离散供油弹流润滑条件下油滴间距临界值的研究

李书义, 郭峰*, 栗心明, 刘成龙

青岛理工大学机械工程学院, 青岛 266520

* E-mail: mefguo@163.com

收稿日期: 2017-11-28; 接受日期: 2018-06-22; 网络版发表日期: 2019-06-14

国家自然科学基金(批准号: 51775286, 51405525)资助项目

摘要 在离散油滴供油条件下, 建立了相应的简化弹流润滑模型, 数值模拟了一列油滴通过点接触弹流接触区的全过程. 结果表明: 离散多油滴供油时, 接触区润滑油膜厚度会经历3个阶段, 即上升期、振荡期和稳定期; 相邻油滴的间距影响到接触区润滑状态, 过大的间距会导致接触区润滑失效. 为保证接触区的连续有效润滑, 油滴间距存在一个临界值, 需保证离散油滴间距不应大于此临界值; 卷吸速度、润滑油黏度和载荷都会影响到离散油滴的润滑成膜特性, 进而改变油滴间距的临界值.

关键词 油滴, 油气润滑, 弹流润滑, 限量润滑, 临界间距

1 引言

润滑的主要目的是在相互运动表面间形成具有承载能力的油膜, 来降低摩擦磨损、延长零件寿命. 为了防止润滑失效, 在工业润滑中润滑油的用量多趋于保守, 即采用“多=安全”的策略, 造成了供油过剩. 基于当今社会对节能和环保的需求^[1,2], 或机械系统自身运行的技术要求^[3], 研究人员越来越关注润滑油的用量, 希望在限量或可控供油条件下实现理想的润滑. 如油气润滑就是一种可控的供油方式, 润滑油以离散油滴形式供给接触副, 已成为高速轴承及列车轮缘等部件的最佳润滑选择^[3-6].

近年, 高速主轴承的油气润滑引起了许多学者的兴趣^[7-10]. 大部分研究采用轴承的温升来评估工作

参数对油气润滑的影响, 诸如供油间隔、润滑油黏度、喷嘴结构^[3], 预载荷、供油量、压缩空气流速、旋转速度^[8]; 输油管长、润滑周期^[9], 这些研究的主要目的是确定油气润滑系统的最佳工况参数^[10], 但并未涉及油气润滑系统中末端喷射出的油滴在摩擦副表面建立油膜等基础问题. 另外, 在零件的飞溅润滑中, 润滑油也多以油滴形式进行润滑成膜; 臧淑燕等人^[11]发现在限量供油下低表面能表面润滑油会以油滴形式供给运动副(如图1). Liang等人^[12]研究了油气润滑下接触区弹流油膜的形成, 讨论了油滴和高压空气的作用; 在油滴供油条件下, Qian等人^[13]利用球-盘接触测量了入口油池和中心膜厚变化情况, 但实验中油滴的尺寸较大. 另外, Zhang等人^[14]分析了单个油滴大小及其位置对润滑成膜的影响; 刘成龙等人^[15]利用光干涉技术

引用格式: 李书义, 郭峰, 栗心明, 等. 离散供油弹流润滑条件下油滴间距临界值的研究. 中国科学: 技术科学, 2019, 49: 767-777

Li S Y, Guo F, Li X M, et al. Study on the critical value of oil droplet spacing distance under conditions of discrete droplet supply in elastohydrodynamic lubrication (in Chinese). Sci Sin Tech, 2019, 49: 767-777, doi: 10.1360/N092017-00412

图1 低表面能(AF)润滑轨道上润滑油分布(PAO₄/1 μL)^[11]

测量了单个油滴静态铺展和动态通过接触区的过程; Li等人^[16]以实验观测到特殊的凹陷油膜情况对单个油滴成膜特性展开了分析, 着重分析了卷吸速度和润滑油黏度的影响。以上分析都是针对于单个油滴润滑行

