

油/水双相流体中碳钢表面水润湿率对其 纯磨损行为的影响 *

胡紫阳, 段德莉, 李 曙

(中国科学院金属研究所, 沈阳 110016)

摘 要: 为更好的研究碳钢在油/水双相流体中的腐蚀磨损问题, 解决抽油杆/管之间的腐蚀磨损问题。利用自制的金属表面水润湿测定装置测定了油/水流体中碳钢表面水润湿率随含水量和流速的变化。利用往复磨损试验机 and 扫描电镜, 在牺牲阳极保护条件下, 研究了碳钢在不同流体中的纯磨损失重和表面破坏情况, 探究表面水润湿率与碳钢纯磨损行为之间的关系。结果表明: 随着水含量的增加, 碳钢表面水润湿率提高; 但是其表面水润湿率在含水量 35% 的流体中随着流动速度的提高而降低, 在含水量 45% 和 60% 的流体中随含水量的提高而升高。碳钢在油/水流体中的纯磨损失重和摩擦因数均随着其表面水润湿率的提高而增加, 碳钢的纯磨损行为受到表面水润湿率的影响。在油/水双相流体中碳钢发生磨粒磨损, 表面水润湿率低的条件下以塑性去除机制为主; 表面水润湿率高的条件下, 以脆性去除机制为主。

关键词: 油/水双相流; 碳钢; 纯磨损; 水润湿; 磨粒磨损

中图分类号: TH117.1; O647.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-9289(2014)05-0052-07

Effects of Surface Water Wetting Percentage of Carbon Steel on Its Pure Mechanic Wear in Oil/Water Two Phase Fluids

HU Zi-yang, DUAN De-li, LI Shu

(Institute of Metal Research, China Academy of Science, Shenyang 110016)

Abstract: To understand the corrosive wear mechanism of carbon steel (CS) in oil/water two phase fluids and to solve the corrosive wear problems between sucker rod and tubing wall in oil recovery industry, home-made apparatus was employed to measure the surface water wetting percentage (SWWP) on CS in oil/water fluids with different water content and flow velocities. Pure mechanic wear loss of CS in oil/water fluids with different SWWP was detected under the protection of sacrificial anode via reciprocating corrosive wear tester and the surface damage of CS was observed by scanning electron microscope (SEM), to explore the relationship between SWWP and the pure mechanic wear behaviors of carbon steel. The results show that: SWWP increases with the increasing of water content in oil/water fluids, and it increases with the increment of flow velocity with a water content of 45% and 60%, while it decreases with flow velocity increasing with 35% water. The friction coefficient and weight loss of CS increases with the development of SWWP, which means that the pure mechanic wear behavior is significantly influenced by SWWP. The damage mechanism of CS is abrasive wear and the plastic removal and fragile removal is the dominant mechanism when the SWWP is low and high, respectively.

Key words: oil/water two phase fluids; carbon steel (CS); pure mechanic wear; water wetting; abrasive wear

收稿日期: 2014-08-18; **修回日期:** 2014-09-25; **基金项目:** * 国家自然科学基金(51041007); 清华大学摩擦学国家重点实验室创新基金(SK11 TKF10B07)

作者简介: 胡紫阳(1988—), 男(汉), 河南平顶山人, 博士生; **研究方向:** 油/水流体中金属的腐蚀磨损

网络出版日期: 2014-09-28 17:13; **网络出版地址:** <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20140928.1713.004.html>

引文格式: 胡紫阳, 段德莉, 李曙. 油/水双相流体中碳钢表面水润湿率对其纯磨损行为的影响 [J]. 中国表面工程, 2014, 27(5): 52-58.

0 引言

由于近年来油田开采的地质对象逐渐转向薄层和低渗透层,导致油泵的抽油杆承受的平均应力不断增加^[1],加之目前大部分油田已进入中、高含水期的开采阶段,井液的腐蚀性不断增强,两者共同作用使得抽油生产中碳钢设备的腐蚀磨损问题越来越突出,油井免修期明显降低,维护工作量大幅增加,采油成本提高。因此,如何解决管、杆的腐蚀磨损问题已经成为采油工程长期的重点工作,如果能准确的确定碳钢设备腐蚀磨损的主要原因(腐蚀或者磨损)并抑制这一因素的影响,必将提高石油开采效率并产生巨大的经济效益。

