

# The Effect of the Roller Size on the Lubrication Behavior in the Chain Drive

Ansheng Zhang<sup>1</sup>, Xuyang Jin<sup>1</sup>, Mingyu Zhang<sup>1</sup>, Jing Wang<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>School of Mechanical and Automotive Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao Shandong

<sup>2</sup>College of Mechanical Engineering, Donghua University, Shanghai

Email: 1961988908@qq.com, <sup>1</sup>jingwang@dhu.edu.cn

Received: Aug. 6<sup>th</sup>, 2020; accepted: Aug. 21<sup>st</sup>, 2020; published: Aug. 28<sup>th</sup>, 2020

---

## Abstract

In order to simulate the lubrication behavior between sleeve and pin in industrial chain drive, the authors have carried out experiments and theoretical studies respectively. Through optical interference experiment, the oil film thickness and shape of the different sizes roller and disk pair are obtained. Numerical simulation of finite line contact is carried out by means of multi-grid algorithm. Results of both experiment and theory show that the thickness of lubricating film increases when the diameter of roller increases. As the sliding speed increases, the width of the contact zone becomes narrower and the thickness of the oil film increases.

## Keywords

Roller, Chain Drive, Optical Interference Experiments, Effect of Roller Size, EHL

---

# 尺寸效应对工业链传动中润滑行为的影响

张安生<sup>1</sup>, 金旭阳<sup>1</sup>, 张明宇<sup>1</sup>, 王 静<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>青岛理工大学机械工程学院, 山东 青岛

<sup>2</sup>东华大学机械工程学院, 上海

Email: 1961988908@qq.com, <sup>1</sup>jingwang@dhu.edu.cn

收稿日期: 2020年8月6日; 录用日期: 2020年8月21日; 发布日期: 2020年8月28日

---

## 摘 要

为模拟工业链传动中不同型号的套筒和销轴间发生的润滑行为, 作者分别进行了实验和理论研究。通过  
\*通讯作者。

光干涉实验,得到了不同尺寸滚子-盘有限长线接触副的润滑油膜厚度及形状的变化;通过多重网格算法对有限长线接触进行了数值仿真。实验和理论均表明:滚子直径增大,润滑油膜厚度升高。实验结果还揭示当滑动速度增加时,接触区宽度变窄,油膜厚度逐步增加。

## 关键词

滚子副,链传动,光干涉实验,滚子尺寸效应,弹性流体动力润滑

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

链传动是常用的传动方式之一,通过链轮与链条的啮合传递动力,具有负载能力大、无弹性滑动、传动效率高和平均传动比准确等优点[1]。Saito 等、Noguch 等和王慧等[2] [3] [4]分析了滚子链的失效形式,当链轮与链条啮合时,其摩擦形式为滑动摩擦,此时滚子与套筒易发生疲劳破坏。不同型号的链条尺寸不同,随着销轴、套筒直径的增大,两者形成的销轴-套筒有限长线接触副的接触区也会变大,对接触区内的润滑状态会产生很大影响。

Liu [5]等通过理论分析研究了轴承滚子等效曲率半径  $R$  对滚子副润滑状态的影响。Zhang [6]等采用数值分析的方法,研究了链条套筒和销轴的等效曲率半径  $R$  对接触区内的油膜厚度、压力、温升和摩擦系数的影响。刘晓玲和杜肖[7]通过光干涉实验研究滚子副润滑状态的转变,当载荷减小或者卷吸速度增加,滚子副润滑状态逐渐由弹流润滑转变为流体动力润滑。钟伟杰等、吴继强等和华同曙等[8] [9] [10]从实验和理论研究了滚子的边缘效应,为滚子轮廓优化设计提供了依据。