为的研究, 而实际润滑系统中是众多离散油滴供油, 这样就有必要对离散的多油滴润滑特性展开分析。本文研究了一系列离散油滴供油的弹性流体动力润滑特性, 分析了相邻油滴间距、卷吸速度、润滑油黏度和载荷对多油滴润滑行为的影响。

2 理论模型

图2(a)为固体表面上油滴的形态, 可近似将其定义为球缺状。理论分析中, 供油为接触中心线上均匀离散分布的一系列油滴(图2(b)), 其基圆半径为 R , 高为 R_c ($R_c = R(1 - \cos\beta)/\sin\beta$)。

供油膜厚方程:

$$h_{oil} = \begin{cases} h_m + R \times \sqrt{\left(\frac{1}{\sin\beta}\right)^2 - \left(\frac{x - x_0(t)}{R}\right)^2 - \left(\frac{y}{R}\right)^2} - R \cot\beta \\ + R \times \sqrt{\left(\frac{1}{\sin\beta}\right)^2 - \left(\frac{x - [x_0(t) - (2-1) \times x_L]}{R}\right)^2 - \left(\frac{y}{R}\right)^2} - R \cot\beta \\ + \dots + R \times \sqrt{\left(\frac{1}{\sin\beta}\right)^2 - \left(\frac{x - [x_0(t) - (N-1) \times x_L]}{R}\right)^2 - \left(\frac{y}{R}\right)^2} - R \cot\beta, \\ \left(\left(\frac{x - x_0(t)}{R}\right)^2 + \left(\frac{y}{R}\right)^2 \leq 1, \text{ and } \left(\frac{x - [x_0(t) - (N-1) \times x_L]}{R}\right)^2 + \left(\frac{y}{R}\right)^2 \leq 1\right), \\ h_m, \quad (\text{其他}), \end{cases} \quad (1)$$

式中, h_{oil} 为供油厚度(m); h_m 为固体表面残留油层厚度(m); $x_0(t)$ 为油滴与球之间中心距离(m); x_L 为相邻油滴间距(m)。

连续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, 因此采用乏油条件下修正的Reynolds方程^[17,18]:

图2 油滴建模(a)和多油滴供油简化模型(b)

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

式中, p 为油膜压力(Pa), h 为两润滑固体表面间总间隙(m), ρ 为润滑油的密度(kg/m^3); η 为润滑油黏度(Pa s), u_e 为润滑表面沿 x 方向的卷吸速度(m/s), 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(m).

方程(2)补充的求解条件为

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

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(2)的边界条件为

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

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

总间隙方程:

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

式中, Ω 为计算全域, $h_0(t)$ 为刚体膜厚(m); E' 为综合弹性模量(Pa).

黏压关系:

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

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

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(N).

数值分析将在方程(1)~(9)无量纲的基础上进行, 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^[19,20].

收敛准则如下:

$$\frac{\sum |p_i^{\text{new}} - p_i^{\text{old}}|}{\sum p_i^{\text{new}}} < 0.0001,$$

$$\frac{\iint_{\Omega} p dx dy}{w} < 0.0001.$$

3 结果与讨论

本文研究主要针对于离散油滴供油条件下点接触润滑问题, 固定参数为 $h_{\text{in}} = 10 \text{ nm}$, $E' = 1.17 \times 10^{11} \text{ Pa}$, $R_x = 12.7 \text{ mm}$, $\alpha = 2.2 \times 10^{-8} \text{ Pa}^{-1}$, $\rho_0 = 870 \text{ kg/m}^3$, $x_{\text{out}}/a = 1.5$, $x_{\text{in}}/a = -2.5$, $y_{\text{out}}/a = 2.0$, $y_{\text{in}}/a = -2.0$ (a 为赫兹接触半径(m)), 油滴的体积和接触角是恒定的 ($V \approx 61.03 \text{ pL}$ 和 $\beta = 10^\circ$), 油滴之间中心距是等距布置, 且首个油滴初始位置 $x_0(0) = x_{\text{in}} - R$.

