DOI: 10.3901/JME.2018.03.095

弹流接触单液滴润滑特性分析*

李书义 郭峰 栗心明

(青岛理工大学机械工程学院 青岛 266520)

摘要: 在油气润滑系统中, 润滑油以分散的微油滴来为摩擦副供油建立油膜。不同的固-液界面形成不同的微液滴铺展半径。基于此建立了简化的单个微油滴供油弹流润滑模型, 模拟了定体积微油滴润滑成膜过程。结果表明: 一定体积的微油滴供油时, 其润滑效果与其初始铺展半径有关, 存在一定范围铺展半径使接触区具有良好成膜能力; 最佳铺展半径范围受卷吸速度和润滑油黏度影响。

关键词: 油气润滑; 微油滴; 弹流润滑; 扩展

中图分类号: TH117

Analysis of Lubrication Characteristic of Single Droplet in the Elastohydrodynamic Lubrication Contact

LI Shuyi GUO Feng LI Xinming

(School of Mechanical Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266520)

Abstract: In oil-air lubrication lubricants in the form of micro oil droplets are supplied to tribo-pairs and build oil film. Different solid-liquid interface leads to different spreading radius of micro oil droplet. With supplying a single micro oil droplet an EHL model is built to numerically simulate the process of building lubricant film. The results show that when the volume of micro oil droplet is unchanged, lubrication effect is related to initial spreading radius of micro oil droplet, and there is a certain range of spreading radius which enables efficient film forming. The desired spreading radius is affected by the entrainment velocity and oil viscosity.

Key words: oil-air lubrication; micro oil droplet; elastohydrodynamic lubrication (EHL); expansion

0 前言

为了避免相互运动的部件间产生磨损, 常使用大量润滑剂, 但真正用于建立润滑油膜的润滑剂用量极少, 造成了润滑剂浪费和环境污染。油气润滑是一种供油精确可控的润滑方式, 已成为高速轴承及齿轮等零部件的最佳润滑选择^[1-2]。

近年来的油气润滑研究多集中于高速轴承的工业应用, 并且多以温升来评测油气润滑系统的效率, 分析系统参数(如预载荷、供油量、压缩空气流速、转速^[3]、管长、润滑周期^[4]、供油间隔、润滑油黏度和喷嘴结构^[5]等)的影响, 找到油气润滑系

统的最适工况参数^[6]。但这些研究并未涉及到油气润滑条件下的润滑学基础问题。在实际油气润滑系统中, 润滑油大都以分散的微油滴形式随着卷吸运动进入到接触区并形成润滑油膜, 这不同于经典弹流理论的供油假设, 因此其成膜特性会不同于经典的润滑理论。针对弹流润滑的单个微油滴供油, 王少朋等^[7]采用光干涉方法进行了初步探讨, 得到了一些有意义的结果。但是关于微油滴供油条件下弹流润滑机理的理论研究尚不多见。受固-液界面作用的影响, 微液滴在不同的固体表面(或不同润滑液体在同一固体表面)将有不同的面体比或铺展半径。本文将从单个微油滴供油的弹流润滑理论计算出发, 研究在不同初始铺展半径条件下固定体积微油滴对接触区润滑成膜特性的影响, 给出具有良好润滑性能的最适初始铺展半径范围。

* 教育部博士点基金(20133721110002)和山东省优秀中青年科学家奖励基金(BS2014ZZ004)资助项目。20170502 收到初稿, 20171106 收到修改稿

1 理论模型

图 1a 为在作者实验室测量得到的实际油气润滑系统中润滑油喷射到固体表面的油滴显微分布图, 油滴分布较为分散, 大小不一, 图 1b 为接触角测量仪得到的微油滴在固体表面的侧视图。故本文将微油滴的外形定义为球面状, 如图 1c, 微油滴的高为 R_c 、半径为 R , 则供油膜厚方程为

图 1 油气润滑系统中微油滴形貌和简化模型

$$h_{oil} = \begin{cases} h_{in} + R_c \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{x - x_0(t)}{R} \right)^2 - \left(\frac{y}{R} \right)^2} & (x - x_0(t))^2 + y^2 \leq R^2 \\ h_{in} & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

式中, h_{in} 为固体表面残留油层厚度(m), 此处设为 10 nm; $x_0(t)$ 为微液滴与球之间中心距离(m)。

微油滴供油为定量供油方式, 润滑方程的求解要考虑入口区固体表面的油层分布, 因此采用考虑供油的修正的 Reynolds 方程^[8-11]