关于滚子副润滑情况的文献,大多是针对滚动轴承的研究[7] [8] [9] [10],运动形式也以滚动居多。基于链传动的滑动条件下滚子副润滑情况的研究,尚不多见。本研究使用光干涉测量方法,使用滚子-盘有限长线接触副,模拟链传动中销轴与套筒或滚子的接触,运动形式为纯滑。通过改变滚子的尺寸、载荷和滑动速度等参数,研究滚子尺寸对润滑油膜厚度及润滑状态的影响。

## 2. 实验设置

### 2.1. 实验装置

本实验采用光干涉法测量油膜形状及厚度,在实验室自主研发的光弹流试验台上进行。采用双色光干涉强度调制技术[11],光干涉图像对比度高,膜厚分辨率为  $1\text{ nm}$ ,可高效准确的测量  $4\text{ }\mu\text{m}$  范围内的润滑油膜厚度。实验装置示意图如图 1 所示,实验台由载荷加载系统、运动控制系统和图像采集系统等组成。

加载装置由手摇螺杆、载物平台和压力传感器组成。运动控制系统主要由工控机、伺服电机、伺服放大器和减速器组成。图像采集系统主要由光源、显微镜、CCD 相机、图像采集卡、计算机等五部分组成。本实验采用的是红绿双色 RG 激光光源(红光波长  $\lambda = 635\text{ nm}$ ,绿光波长  $\lambda = 532\text{ nm}$ )。CCD 相机负责采集经过显微镜放大的光干涉图像,采集到的信号为模拟信号,每秒钟可采集光干涉图像 120 张。图像采集卡负责 AD 转换及缓存图像。计算机通过软件控制光干涉图像的采集和存储。

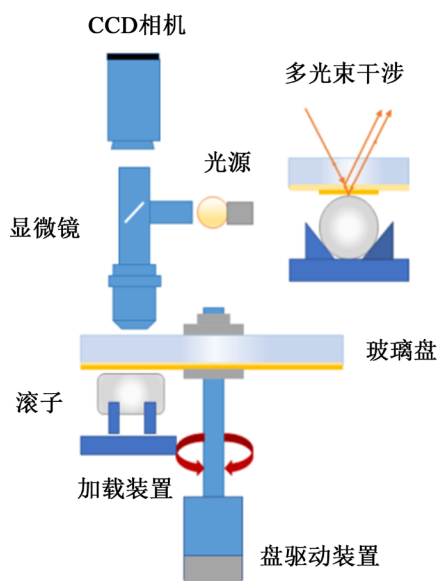


Figure 1. The schematic diagram of testing  
图 1. 试验台示意图

## 2.2. 实验条件和材料

实验过程中控制环境温度为  $24^{\circ}\text{C} \pm 0.5^{\circ}\text{C}$ ，湿度为  $60\% \pm 5\%$ 。玻璃盘做恒速旋转运动，滚子固定不动，运动状态为纯滑。供油条件为充分供油。

玻璃盘为 K9 玻璃盘，弹性模量为 81 GPa，泊松比为 0.208。玻璃盘上镀有公称厚度 15 nm 的析光 Cr 膜和公称厚度为 120 nm 的  $\text{SiO}_2$  垫层，镀层的表面粗糙度  $R_a = 4$  nm。滚子材料为 GCr15，弹性模量为 208 GPa，泊松比为 0.3。为得到更好的光干涉图像，滚子表面做抛光处理。实验所用滚子长度为 24 mm，滚子直径分别为 12 mm、18 mm 和 24 mm。试验用润滑油为 CK 润滑油， $40^{\circ}\text{C}$  时动力粘度为 89.34 mPa·s， $100^{\circ}\text{C}$  时动力粘度为 12.44 mPa·s，密度为  $668 \text{ kg/m}^3$ 。

## 3. 数学模型及数值方法

为了验证本文的实验结果，我们使用弹流润滑理论，建立了一个有限长线接触弹流润滑模型，如图 2 所示。图中， $a$  为滚子， $b$  为玻璃盘， $r$  为滚子的半径， $l_0$  为滚子的母线长度， $y_{sk}$  为滚子圆角区域的长度， $r_{end}$  为修形圆角半径。