图3为离散多油滴供油时部分瞬时的固体间隙伪干涉图, 其中油滴间距 $x_L = 5R$ 、卷吸速度 $u_e = 1.0 \text{ m/s}$ 、润滑油黏度 $\eta_0 = 0.08 \text{ Pa s}$ 、载荷 $w = 30 \text{ N}$. 由图可清晰地看出, 一系列离散油滴依次穿过接触区时润滑状态的变化. 首先油滴会随着卷吸运动逐渐进入接触区, 第一个油滴在某一刻与球壁产生接触, 受到来自球壁的压力而铺展^[16], 即“挤压铺展”, 油-固体界面不断增大, 在接触区入口处形成油池, 为接触区成膜提供所需的润滑油, 后续油滴会陆续地溶合到入口油池内, 补充接触区成膜消耗的润滑油, 以此来维持接触区润滑状态.

为了更准确地了解接触区润滑油膜的变化情况, 图4给出了此工况下中心点A和边界点B膜厚的变化曲线. 由图可看出, 除了中心点膜厚比边界点膜厚数值上大一些, 两点膜厚曲线的变化规律几乎相同. 首先两位置点膜厚会随着油滴进入接触区而逐渐增加并达到膜厚峰值, 但膜厚峰值未能维持, 而是出现微小的波动情况, 膜厚峰值出现次数正好对应于油滴个数, 也就是说, 由于离散多油滴供油导致入口油池内润滑油体积

图3 离散多油滴供油时部分瞬时的伪干涉图($x_L=5R$, $u_e=1.0$ m/s, $\eta_0=0.08$ Pa s, $w=30$ N)

的波动,进而造成接触区润滑膜的变化.根据膜厚曲线变化情况整个过程可大体分为3个部分,即上升期、振荡期和稳定期,而稳定期的数据维持性和重复性最好,是工程润滑中最希望达到的,故本文把稳定期的接触区成膜情况作为分析对象,展开对一系列离散油滴供油润滑特性的分析.

值得说明的是,模型计算时忽略了表面张力/毛细力的影响.这是由于表面张力/毛细力作用下油滴扩展整个接触区所需时间在数秒以上^[21],而文中油滴通过接触区的时间一般都在毫秒级甚至微秒级,且接触油膜压力大,因此忽略表面张力/毛细力作用.

3.1 油滴间距的影响

油滴间距是否会对接触区润滑产生影响呢?仅增大图3工况中油滴间距至 $x_L=6R$,得到图5所示部分瞬时的固体间隙伪干涉图.与图3相比,接触区润滑状态却呈现出明显差异,润滑油膜波动大、稳定性差,尤其其接触区边界部位(如 $NT=150, 300$).这是由于油滴间距的增大,使得后续油滴不能及时补充到入口油池,导致油池在部分时段无法提供充足的润滑油,进而影响到了接触区油膜的维持性.可见,相邻油滴间距会直接影响到接触区润滑状态.

图6给出了不同油滴间距下接触区润滑稳定期的

图 4 离散多油滴供油时中心点膜厚和边界点膜厚变化曲线($x_L=5R$, $u_e=1.0$ m/s, $\eta_0=0.08$ Pa s, $w=30$ N)

中心点膜厚和边界点膜厚的变化曲线. 由图可知, 油滴间距会直接影响到接触区成膜能力, 油滴间距越大, 中心点和边界点处膜厚波动情况越严重; 在油滴间距较小时, 两点膜厚波动情况几乎相同, 但随着油滴间距增大, 两点膜厚波动情况的差距越来越大, 边界点膜厚的波动会更加剧烈. 在工程润滑中, 为防止具有一定粗糙度的运动副润滑失效, 往往要求润滑油膜高于 3 倍的综合粗糙度, 本文设定了有效润滑膜厚 $h_{set}=0.1 \mu\text{m}$, 用此值判定接触区在离散油滴供油条件下的润滑状态, 而实际工况中 h_{set} 的值可视具体情况而定. 接触区润滑油膜厚度不能小于设定的有效润滑膜厚 h_{set} , 否则认定为接触区润滑失效. 由图 6 的中心点最小膜厚 $h_{A,min}$ 和边界点最小膜厚 $h_{B,min}$ 对比, 可以看到起到