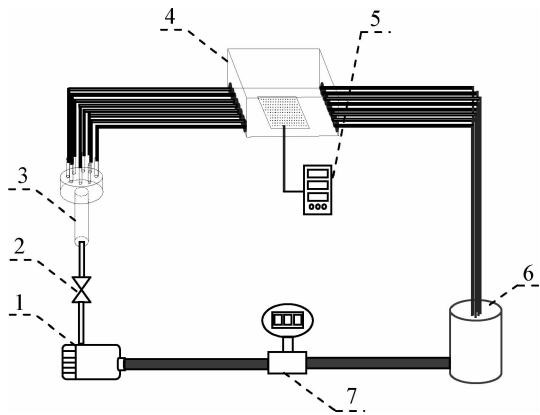
为找到腐蚀磨损过程中的主要影响因素,腐蚀磨损往往被拆分为纯腐蚀分量、纯磨损分量和腐蚀对磨损的促进分量以及磨损对腐蚀的促进分量来逐次研究^[2-8],其中,纯磨损分量是指抑制腐蚀发生时单纯的力学行为产生的破坏。在水溶液中,人们大多关注材料的性能(硬度、微结构和塑性等)以及施加的力学参数(载荷、相对速度和运动方式)对磨损过程的影响。Jiang^[9]研究了不同腐蚀抑制条件下碳钢(Carbon steel, CS)和不锈钢的纯机械磨损,指出不同的方法下碳钢和不锈钢的质量损失随着载荷增加而提高;Neville^[7]研究了载荷和相对运动频率对磨损过程的影响,提出能够影响磨粒尺寸和数量的因素在磨损过程中都应该得到关注;Reza Bateni^[10],Pamfilov^[6]和 Mischler^[11]的研究表明氧化层的存在有利于降低磨损过程中材料的损失;Yakupov^[12]指出当磨损发生时,处于拉伸状态的材料比压缩状态更容易破坏。而对油/水介质的研究大多集中于介质流速、油水比例和流动状态对腐蚀磨损过程的影响^[13-16],而对材料的纯磨损研究却很少,介质条件如何影响材料的腐蚀磨损过程更是鲜有报道。

以表面水润湿状态为切入点,在 Mg 牺牲阳极保护下,研究碳钢在油/水混合流体中的纯磨损行为,考察介质流动速度和油/水比例对表面水润湿状态的影响,并在不同的表面水润湿率(Surface water wetting percentage, SWWP)时研究碳钢的纯磨损量,探究表面润湿状态与碳钢纯磨损行为之间的内在联系,为进一步研究油/水流体中碳钢的腐蚀磨损提供支持。

1 材料与方法

1.1 试验设备

利用自制的金属表面水润湿测量装置^[16]测定碳钢表面的水润湿状态,如图 1 所示。试样中,水槽中的油/水混合介质在循环泵的抽动下,流经流量计、分流器和样品测试模块后再次回到水槽中,10 min 后,当油/水介质平稳的流经样品(见图 2)表面时,信息采集和显示系统将根据油膜和水膜不同的电导率,利用样品表面均匀分布的 160 个微型电导传感器(见图 3)测定样品表面的润湿膜类别,并统计测到水润湿的电导传感器数量 N ,将 N 与电导传感器总数的比值作为碳钢表面的水润湿率,同时将测定的水润湿率实时传递给计算机。每次试验测定时间为 1 min,测定 60 次,然后将 60 次测定的水润湿率取平均值。每个条件重复测量 5 次确保试验数据的准确性。



1—Circulation pump; 2—Flow rate control valve; 3—Manifold; 4—Sample test module; 5—Information collection and display system; 6—Reservoir; 7—Oval gear volume flow meter

图 1 油/水润湿状态测量装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental apparatus for oil/water wetting behavior studies

利用济南舜茂仪器有限公司设计的往复式腐蚀磨损试验机^[16]测定碳钢样品在流动油/水介质中的纯磨损量,样品槽如图 4 所示。设定试验条件:单次磨程 0.5 m,往复频率 1 Hz,载荷 100 N,试验时间 1 h。

