

# 油、水介质对 GCr15 钢微动磨损特性的影响

任平弟, 朱旻昊, 周仲荣

(西南交通大学材料先进技术教育部重点实验室, 610031, 成都)

**摘要:** 采用 PLINT 高精度液压伺服式微动磨损试验机, 在法向载荷 100 N、频率 2 Hz、位移幅值 115 ~ 60  $\mu\text{m}$ , 以及大气、纯净水和液压油 3 种不同介质条件下, 对 GCr15 钢进行了微动磨损试验. 动力学分析结合光学显微镜和激光共焦扫描显微镜 (LCSM) 的微观观察结果显示: 流体介质对微动运行区域有轻微改变; 液压油和纯净水介质明显降低了微动摩擦因数、磨痕深度和磨斑尺寸, 表现出明显的润滑作用, 而液压油的润滑效果明显优于纯净水. 微观分析表明, 3 种介质条件下的微动磨损是磨粒磨损和剥层机制共同作用的结果.

**关键词:** 微动磨损; 润滑; GCr15 钢

**中图分类号:** TH11713 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253 - 987X(2004)11 - 1152 - 04

## Influence of Oil and Water Mediums on Characteristics of Fretting Wear of 52100 Steel

Ren Pingdi, Zhu Minhao, Zhou Zhongrong

(The key Laboratory on Advanced Material Technology of Education Ministry, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**Abstract:** The fretting wear tests of 52100 steel under three different mediums of air, hydraulic oil, and tap water were carried out on a hydraulic PLINT fretting test machine with high precision. All tests were examined under the conditions of 100 N normal load, 2 Hz frequency, and the displacement amplitude varying in the range 115 to 60 micrometers. Combined with microscopic observations by optical microscopy and laser confocal scanning microscopy (LCSM), the dynamic analysis was performed. The test results show that the fretting regimes only slightly vary with the fluid mediums. And with the mediums of hydraulic oil and tap water, the friction coefficients of fretting tests, the depth and sizes of fretting scars are lowered obviously, a more remarkable lubrication effect in hydraulic oil can be observed than in tap water. The microscopic analysis indicates that the fretting wear results from the combined actions of abrasion and delamination under the above mentioned conditions.

**Key words:** fretting wear; lubrication; 52100 steel

在能源、化工、交通运输、航空航天等重要工业领域, 微动导致材料损伤和破坏已成为影响设备使用寿命和运行安全的关键因素. 近年来, 微动摩擦学研究不断取得重要研究成果<sup>[1]</sup>. 微动理论认为, 受材料性质和微动运行工况等因素影响, 微动运行过程表现出不同的特征, 微动运行状态对应于滑移区、部分滑移区和混合区等 3 个不同区域. 研究金属材料在不同介质环境中的微动磨损特性<sup>[2-5]</sup>, 可以进一步通过控制微动运行工况来改变微动运行区

域, 从而控制材料的受损程度<sup>[6,7]</sup>. 机械设备的金属材料零部件接触面如果有油或水介质渗入, 在实际使用中就可能产生润滑和微动腐蚀等现象. 本文研究纯净水和液压油对微动磨损特性的影响, 以期为进一步研究水、油介质中的微动磨损机理奠定基础, 并为生产实际中的微动控制提供依据.

## 1 试验部分

微动摩擦试验采用球/平面接触, 材料均为

收稿日期: 2004 - 03 - 30. 作者简介: 任平弟(1960~), 男, 副教授, 在职博士生. 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50105017); 四川省杰出青年基金资助项目(03ZQ026 - 062).

GCr15 轴承钢,球试样直径为 40 mm,平面试样尺寸为 10 mm × 10 mm × 20 mm(表面粗糙度  $R_a = 0.103 \sim 0.104 \mu\text{m}$ )。GCr15 钢的主要化学成分(质量分数)为:0.195 %C,0.125 %Si,0.130 %Mn,1.15 %Cr,0.120 %Ni,0.105 %Mo,0.115 %V,0.102 %S,0.102 %P。其热处理为淬火和低温回火,主要力学性能为:  $\sigma_s = 1\ 700 \text{ MPa}$ ,  $\sigma_b = 2\ 000 \text{ MPa}$ ,  $E = 210 \text{ GPa}$ ,  $HV_{870} \sim 890$ 。试验装置为 PLINT 高精度液压伺服式微动磨损试验机<sup>[8]</sup>,主要试验参数为:位移幅值  $D = 60, 20, 10, 5, 2.15, 1.15 \mu\text{m}$ ;法向载荷  $F_n = 100 \text{ N}$ ;频率  $f = 2 \text{ Hz}$ ;循环次数  $N = 1 \sim 20\ 000$  次;试验重复次数为 5 次。试验介质环境为大气、纯净水和 T46 液压油。