图 5 离散多油滴供油时部分瞬时的伪干涉图($x_L=6R$, $u_e=1.0$ m/s, $\eta_0=0.08$ Pa s, $w=30$ N)

图6 不同油滴间距下稳定期的中心点膜厚和边界点膜厚变化曲线($u_c=1.0$ m/s, $\eta_0=0.08$ Pa s, $w=30$ N)

决定作用的为边界点最小膜厚 $h_{B,min}$ ($h_{A,min} > h_{B,min}$), 且数值分析表明在一个周期内边界点发生的最小膜厚等于该周期内整个接触区发生的最小膜厚, 这样边界点最小膜厚 $h_{B,min}$ 大于有效润滑膜厚 h_{set} , 接触区必然处于有效润滑状态。因此, 油滴间距 $x_L=5R$ 和 $x_L=5.5R$ 时, 多油滴供油能够形成有效润滑, 而油滴间距 $x_L=6.0R$ 时, 部分时刻却出现了润滑失效情况, 这是工程润滑中应当避免的。

为了保证接触区能一直处于有效润滑状态, 油滴间距应进行合理控制, 图7给出了接触区润滑稳定期的边界点最小膜厚 $h_{B,min}$ 随着油滴间距的变化曲线。由图可知, 边界点最小膜厚会随着油滴间距的增大而逐渐减小, 特别是在油滴间距 $x_L=5.9R$ 时, 达到有效润滑膜厚 h_{set} 。若继续增大油滴间距, 边界点最小膜厚会小于有效润滑膜厚 h_{set} , 意味着接触区必然会出现润滑失效情况, 也就是说, 油滴间距的临界值为 $x_L=5.9R$ 。因此, 此工况下油滴间距应满足 $x_L \leq 5.9R$, 离散油滴供油才能保证接触区始终处于润滑状态。

3.2 卷吸速度的影响

卷吸速度作为弹流润滑中一个重要影响因素, 同样也会改变离散多油滴润滑状态, 如图8, 仅减小了

图7 边界点最小膜厚随油滴间距的变化曲线($u_c=1.0$ m/s, $\eta_0=0.08$ Pa s, $w=30$ N)

图5工况中卷吸速度, 可接触区润滑状态却明显优于图5工况, 接触区润滑状态稳定, 润滑油膜维持性较好。这是由于卷吸速度较低情况下油滴在接触区入口处受挤压铺展更加充分, 可以形成较大的入口油池^[16], 弥补了因油滴间距大而造成入口油池润滑油补充不及时的情况, 进而使接触区润滑状态得以改善。可见, 卷吸速度可以改变一定油滴间距下离散供油的润滑特性。

图9给出了不同卷吸速度下接触区润滑稳定期的边界点最小膜厚 $h_{B,min}$ 随着油滴间距的变化曲线。由图可知, 3种卷吸速度下, 最小膜厚曲线的总体变化趋势是一致的, 都随着油滴间距的增大而逐渐减小。在油滴间距较小时, 卷吸速度越高油膜厚度越厚, 由于此阶段离散油滴间距较小, 前后油滴溶合程度好, 入口油池可以满足接触区成膜的润滑油供给需求; 可是油滴间距增大到一定程度后, 卷吸速度高的工况会降低油滴的挤压铺展, 使得前后油滴溶合程度变差, 导致入口油池对接触区所需润滑油供应不足, 降低了边界点成膜能力, 故卷吸速度高反而边界点油膜厚度低。重要的是, 3种卷吸速度下边界点最小膜厚 $h_{B,min}$ 达到有效润滑膜厚 h_{set} 的油滴间距临界值是不同的。卷吸速度越低, 可允许的油滴间距临界值就会越大。因此, 可根据实际运行参数, 设计优化供油系统, 控制油滴间距。卷吸速度高的工况, 离散油滴应适当紧密些, 以防止接触区出现润滑失效; 反之, 离散油滴却可以稀疏些, 以提高润滑油的利用率。

