

激光毛化形貌对轮轨材料混合润滑摩擦系数的影响

蔡宝春¹ 王保安¹ 孙珊珊¹ 杨 兵¹ 任志远¹ 王文中² 杨明江¹ 李正阳¹

¹中国科学院力学研究所先进制造工艺力学重点实验室, 北京 100190

²北京理工大学机械与车辆工程学院, 北京 100190

摘要 为了研究规则分布的表面形貌对轮轨接触在混合润滑状态下摩擦系数的影响,设计了3种不同的表面纹理:横纹、纵纹、菱形。用确定性模型取代平均流量模型,对膜厚、压力、接触面积比进行了数值计算,总的接触载荷由流体接触区和固体接触区分别分担,总的摩擦力等于流体区的摩擦力和固体接触区摩擦力之和。根据设计的3种表面纹理,用YAG激光对车轮钢试样表面进行激光毛化处理,获得这3种表面纹理,在RSW-2摩擦磨损试验机上进行油介质条件下的混合润滑摩擦学实验,模拟轮轨间有油污时的工况,测量了该条件下各种表面纹理下的摩擦系数,并与未作激光毛化处理的表面进行对比。理论和实验结果显示,在油介质混合润滑条件下,有激光表面纹理的摩擦系数远大于未作激光毛化处理的试样表面的摩擦系数。3种激光表面纹理中,菱形纹理的摩擦系数大于纵纹和横纹的摩擦系数,纵纹的摩擦系数比横纹略大。因此,在油污条件下使用激光毛化的菱形纹理表面能较显著地提高轮轨间的摩擦系数。

关键词 激光技术; 摩擦系数; 激光毛化; 混合润滑

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0603003

Effect of Laser Textured Patterns on Friction Coefficient of Wheel/Rail Materials under Mixed Lubrication

Cai Baochun¹ Wang Baoan¹ Sun Shanshan¹ Yang Bing¹ Ren Zhiyuan¹
Wang Wenzhong² Yang Mingjiang¹ Li Zhengyang¹

¹Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

²Beijing Institute of Technology, Mechanical and Vehicular Engineering College, Beijing 100190, China

Abstract To investigate the influences of regular patterns on friction coefficients of wheel-rail contact under mixed lubrication, longitudinal, transverse and rhombus patterns are designed. The film thickness, pressure and contact area ratio are calculated by using deterministic model instead of average flow model. Based on the load-sharing concept, the hydrodynamic film and asperities both contribute to carrying the total load. Therefore the friction force is composed of hydrodynamic friction force and asperity friction force. According to the designed patterns, the surfaces of wheel discs are textured by YAG laser. The friction coefficients are tested on a RSW-2 type wear testing machine and the results are compared with that of the grinded without laser textured. It is shown theoretically and experimentally that the friction coefficient of rhombus pattern is higher than that of longitudinal and transverse patterns. And the friction coefficient of longitudinal pattern is slightly higher than that of transverse pattern. Therefore, laser texturing of the textured surface with rhombus distribution can increase the friction coefficient obviously between wheel and rail under oil-contamination condition.

Key words laser technique; friction coefficient; laser texturing; mixed lubrication

OCIS codes 140.3390; 140.3580; 160.3900; 220.4000; 240.6700

收稿日期: 2015-01-07; 收到修改稿日期: 2015-02-03

基金项目: 国家自然科学基金(51275510)、国家973发展计划(2011CB711103)

作者简介: 蔡宝春(1987—),男,硕士研究生。主要从事激光加工方面的研究。E-mail: 380673128@qq.com

导师简介: 李正阳(1963—),男,博士,副研究员,主要从事激光加工方面的研究。E-mail: zhengyang.li@gmail.com(通信联系人)