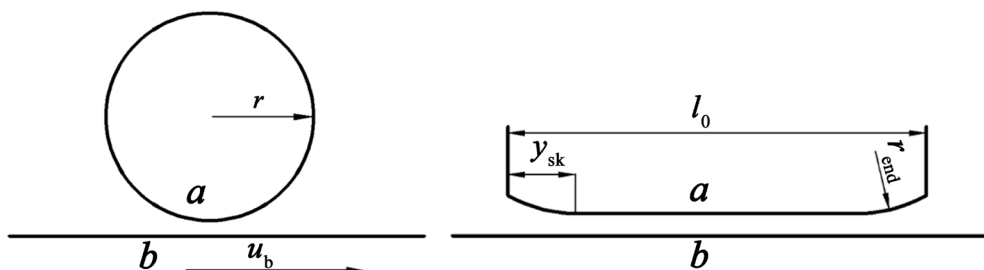


Figure 2. The schematic diagram of model  
图 2. 模型示意图

计算过程中使用的方程如下：

Reynolds 方程[12]为

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[ \left( \frac{\rho}{\eta} \right)_e h^3 \frac{\partial p}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \left( \frac{\rho}{\eta} \right)_e h^3 \frac{\partial p}{\partial y} \right] = 12u_0 \frac{\partial(\rho^* h)}{\partial x} \quad (1)$$

油膜厚度方程[12]为

$$h(x) = h_{00} + \frac{x^2}{2r} + h_{\text{end}} + \frac{2}{\pi E'} \iint_{\Omega} \frac{p(x', y')}{\sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2}} dx' dy' \quad (2)$$

其中  $h_{\text{end}}$  的表达式为

$$h_{\text{end}} = \begin{cases} \frac{(y + y_{\text{sk}} - l)^2}{r_{\text{end}}} & (-l \leq y < y_{\text{sk}} - l) \\ 0 & (y_{\text{sk}} - l \leq y \leq l - y_{\text{sk}}) \\ \frac{(y - y_{\text{sk}} + l)^2}{r_{\text{end}}} & (l - y_{\text{sk}} < y \leq l) \end{cases} \quad (3)$$

润滑油膜的能量方程[12]为

$$\begin{aligned} & c \left( \rho u \frac{\partial t}{\partial x} + \rho v \frac{\partial t}{\partial y} - q \frac{\partial t}{\partial z} \right) - k \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \\ & = -\frac{t}{\rho} \cdot \frac{\partial \rho}{\partial t} \left( u \frac{\partial p}{\partial x} + v \frac{\partial p}{\partial y} \right) + \eta^* \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right] \end{aligned} \quad (4)$$

两固体能量方程(即热传导方程) [12]为

$$\begin{cases} c_a \rho_a u_a \frac{\partial t}{\partial x} = k_a \left( \frac{\partial^2 t}{\partial z_a^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} \right) \\ c_b \rho_b u_b \frac{\partial t}{\partial x} = k_b \left( \frac{\partial^2 t}{\partial z_b^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} \right) \end{cases} \quad (5)$$

润滑油的粘温粘压关系[12]为

$$\eta = \eta_0 \exp \left\{ A_1 \times \left[ -1 + (A_2 p)^{z_0} (A_3 t - A_4)^{-s_0} \right] \right\} \quad (6)$$

润滑油的密压密温关系[12]为

$$\rho = \rho_0 \left( 1 + \frac{C_1 p}{1 + C_2 p} \right) \left[ 1 - C_3 (t - t_0) \right] \quad (7)$$