1.2 试验材料

选取尺寸为 60 mm × 36 mm × 5 mm 和 Φ 3 mm × 17 mm,硬度 40~45 HRC 的淬火 45 号

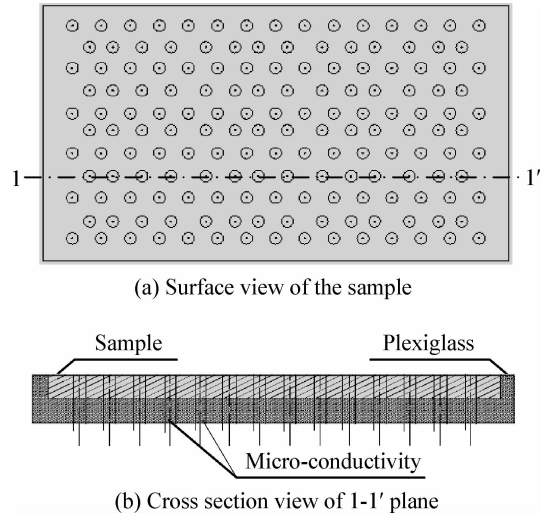


图 2 样品的表面和截面示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the surface and cross section of the sample

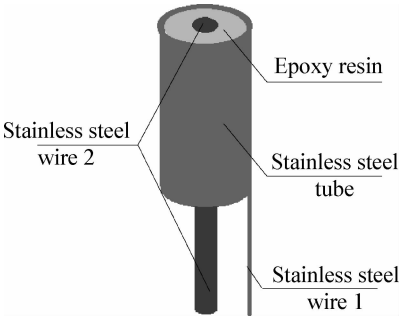


图 3 微型电导传感器示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the micro-conductivity sensor

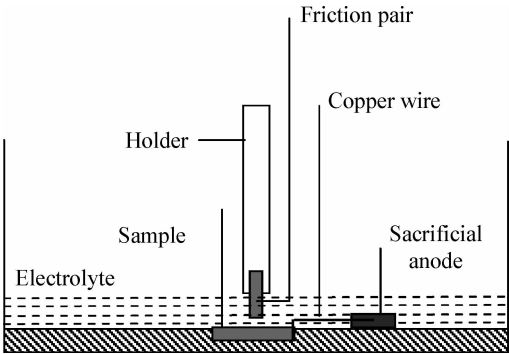


图 4 样品槽示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the sample chamber

吹干,计算样品失重(精度 0.1 mg)。试验中碳钢样品与介质的接触面积为 $60\text{ mm}\times 5\text{ mm}$,其余部分用胶带粘贴,保证其与介质绝缘。

选取元素组成为(质量分数/%):0.004 Al; 0.024 Zn;1.3 Mn;0.003 2 Fe;0.002 3 Cu,其余为 Mg 的镁-锰牺牲阳极,阳极尺寸为 $30\text{ mm}\times 20\text{ mm}\times 5\text{ mm}$ 。用 400 号砂纸去掉牺牲阳极表面的覆盖物和腐蚀产物,然后将牺牲阳极和碳钢样品用铜丝相连接,铜丝用胶带密封,与油/水介质绝缘。

选择密度为 832 kg/m^3 ,粘度($25\text{ }^{\circ}\text{C}$)为 $2.88\text{ mm}^2/\text{s}$ 和表面张力 27.27 mN/m 的司卡兰 3 号白油作为混合介质的油相,氯化钠含量(质量分数)为 3%的水溶液为水相。配置水含量(体积分数)为 35%,45%和 60%的油/水混合流体,设定流动速度为 0.5 m/s 和 1 m/s 。

2 结果和分析

2.1 油/水双相流体中表面水润湿行为

图 5 给出了含水量 35%,45%和 60%,流动速度为 0.5 m/s 和 1 m/s 的流体中,碳钢的表面水润湿率。

从图中可知:随着含水量的提高,碳钢表面的水润湿率都提高;但是碳钢的表面水润湿率在含水量 35%的流体中随着流动速度的提高而降低,在含水量 45%和 60%的流体中随含水量的提高而升高;在高速流体中,随着含水量的增加,碳钢的表面水润湿率提高幅度更大。这可能是由于油/水混合流体在含水量 35%时接近于反相点^[17-19],水分子以堆垛结构存在,与样品表面的接触少,样品表面的水润湿率较低;当含水量达到 45%和 60%时,流体以水包油的状态存在^[17-19],样品表面与水相的接触增加,提高了样品表面的水润湿率。这是因为在含水量 35%的流体中,随着流动速度的增加,油含量增加,提高了样品的表面水润湿率。在含水量 35%的流体中,随着流动速度的增加,油容易从堆垛结构的水分子中逃脱,增加流体中油相的活动范围,甚至形成油包水的流体,降低了碳钢的表面水润湿率;而水含量高的流体中,流体以稳定的水包油状态存在,随着流速的提高,油相受到的剪切增加,油滴尺寸减小,使得水包油状态得到进一步巩固,增加了碳钢的表面水润湿率。