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\rho h^3}{\eta} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\rho h^3}{\eta} \frac{\partial p}{\partial y} \right) = 12u_e \frac{\partial}{\partial x} (\rho \theta h) + 12 \frac{\partial}{\partial t} (\rho \theta h) \quad (2)$$

式中, p 为油膜压力; h 为两固体表面间隙; ρ 为润滑油的密度; η 为润滑油黏度, u_e 为润滑表面沿 x 方向的卷吸速度, θ 为部分油膜比例, 其表达式为

$$\theta(x, y, t) = \frac{h_f(x, y, t)}{h(x, y, t)} \quad (3)$$

式中, h_f 为油层总厚度。

方程式(2)补充的求解条件为

$$\begin{cases} p(x, y, t) [1 - \theta(x, y, t)] = 0 \\ p(x, y, t) \geq 0 \quad 0 < \theta(x, y, t) \leq 1 \end{cases} \quad (4)$$

另外, 由式(1)、(3)和(4)可知, 供油膜厚(h_{oil})需要满足小于等于两固定表面间隙值(h)。

为了得到唯一解, 将 θ 和 p 作为两个独立变量: $p(x, y, t) > 0$ 时, $\theta(x, y, t) = 1$; $p(x, y, t) = 0$ 时, $0 < \theta(x, y, t) < 1$ 。

方程式(2)的边界条件为

$$\begin{cases} p(x_{in}, y, t) = p(x_{out}, y, t) = 0 \\ p(x, y_{in}, t) = p(x, y_{out}, t) = 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中, x_{in} 、 x_{out} 、 y_{in} 和 y_{out} 均为计算域的边界坐标。

两固体间表面隙方程

$$h(x, y, t) = h_0(t) + \frac{x^2}{2R_x} + \frac{y^2}{2R_y} + \frac{2}{\pi E'} \iint_{\Omega} \frac{p(x', y', t)}{\sqrt{(x - x')^2 + (y - y')^2}} dx' dy' \quad (6)$$

式中, Ω 为计算全域; $h_0(t)$ 为刚体接近距离; E' 为综合弹性模量。

黏压关系

$$\eta = \eta_0 \exp \left\{ A_1 \left[(1 + A_2 p)^{z_0} - 1 \right] \right\} \quad (7)$$

式中, η_0 为环境黏度, $A_1 = \ln \eta_0 + 9.67$, $A_2 = 5.1 \times 10^{-9} \text{ Pa}^{-1}$, $z_0 = \alpha / (A_1 A_2)$, α 为 Barus 黏压系数(Pa^{-1})。

密压关系

$$\rho = \rho_0 [1 + A_3 p / (1 + A_4 p)] \quad (8)$$

式中, ρ_0 为润滑油的环境密度(kg/m^3), $A_3 = 0.6 \times 10^{-9} \text{ Pa}^{-1}$, $A_4 = 1.7 \times 10^{-9} \text{ Pa}^{-1}$ 。

载荷方程

$$\iint_{\Omega} p dx dy = w \quad (9)$$

式中, w 为外载荷。

数值分析将在方程式(1)~(9)量纲一的基础上进行, 压力和部分油膜比例松弛采用多重网格法, 弹性变形计算采用多重网格积分法。

2 结果与讨论

本文以工程中常见的钢-钢接触工况为例, 微油滴通过整个计算域的过程共划分为 128 个瞬时(NT 为时步数), 固定参数为: $R_x = 12.7 \text{ mm}$, $w = 30 \text{ N}$, $E' = 2.26 \times 10^{11} \text{ Pa}$, $\alpha = 2.2 \times 10^{-8} \text{ Pa}^{-1}$, $\rho_0 = 870 \text{ kg/m}^3$, $x_{\text{in}}/a = -2.5$, $x_{\text{out}}/a = 1.5$, $y_{\text{in}}/a = -2.0$, $y_{\text{out}}/a = 2.0$ (a 为赫兹接触半径), $x_0(0) = x_{\text{in}} - R_c$ 。

