DOI: 10.3901/JME.2019.09.048

油水乳化液的边界润滑行为及机理分析*

刘宸旭^{1,2} 陈朝浪^{1,2} 张继平¹ 戴媛静¹

(1. 清华大学天津高端装备研究院 天津 300300;

2. 清华大学摩擦学国家重点实验室 北京 100084)

摘要: 在滑动轴承的实际应用中, 难以避免水对润滑油的侵入污染; 因此对油水乳化液的润滑研究至关重要。为探索轴承启停过程中油水乳化液的摩擦学行为及规律, 研究了不同含水量对于油水混合体系边界润滑性能及磨损状况的影响。发现在含水量低于 99.75% 的乳化液中轴承钢间的摩擦因数与纯油润滑时相近, 但磨损状况较纯油差; 综合摩擦因数与磨损量测试, 认为含水量为 30% 的乳化液, 其减摩抗磨效果接近纯油润滑的情况。通过黏度和润湿行为的观测, 给出了油水乳化液对于润滑作用机制的原理分析。当乳化液进入润滑接触区时, 由于液下超疏水性质, 水相极易被挤出接触区, 而油相则趋向于在试样表面润湿, 从而形成润滑油膜, 起到承载和润滑效果。

关键词: 油包水; 水包油; 乳化液; 边界润滑; 摩擦磨损

中图分类号: TH117

Boundary Lubrication Behavior and Mechanism Analysis of Oil-Water Emulsion

LIU Chenxu^{1,2} CHEN Chaolang^{1,2} ZHANG Jiping¹ DAI Yuanjing¹

(1. Tianjin Research Institute for Advanced Equipment, Tsinghua University, Tianjin 300300;

2. State Key Laboratory of Tribology, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract: Oil-water emulsion generally exists in the actual application of the sliding bearings. Hence, the lubricating property of emulsion is of great value for engineering. In order to explore the tribological behaviour of oil-water emulsion during the bearing start-stop process, effects of oil-water emulsions with different water content on boundary lubrication have been investigated. It is found that the friction coefficient of emulsion with water content less than 99.75wt% is almost similar to that of pure oil, while the wear performance is much worse. Combining the friction and wear results, the emulsion with water content of 30wt% is considered as the acceptable choice for the engineering applications. By investigating the viscosity and wetting behaviours, the lubrication mechanism of oil-water emulsion has been discussed. Owing to the better wettability than water, the oil phase in emulsion preferentially forms oil film on bearing steel surface, which acts an important role in bearing and lubrication.

Key words: water-in-oil; oil-in-water; emulsion; boundary lubrication; friction

0 前言

滑动轴承在使用过程中常会出现水分混入润滑油的情况, 这一现象在实际应用中往往不可避免。比如对于轧机油膜轴承, 其轧制过程中产生的大量轧制热需用水或含水介质来冷却; 但由于高速重载、冲击振动等复杂条件及密封材料的局限性, 水分难免会进入油膜轴承油中, 有时甚至会大量混入。油和水在高速旋转的轴承以及齿轮和油泵的剪切下剧

烈乳化, 进而导致轴承润滑状态恶化, 轴承发热, 磨损加剧^[1]。鉴于此类轴承的实际工作状况, 油水乳化液的润滑研究具有重要的工程意义。

关于油水两相混合物的理论研究, 多依托于石油开采、储运、化工、能源等工业背景, 其研究一般集中在油水混合物的黏度和两相之间的转化。近年来, 随着摩擦学领域的发展, 油水混合物润滑性能的研究日臻完善。2008 年, 杨莹等^[2]针对水包油乳化液润滑的动静压轴承, 发现合适的含油率可以改变轴承的润滑特性, 使轴承在达到一定的承载力的前提下, 降低轴承的温升和功耗。2013 年, HARIKA 等^[3]研究了动压润滑下的油水两相混合物