钢为样品和对摩副。用磨床打磨样品和对摩副,并用粒度为 $2.5\text{ }\mu\text{m}$ 的金刚石抛光液进行抛光,以保证样品和对摩副测试面平整、光滑;试验前后均用蒸馏水和酒精对样品和对摩副进行清洗、

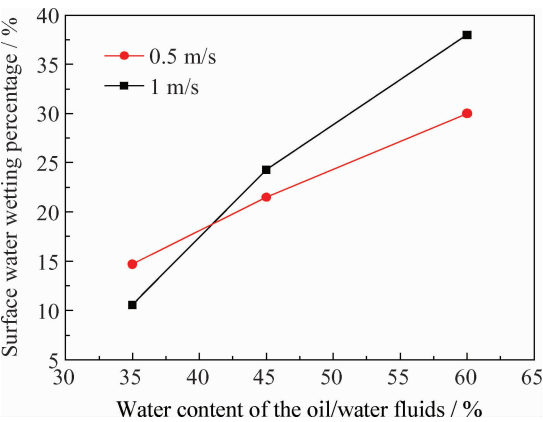


图 5 油/水流体中样品的表面水润湿率

Fig. 5 Surface water wetting percentage of the samples in oil/water fluids

2.2 油/水双相流体中牺牲阳极保护效果

图 6 给出了牺牲阳极保护条件下,含水量 45%,流速 0.5 m/s 的油/水流体中碳钢样品的宏观形貌和未磨损区域的扫描电镜形貌和能谱

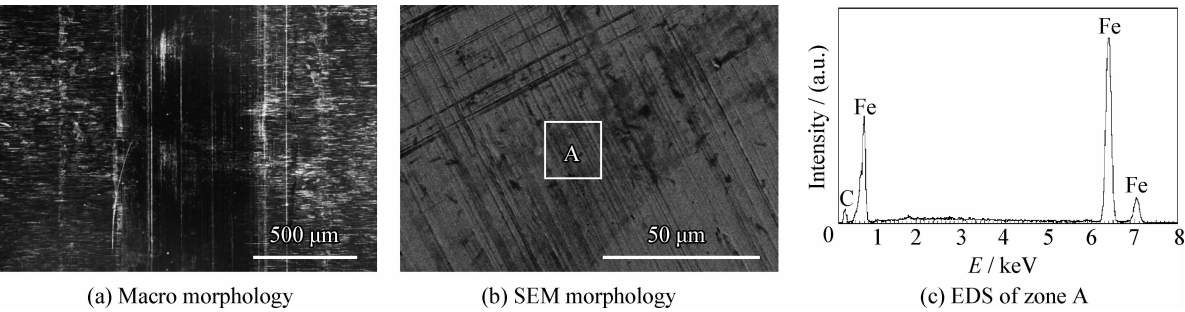


图 6 碳钢在含水量 45%,流速 0.5m/s 的油/水流体中的形貌和 EDS 能谱

Fig. 6 Morphologies and EDS spectrum of CS in the oil/water fluids with the water content of 45% and flow velocity of 0.5 m/s

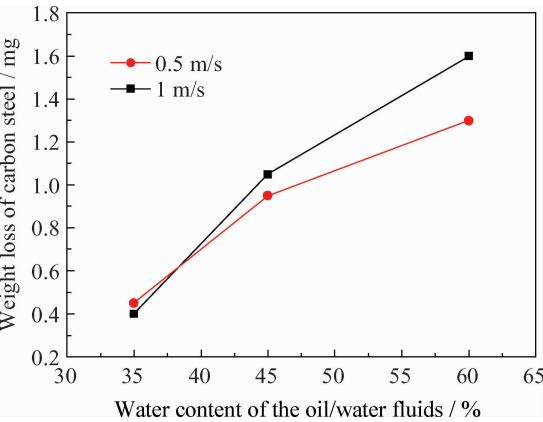


图 7 油/水流体中样品的质量损失

Fig. 7 Weight loss of the original samples in the oil/water fluids

图。从图中可以看出,此时碳钢表面光滑平整,且能谱图中只检测到碳钢的主要成分,同时也未检测到氧,表明此时碳钢并未发生腐蚀,表明在牺牲阳极保护条件下碳钢的腐蚀得到了很好的抑制,此时碳钢的质量损失可以作为碳钢的纯磨损分量来计算,文中利用牺牲阳极来研究碳钢在油/水双相流体中的纯磨损行为是可行的。