卷吸速度 $u_e = 1.0 \text{ m/s}$ 、润滑油黏度 $\eta_0 = 0.08 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 工况下, 图 2 给出了初始半径 $R/a = 0.2$ 、高度 $R_c = 10 \text{ }\mu\text{m}$ (体积约为 15.5 pL , 接触角约 40.4°) 的微油滴通过接触区时八个瞬时的固体间隙伪干涉图与 $y/a = 0$ 截面上膜厚和压力曲线。由伪干涉图看出, 微油滴随着卷吸运动逐渐进入接触区, 其表面就会与球壁产生接触($NT = 20$), 润滑油就会受压扩展, 尤其在 y 轴方向上的尺寸不断增大, 但由于卷吸速度非常快, 润滑油受压扩展时间十分有限, 使其在

y 轴方向上扩展并不充分($NT = 50$, 定义接触入口区域润滑油扩展距离为 L/a), 由于在弹流润滑中入口区域的油池分布情况对油膜的形成产生很大影响^[12], 造成了接触区局部成膜($NT = 90$), 在 y 轴方向上最大成膜区间约在 ± 0.88 之间, 随后微油滴脱离接触区($NT = 120$)。可见, 此工况微油滴供油未能形成有效润滑。值得说明的是, 模型计算时忽略了表面张力/毛细力的影响。这是由于微油滴通过接触区的时间都在毫秒级, 并且接触油膜压力大, 而仅在表面张力/毛细力作用下微油滴(PAO08)扩展整个接触区所需时间在数秒以上^[7], 表面张力/毛细力作用来不及体现微油滴就已经通过了接触区, 故沿 y 轴方向的润滑油扩展主要来自于压力流动。另外, 由曲线图可看出, 微油滴通过接触区时对截面上膜厚和压力的影响较大, 截面膜厚最大改变量接近 300 nm , 充分分离了接触表面, 而压力最大改变量约为 0.22 GPa , 却造成了局部压力集中现象。因此, 此工况下微油滴供油未能起到良好润滑效果。

图2 微油滴通过接触区时八个瞬时的固体间隙伪干涉图与 $y/a = 0$ 截面膜厚和压力曲线

实际油气润滑系统中,微油滴形态是存在差异的,其面体比与油-固界面性质有关,或者说微油滴的初始半径 R/a 与油-固界面性质相关,那么初始半径是否会影响微油滴接触区成膜特性。图3给出了三位置点(见图2, $NT = 90$, 位于 $x/a = 0$ 截面上中心点 $A(0.0,0.0)$ 、半中点 $B(0.0,0.5)$ 和边界点 $C(0.0,1.0)$)最大膜厚随微油滴初始半径的变化曲线,供油体积 $V \approx 15.5 \text{ pL}$ 、卷吸速度 $u_e = 1.0 \text{ m/s}$ 、润滑油黏度 $\eta_0 = 0.08 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 。微油滴通过接触区时,具有成膜能力的位置点膜厚都会产生一个上升下降的过程,位置点最大膜厚就是此过程中此点上升的最高值。由图可以看出,随着微油滴初始半径的增加,中心点 A 和半中点 B 变化趋势相似,最大膜厚呈现先略微上升后下降,且数值上两者都在 170 nm 以上,达到分离球面接触的目的;而边界点 C 最大膜厚在开始阶段($R/a \leq 0.25$)未产生任何改变,即微油滴供油未能在接触区边界附近成膜,随后此点才出现膜厚并急剧增加,达到一定值后增加趋势变缓而后略微减小,也就是说,只有微油滴初始半径 $R/a > 0.25$ 后,才能保证整个接触区都会经历润滑成膜过程。这是由于接触区入口润滑油最大扩展距离 $L_{\max}/a$ 和微油滴初始高度 R_c 也会随初始半径发生改变(图4),开始阶段接触区入口润滑油最大扩展距离

图3 三位置点最大膜厚随微油滴初始半径的变化曲线

图4 接触区入口润滑油扩展距离和微油滴初始高度随初始半径的变化曲线

小,达不到接触区全部成膜条件,故边界点 C 膜厚未发生变化,随着润滑油最大扩展距离的增加,逐渐满足接触区全部成膜需求,边界点 C 出现膜厚变化,整个接触都具有了成膜能力,而此阶段微油滴初始高度又具有一定数值,接触区入口油池情况良好,故在这一阶段中心点 A 和半中点 B 处最大膜厚都出现略微升高的趋势,而后随着微油滴初始高度的逐渐降低,接触区总体成膜厚度也相应出现了下降趋势。可见,即使相同体积的微油滴供油,由于其初始半径的不同使得接触区成膜性产生差异,也就是说微油滴面体比的改变会产生不同的润滑效果。这就要求微油滴供油时,首先要保证整个接触区形成有效油膜;其次接触区油膜厚度应达到一定高度,认定各点膜厚值能达到其最大值的85%以上较为合理。这里未对接触区成膜后油膜维持时间进行讨论,由于油膜维持时间很大程度受到多个微油滴连续程度的影响,而本文主要针对单个微油滴供油下接触区成膜能力的讨论。这样,此工况下微油滴最适初始半径 $R/a \approx 0.36 \sim 0.74$ 。