* 国家自然科学基金(51727901)和天津市科技计划(17YFCZC00380)资助项目。20181009 收到初稿, 20190124 收到修改稿

的流变性能和热行为,认为水的存在对润滑油膜的厚度和摩擦力矩的影响较小,对温度的影响较为显著,并给出在特定的情况下,即使在水含量(质量分数)高达7%时,混合物仍能起到良好的流体润滑效果。2016年,王涛等^[4]利用油水两相流体数学模型和弹流润滑方程,研究了油水两相流润滑轧机油膜轴承的摩擦行为,并发现油包水型比水包油型具有更好的润滑性能,且在两相转变点处的润滑性能最优。2017年,JOSLYN等^[5]研究了低浓度水包油乳化液的弹流润滑行为,并将其润滑过程分为三种状态:低速状态下乳化液润滑膜厚度与纯油相当;中速状态下润滑油膜厚度急剧下降,形成乏油润滑;高速状态下乳化液润滑膜厚度再次增加。

上述的研究多关注于轴承工作中的流体润滑状态,由于实际环境中轴承油的使用工况恶劣、尤其启停阶段速度和负荷变化大,动压油膜形成难以稳定而易造成边界润滑,因此对于油水两相混合物状况下边界润滑的研究同样重要。2006年,BENNER等^[6]利用球盘试验结合光干涉方法测量了不同含水量的润滑油在不同载荷和速度下的接触区膜厚,发现对于与水不互溶的油包水乳化液来说,水的存在对润滑膜厚度几乎没有影响,认为油滴会优先被固体表面捕获而在接触区周围形成油池,从而起到承载和润滑效果。2010年以来,MA等^[7-8]对含有微量油水的成膜特性进行了系统研究,认为水中含有极微量的油(体积分数小于 1×10^{-5})时,其成膜能力远高于纯水成膜能力,并通过竞争润湿理论对油水分子在固体界面上的行为进行分析;此外,该团队^[9]还研究了高速状态下水包油乳化液润滑油膜成膜机理,发现在高速状态下乳化液中的油滴会在接触区聚集从而形成油池。

然而上述研究多集中在对油膜形成机制的探讨,对于边界润滑中涉及的摩擦学行为却少有描述。

本文在前人研究的基础上,重点研究了不同含水量对于油水混合体系边界润滑性能及磨损状况的影响,并通过黏度和润湿行为的观测,给出了不同含水量油水乳化液对于润滑作用机制的原理分析;以模拟并探索轴承启停过程中不同成分油水乳化液状况下摩擦学行为的规律,为工程应用提供参考信息。

1 试验部分

1.1 乳化液的配制

试验选用美孚-525润滑油和蒸馏水作为配制油水混合物的主要材料。设计并配制不同质量分数的

油水混合物,之后将配制好的混合物,于室温下用高速搅拌机(1 500 r/min, JSH0202)连续搅拌30 min;将配制好的乳化液在1 h内进行摩擦学等测试。

1.2 摩擦性能测试

试验使用可控环境摩擦磨损仪(UMT-2, Bruker)进行摩擦试验。轴承钢块(型号GCr15,直径20 mm,厚度5 mm,粗糙度约为10 nm)为下试样,轴承钢球为(型号GCr15,直径大小是8 mm,理论粗糙度 $R_a=20$ nm)上试样。

试验前对轴承钢块表面进行研磨和抛光。其步骤为:依次使用800#、2 000#和4 000#的砂纸研磨至最优水平,然后使用 $1.5 \mu\text{m}$ 的金刚研磨膏进行精抛光。抛光后的样品用石油醚、酒精、去离子水等仔细清洗、擦干后保存。在进行试验之前,将抛光后的样品浸没于酒精、去离子水中,依次进行15 min的超声清洗。在氮气或空气中吹干后,通过3M牌双面胶固定于UMT-2模块上,进行试验。试验施加的载荷是20 N,频率分别设置为0.5 Hz、1 Hz、5 Hz和10 Hz,往复距离4 mm。采用滴加的方式,将润滑液加入到上、下试样之间。