载荷平衡方程[12]为

$$\int_{-l}^l \int_{x_{\text{in}}}^{x_{\text{out}}} p dx dy = w \quad (8)$$

Reynolds 方程的边界条件为

$$\begin{cases} p(x_{\text{in}}, y) = p(x_{\text{out}}, y) = p(x, -l) = p(x, l) = 0 \\ p \geq 0 \quad (x_{\text{in}} < x < x_{\text{out}}, -l < y < l) \end{cases} \quad (9)$$

油膜上游温度的边界条件为

$$t(x_{\text{in}}, y, z) = t_0 \quad (u(x_{\text{in}}, y, z) \geq 0) \quad (10)$$

固体的能量方程的边界条件[12]为

$$\begin{cases} t(x_{in}, y, z_a) = t_0, t(x_{in}, y, -d) = t_0 \\ t(x_{in}, y, z_b) = t_0, t(x_{in}, y, d) = t_0 \end{cases} \quad (11)$$

油膜压力采用多重网格法[12]计算, 弹性变形项用多重网格积分法[12]求解。本文全部计算均在无量纲后进行, 使用4层网格, 在最稠密的网格层上,  $X$ 方向上的节点数为128,  $Y$ 方向上的节点数为10。温度计算采用逐列扫描法[12]。收敛精度方面, 压力的相对误差小于 $10^{-3}$ , 温度的相对误差小于 $10^{-4}$ , 载荷的相对误差小于 $10^{-4}$ 。计算中使用与实验中相同的载荷和卷吸速度以及润滑油黏度参数, 计算后使用Origin软件绘制膜厚图。

## 4. 结果与讨论

在钢制滚子与K9玻璃盘组成的有限长线接触运动副中, 通过改变玻璃盘的转速, 获得不同的滑动速度(0.02 m/s、0.1 m/s、0.2 m/s、0.3 m/s和0.4 m/s)。最大赫兹接触压力设置为50 MPa和100 MPa两种。

### 4.1. 滚子尺寸对接触区内润滑油膜厚度的影响

图3给出了在最大赫兹接触压力分别为50 MPa和100 MPa条件下, 随滑动速度的增加, 3种滚子的中部与玻璃盘之间所形成的最小膜厚变化情况, 最小膜厚均随着滑动速度的增加而增加。2种载荷条件下, 最小膜厚都随着滚子直径的增加而增加。当其它参数相同的条件下, 载荷越轻, 最小膜厚越厚。

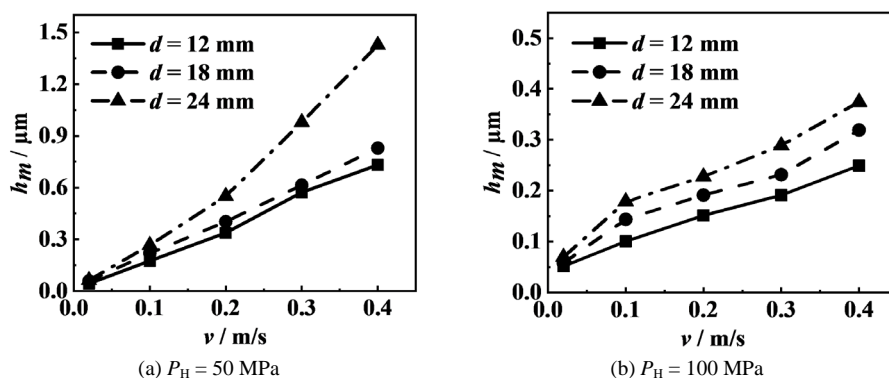
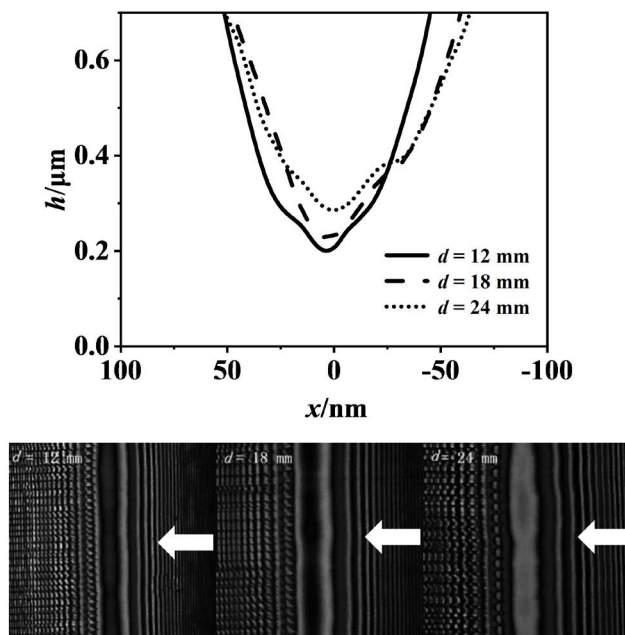


