

## 动态与静态纯腐蚀对定量研究材料 冲刷腐蚀交互作用的影响\*

张安峰 邢建东 鲍崇高 贾焕如

(西安交通大学机械工程学院, 西安 710049)

**摘 要** 分别测定了不锈钢和碳钢静态与动态纯腐蚀失重率、冲刷腐蚀失重率及其电化学行为, 研究了静态与动态纯腐蚀失重率对材料冲刷腐蚀交互作用失重率的影响. 实验表明: (1) 动态纯腐蚀比静态纯腐蚀更能反映材料在液固两相流中冲刷腐蚀交互作用的本质; (2) 本实验条件下, T8 钢动态纯腐蚀失重率是静态纯腐蚀失重率的 2 倍以上, 18-8 不锈钢动态纯腐蚀失重率是静态纯腐蚀失重率 200 倍以上, 静态交互作用失重率是动态交互作用失重率的 2 倍以上. 可见静态与动态纯腐蚀对定量研究材料冲刷腐蚀交互作用会产生很大的差异; (3) 在腐蚀性浆料中, 首先要保证材料具有一定的耐蚀性, 其次再考虑提高材料的硬度和耐磨性. 这样才能有效地提高材料的耐冲刷腐蚀性能. 对不同的工况, 必须同时兼顾材料的耐蚀性和耐磨性.

**关键词** 纯腐蚀, 冲刷腐蚀, 交互作用, 失重率

中图分类号 TG171

文献标识码 A

文章编号 0412-1961(2002)05-0521-04

## THE EFFECT OF DYNAMIC AND STATIC PURE CORROSION ON QUANTITATIVELY STUDYING THE INTERACTION BETWEEN EROSION AND CORROSION OF MATERIALS

ZHANG Anfeng, XING Jiandong, BAO Chonggao, JIA Huanru

School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049

Correspondent: ZHANG Anfeng, associate professor, Tel: (029)2668557, E-mail: zhangaf@xjtu.edu.cn

Supported by the Scientific Research Foundation of Xi'an Jiaotong University (No.01E0103)

Manuscript received 2001-08-21, in revised form 2001-11-05

**ABSTRACT** The dynamic and static pure corrosion weight loss rates and electrochemical behaviors of stainless steel and carbon steel were determined separately. The effects of dynamic and static pure corrosion on the interaction between erosion and corrosion weight loss rate of material were studied. The experiment results are as follows: (1) Dynamic pure corrosion comparing with static pure corrosion can truthfully reflect the essence of the interaction between erosion and corrosion of materials in dual-phase fluid; (2) Under this test condition, the dynamic pure corrosion weight loss rate is over two times higher than the static one, so that the interaction weight loss rate calculated by the static pure corrosion is two times higher than that by the dynamic pure corrosion; (3) For material in acidic slurry the first important point is to ensure the corrosion resistance, and then to increase the hardness and wear resistance so as to increase the erosion-corrosion resistance effectively.

**KEY WORDS** pure corrosion, erosion-corrosion, interaction, weight loss rate

冲刷腐蚀磨损极其普遍地存在于石油、化工、矿山、冶金、水利、电厂等行业中. 金属机械和设备经常与腐蚀性介质(如酸、碱、盐等)接触, 比如, 各种泵、阀、搅拌叶片等; 各类输送管道、料浆、泥浆的过流部件; 海上

设施及采矿设备等, 经常承受严重的液固两相流或多相流的冲刷腐蚀磨损, 导致部件失效或设备报废. 冲刷腐蚀不但耗尽了极为宝贵的和有限的资源, 而且还浪费了大量的能源. 冲刷腐蚀是金属表面与腐蚀流体之间由于高速相对运动而引起的金属损坏现象<sup>[1]</sup>, 是材料受冲刷和腐蚀交互作用的结果. Zelders<sup>[2]</sup>于 1949 年首次提出腐蚀与磨损的交互作用, 指出: 腐蚀磨损造成的材料流失量绝不是单纯腐蚀及干磨损失重之和, 它们之间的交互作用, 即腐蚀加速磨损, 磨损又促进腐蚀, 极大地加速了材料的破坏.