摩擦磨损试验后,使用白光干涉三维表面轮廓仪(Phase Shift MicroXAM-3D)对磨痕形貌及深度进行表征。通过扫描电子显微镜(SEM, FEI QUANTA 200 FEG),对磨损形式和磨痕元素进行表征和分析。

1.3 乳化液的表征

使用旋转流变仪(Aaton Paar Physica MCR)对不同含水量的乳化液的流变性质进行测试,测试模块为平行板(直径25 mm),剪切速度变化为 $1 \sim 500 \text{ s}^{-1}$,温度为 25°C 。使用光学显微镜(SOIF 5XA)对乳化液滴的形态和大小进行了观察。接触角测量采用视频光学接触角测量仪(Dataphysics OCA 25),液滴大小为 $4 \mu\text{L}$,每个点测量三次取平均值。

2 结果与讨论

图1是在不同往复频率下不同含水量(0~100%)乳化液润滑时的摩擦因数情况(含水量指质量分数)。试验发现,随着频率从0.5 Hz到10 Hz增大,对于固定含水量润滑液中测试的摩擦因数逐渐减小。该结果符合Stribeck曲线的边界润滑规律:当载荷和润滑液黏度不变,轴承数随着速度(本试验中的往复频率)的增大而增大,处于边界润滑的摩擦因数会略微降低。

对于同一频率下,不同含水量润滑液的摩擦因数情况:纯油中的摩擦因数略低于乳化液($1\% \leq \text{含水量} < 100\%$)的摩擦因数,远低于纯水的摩擦因数。

说明含有少量油的乳化液即有较好的润滑效果, 几乎接近于纯油的情况; 而使用纯水时, 由于其无法形成具有良好承载和润滑效果的边界膜, 从而使摩擦因数远高于其他乳化液的情况。

图1 不同往复频率、不同含水量乳化液润滑时的摩擦因数

图1中的插图进一步说明, 当含水量达99.5%时, 乳化液的摩擦因数仍与纯油接近; 而含水量继

续增大到99.75%时, 摩擦因数才会有比较明显的增大。由结果可知, 当含水量增大到一定值时, 润滑油含量过少会导致边界润滑膜的形成受限而不再连续, 从而影响了边界润滑效果, 导致摩擦因数增大。

图2是往复频率为1 Hz、时间为20 min时, 不同含水量乳化液润滑时轴承钢表面的磨损情况。图3是不同含水量乳化液润滑时轴承钢表面的磨痕轮廓。结合图2和图3可知, 纯油的磨损情况最小, 深度约为72 nm, 磨损宽度约为148 μm ; 在含水量较低时, 磨损量略高于纯油的情况, 当含水量为30%时, 深度为200 nm和磨损宽度为167 μm , 与含水量1%和5%相似。当含水量增大到95%时, 磨损量仍相对较小, 磨损深度约为174 nm, 磨痕宽度为182 μm ; 而随含水量继续增大到99%, 磨损深度为240 nm, 磨损宽度为240 μm , 较95%含水量时磨损量有较大的改变。纯水时, 磨损情况远大于其他乳化液情况, 深度达到768 nm, 宽度达到231 μm 。

图2 不同含水量乳化液润滑时轴承钢表面的磨损情况(往复频率为1 Hz)

图3 不同含水量乳化液润滑时轴承钢表面的磨痕轮廓(往复频率为1 Hz)