Figure 3. The polyline diagram of the minimum film thickness in the middle region of the roller under different sliding speeds  
图3. 不同滑动速度条件下滚子中部区域最低膜厚曲线图

图4给出了 $P_H = 100$  MPa,  $v = 0.3$  m/s条件下3种滚子直径中部的中截面膜厚曲线对比图和光干涉图像, 入口在接触区右侧, 速度方向如箭头所示。从膜厚曲线对比图可见, 油膜厚度随滚子直径的增加而增厚。光干涉图中可见在滚子轴向, 因为滚子的圆柱度不够, 图像出现不均匀现象。事实上, 作者已尽力打磨了滚子, 可以想象在实际销轴-套筒形成的有限长线接触中, 由于制造加工误差的存在, 销轴的圆柱度也一定存在更严重的问题, 对接触和承载造成一定的影响。

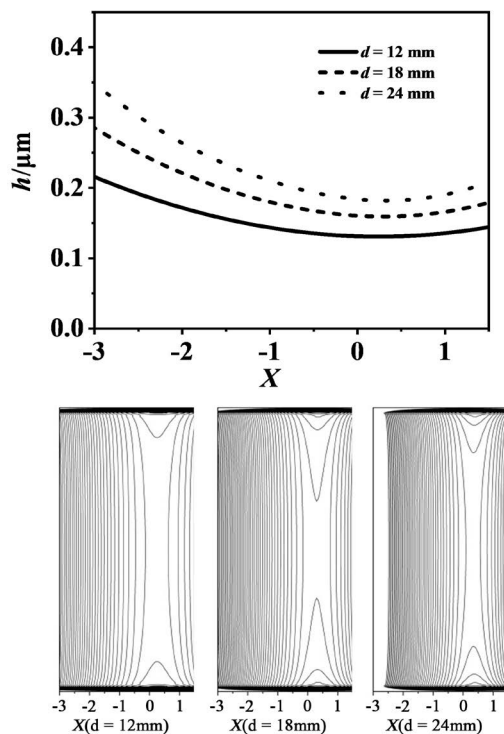
图5给出了与图4对应的理论分析结果, 即在 $P_H = 100$  MPa,  $v = 0.3$  m/s条件下3种滚子直径的中截面膜厚曲线对比图和膜厚等值线图, 入口在左侧。理论分析结果的趋势与实验结果一致, 油膜厚度随滚子直径的增大而增加。滚子直径增大, 中部膜厚增大。作者认为滚子直径增大, 加剧了端部的应力集中现象, 端部压力值增大, 中心压力减小, 从而导致接触区中心膜厚增加。由于实验条件限制, 本文并没有得到滚子端部区域的实验结果。与实验结果不同的是, 滚子中截面最低膜厚出现在接触区中心, 且

膜厚低于实验膜厚。在  $P_H = 100$  MPa 的轻载荷条件下，接触区温升很小，可以忽略。故本文没有给出油膜中温升曲线图。



**Figure 4.** Film thickness curve and optical interferometric image of different radius roller under middle region ( $P_H = 100$  MPa,  $v = 0.3$  m/s)