2.3 表面水润湿率对碳钢纯磨损形为的影响

图 7 给出了牺牲阳极保护条件下,碳钢在油/水流体中质量损失随含水量和流速的变化情况。由图可知:碳钢样品的质量损失随着含水量的增加而增加,且在高速流体中,质量损失增加的更快;随着流动速度的增加,在含水量 35% 的流体中,碳钢的质量损失有所降低,在含水量 45% 和 60% 的流体中质量损失明显增加,且在高含水量时,质量损失受到流速的影响更大。

图 8 给出了对摩擦副的质量损失,从图中可以看出:在含水量 35% 的油/水流体中对摩擦副损失

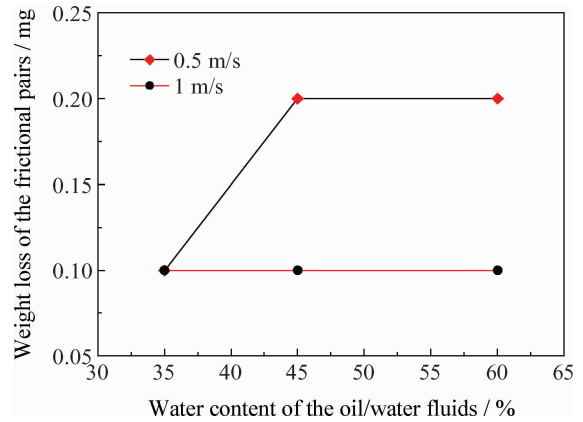


图 8 油/水流体中对摩擦副的质量损失

Fig. 8 Weight loss of the frictional pairs the in the oil/water fluids

最小;在流速 1 m/s 时,对磨副的失重不随含水量发生变化,而在流速 0.5 m/s 时,其随水含量的增加而增加,且在含水量为 45%和 60%时损失相同。

图 9 给出了牺牲阳极保护条件下,油/水流体中碳钢的平均摩擦因数随含水量和流速的变化情况。不难看出摩擦因数的变化规律与碳钢的质量损失规律相同。同时比较碳钢失重和摩擦因数与碳钢表面水润湿率变化规律可知:两者在很大程度上受到表面水润湿率的影响,然而对磨副的质量失重却与表面水润湿行为相差很大,说明可能还有其它因素影响纯磨损过程。

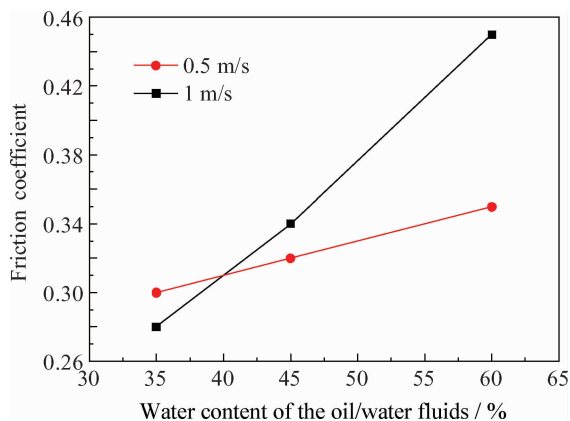


图 9 油/水流体中碳钢的平均摩擦因数

Fig. 9 Average friction coefficient of CS in the oil/water fluids

在含水量 35%的油/水流体中,样品表面水润湿率较低,此时样品表面主要被油相占据。由于油相良好的润滑性能,在很大程度上减小了摩擦因数;同时油相良好的承载能力,使其能够很好的存在于样品和对磨副之间,限制了样品和对磨副之间的直接接触,有效的降低了样品和对磨副的磨损量。但是当水含量增加到 45%时,流体以水包油状态存在,样品表面的水润湿比例显著提高,而水膜较油膜的润滑效果差,使得摩擦因数提高;同时水膜的承载小、粘度小、流动性好,在磨损过程中易于被挤压出接触面,使得样品和对磨副直接接触,发生强烈的对磨,提高了碳钢样品的磨损量。当水含量进一步提高到 60%时,流体水包油的状态更加稳定,碳钢表面水润湿率进一步提高,进而使摩擦因数和磨损量提高。然而水润湿率高的条件下,碳钢在镁牺牲阳极的保护下有发生氢脆的危险,这也许是碳

