, 12. 监视器

温, 频率 8 Hz , 振幅 $120 \mu\text{m}$, 法向载荷 15 N ; 采用浓度为 0.9% 的 NaCl 溶液 (Saline 溶液, $\text{pH} = 7.0$) 作为微动腐蚀介质; 微动测试采样频率 160 Hz , 采样间隔

* 高等学校博士点基金资助项目 (97000812).

1999-11-15 收到初稿, 1999-12-24 收到修改稿/本文通讯联系人阎建中

阎建中 男, 29 岁, 博士研究生, 目前从事金属人体植入材料的力学与化学损伤研究

0.2 h.

粘滞与滑移混合状态[见图 3(c 和 d)]

2 结果与讨论

2.1 摩擦系数随微动循环周次的变化

对每个采样点取摩擦系数的最大值对微动循环周次作图, 结果如图 2 所示. 从图 2 可以看出, 微动过

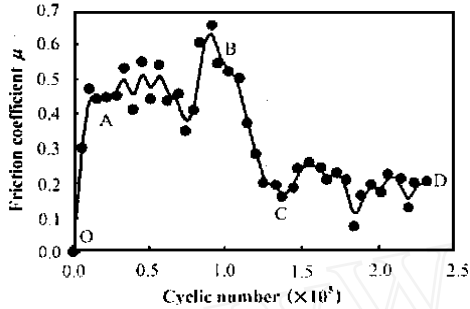


Fig 2 Variation in friction coefficient with fretting cycle

图 2 摩擦系数随微动循环周次的变化关系

程可分为 4 个阶段: 第一过渡阶段(OA)、第一稳定阶段(AB)、第二过渡阶段(BC) 以及第二稳定阶段(CD). 第一过渡阶段持续约 1.2×10^4 循环周次, 摩擦系数随循环周次增大而迅速上升; 第一稳定阶段的最大摩擦系数在 0.40~0.65 范围内波动, 这一阶段持续约 8×10^4 循环周次; 在第二过渡阶段摩擦系数迅速下降至 0.2 左右; 之后进入第二稳定阶段. 图 2 从宏观上反映了不同微动阶段摩擦副的摩擦应力状态的相对大小, 但尚不能反映不同微动阶段微动循环过程中材料应力应变的变化特性. 研究表明^[8~11], 在微动循环过程中的摩擦应力-微动振幅的变化特征与材料的微动损伤特性之间存在对应关系. 在固定振幅下, 单元微动循环过程中微动摩擦应力随微动时间的变化特征能为揭示材料的微动损伤机制提供较详细的信息^[9].

图 3 为在 4 个微动阶段的单元循环过程中摩擦系数随时间的变化情况, 图中数据为 5 次平行测试结果经快速傅立叶变换处理后的平均值. 可见在不同的阶段摩擦系数的变化有明显区别. 研究表明^[12], 在弹性滑移范围内, 接触表面处于粘滞状态, 摩擦力的变化与交变应力的变化同相; 在宏观滑移范围内接触表面处于粘滑运动状态, 摩擦力的变化与交变应力的变化不同步. 在微动过程中的第一过渡阶段, 316L 不锈钢的接触表面处于粘滞与粘滑混合状态[见图 3(a)]; 在第一稳定阶段微动摩擦副之间发生轻微的滑移, 但接触状态以粘滞为主[见图 3(b)]; 在第二过渡阶段和

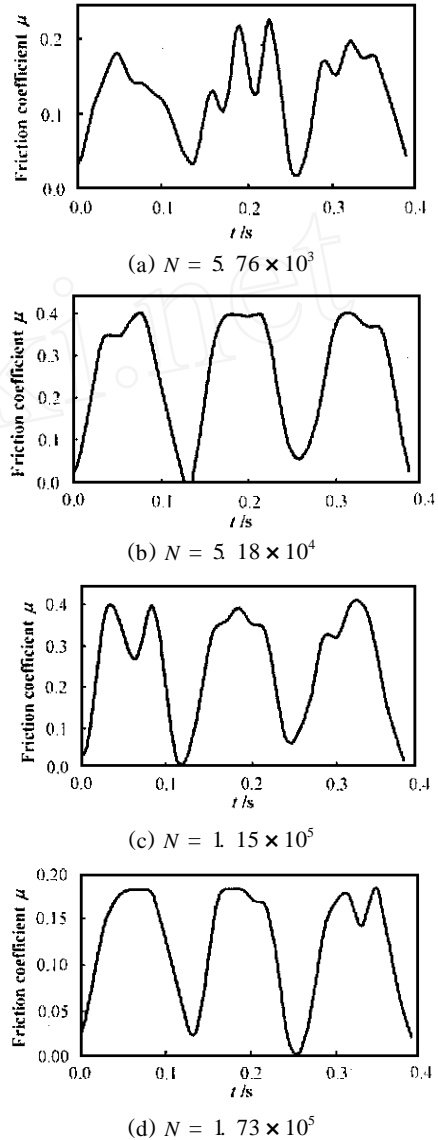


Fig 3 Variation in friction coefficient with fretting cycle in different fretting periods