**图 4.** 不同直径滚子中部径向膜厚曲线图和光干涉图( $P_H = 100$  MPa,  $v = 0.3$  m/s)



**Figure 5.** Radial film thickness curves and film thickness contour diagram of different radius rollers ( $P_H = 100$  MPa,  $v = 0.3$  m/s)

**图 5.** 不同直径滚子中部径向膜厚曲线和膜厚等值线图( $P_H = 100$  MPa,  $v = 0.3$  m/s)

## 4.2. 滑动速度对接触区内润滑油膜厚度的影响

图6给出了滚子直径为12 mm, 最大赫兹应力为100 MPa条件下, 随玻璃盘滑动速度的增加, 接触区中部油膜光干涉图和中截面曲线图的变化。入口在接触区右侧, 速度方向如箭头所示。由光干涉图的变化可见, 在滑动速度较低的情况下, 接触区较宽, 对应的油膜厚度只有0.1  $\mu\text{m}$ 左右。随着滑动速度的增加, 形状逐渐变为楔形, 油膜厚度逐步增加。

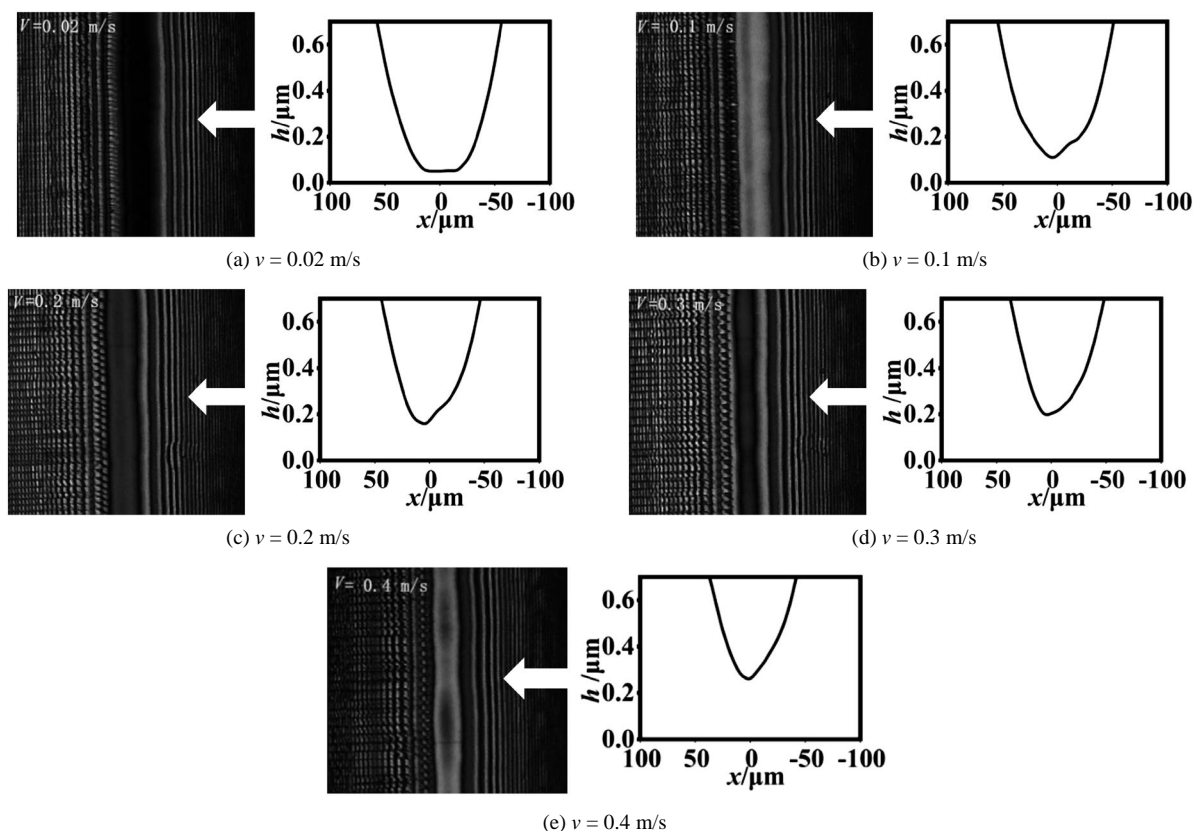


Figure 6. Optical interferometric images and mid-section curves under different sliding speeds ( $P_H = 100 \text{ MPa}$ )

图6. 不同滑动速度下滚子中部光干涉图和中截面曲线图( $P_H = 100 \text{ MPa}$ )

## 5. 结论

- 1) 实验结果表明, 接触区中截面油膜厚度随滚子直径的增加而增加。
- 2) 理论分析结果的趋势与实验结果一致, 油膜厚度也随滚子直径的增加而增加。有些不同的是计算所得膜厚略低于实验测得膜厚。
- 3) 在滑动速度较低时, 接触区较宽, 随滑动速度增加, 油膜形状逐渐变为楔形, 油膜厚度逐步增加。

## 基金项目

国家自然科学基金(51875298); 山东省自然科学基金(ZR2019MEE040)。

## 参考文献

- [1] 孟繁忠. 我国链传动行业的发展历程、技术研究现状与展望[J]. 机械传动, 2016(11): 6-12.
- [2] Saito, R., Nodan, A., Sano, Y., *et al.* (2018) Fatigue Strength Analysis and Fatigue Damage Evaluation of Roller Chain.