图 8 多油滴供油时部分瞬时的伪干涉图($x_L=6R$, $u_e=0.5$ m/s, $\eta_0=0.08$ Pa s, $w=30$ N)

3.3 润滑油黏度的影响

相对图2工况, 润滑油黏度增加至 $\eta_0=0.16$ Pa s, 明显导致接触区润滑状态的不稳定, 润滑油膜波动十分剧烈, 如图10所示. 这是由于润滑油黏度增大后润滑油的流动性变差, 油滴在接触区入口处挤压铺展困难, 导致入口油池尺寸缩小, 降低了润滑油供给的维持性, 进而使接触区润滑状态变化剧烈.

事实上, 在油滴供油润滑中卷吸速度和润滑油黏度都对油滴的铺展有重要影响^[15,16], 并且润滑参数 $\eta_0 u_e$ 是一个重要的影响因素^[22]. 因此, 有必要分析在离散供油条件下油滴临界距离是否取决于润滑参数 $\eta_0 u_e$? 图11给出了油滴间距临界值随着润滑参数 $\eta_0 u_e$ 的

变化曲线, 其中载荷 $w=30$ N. 润滑参数 $\eta_0 u_e$ 的变化通过两种方式实现: 一种是润滑油黏度变化而卷吸速度恒定; 另一种是卷吸速度变化而润滑油黏度恒定. 由图可见, 两种方式下得到的变化曲线基本重合, 可见油滴间距临界值唯一由 $\eta_0 u_e$ 决定, 在油滴有效铺展情况下润滑油黏度和卷吸速度对接触区润滑状态具有同等影响效果. 此外, 油滴间距临界值会随着润滑参数 $\eta_0 u_e$ 的增大而减小, 因为不管润滑油黏度的升高(润滑油流动性变差)还是卷吸速度的增大(油滴铺展时间缩短), 都会降低油滴在接触区入口的铺展距离, 进而缩小了接触区有效润滑下油滴间距的临界值. 可见, 润滑油黏度也是离散油滴供油时必须考虑的因素.

图9 不同卷吸速度下边界点最小膜厚随油滴间距的变化曲线($\eta_0=0.08$ Pa s, $w=30$ N)

值得注意的是, 随润滑参数 $\eta_0 u_e$ 的增加, 间距临界值趋近于 $2.0R$, 但由于离散油滴的物理意义而不允许油滴间距小于 $2.0R$ (油滴中心距应大于两油滴半径之和)。因此, 在一定供油工况下, 当油滴间距的临界值靠近 $2R$ 后, 无法通过缩短离散油滴间距来改善由润滑参数 $\eta_0 u_e$ 增大带来的挤压铺展恶化情况, 故润滑参数 $\eta_0 u_e$ 不允许超过一定限值, 否则就会造成接触区润滑失效, 但可以通过扩大油滴体积等方法来实现接触区有效润滑下滑润参数 $\eta_0 u_e$ 的继续增大。

3.4 载荷的影响

载荷也会影响离散油滴供油的润滑状态。数值分析了3种载荷下接触区稳定期边界点最小膜厚 $h_{B,min}$ 随

图10 多油滴供油时部分瞬时的伪干涉图($x_L=5R$, $u_e=1.0$ m/s, $\eta_0=0.16$ Pa s, $w=30$ N)

图 11 油滴间距临界值随着润滑参数 $\eta_0 u_e$ 的变化曲线 ($w=30$ N)