2.1 微油滴体积的影响

图5给出了不同供油体积下中心点 A 和边界点 C 最大膜厚随微油滴初始半径的变化曲线,卷吸速度 $u_e = 1.0 \text{ m/s}$ 、润滑油黏度 $\eta_0 = 0.08 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 。

图5 不同供油体积下两位置点最大膜厚随微油滴初始半径的变化曲线

由图可看出,随着微油滴初始半径的增加,供油体积 $V \approx 31.0 \text{ pL}$ 时,中心点 A 和边界点 C 最大膜厚曲线变化平缓,相对改变量小,依定义的膜厚可允许变化范围判定,微油滴最适初始半径范围 $R/a \approx 0.2 \sim 1.0$,改变区间大,即使微油滴初始半径很小情况下整个接触区也都会经历成膜过程,这是由于供油体积大,微油滴与球壁接触后在 y 轴上受压扩展距离大,能满足整个接触区成膜条件;供油体积 $V \approx 7.71 \text{ pL}$ 时,中心点 A 最大膜厚曲线发生显

著变化, 相对改变量大, 而边界点 C 最大膜厚在初始半径 $R/a \leq 0.5$ 时无变化, 也就是说接触区边界位置不具有成膜能力, 故微油滴最适初始半径仅在 $R/a \approx 0.6$ 左右, 最佳初始半径变化范围十分小, 为了得到良好润滑效果需对微油滴初始状态做严格控制, 做到既要使润滑油在 y 轴上具有一定的受压扩展距离, 又要保证入口油池具有一定高度; 而供油体积 $V \approx 15.5 \text{ pL}$ 时, 微油滴最适半径变化范围位于两者之间。可见, 微油滴供油体积对接触区成膜性的影响明显, 在保证接触区具有良好成膜能力的前提下, 微油滴供油体积越大, 其初始半径可允许变化范围越大; 反之, 微油滴初始半径可变化范围越小。

2.2 卷吸速度的影响

图 6 给出了不同卷吸速度下中心点 A 和边界点 C 最大膜厚随微油滴初始半径的变化曲线, 供油体积 $V \approx 15.5 \text{ pL}$ 、润滑油黏度 $\eta_0 = 0.08 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 。

图 6 不同卷吸速度下两位置点最大膜厚随微油滴初始半径的变化曲线

由图 6 可看出, 随着微油滴初始半径的增加, 卷吸速度 $u_e = 0.5 \text{ m/s}$ 时, 中心点 A 和边界点 C 最大膜厚曲线变化平缓, 相对改变量小, 依定义的膜厚可允许变化范围判定, 微油滴最适初始半径范围 $R/a \approx 0.2 \sim 0.8$, 变化范围大, 即使微油滴初始半径很小情况下接触区各点也会出现油膜改变, 这是由于卷吸速度较小工况下, 微油滴与球壁接触后润滑油受压扩展时间相对充分, 扩展距离大, 达到了整个接触区成膜要求; 卷吸速度 $u_e = 2.0 \text{ m/s}$ 时, 中心点 A 最大膜厚曲线发生显著变化, 相对改变量大, 而边界点 C 最大膜厚在初始半径 $R/a \leq 0.4$ 时无变化, 部分接触区没有经历成膜过程, 故微油滴最适初始半径范围 $R/a \approx 0.55 \sim 0.70$, 可变范围小, 为实现理想润滑状态需对微油滴初始状态的控制更为严格; 而卷吸速度 $u_e = 1.0 \text{ m/s}$ 时, 微油滴最适半径变化范围位于两者之间。可见, 同等体积供油条件下,

卷吸速度会显著影响接触区成膜性, 在保证接触区具有良好成膜能力的前提下, 卷吸速度越小, 微油滴最适初始半径可允许变化范围越大; 反之, 微油滴最适初始半径可变化范围很小。

2.3 润滑油黏度的影响

图 7 给出了不同润滑油黏度下中心点 A 和边界点 C 最大膜厚随微油滴初始半径的变化曲线, 供油体积 $V \approx 15.5 \text{ pL}$ 、卷吸速度 $u_e = 1.0 \text{ m/s}$ 。