1 引言

牵引力是轮式列车的动力来源,对于列车运行的安全性、稳定性具有决定性的意义。如果摩擦力不足,会造成车轮打滑,使轮轨踏面产生擦伤、剥离,对列车的安全性和舒适性会有很大影响。研究表明,在油污、落叶碾轧形成的粘稠物、雨雪天气等情况下,轮轨间的摩擦系数随车速的增加而减小,特别是当列车时速超过 200 km,轮轨摩擦系数快速下降^[1-3]。轮轨在液体介质条件下摩擦力不足是因为轮轨间的部分固体接触被液体膜隔开,轮轨接触状态为混合润滑状态,因液体膜承载了一部分的动压,使得轮轨间的剪切力远远小于完全固体接触时的情形^[4-6]。在外界动力学条件和材料特性不变的情况下,影响接触区剪切力的主要因素是接触面的表面形貌,特别是表面形貌的某种特定取向(即表面纹理)会直接影响润滑膜的厚度和接触区的流体动压,进而影响摩擦系数。摩擦学的研究热点之一就是表面纹理对膜厚和压力的影响。Krupka 等^[7]研究了纵纹、横纹和规则分布的圆坑对混合润滑摩擦系数的影响,认为纵纹可以在尽可能减少固体接触的情况下,增大摩擦系数^[8]。通常,表面纹理取向是随机的,可以用参数 γ 来表征^[5],然而,某种表面纹理取向是增大摩擦系数还是减小摩擦系数,迄今仍然存在分歧。Akbarzadeh 等^[9-10]发现在油润滑条件下,横纹对应的摩擦系数较大,纵纹的摩擦系数较小。Chen 等^[11]用平均流量模型所作的计算结果是:对于水润滑情况,横纹对应摩擦系数较小,纵纹对应的摩擦系数大。但是,得到的实验结果却与计算结果相反:横纹对应的摩擦系数较大,纵纹对应的摩擦系数较小。

实验过程中表面形貌的不断变化,平均流量模型的采用是造成实验结果与数值计算不符的原因,其中,平均流量模型得到的是表面纹理对总的接触压力、接触区膜厚的效果,这对于随机形貌及其表面纹理形成的润滑情况是适用的,但是,对于规则分布形成的表面纹理,某一个位置的局部压力、局部膜厚以及局部接触变形,是尤为重要的^[12-14]。

激光毛化的主要特点是:既能形成有特定取向的规则分布的表面纹理,又能精确地控制每个微坑的造型,并且因快速熔凝使材料得到强化,从而使表面纹理在实验中能保持相对稳定。激光毛化技术已经被广泛应用于冷轧辊的表面处理,减少钢板轧制中的打滑现象,提高摩擦系数,进而改变冷轧薄板、带钢的表面形貌。激光毛化冷轧辊能提高轧辊寿命^[15],占剑等^[16]将其应用到汽车发动机缸体缸套的表面改性上,用于改善上支点贫油区活塞环与内壁的润滑。邢旭辉等^[17]发现激光离散强化形貌在无润滑条件下表现出很高的耐磨性,可用于车轮踏面,王保安等^[18]发现激光离散强化形貌能有效地提高高速列车车轮材料的接触疲劳性能。激光毛化的本质是表面造型和材料改性,基于这些优点,其被广泛应用到一些新的领域^[19-22]。

本文主要研究激光毛化用于提高高速列车在混合润滑状态下摩擦系数的可能性及其规律,将 Hu 等^[12]提出的确定性模型用于激光毛化规则形貌的混合润滑状态计算,求出计算域中任意一点的压力、膜厚和接触变形,表面形貌参数采用实际测量得到的数据。研究激光毛化规则形貌在油介质混合润滑条件下与钢轨材料之间形成的流体动压、膜厚、接触面积比对摩擦系数的影响机制,并试图揭示其物理意义,探索液体润滑条件下增加轮轨摩擦系数的可行性。

2 分析模型

对于混合润滑弹流问题的求解,无论是平均流量模型还是确定性模型,都是将计算域划分为流体区和固体区,然后对流体区和固体区分别求解。Hu 等^[12]指出润滑膜在流体区是连续的,当两个面的局部粗糙峰相接触时,润滑膜厚变得非常薄,用 Reynolds 方程求得的压力与 Hertz 方程的结果相同,因此,可以统一用 Reynolds 方程来求解流体区、固体接触区的压力和膜厚,避免流体区、固体接触区分别求解时,固液相邻的边界条件难以确定所带来的困难^[12,19]。流体区的求解,通过求解一般 Reynolds 方程^[8]获得:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\rho}{12\eta} h^3 \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\rho}{12\eta} h^3 \frac{\partial p}{\partial y} \right) = U \frac{\partial(\rho h)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho h)}{\partial t}, \quad (1)$$