试验温度控制在 20 ~ 25 °C,大气相对湿度为 (60 ± 10) %。微动磨损试验后利用光学显微镜和 OLS 1100 型激光共焦扫描显微镜(LCSM)观察表面形貌,磨痕深度用 LCSM 测量。

## 2 试验结果及讨论

### 2.1 微动运行区域特性

微动磨损试验获得的摩擦力 - 位移 - 循环周次曲线( $F_t - D - N$  三维图),揭示了微动的运行特性。当位移幅值为 2.15 和 1.15  $\mu\text{m}$  时,对液压油、纯净水和大气 3 种不同介质,除试验初期的跑合阶段外,  $F_t - D$  曲线均闭合为直线状,说明微动运行于部分滑移区,即接触中心黏着,微滑仅发生在接触边缘。图 1 示出了频率和法向载荷一定、位移幅值为 5  $\mu\text{m}$  时 3 种介质环境下 GCr15 钢的微动摩擦特性曲线。对大气环境(见图 1a),当  $D = 5 \mu\text{m}$  时,  $F_t - D$  曲线随着循环周次增加在椭圆状和平行四边形之间转化,表明微动运行于混合区;液压油介质条件下的运行特性与干态相似,即存在  $F_t - D$  曲线在椭圆状和平行四边形之间的交替转化(见图 1c),微动也运行于混合区,不同之处在于由于油的润滑作用,试验后期的摩擦因数较低(对比图 1a 和图 1c),而且椭圆状曲线持续的时间较短,使混合区有向部分滑移区移动的倾向;在纯净水介质条件下,当  $D = 5 \mu\text{m}$  时,

$F_t - D$  曲线全都为平行四边形(见图 1b),这说明混合区在此时被限制到位移幅值为 2.15 和 5  $\mu\text{m}$  之间的狭窄区域或已消失。随位移幅值的增大,在  $D = 10, 20, 60 \mu\text{m}$  时,3 种介质的  $F_t - D$  曲线均为平行四边形,说明它们都运行于滑移区。

由图 1 还可看出,与大气介质相比,液体介质对微动运行区域存在影响,表现为水介质抑制了混合区的形成,而油介质扩大了滑移区的范围,这说明液体介质从不同角度增加了滑移的倾向,在接触界面产生了润滑作用。

### 2.1.2 摩擦因数分析

在不同介质条件下,部分滑移区( $D = 2.15 \mu\text{m}$ )、混合区( $D = 5 \mu\text{m}$ )和滑移区( $D = 60 \mu\text{m}$ )的微动摩擦因数与循环次数的关系如图 2 所示。在微动磨损试验初期(几至几十次循环),存在一个摩擦因数较低的变化平缓期,即跑合期。随循环周次增加,接触区的表面膜破坏,发生金属与金属之间的接触,跑合期结束,摩擦因数开始升高,对于油和水介质,材料表面膜厚度增加,表面膜对材料的保护作用增强,所以跑合期相对于干态较长。由图 2 可见,随位移幅值增加,跑合期缩短,这是表面切应力随位移幅值的增加而增加的结果。

在微动的部分滑移区(见图 2a),由于接触中心黏着,摩擦因数  $\mu$ (严格讲应是切向力与法向压力之比)处于较低水平(0.132 ~ 0.135),而且此时流体介质难以进入接触界面,故流体介质对摩擦因数没有明显影响。对于微动的混合区和滑移区,在干态条件下,跑合阶段后发生金属对金属的直接接触,摩擦因数迅速增加,随着第三体(磨屑)的形成及其调节作用,摩擦因数又降低,并逐渐过渡到平稳状态,因此摩擦因数随循环周次的演变规律基本呈现 5 阶段特征,即跑合期、迅速上升期、峰值期、降低期和稳定期<sup>[1]</sup>。从总体上看,在纯净水和液压油介质条件下的摩擦因数明显低于干态时的摩擦因数(见图 2b 和图 2c),且随位移幅值增加,降低越发明显,这表明流体介质起到了润滑作用。流体介质中的摩擦因