上述结果表明, 虽然摩擦因数相差不大(图 1), 但是磨损相差较大(图 2 和图 3)。因此有必要对摩擦因数的细节进一步讨论。图 4 是往复频率为 1 Hz 时, 不同含水量乳化液润滑时的摩擦因数随时间的变化。由图可知, 当含水量为 99%和 95%时, 摩擦因数虽然远低于纯水情况, 但摩擦因数的变化剧烈(从 0.09 到 0.12), 表明摩擦副之间剪切力不稳定, 因而加剧了试件的磨损; 导致摩擦因数变化剧烈的原因可能是因为含油量过低, 从而使形成的润滑油膜不连续。而含水量为 30%甚至更低时, 供油充足, 摩擦因数比较平稳, 几乎接近纯油的摩擦因数(约 0.095), 因而磨损较小。

图 4 不同含水量乳化液润滑时的摩擦因数随时间的变化 (往复频率为 1 Hz)

此外, 图 5 中观测了纯油、含水量为 30%的乳化液、纯水润滑时轴承钢表面磨痕轮廓的微观形貌及元素面分布。图 5a 是纯油润滑时轴承钢摩擦试验后表面磨痕情况, 其与图 5b 中含水量为 30%的乳化液磨痕情况基本相似: O 含量在磨痕区与非磨痕区未见差异, 说明磨痕区域没有被显著腐蚀; 而元素 S 和 P 在磨痕区域的分布明显较多, 结合润滑油中含 S 和 P 添加剂的存在(美孚 525 润滑油的 S 含量为 0.563 %, P 含量为 0.0434 %), 说明在纯油润滑和含水量为 30%的乳化液润滑情况下, 磨痕区域均有 S 和 P 元素组成的反应膜生成。

图 5c 是纯水润滑时的磨痕区域的微观形貌和元素分布, 与前两者不同, 纯水润滑时磨痕区域 O 的含量有显著的不均匀分布, 分析是 O 含量较高处为腐蚀摩擦产物, 而元素 S 和 P 含量在磨痕区与非磨痕区未见差异, 说明磨痕区域没有含 S 或含 P 的反应膜生成。

由此可知, 在纯油或者含水量为 30%乳化液润滑情况下, 摩擦试验中磨痕区域有反应膜生成, 因此减摩抗磨效果比较明显; 而以纯水为润滑的磨痕中不仅没有保护的反应膜生成, 反而由于腐蚀磨损

使得摩擦因数变化剧烈, 且磨损量较其他两种情况显著增大。

图 5 不同含水量乳化液润滑时轴承钢表面磨痕轮廓的微观形貌及元素面分布

3 理论分析

根据 Stricbeck 曲线, 润滑液的黏度是影响其摩擦性能的主要因素之一^[10-12]。因此对于不同含水量乳化液的黏度进行了测试, 其结果如图 6 所示。由黏度随剪切速率的曲线结果显示, 黏度随着剪切速率的变化几乎不发生变化, 因此认为乳化液均是牛顿流体。

此外, 对比不同含水量乳化液的黏度情况(图 6

图 6 不同含水量乳化液的黏度与剪切速率的曲线

中的插图)发现,随着含水量逐渐增加,乳化液的黏度先增加后减小。含水量从 0%上升到 30%时,黏度从纯美孚油的 200 mPa·s,增大到 300 mPa·s;当含水量超过 30%,黏度迅速降低,从 300 mPa·s 降低到 1 mPa·s 附近。为进一步解释黏度变化的原因,分析不同含水量乳化液中油滴或水滴的存在情况,试验对不同含水量的乳化液进行了观察。

图 7 是不同含水量乳化液的微液滴形貌及宏观照片。图 7a 是纯油的微观和宏观照片,其结果显示美孚油是黄色透明的液体,未发现微小液滴或气泡的存在;图 7b 和图 7c 分别是含有 1%水和 5%水的乳化液情况,宏观照片显示随着水含量的增大,乳化液颜色由黄色变为白色,且乳化水滴数目