钢样品随水润湿率急剧增高而对磨副的失重不发生变化的原因。

图 10 给出了牺牲阳极保护条件下碳钢样品在含水量 35%、45%和 60%的油/水流体中纯磨损磨痕的 SEM 形貌以及流速 1 m/s 条件下磨痕内的 EDS 谱图。图 11 给出了含水量 35%、45%和 60%,流速 1 m/s 条件下对磨副的 SEM 形貌图。由图 10(a)和 10(b)可知:含水量 35%时,碳钢样品以磨粒磨损为主要磨损机制,磨痕表面犁沟明显,并发生明显的塑性变形,当流动速度提高时犁沟变浅、窄,油润滑效果提高;由图 10(c)能谱图可知:磨痕内有氧存在,说明此时磨损过程可能发生了显著的摩擦氧化,这可能也是此时摩擦因数和磨损失重较低的另一原因。图 11(a)中对磨副犁沟浅且窄,表面光滑,磨损轻微。

从图 10(d)和 10(e)不难发现:含水量 45%时,样品依然以磨粒磨损为主,犁沟明显,且犁沟的深度较含水量 35%时有所加深,磨损加剧;同时磨痕内开始出现明显的剥落和裂纹,且随着流速的提高,犁沟和剥落都更加严重。这可能是表面水润湿率高的条件下,介质的润滑效果下降,表面润湿膜承载能力下降的结果。同时能谱分析(图 10(f))发现,剥落处依然有氧存在,在磨损过程依然有摩擦氧化发生,表明此时并没有明显的析氢现象发生,材料依然保持一定的塑性。图 11(b)显示对磨副的表面还是以犁沟为主,但表面发现有磨屑粘附,这可能是对磨副失重较小的原因,同时也说明,此时碳钢的磨损加剧。

从图 10(g)和 10(h)不难发现,在含水量 60%时磨痕中犁沟并不明显,磨损表面表现出脆性断裂的迹象并出现大量的裂纹和剥落。此时高的含水量和水润湿率使得磨损条件更加苛刻,样品和对磨副之间的相互作用加剧,增加了样品的质量损失。图 10(i)碳钢磨痕的能谱结果中没有检测到氧,摩擦氧化过程受到抑制。而对磨副表面(图 11(c))出现大量的磨屑黏着,这可能是此时对磨副失重较小的原因之一。同时,在高的含水量和水润湿条件下,镁牺牲阳极提供更大的阴极保护电流,在碳钢表面产生更负的阴极保护电位,进而导致碳钢表面大量水分子电解,引起材料发生氢脆并抑制摩擦氧化过程。氢脆能够降低材料的塑性变形能力和抗磨损能力,这可能也是此时碳钢出现脆性断裂和磨损加剧的原因,