\* 西安交通大学科学研究基金项目 01E0103 资助

收到初稿日期: 2001-08-21, 收到修改稿日期: 2001-11-05

作者简介: 张安峰, 男, 1956 年生, 副教授, 博士

Weiser 等人<sup>[3]</sup>用 CF-8 耐蚀铸铁在硫酸砂浆与单独硫酸腐蚀和单独湿磨料磨损条件下进行对比实验,表明材料的冲刷腐蚀速度是纯腐蚀和纯冲刷磨损速度之和的 9—35 倍。Kim 等人<sup>[4]</sup>用电化学方法研究了材料在腐蚀磨损条件下的腐蚀行为,发现磨料的机械作用使腐蚀速度增加了 2—4 个数量级。由此可见冲刷腐蚀交互作用是研究其机理的关键所在,引起了国内外学者的高度重视,从不同侧面进行了大量的研究<sup>[5-9]</sup>,概述起来可分成两大类:第一类是冲刷腐蚀工况为主要过程,研究冲刷与腐蚀的交互作用;第二类是腐蚀磨损工况为主要过程,研究腐蚀与磨损的交互作用。现以冲刷腐蚀为例,材料的冲刷腐蚀总失重率  $W_t$  等于纯冲刷失重率  $W_e$ 、纯腐蚀失重率  $W_c$  和冲刷腐蚀交互作用失重率  $\Delta W_{ec}$  三者之和(即:  $W_t = W_e + W_c + \Delta W_{ec}$ )。因不同学者对上述各项理解上的差异和测试方法的不同,使实验所得各项失重率和交互作用失重率有较大差异,实验数据缺乏可比性。目前主要有两种测试方法:第一种为不带电化学测试系统的冲刷腐蚀实验机,用静态纯腐蚀失重率代表  $W_c$ 、用含固量相同的非腐蚀流体(一般为自来水+固相颗粒)的纯冲刷失重率代表  $W_e$ ,然后测出材料冲刷腐蚀总失重率  $W_t$ ,交互作用失重率  $\Delta W_{ec}$  为总失重率  $W_t$  与  $W_e$  和  $W_c$  的差值。此法虽具有工程直观性,但不能反映交互作用的本质。第二种为带电化学测试系统的冲刷腐蚀实验机,采用阴极保护(浆料不变)下的纯冲刷失重率代表  $W_e$ ,在无磨料的腐蚀介质中动态(转速不变)纯腐蚀失重率代表  $W_c$ ,然后测出材料冲刷腐蚀总失重率  $W_t$ ,由上述实验数据计算出交互作用失重率  $\Delta W_{ec}$ 。此法更能反映交互作用的本质。为了探讨不同测试方法对冲刷腐蚀交互作用的影响,本文依第二种测试方法为基础,不改变  $W_t$ 、 $W_e$  的测试方法,实验条件完全相同的前提下,只改变纯腐蚀项  $W_c$  的实验方法,探讨不同测试方法对材料冲刷腐蚀交互作用的影响;然后用电化学测试方法分别测定动态、静态纯腐蚀和冲刷腐蚀的电化学行为,分析这两种不同的测试方法(静态和动态)哪一个更能反应材料冲刷腐蚀交互作用失重率的本质,这对于正确分析和科学评价材料冲刷腐蚀交互作用失重率、研制新型耐冲刷腐蚀合金具有非常重要的现实意义。

## 1 实验方法

### 1.1 实验材料

选用两种材料作为实验材料,一种为耐蚀不耐磨的

1Cr18Ni9Ti 不锈钢(用 18-8 表示);另一种为相对耐磨不耐蚀的 T8 钢,其化学成分及硬度如表 1 所示。加工成直径为 14 mm 长为 14 mm 冲刷腐蚀试样。磨料为 75 目(粒度为 215—315  $\mu\text{m}$ )的石英砂,硬度为 HV1120。

### 1.2 实验条件

实验在 CF-2000 型冲刷腐蚀实验机上进行,该试验机示意图如图 1 所示。主要由 5 大系统组成:液固两相流冲刷腐蚀摩擦学系统;机械传动系统;电化学测试系统;温度控制系统和试样装夹系统。电化学测试系统的三电极中,试样电极由铜柱、弹簧、导线、铜套和碳刷引出;参比电极由 6 个均布的 Luggin 毛细管盐桥引出;辅助电极由 6 个均布的铂电极引出。试样盘一次可装 4 个平行试样,试样镶嵌在聚四氟乙烯圆盘的边缘上,并可测试试样的电化学行为。将三电极接到 PS-168 型电化学微机控制测试系统上,实现对试样动态电化学的自动测试、采集和处理。