图 7 不同润滑油黏度下两位置点最大膜厚随微油滴初始半径的变化曲线

由图 7 可看出, 随着微油滴初始半径的增加, 润滑油黏度 $\eta_0 = 0.03 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 时, 中心点 A 和边界点 C 最大膜厚曲线变化平缓, 相对改变量小, 依定义的膜厚可允许变化范围判定, 微油滴最适初始半径范围 $R/a \approx 0.2 \sim 0.9$, 可允许变化范围广, 即使微油滴初始半径很小情况下也能实现接触区有效润滑, 由于润滑油的黏度低, 其流动性好, 微油滴与球壁接触后受压扩展距离大, 足够使接触区形成完整油膜; 润滑油黏度 $\eta_0 = 0.20 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 时, 中心点 A 最大膜厚曲线发生显著变化, 相对改变量大, 而边界点 C 最大膜厚在初始半径 $R/a \leq 0.5$ 时未发生变化, 不能使整个接触区都具有成膜过程, 故微油滴最适初始半径范围 $R/a \approx 0.57 \sim 0.69$, 允许变化幅度小, 需严格控制微油滴初始状态才能得到有效润滑; 而润滑油黏度 $\eta_0 = 0.08 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 时, 微油滴最适半径变化范围位于两者之间。可见, 同等体积微油滴供油时, 润滑油黏度也是接触区有效成膜的重要影响因素, 在保证接触区具有良好成膜能力的前提下, 微油滴黏度越小, 微油滴初始半径可允许变化范围越大; 反之, 微油滴初始半径可变化范围很小。

3 结论

(1) 同等体积微油滴供油时, 其初始铺展半径

会影响到接触区润滑效果,若微油滴初始半径选择不适,可能会造成接触区部分区域不能形成有效油膜。为了得到良好接触区润滑成膜效果,微油滴初始半径存在一定最适变化范围。

(2) 供油体积、卷吸速度和润滑油黏度的变化,会使微油滴最适初始半径变化范围发生改变,供油体积越大、卷吸速度越小或润滑油黏度越低,微油滴最适半径范围越广,反之微油滴最适半径可允许变化幅度小,为了得到良好的润滑效果就需对其初始形态控制更为严格。

(3) 本文的结果为油气润滑系统设计提供了新的基础数据,具有一定的工程指导意义。

参 考 文 献

- [1] HOHN B R, MICHAELIS K, OTTO H P. Minimised gear lubrication by a minimum oil/air flow rate[J]. *Wear*, 2009, 266(3-4): 461-467.
- [2] DUDOROV E A, RUZANOV A I, ZHIRKIN Y V. Introducing an oil-air lubrication system at a continuous-casting machine[J]. *Steel in Translation*, 2009, 39(4): 351-354.
- [3] JENG Y R, GAO C C. Investigation of the ball-bearing temperature rise under an oil-air lubrication system[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 2001, 215(2): 139-148.
- [4] WU C H, KUNG Y T. A parametric study on oil/air lubrication of a high-speed spindle[J]. *Precision Engineering*, 2005, 29(2): 162-167.
- [5] JIANG S, MAO H. Investigation of the high speed rolling bearing temperature rise with oil-air lubrication[J]. *Journal of Tribology*, 2011, 133(2): 021101.
- [6] MOON J H, LEE H D, KIM S I. Lubrication characteristics analysis of an air-oil lubrication system using an experimental design method[J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2013, 14(2): 289-297.
- [7] 王少鹏. 微量供油条件下润滑油膜特性实验研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2014.
WANG Shaopeng. Experimental studies on the lubrication films with minimal quantity oil feeding[D]. Qingdao: Qingdao Technological University, 2014.
- [8] WIJNANT Y H. Contact dynamics in the field of elastohydrodynamic lubrication[D]. Enschede: University of Twente, 1998.
- [9] DAMIENS B, VENNER C H, CANN P M E, et al. Starved lubrication of elliptical EHD contacts[J]. *Journal of Tribology*, 2004, 126(1): 105-111.
- [10] 谭洪恩, 杨沛然, 尹昌磊. 特殊供油条件下点接触弹流润滑乏油分析[J]. *摩擦学报*, 2007, 27(4): 357-361.
TAN Hongen, YANG Peiran, YIN Changlei. Analysis of the oil starvation in EHL point contacts under a special oil-supply condition[J]. *Tribology*, 2007, 27(4): 357-361.
- [11] YIN Changlei, YANG Peiran, TAN Hongen, et al. Thermal elastohydrodynamic lubrication of starved elliptical contacts[J]. *Tribology International*, 2009, 42(6): 964-974.
- [12] CHEVALIER F, LUBRECHT A A, CANN P M E, et al. Film thickness in starved EHL point contacts[J]. *Journal of Tribology*, 1998, 120(1): 126-133.

作者简介: 李书义, 男, 1986 年出生, 博士研究生。主要研究方向为弹流润滑。

E-mail: lishuyi1986@126.com

郭峰(通信作者), 男, 1968 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为摩擦学。

E-mail: mefguo@163.com