明显增多,但尺寸基本不变,约为 10 μm 。当含水量超过 30%时,油水乳化液的连续相由油相转变为水相,乳化油滴的数量也逐渐减小,乳化液的颜色也从乳白色逐渐变白色透明。因此,油水乳化液的黏度随着含水量的增加先增加后减小是由于当含水量低于 30%时,润滑液为油包水型乳化液,并且随着含水量的逐渐增加,乳化液中的乳化水滴数量也随着增加(图 7a~7d),乳化液的内摩擦阻力增大,从而导致黏度增大;而含水量高于 30%时,润滑液从油包水转变为水包油型乳化液,并随着含水量的增加乳化油滴的数量减少(图 7e~7g),从而导致黏度减小。这与相关文献报道的试验规律^[4, 13]是一致的。

图 7 不同含水量乳化液的微液滴形貌及宏观照片

尽管不同含水量的润滑液黏度相差甚远,其润滑效果却相当(图 1)。分析主要原因是接触区的油水乳化液的黏度与宏观黏度不同,因此不能由宏观的乳化液黏度来反映其油膜厚度与承载情况。由图 8 所示,在空气中,轴承钢表面对于水和油的接触角分别为 $45.6^{\circ} \pm 1.9^{\circ}$ 和 $12.3^{\circ} \pm 1.5^{\circ}$,表现出亲水亲油性质。轴承钢在油中水滴的接触角为 $158.7^{\circ} \pm 0.4^{\circ}$,表现为油下超疏水状态。而水中油滴在轴承钢表面的接触角为 $106.0^{\circ} \pm 1.2^{\circ}$,表面为水下疏油状态。

可见,无论是在空气中还是在液下,油对于轴承钢表面都表现出了更好的润湿性。因此,当油包水或水包油乳化液进入润滑接触区时,由于液下超疏水性质,水相极易被挤出接触区,而乳化液中的

油滴会优先被轴承钢表面捕获而在接触区周围形成

图 8 美孚润滑油或蒸馏水于空气及介质中在轴承钢表面的润湿情况

油池,从而起到承载和润滑效果。由于边界润滑油膜厚度一般小于 100 nm,接触区所需油量较少,因此当含油量只有 0.5%时也能形成油池,达到和纯油相当的润滑效果。前人将油水分子在固体界面上的行为,进一步归纳为竞争润湿理论^[7-8];通过对油水乳化液成膜特性的系统研究,发现水中含有极微量的油,其成膜能力即可远高于纯水的成膜能力,这与本文的试验现象及结论相互印证。但考虑到润滑油膜的稳定性和持续作用,实际摩擦过程中仍需要含水量为 30%或更低时的乳化液才能实现良好且稳定的润滑效果。

4 结论

(1) 研究了不同水含量对于油水混合体系边界润滑性能及磨损状况的影响,发现在含水量低于 99.75%的乳化液中,其摩擦因数与纯油相近,但磨损状况较纯油差;综合摩擦因数与磨损量测试,认为含水量为 30%的乳化液,其减摩抗磨效果接近纯油润滑的情况。

(2) 通过黏度和润湿行为的观测,给出了不同含水量油水乳化液润滑机制的原理分析。一方面,乳化液的体相黏度并不是影响其润滑行为的主要因素,分析其原因是体相黏度与其接触区的间隙黏度并不相同。另一方面,与水相比,油对于轴承钢表面表现出更好的润湿性;当乳化液进入润滑接触区时,由于液下超疏水质,水相极易被挤出接触区,而油相则趋向于润湿在试样表面,形成润滑油膜,从而起到承载和润滑效果。因而极微量的油在水中即可起到较好的润滑效果;但考虑到油膜的稳定性和磨损,实际摩擦过程中需要含水量为 30%或更低时的乳化液才能实现良好且稳定的减摩抗磨效果。

参 考 文 献

- [1] 汤超. 高速线材精轧机油膜轴承油研制[J]. 传动技术, 2006(2): 44-48.
TANG Chao. The developing of high speed wire and rod mill oil[J]. Drive System Technique, 2006(2): 44-48
- [2] 杨莹, 路长厚. 水包油乳化液润滑的动静压轴承静特性研究[J]. 润滑与密封, 2008, 33(7): 25-27.
YANG Ying, LU Changhou. Research on the static performance of hybrid bearing lubricated with the emulsion of oil in water[J]. Lubrication Engineering, 2008, 33(7): 25-27.
- [3] ELIAS H, JEAN B, MICHEL F. Effects of water

contamination of lubricants on hydrodynamic lubrication: rheological and thermal modeling[J]. Journal of Tribology, 2013, 135: 41707.