动态实验条件:实验温度为 20  $^{\circ}\text{C}$ ;冲蚀时间为 2 h;浆料为 5% $\text{H}_2\text{SO}_4$ +15%75 目石英砂;冲蚀角为 0  $^{\circ}$ ;相对线速度为 5 m/s;主轴转速为 530 r/min;溶剂为蒸馏水;平行试样为 4 个。静态实验条件:温度为 20  $^{\circ}\text{C}$ ;腐

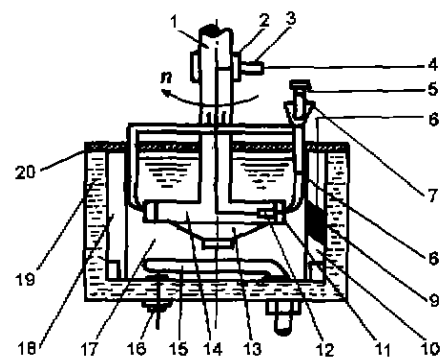


图 1 CF-2000 型冲刷腐蚀试验机示意图

Fig.1 Schematic diagram of CF-2000 erosion-corrosion tester

1. Main shaft, 2. Copper ring, 3. Carbon brush,
4. Working electrode, 5. Reference electrode, 6. Counter electrode, 7. Saturated calomel electrode, 8. Luggin capillary, 9. Platinum electrode, 10. Baffle,
11. Sample, 12. Spring-copper bar, 13. Agitating impeller, 14. Rotating disc, 15. Heater, 16. Thermocouple, 17. Slurry, 18. Slurry pot, 19. Cooling water, 20. Sealed cover

表 1 实验材料的化学成分及硬度

Table 1 The chemical composition and hardness of material tested

Material	Content (mass fraction, %)								Hardness HV
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Ti	
18-8 stainless steel	0.07	0.54	1.36	0.026	0.01	17.5	9.84	0.74	197
T8 steel	0.77	0.32	0.37	0.02	0.03	-	-	-	526

蚀时间为 72 h; 介质为 5%  $H_2SO_4$ ; pH 值为 1.5; 平行试样为 5 个. 电化学测试使用 PS-168 型电化学微机控制测量系统, 采用恒电位法, 实验条件同上, 电化学试验参数及使用电极如下: A/D 采样周期为 1 s; 扫描速度为 0.5 mV/s; 扫描范围为  $E \pm 900$  mV; 参比电极为饱和甘汞电极 (SCE); 辅助电极为铂电极.

### 1.3 实验方法

按第二种测试方法测定  $W_t$  和  $W_c$ , 测  $W_c$  时的转速为 530 r/min, 计算出动态  $\Delta W_{ec}$ ; 然后只改变纯腐蚀失重率的实验方法, 在静止腐蚀介质中测定材料的静态纯腐蚀失重率  $U_c$ , 并计算出静态交互作用失重率  $\Delta U_{ec}$ . 在其它条件相同的前提下, 比较动态纯腐蚀与静态纯腐蚀失重率对冲刷腐蚀交互作用失重率的影响; 最后, 用电化学测试方法分别测定动态和静态纯腐蚀的电化学行为, 分析这两种不同的测试方法 (动态和静态) 哪一个更能反应材料冲刷腐蚀交互作用失重率的本质, 冲刷腐蚀交互作用失重率的计算方法如下:

用动态  $W_c$  计算动态  $\Delta W_{ec}$  的公式为:

$$\Delta W_{ec} = W_t - (W_e + W_c) \quad (1)$$

用静态  $U_c$  计算静态  $\Delta U_{ec}$  的公式为:

$$\Delta U_{ec} = W_t - (W_e + U_c) \quad (2)$$

## 2 实验结果与分析

### 2.1 动态与静态纯腐蚀对正确评价材料冲刷腐蚀交互作用的影响

为了正确评价材料冲刷腐蚀交互作用, 通过改变纯腐蚀项的实验方法, 探讨动态与静态纯腐蚀对正确评价材料冲刷腐蚀交互作用的影响. 实验结果见表 2, 由表 2 可见, 18-8 不锈钢和 T8 钢两种材料的动态纯腐蚀失重率远大于静态纯腐蚀失重率. 18-8 不锈钢动态纯腐蚀失重率是静态纯腐蚀的 211.5 倍, T8 钢动态纯腐蚀失重率是静态纯腐蚀的 2.1 倍. 从而使静态冲刷腐蚀交互作用失重率是动态冲刷腐蚀交互作用失重率的 2.1—2.4 倍. 其主要原因在于: 材料在液固两相流中存在剧烈的冲刷、对流和搅拌作用, 而静态纯腐蚀是依靠离子浓度的缓慢扩散进行, 其离子迁移速度远远小于在动态流体中物质的迁移速