着油滴间距的变化曲线, 如图12所示, 其中卷吸速度 $u_e=1.0$ m/s、润滑油黏度 $\eta_0=0.08$ Pa·s. 由图可知, 3种载荷下边界点最小膜厚曲线的变化趋势总体相同, 都会随着油滴间距的增大而减小, 但是三者的变化速率是不同的, 且达到有效润滑膜厚 h_{set} 的油滴临界间距是不同的, 载荷 $w=30$ N时, 油滴间距临界值最大, 而载荷 $w=20$ N和 $w=50$ N时, 油滴间距临界值却反而变小. 为了得到载荷对油滴间距临界值的影响规律, 图13给出了油滴间距临界值随着载荷的变化曲线. 由图可知, 油滴间距临界值会随着载荷的增大先增大后减小, 这是由于在载荷较小的时候, 球-面接触半径小, 对油滴的挤压铺展作用较弱, 故仅有较小的油滴间距临界值才能保证接触区有效润滑; 而随着载荷的增大, 球-面接触半径变大, 对油滴的挤压铺展作用增强, 扩大的油滴铺展距离能够使油滴间距临界值增加; 但当载荷达到一定数值后继续增加, 由于油滴体积的恒定而无法继续增大油滴的挤压铺展距离, 且载荷的增加需求更多的润滑油以达到有效润滑, 反而降低了油滴间距的临界值. 可见, 离散油滴供油工况中, 应该重视载荷对油滴间距临界值的影响.

4 总结

通过数值计算模拟了一系列离散油滴通过接触区的整个过程, 分析了油滴间距、卷吸速度、润滑油黏度和载荷对接触区润滑状态的影响, 得到如下结论.

(1) 离散油滴供油时, 接触区的润滑油膜厚度经历

图 12 不同载荷下边界点最小膜厚随油滴间距的变化曲线 ($u_e=1.0$ m/s, $\eta_0=0.08$ Pa·s)

图 13 油滴间距临界值随着载荷的变化曲线 ($u_e=1.0$ m/s, $\eta_0=0.08$ Pa·s)

3个过程, 即上升期、振荡期和稳定期.

(2) 油滴间距会直接影响到接触区的润滑特性, 过大油滴间距会导致接触润滑失效, 一定工况下存在油滴间距的临界值, 油滴间距不应大于此临界值.

(3) 卷吸速度、润滑油黏度和载荷会对离散油滴供油的接触区润滑状态产生影响, 进而改变油滴间距的临界值. 一定工况下离散油滴间距的临界值取决于润滑参数 $\eta_0 u_e$, 此参数值较大时, 离散油滴应当控制的稠密些, 以防止润滑失效; 载荷的合适选择会扩大油滴间距临界值, 提高润滑油的利用率.

(4) 本文的结果可为微量润滑设计提供一些基础数据.