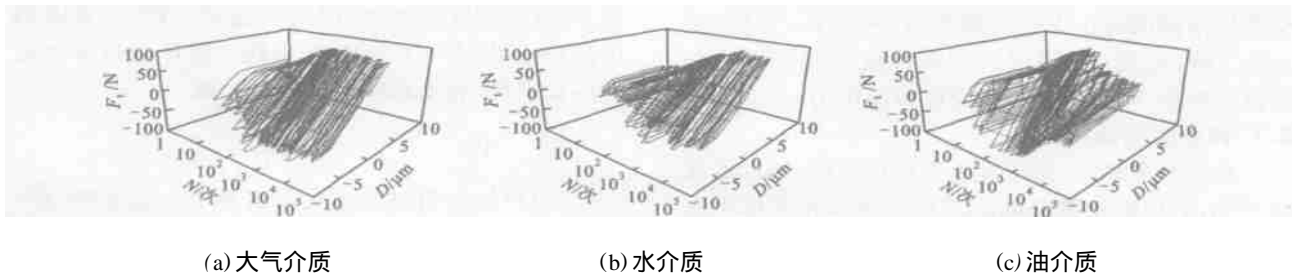


图 1 微动运行特性  $F_t - D - N$  三维曲线图 ( $D = 5 \mu\text{m}$ )

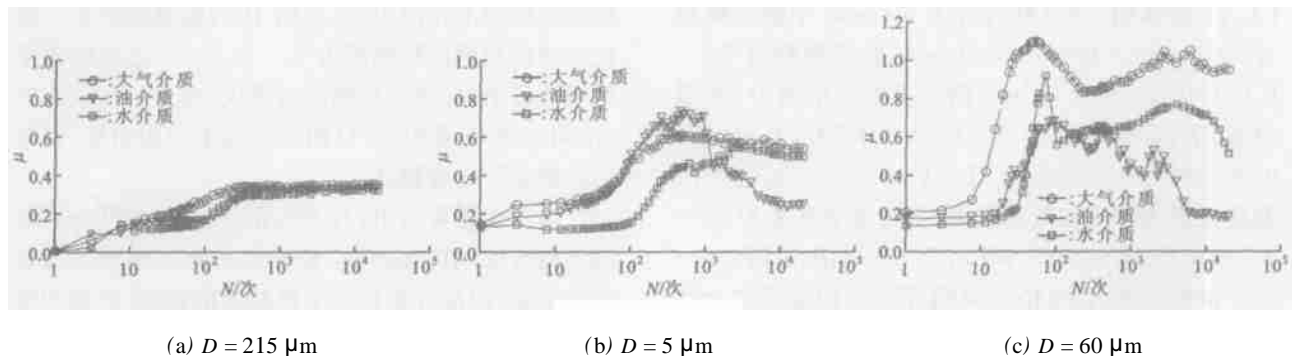


图2 不同介质条件下微动摩擦因数随循环周次的变化曲线

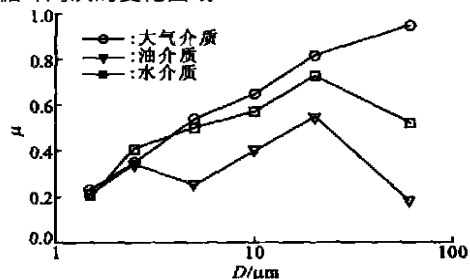
数主要取决于液体润滑膜的形成及其性质,因此液压油的摩擦因数下降更为显著.由图2b和图2c可见,液压油的摩擦因数在跑合期后经历了上升、峰值和下降期,随后又稳定在与跑合期相当的水平上,这是因为:跑合期后表面膜被破坏,金属与金属接触,黏着作用增强,油介质难以进入接触界面;经历峰值期后,第三体形成并参与承载,摩擦因数开始下降,同时由于第三体的隔绝作用,润滑油得以进入接触界面,使摩擦因数降低到较低水平,润滑作用得以持续.