度. 所以静态纯腐蚀失重率较动态小得多. 不能简单地用静态纯腐蚀失重率代替动态纯腐蚀失重率. 因此从冲刷腐蚀对材料的作用机理看, 动态纯腐蚀比静态纯腐蚀更接近冲刷腐蚀实际工况.

另外由表可见, 虽然 T8 钢的硬度明显大于 18-8 不锈钢, 但是 T8 钢耐蚀性远不如 18-8 不锈钢. T8 钢总失重约是 18-8 不锈钢总失重率的 7 倍, 而 18-8 不锈钢动态纯冲刷失重率占总失重率的 34.94%, T8 钢只占其总失重率的 4.96%. 然而, 同样实验条件下, T8 钢总失重率、动态和静态纯腐蚀失重率、交互作用失重率均显著大于 18-8 不锈钢. 说明提高材料耐蚀性不但减小了腐蚀失重率, 更重要的是减小了交互作用失重率, 从而使材料的总失重率大幅度下降.

### 2.2 动态、静态纯腐蚀和冲刷腐蚀的电化学行为

用 PS-168 型电化学测试系统分别测定 18-8 和 T8 钢的动态纯腐蚀、静态纯腐蚀和冲刷腐蚀极化曲线如图 2. 由图 2 可见, 18-8 和 T8 钢极化曲线的共同特点是: (1) 动态纯腐蚀和冲刷腐蚀的腐蚀电流远大于静态纯腐蚀的腐蚀电流, 动态纯腐蚀的腐蚀电位高于静态纯腐蚀; (2) 动态纯腐蚀极化曲线与冲刷腐蚀极化曲线相近, 而与静态纯腐蚀极化曲线相差较大. 18-8 钢动态纯腐蚀的腐蚀电流均显著大于静态纯腐蚀, 但两者的极化曲线较相似, 都处于活化状态, 但 T8 钢动态纯腐蚀不象静态纯腐蚀有一个钝化过程, 而是一直处于活化状态. 两者的腐蚀机理存在本质的差异, 因此不能用静态纯腐蚀代替动态纯腐蚀; (3) 冲刷腐蚀极化曲线受冲刷腐蚀交互作用的影响, 一直处于活化状态, 所以冲刷腐蚀失重率明显大于前两者. 两种材料极化曲线的不同点在于: (1) 18-8 不锈钢静态纯腐蚀电流很小, 一直处于钝化状态; 而 T8 钢则经过一段较宽的活化峰后, 然后进入钝化区. (2) 从动态纯腐蚀极化曲线看, 18-8 不锈钢由活化区转入钝化区; 而 T8 钢则一直处于活化状态. 得出上述结果的原因在于: 由于静态腐蚀条件下, 主要是氢去极化, 氧几乎不参与去极化, 腐蚀失重率较小; 而动态腐蚀条件下, 氧也参与去极化, 并随冲刷速度增加, 氧去极化的强度增大. 冲刷作用加速氧在介质中的扩散, 因而加速了材料的腐蚀. 因此在研究液固两相流冲刷腐蚀交互作用时, 动态纯腐蚀比静态纯腐

表 2 静态与动态纯腐蚀失重率对实验材料冲刷腐蚀交互作用失重率的影响

Table 2 The effect of dynamic and static pure corrosion weight loss rates on the synergistic effect between erosion and corrosion weight loss rates of material tested

Material	$W_t$	$W_e$	$W_c$	$\Delta W_{ec}$	$U_c$	$\Delta U_{ec}$	$(g/(m^2 \cdot h), \%)$	
							$W_c/U_c$	$\Delta U_{ec}/\Delta W_{ec}$
18-8 stainless steel	12.42	4.34	4.23	3.85	0.02	8.06	211.5	2.1
	100	34.94	34.06	31.00	0.16	64.90		
T8 steel	89.93	4.16	55.88	23.89	26.17	53.60	2.1	2.4
	100	4.96	66.58	28.46	31.18	63.86		