- [4] 王涛, 王优强, 王建, 等. 油水两相流润滑轧机油膜轴承的摩擦行为分析[J]. 表面技术, 2016, 45(10): 89-95.
WANG Tao, WANG Youqiang, WANG Jian, et al. Friction behavior of oil film bearing in oil-water two-phase flow lubricated rolling mill[J]. Surface Technology, 2016, 45(10): 89-95.
- [5] JOSLYN H, CHRISTOPHE P, LEON J, et al. High-speed elastohydrodynamic lubrication by a dilute oil-in-water emulsion[J]. Tribology Transactions, 2018, 61(2): 287-294.
- [6] BENNER J J, SADEGHI F, HOEPRICH M R, et al. Lubricating properties of water in oil emulsions[J]. Journal of Tribology, 2006, 128: 296-311.
- [7] MA Liran, LUO Jianbin, ZHANG Chenhui. Effect of solid surface on the formation of thin confined lubricating film of water with micro-content of oil[J]. Applied Surface Science, 2010, 256: 6574-6579.
- [8] 马丽然, 雒建斌. 高水基乳化液成膜特性及机理研究[J]. 机械工程学报, 2013, 49(1): 80.
MA Liran. LUO Jianbin. Research on the lubricating characteristics and mechanisms of aqueous emulsions[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(1): 80.
- [9] LIANG He, GUO Dan, MA Liran, et al. Investigation of film formation mechanism of oil-in-water (O/W) emulsions at high speeds[J]. Tribology International, 2017, 109: 428-434.
- [10] 温诗铸, 黄平. 摩擦学原理 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
WEN Shizhu, HUANG Ping. Principles of tribology [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002.
- [11] 王慰祖, 黄平. 不同表面粗糙度的摩擦副润滑状态的 Stribeck 曲线研究[J]. 摩擦学学报, 2004(3): 254-257.
WANG Weizu, HUANG Ping. Study on the lubrication state of frictional pairs with different surface roughness based on stribeck curves[J]. Tribology, 2004(3): 254-257.
- [12] 李鹤尊, 张晓昊. 利用 Stribeck 曲线评价润滑油性能的方法研究[J]. 润滑油, 2009, 24(5): 61-64.
LI Hezun, ZHANG Xiaohao. Study on the evaluation method of lubricating oils based on stribeck curves[J]. Lubricating Oil, 2009, 24(5): 61-64.
- [13] 胡志华, 刘磊, 周芳德, 等. 油水两相乳化液流动特性的试验研究[J]. 上海交通大学学报, 2005(2): 314-316.
HU Zhihua, LIU Lei, ZHOU Fangde, et al. An

experimental study on the flow characteristics for oil-water emulsions[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2005(2): 314-316.

作者简介: 刘宸旭, 男, 1991 年生, 博士研究生。主要研究方向是超精表面加工技术、工业润滑介质及其润滑机理。

E-mail: liuchenxu19910407@163.com

陈朝浪, 男, 1995 年出生, 博士研究生。主要研究方向是超精表面加工技术、工业润滑介质及其润滑机理。

E-mail: clchen100@163.com

戴媛静(通信作者), 女, 1977 年出生, 高级工程师。主要研究方向是超精表面加工技术、工业润滑介质及其润滑机理。

E-mail: daiyj@tsinghua-tj.org