对比图2b和图2c还可以发现,对纯净水和干态试样:在位移幅值较小时,磨屑不能顺利排出接触界面而作为第三体承载,微动稳态摩擦因数较低;在位移幅值较大时,磨屑较易排出接触区,随磨损持续进行,摩擦因数较高.图2c中在1万次循环后,水介质中的摩擦因数明显较低,说明纯净水的流体润滑膜已形成,但此时水介质的润滑作用仍明显低于液压油的润滑作用.

在3种不同介质中,摩擦因数大致在1万次循环后都基本处于稳定阶段,图3给出了不同位移幅值条件下的稳态( $N=2$ 万次)摩擦因数.在部分滑移区( $D=115\sim 215\mu\text{m}$ ),流体介质对摩擦因数的影响不明显,这是因为部分滑移区的位移主要由弹性变形协调,材料接触面无相对滑移发生,流体介质的作用不能充分发挥.微动运行于混合区( $D=5\mu\text{m}$ )和滑移区( $D=20\sim 60\mu\text{m}$ )时,介质的润滑作用逐渐显现出来,在不同位移幅值条件下,油的润滑作用明显优于水的润滑作用.相对于干态,纯净水和液压油介质的摩擦因数在大位移幅值( $D=20\mu\text{m}$ )时出现显著下降(见图3),说明大位移幅值有利于流体介质进入摩擦界面,更有利于发挥润滑作用.

### 2.1.3 微动磨损分析

在部分滑移区,微滑发生在接触边缘,因此磨斑呈环状,水和油介质中试样的最大磨痕深度比干态时的略低(见图4b,  $D=215\mu\text{m}$ ),但影响不明显,这是因为接触中心黏着,流体介质难以进入摩擦界

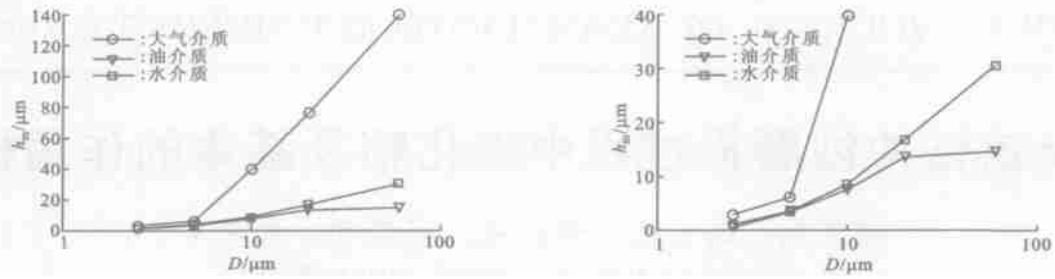
图3 摩擦因数与微动位移幅值的关系( $N=2$ 万次)

面,而仅在环状微滑区产生作用.在混合区( $D=5\mu\text{m}$ ),环状磨斑形貌消失,接触中心伴有明显塑性变形,此时接触界面流体介质进入不畅,润滑效果并不显著,与干态时相比,磨痕深度的降低并不明显(见图4b).微动进入滑移区后,干态磨损速率随位移幅值的增加迅速增加,而流体介质中试样的磨损速率却大大低于干态时的磨损速率(见图4a).