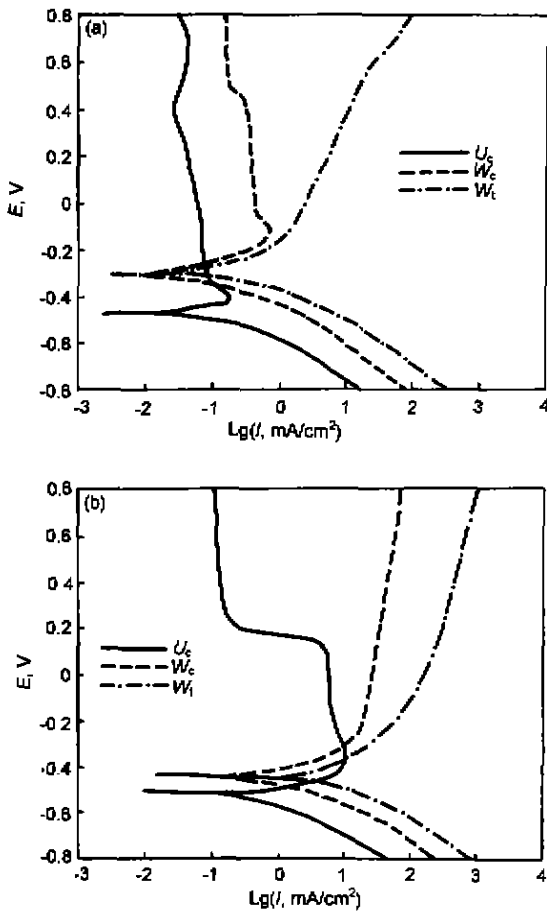


图2 18-8与T8钢动态纯腐蚀、静态纯腐蚀和冲刷腐蚀的极化曲线

Fig.2 Polarization curves of dynamic and static pure corrosion and erosion-corrosion of steels 18-8 (a) and T8 (b) ( $U_c$ —the static pure corrosion weight loss rate;  $W_c$ —the dynamic pure corrosion weight loss rate;  $W_t$ —the total erosion-corrosion weight loss rate)

蚀更能反应材料在液固两相流中冲刷腐蚀交互作用的本质, 并更接近实际. 最理想的方法是能在一次冲刷腐蚀过程中能同时分别测定出纯腐蚀和纯冲刷失重率, 但这需在测试技术上有所突破.

### 3 结论

(1) 通过动态与静态纯腐蚀对材料冲刷腐蚀交互作用和极化曲线的比较发现, 动态纯腐蚀与静态纯腐蚀的明显差别是冲刷引起的腐蚀增量. 它从一个侧面反映了冲刷腐蚀交互作用的本质.

(2) 本实验条件下, T8 钢动态纯腐蚀失重率是静态纯腐蚀失重率 2 倍以上, 18-8 不锈钢动态纯腐蚀失重率是静态纯腐蚀失重率 200 倍以上, 静态交互作用失重率是动态交互作用失重率的 2 倍以上, 可见静态与动态纯腐蚀对定量研究材料冲刷腐蚀交互作用会产生很大的差异.

(3) 在腐蚀性浆料中, 首先要保证材料具有一定的耐蚀性, 其次再考虑提高材料的硬度和耐磨性. 这样才能有效地提高材料的耐冲刷性能. 对不同的工况, 必须同时兼顾材料的耐蚀性和耐磨性.

### 参考文献

- [1] Fontana M G, Greene N D. *Corrosion Engineering*. London: Mc Graw-Hill Book Company, 1987: 11
- [2] Zelders H G. *Met Corros*, 1949; 65(1): 25
- [3] Weiser P F, Beck F H, Fontana M G. *Mater Performance*, 1973; 12(3): 34
- [4] Kim K Y, Bhattacharyya S, Agarwala V. In: Rhee S K, Ruff A W, Ludema K G eds, *Inter Conf on Wear of Materials*, San Francisco: ASME, 1981: 772
- [5] Zheng Y G, Yao Z M, Wei X Y, Kei W. *Wear*, 1995; 186-187: 555
- [6] Madsen B W. *Wear*, 1988; 123: 127
- [7] Watson S W. *Wear*, 1995; 181-183: 469
- [8] Batchelor A W, Stachowiak G W. *Wear*, 1998; 123: 281
- [9] Povarov O A, Tomarov G V. *Therm Eng*, 1985; 32(9): 511