图 3 不同微动阶段摩擦系数随微动循环周次变化的关系曲线

2.2 微动损伤速率

用单位微动行程内材料的平均质量损失来表示微动损伤速率, 其表达式如下:

$$K = \frac{G}{2SN} \quad (1)$$

式中: G 为微动 T_2 时刻与微动 T_1 时刻材料的质量损失之差; S 为微动振幅; N 为 $T_1 \sim T_2$ 时间段内的微动循环周次; K 为 $T_1 \sim T_2$ 时间段内材料的平均损伤速率

图 4 示出了材料微动损伤速率随微动时间变化

可以看出,材料微动损伤速率表现出较大差异:在OA段即微动初期,微动损伤速率急剧上升;在AB段,材料的微动损伤速率先有所降低,然后随微动循环周次

段:第一过渡期为跑合期和轻微损伤阶段;第一稳定

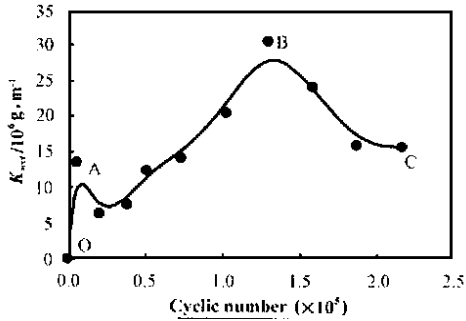


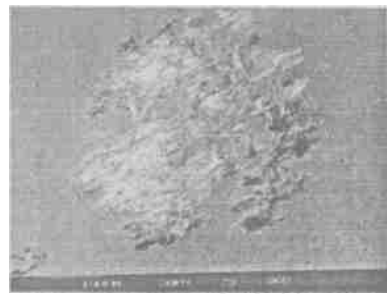
Fig 4 Evolution of fretting damage rate as a function of fretting cycle

图 4 微动损伤速率随微动循环周次的变化

的增大而快速升高,表明随微动过程的进行发生微动损伤积累,并造成损伤机制发生转变;在BC段,材料的微动损伤速率逐渐下降并最终到达平缓变化状态

2.3 微动损伤机理

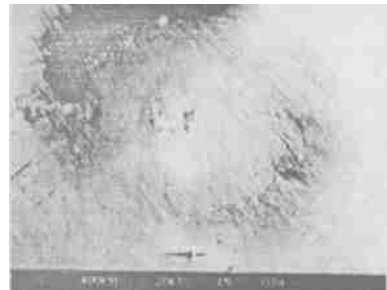
虽然难以建立微动过程中摩擦系数与损伤速率间的严格对应关系,但两者的测定结果都表明,在不同的微动阶段材料的微动损伤机制有所不同。摩擦系数及损伤速率随循环周次的变化反映了微动过程对时间参数的依赖性。图 5 所示的材料微动损伤表面形貌 SEM 照片揭示了 316L 不锈钢在不同微动阶段的损伤机制。可以看出,在微动早期 316L 不锈钢表面呈轻微损伤迹象[图 5(a)],同时,机械损伤作用破坏了材料表面的氧化膜,氧化膜破碎形成的硬质磨屑作为磨粒可导致材料的微切削损伤,从而在 316L 不锈钢磨损表面形成犁沟损伤形貌[见 5(b)]。随着微动过程的继续进行,316L 不锈钢表面发生严重的缝隙腐蚀[如图 5(c)所示],微动腐蚀产物在外逸过程中遇氧水解,并在微动区外一定距离处形成碱性氢氧化物沉积。此时,微动接触区中的 316L 不锈钢表面发生严重的弹性变形,微动摩擦副处于粘着状态,而碱性氢氧化物沉积处则可见明显的擦伤与轻微剥蚀损伤。在微动后期,金属材料表面处于活化状态,微动区域溶液的腐蚀性强,微动损伤呈现因微动腐蚀疲劳所致的微断裂及微剥层特征。如图 5(d 和 e)所示,可见材料表面由于剥落所形成的坑洼形貌,与微动方向相垂直的微断裂裂纹以及因材料处于活化状态且硬度较低而形成的犁沟形貌。