而氢脆的发生也可能使得样品的去除更加容易, 进而导致对摩副失重较小。氢脆现象的发生也表明油/水流体中碳钢的纯磨损测量方法还有待进一步改进。

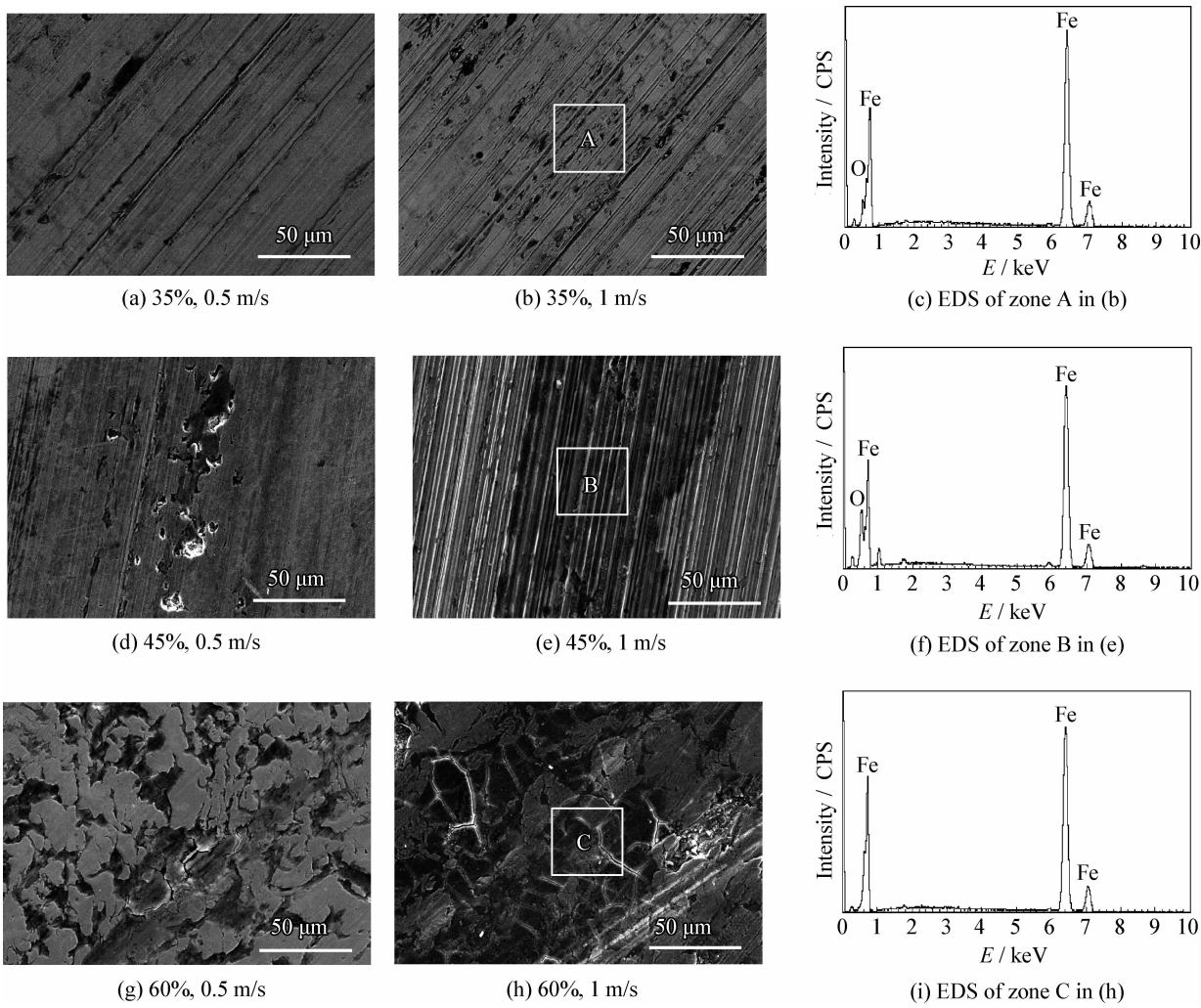


图 10 不同含水量和流速下碳钢样品磨痕的 SEM 形貌和 EDS 能谱

Fig. 10 SEM morphologies views and EDS spectrum of the worn scars of carbon steel samples under different water content and flow velocities

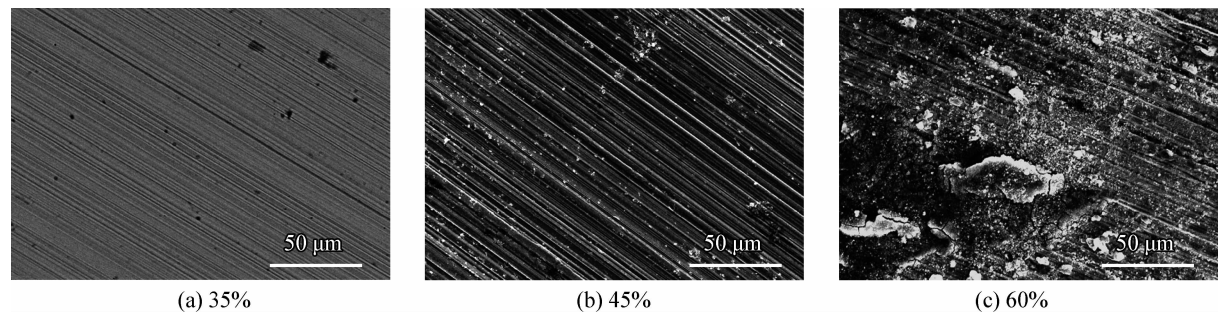


图 11 对摩副在不同含水量的油/水流体中的表面形貌($v=1\text{ m/s}$)

Fig. 11 Surface morphologies of the frictional pairs in the oil/water fluids under different water content ($v=1\text{ m/s}$)

3 结 论

以碳钢表面水润湿状态为切入点,在含水量 35%、45%和 60%的油/水流体中,研究了碳钢样品表面的水润湿率与牺牲阳极保护条件下碳钢样品的纯力学磨损行为之间的关系。