*Metals*, **8**, 847. <https://doi.org/10.3390/met8100847>

- [3] Noguchi, S., Yoshiba, H., Nakayama, S., *et al.* (2009) Evaluation of Wear between Pin and Bush in Roller Chain. *Journal of Advanced Mechanical Design Systems and Manufacturing*, **3**, 355-365.
- [4] 王慧, 谭艳新. 滚子链失效形式的分析[J]. 煤矿机械, 2007, 28(12): 78-80.
- [5] Liu, X., Cui, J. and Yang, P. (2012) Size Effect on the Behavior of Thermal Elastohydrodynamic Lubrication of Roller Pairs. *Journal of Tribology*, 134, Article No. 011502.
- [6] Zhang, M.Y., Wang, J., Liu, Y., *et al.* (2019) Size Effect on Thermal Elastohydrodynamic Lubrication of Industrial Chain Bush-Pin Hinge Pair. *Industrial Lubrication and Tribology*, **71**, 1080-1085. <https://doi.org/10.1108/ILT-10-2018-0369>
- [7] 刘晓玲, 杜肖. 滚子副润滑状态转变的光干涉试验研究[J]. 机械设计与制造, 2018(6): 110-113.
- [8] 仲伟杰, 丁建宁, 吴朝阳, 等. 滚子圆环接触式光弹流试验装置的设计及初步实验研究[J]. 润滑与密封, 2019, 44(1): 100-103+108.
- [9] 吴继强, 王黎钦, 陆宇帆, 等. 几何修形对低速圆柱滚子轴承混合润滑性能的影响研究[J]. 摩擦学学报, 2019(7): 470-478.
- [10] 华同曙, 丁璐璐, 陈晓阳, 等. 凸度滚子重载变速工况弹流润滑的实验研究[J]. 润滑与密封, 2010, 35(10): 46-48.
- [11] 刘海超, 郭峰, 赵国垒. 润滑膜厚测量的双色光干涉强度调制方法[J]. 摩擦学学报, 2015, 35(3): 282-287.
- [12] 许慧. 弹性滚子间油膜的热流体动力润滑分析[D]: [硕士学位论文]. 青岛: 青岛理工大学, 2011.