(a) 1.0×10^4 cycle



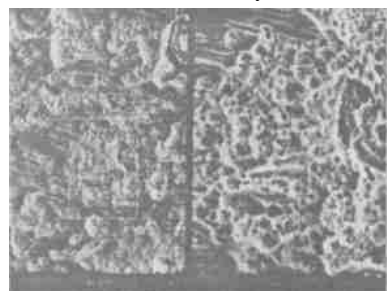
(b) Local magnification of (a)



(c) 5×10^4 cycle



(d) 1.0×10^5 cycle



(e) 2.0×10^5 cycle

Fig 5 Typical fretted topographies of 316L stainless steel at different fretting stages

图 5 不同微动阶段 316L 不锈钢微动损伤表面形貌 SEM 照片

3 结论

a 316L 不锈钢微动损伤过程可分为 4 个阶



期为粘着损伤阶段; 第二过渡期和第二稳定期为微动腐蚀疲劳断裂及剥落损伤阶段

b 微动初期材料表面氧化膜破裂形成硬质磨屑, 磨屑在微动表面的微切削作用使得微动损伤速率迅速增大, 而其他阶段微动损伤速率变化则受材料表面弹塑性变形与缝隙腐蚀损伤积累的共同影响, 并在一定的微动循环周次后达到平缓变化状态

参考文献:

- [1] Waterhouse R B. Fretting Corrosion[M]. New York: Pergamon Press, 1972
- [2] 徐桂珍, 刘家浚, 周仲荣. 表面改性技术在微动摩擦学领域中的应用[J]. 摩擦学学报, 1998, 18 (2): 185~ 190
- [3] 阎逢元, 薛群基. 聚全氟乙烯的微动磨损[J]. 摩擦学学报, 1998, 18(3): 198~ 203
- [4] 戴振东, 王珉, 杨生荣, 等. 面扫描激光淬火对钛合金微动磨损性能的影响[J]. 摩擦学学报, 1999, 19 (2): 107~ 111.
- [5] 李诗卓, 董祥林. 材料的冲蚀磨损与微动磨损[M]. 北京: 机械工业出版社, 1987.
- [6] Wit E D, Blanpain B, Froyen L, *et al*. The tribochanical behaviour of TN-coatings during fretting wear [J]. Wear, 1998, 217: 215~ 224
- [7] Baets P D, Strijckmans K, Peteghem A P. Characterization of the fretting wear of unlubricated steel surfaces based on the comparison of wear results obtained by different methods[J]. Wear, 1997, 208: 169~ 176
- [8] Vingsbo O, Soderberg S. On fretting maps[J]. Wear, 1988, 126: 131~ 147.
- [9] Vingsbo O, Od Falk M, Shen N E. Fretting maps and fretting behavior of some F. C. C. metal alloys[J]. Wear, 1990, 138: 153~ 167.
- [10] Zhou Z R, Fayeulle S, Vincent L. Cracking behaviour of various aluminium alloys during fretting wear [J]. Wear, 1992, 155: 317~ 330
- [11] Zhou Z R, Vincent L. Mixed fretting regime[J]. Wear, 1995, 181-183: 531~ 536
- [12] 匡震邦, 顾海澄, 李中华. 材料的力学行为[M]. 北京: 高等教育出版社, 1998

Study on the Fretting Corrosion-wear Behavior of 316L Stainless Steel in Saline Solution

YAN Jian-zhong, WU Yin-shun, LI Jiu-qing, ZHANG L in

(School of Materials Science and Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: The fretting corrosion-wear behavior and mechanism of 316L stainless steel in saline solution have been investigated with a fretting test rig in a ball-on-disc contact configuration. The worn surface morphologies and corrosion-wear mechanisms have been examined by means of scanning electron microscopy. As the results, the fretting process can be divided into four stages. Namely, stage 1 refers to the initial or running-in stage where the worn steel surface is characteristic of slight wear, though the wear rate rises considerably with increase of fretting cycle in this stage. Stage 2 refers to the first steady stage where the fretted surface of the stainless steel shows signs of severe plastic and elastic deformation, and a high friction coefficient is recorded. The signs of crevice corrosion are also observed in the first steady stage, due to the mechanical damage and closed fretted area. With the increase in the fretting cycle, both the mechanical damage and crevice corrosion effects accumulate. Then it comes to stages 3 and 4, the second transitional and steady stages where the fretting damage is largely attributed to micro crack and corrosion fatigue. Moreover, there exists some correlation among the friction coefficient variation and the fretting damage rate and fretting mechanisms.

Key words: fretting corrosion-wear; 316L stainless steel; saline solution