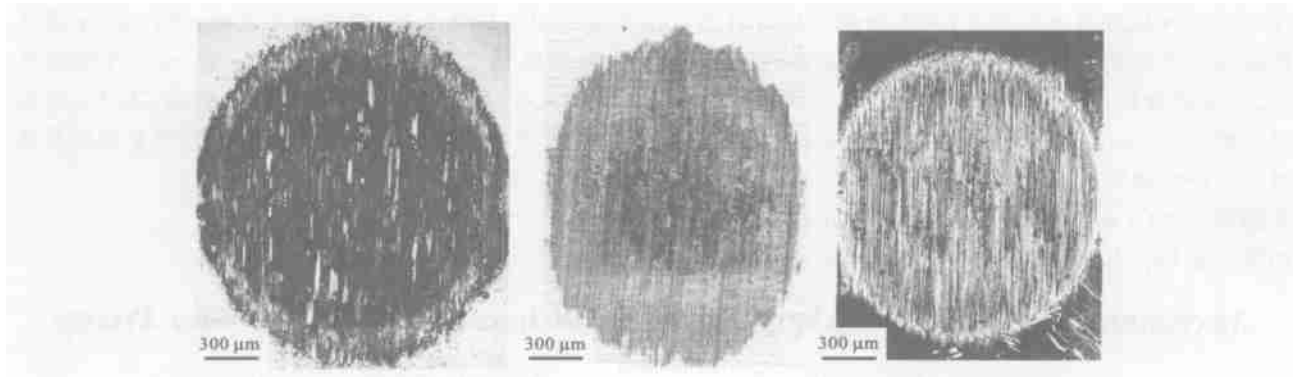
从滑移区磨痕的低倍形貌来看(见图5),在3种介质条件下均具有典型的磨粒磨损的犁沟特征,大气环境中磨痕表面覆盖着大量棕红色氧化磨屑(第三体),而油和水介质试样表面损伤最严重的区域集中在接触中心.3种介质试样的磨斑尺寸也与图4中最大磨痕深度有较好的对应关系,即干态磨损深度最大,磨斑尺寸最大,液压油试样磨痕深度最浅,磨斑尺寸也最小.从高倍形貌来看(见图6),干态磨痕中心覆盖着较厚的磨屑层,并可观察到有颗粒呈片状按剥层机制剥落(见图6a),而由于流体介质的“清洗”作用,油和水介质试样的磨痕中心磨屑较少,氧化程度也轻微,但与干态时一样,均具有剥层的特征(见图6b和图6c),其中液压油试样磨痕中心较平滑,磨损较纯净水试样轻微.

## 3 结论

(1) 流体介质对微动运行区域有一定影响,即:纯净水介质使滑移区向小位移方向发展,混合区缩小;液压油对微动运行区域影响不显著,但有向小位



(a) 整体 (b) 局部  
图 4 3 种介质条件下最大磨痕深度  $h_m$  与微动位移幅值的关系



(a) 大气介质 (b) 油介质 (c) 水介质  
图 5 滑移区微动磨痕的光学显微形貌 ( $D = 60 \mu\text{m}$ )



(a) 大气介质 (b) 油介质 (c) 水介质  
图 6 滑移区微动磨痕的 LSCM 形貌 ( $D = 60 \mu\text{m}$ )

移方向发展的趋势。

(2) 微动运行和摩擦磨损特性的结果表明,在混合区和滑移区,液压油和纯净水都明显降低了微动摩擦因数,表现出明显的润滑效果,其中液压油的润滑作用最明显,润滑作用随位移幅值的增加而增加。

(3) 大气、液压油和纯净水 3 种介质条件下的微动磨损机制均表现为磨粒磨损和剥层的共同作用。

**参考文献:**

[1] 周仲荣, Vincent L. 微动磨损 [M]. 北京: 科学出版社, 2002.  
 [2] Price S, Taylor D E. Fretting corrosion of high strength low alloy steel in synthetic seawater environments [J]. Wear, 1988, 125(1 - 2): 107 - 128.  
 [3] Pearson B R, Brook P A, Waterhouse R B. Fretting in

aqueous media, particularly of roping steels in seawater [J]. Wear, 1985, 106(1 - 3): 225 - 260.  
 [4] 任平弟, 陈光雄, 周仲荣. 不同水介质下 GCr15 钢的微动磨损特性 [J]. 摩擦学学报, 2003, 23(4): 331 - 335.  
 [5] Liu Q Y, Zhou Z R. Effect of displacement amplitudes in oil lubricating fretting [J]. Wear, 2000, 239(2): 237 - 243.  
 [6] 朱旻昊, 周仲荣. 7075 铝合金复合微动行为的研究 [J]. 摩擦学学报, 2003, 23(4): 320 - 325.  
 [7] Fouvry S, Kapsa P, Vincent L. Analysis of sliding behaviour for fretting loading: determination of transition criteria [J]. Wear, 1995, 185(1 - 2): 35 - 46.  
 [8] 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. 40 - 42.

(编辑 葛赵青)