参考文献

- 1 温诗铸, 黄平. 摩擦学原理. 第4版. 北京: 清华大学出版社, 2012
- 2 Bartz W J. Ecotribology: Environmentally acceptable tribological practices. *Tribol Int*, 2006, 39: 728–733
- 3 Jiang S, Mao H. Investigation of the high speed rolling bearing temperature rise with oil-air lubrication. *J Tribol*, 2011, 133: 021101
- 4 Yeo S H, Ramesh K, Zhong Z W. Ultra-high-speed grinding spindle characteristics upon using oil/air mist lubrication. *Int J Machine Tools Manuf*, 2002, 42: 815–823
- 5 Höhn B R, Michaelis K, Otto H P. Minimised gear lubrication by a minimum oil/air flow rate. *Wear*, 2009, 266: 461–467
- 6 Dudorov E A, Ruzanov A I, Zhirkin Y V. Introducing an oil-air lubrication system at a continuous-casting machine. *Steel Transl*, 2009, 39: 351–354
- 7 Tret'yakov E I, Yurchenko N A, Lysyak A A. Improving oil-air lubrication systems. *Metallurgist*, 2004, 48: 414–416
- 8 Jeng Y R, Gao C C. Investigation of the ball-bearing temperature rise under an oil-air lubrication system. *P I Mech Eng J-J Eng Tribol*, 2001, 215: 139–148
- 9 Wu C H, Kung Y T. A parametric study on oil/air lubrication of a high-speed spindle. *Precis Eng*, 2005, 29: 162–167
- 10 Moon J H, Lee H D, Kim S I. Lubrication characteristics analysis of an air-oil lubrication system using an experimental design method. *Int J Precis Eng Manuf*, 2013, 14: 289–297
- 11 臧淑燕, 郭峰, 李超. 表面亲润性对限量供油润滑影响的研究. *摩擦学学报*, 2017, 37: 429–434
- 12 Liang H, Guo D, Ma L, et al. The film forming behavior at high speeds under oil-air lubrication. *Tribol Int*, 2015, 91: 6–13
- 13 Qian S, Guo D, Liu S, et al. Experimental investigation of lubricant flow properties under micro oil supply condition. *J Tribol*, 2012, 134: 041501
- 14 Zhang S, Wang W, Li X, et al. The effect of oil droplet on the lubrication performance. *J Tribol*, 2016, 138: 031506
- 15 刘成龙, 栗心明, 郭峰, 等. 单个微油滴弹流润滑行为的试验研究. *摩擦学学报*, 2017, 37: 340–347
- 16 Li S Y, Guo F, Li X M, et al. Numerical simulation of an oil droplet passing through an EHL contact. *Tribol Int*, 2017, 112: 58–67
- 17 Wijnant Y H. Contact dynamics in the field of elastohydrodynamic lubrication. Dissertation for Doctoral Degree. Enschede: University of Twente, 1998
- 18 Damiens B, Venner C H, Cann P M E, et al. Starved lubrication of elliptical EHD contacts. *J Tribol*, 2004, 126: 105–111
- 19 Venner C. Multilevel solution of the EHL line and point contact problems. Dissertation for Doctoral Degree. Twente: University of Twente, 1991
- 20 Brandt A, Lubrecht A A. Multilevel matrix multiplication and fast solution of integral equations. *J Comput Phys*, 1990, 90: 348–370
- 21 王少鹏. 微量供油条件下润滑油膜特性实验研究. 硕士学位论文. 青岛: 青岛理工大学, 2014
- 22 Venner C H, Popovici G, Lugt P M, et al. Film thickness modulations in starved elastohydrodynamically lubricated contacts induced by time-varying lubricant supply. *J Tribol*, 2008, 130: 041501

Study on the critical value of oil droplet spacing distance under conditions of discrete droplet supply in elastohydrodynamic lubrication

LI ShuYi, GUO Feng, LI XinMing & LIU ChengLong

School of Mechanical Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266520, China

Based on the oil supply in the form of discrete droplets, a simplified model of elastohydrodynamic lubrication (EHL) has been established to simulate the whole process of a series of oil droplets passing through the point contact EHL zone. The results show that with discrete oil droplets supply, the lubrication film thickness of contact zone will experience three stages, that is, increase stage, oscillation stage and stability stage. If the spacing distance between oil droplets changes, it will inevitably affect the lubrication state of contact zone, and there may be lubrication failure in some cases. In order to ensure that the contact zone is in a state of full lubrication, there is a critical value for the spacing distance between oil droplets. The actual droplet spacing distance must not be greater than this critical value. Entrainment speed, oil viscosity and load can significantly affect the lubrication film formation under oil droplets supply, and then change the critical value of droplet spacing distance.

oil droplets, oil-air lubrication, elastohydrodynamic lubrication, limited lubricant, critical distance

doi: [10.1360/N092017-00412](https://doi.org/10.1360/N092017-00412)