(1) 随着含水量的提高,碳钢表面的水润湿率提高,且在高含水量的油/水流体中碳钢表面的水润湿率受到流速变化的影响更大。

(2) 表面水润湿率在含水量 35% 的油/水流体中,随流速的增加而降低,而在含水量 45% 和 60% 的油/水流体中则随着流速的提高而提高。

(3) 碳钢的纯磨损失重和摩擦因数随着含水量和流速的变化与表面水润湿率相同,碳钢的纯磨损行为受到表面水润湿率的影响。

(4) 对摩擦副的失重与水润湿之间的关系并不明显,尤其是高含水量和高流速条件下,此时磨屑的黏着和样品的氢脆可能在很大程度上影响对摩擦副的摩擦磨损过程。

(5) 碳钢的纯磨损以磨粒磨损为主,在含水量 35% 的油/水流体中,材料表现出一定的塑性,以塑性去除为主;在含水量 60% 的油/水流体中,镁牺牲阳极可能导致碳钢发生氢脆,进而加剧碳钢的磨损,碳钢以脆性去除为主。

参考文献

- [1] 王海斌. 抽油杆受力分析及优化管理 [J]. 江汉石油学院学报, 2004, 26(4): 166-167.
- [2] Assi F, Böhm H. Study of wear-corrosion synergy with a new microelectrochemical technique [J]. Wear, 1999, 233-235(1): 505-514.
- [3] Hong M H, Pyun S I. Corrosive wear behaviour of 304-L stainless steel in 1 N H_2SO_4 solution part 1. effect of applied potential [J]. Wear, 1991, 147(1): 59-67.
- [4] Zhang T C, Jiang X X, Li S Z. Acceleration of corrosive wear of duplex stainless steel by chloride in 69% H_3PO_4 solution [J]. Wear, 1996, 199(2): 253-259.
- [5] Akonko S, Li D Y, Ziomek-Moroz M. Effects of cathodic protection on corrosive wear of 304 stainless steel [J]. Tribology Letters, 2005, 18(3): 405-410.
- [6] Pamfilov E A, Prozorov Y S. On the modeling of mechano-chemical wear [J]. Journal of Friction and Wear, 2012, 33(3): 224-232.
- [7] Jiang J, Stack M M, Neville A. Modelling the tribo-corrosion interaction in aqueous sliding conditions [J]. Tribolo-

gy International, 2002, 35(10): 669-679.

- [8] Guo H X, Lu B T, Luo J L. Interaction of mechanical and electrochemical factors in erosion-corrosion of carbon steel [J]. Electrochimica Acta, 2005, 51(2): 315-323.
- [9] Huang Y L, Jiang X X, Li S Z. Pure mechanical wear loss measurement in corrosive wear [J]. Bulletin of Materials Science, 2000, 23(6): 539-542.
- [10] Reza Bateni M, Szpunar J A, Wang X, et al. Wear and corrosion wear of medium carbon steel and 304 stainless steel [J]. Wear, 2006, 260(1/2): 116-122.
- [11] Mischler S, Debaud S, Landolt D. The role of passive oxide films on the degradation of steel in tribocorrosion systems [J]. Wear, 1999, 225-229(2): 1078-87.
- [12] Yakupov N İ, Giniyatullin R R, Yakupov S N. The influence of the character of deformation of structural element surfaces on the corrosive wear [J]. Strength of Materials, 2012, 44(2): 170-176.
- [13] 王优强, 宋开利, 王民轩, 等. 有杆泵井管磨蚀机理及应用研究 [J]. 石油矿场机械, 2004, 33(5): 10-13.
- [14] Craig B. The conductivity of water-in-oil solutions as a means to estimate corrosion [J]. Corrosion, 1998, 54(8): 657-662.
- [15] Heuer J K, Stubbins J F. Microstructure analysis of coupons exposed to carbon dioxide corrosion in multiphase flow [J]. Corrosion, 1998, 54(7): 566-575.
- [16] Duan D L, Hu Z Y, Jiang S L, et al. Corrosive wear behaviors of carbon steels in oil-water fluid [J]. Tribology Transactions, 2014, 57(2): 317-323.
- [17] 王安鹏. 水平管内油/水分散流反相研究 [D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2011.
- [18] Laflin G C, Oglesby K D. An experimental study on the effect of flow-rate, water fraction and gas-liquid ratio on air-oil-water flow in horizontal pipes [D]. Tulsa: The University of Tulsa, 1976.
- [19] Angeli P, Hewitt G F. Pressure gradient in horizontal liquid-liquid flows [J]. International Journal of Multiphase Flow, 1998, 24(7): 1183-203.

作者地址: 辽宁省沈阳市沈河区文化路 72 号 110016
中国科学院金属研究所
Tel: (024) 2397 1775
E-mail: zyhu10s@imr.ac.cn

(责任编辑: 黄艳斐)