式中运动方向与 x 方向重合, p 为局部压力, ρ 为密度, y 为垂直于 x 轴的方向, t 为时间变量, η 为粘度, U 为平均速度, $U=(u_1+u_2)/2$, u_1 、 u_2 分别表示主动轮和从动轮的线速度,膜厚 h 可以通过求解以下方程^[8]得到:

$$h(x, y) = h_0(x, y) + \frac{x^2}{2R_x} + d(x, y) - d_0, \quad (2)$$

式中 $h_0(x, y)$ 表示两粗糙表面的初始间隙 (也称初始膜厚), R_x 为等效半径, 满足 $\frac{1}{R_x} = \frac{1}{R_{x_1}} = \frac{1}{R_{x_2}}$, d_0 表示表面初始变形, $d(x, y)$ 表示接触区某一点 (x, y) 的表面变形, 其表达式为^[8]

$$d(x, y) = \frac{2}{\pi E'} \iint_{\Omega} \frac{p_h(x', y') + p_c(x', y')}{\sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2}} dx' dy', \quad (3)$$

式中 $1/E' = (1/E_1 + 1/E_2)$ 表示等效弹性模量, $p_c(x, y)$ 表示固体接触区内某一点 (x, y) 的接触压力, $p_h(x, y)$ 表示流体区内某一点 (x, y) 的压力, Ω 为计算区域, d_0 为接触表面的初始变形。由(1)~(3)式可以求得流体区的膜厚和压力。

对于固体区的求解, 由于 h 趋近于零, (1)式简化为^[8]

$$U \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial t} = 0 \quad h \rightarrow 0, \quad (4)$$

考虑稳态时的情形, 可以进一步简化为

$$\frac{\partial h}{\partial x} = 0, \quad (5)$$

由于(5)式是(1)式的简化形式, 因此, 对流体区和固体接触区的求解就可以用一个 Reynolds 方程实现。通过相同的循环迭代就能得到压力、膜厚(接触间隙)等参数。总的摩擦系数^[4]:

$$\mu = \frac{\mu_c \iint P_c(x', y') dx' dy' + \mu_h \iint P_h(x', y') dx' dy'}{P}, \quad (6)$$

式中 μ_h 为流体剪切系数, 可以通过文献[4]得到。 μ_c 为边界润滑摩擦系数, 取值为 0.26^[12]。 P_h 和 P_c 分别表示流体区和固体区具体某一计算节点承载的压力。 P 为总的正压力, 由平衡方程可知有如下关系^[4]:

$$P = \iint_{\Omega} p_h(x, y) dx dy + \iint_{\Omega} p_c(x, y) dx dy. \quad (7)$$

3 实验方法

实验所用到的轮轨材料分别是 CL60 和 U71Mn, 这是目前中国铁路系统所用的典型的轮轨材料。实验试样为两个圆环, 半径 $r_1=r_2=22.7$ mm, 厚度为 10 mm, 接触区长度 $L=5$ mm, 分别由车轮材料和钢轨材料制成。利用 YAG 激光器对轮试样柱面在氩气吹气保护环境下进行激光毛化处理。YAG 激光器输出光斑直径约为 0.1 mm, 脉宽为 1.5 ms, 单峰脉冲能量约为 0.06 J。激光毛化前, 对试样表面进行抛光处理, 使粗糙度 $R_a=0.3$ μm 。本文设计了 3 种不同的规则表面形貌纹理: 横纹、纵纹、菱形, 如图 1 所示。激光毛化形貌在白光干涉形貌仪(WYKO)下的实测情况如图 2 和图 3 所示。钢轨材料制成的试样不作激光处理, 但同样进行抛光, 作为对照, 抛光后表面粗糙度为 $R_a=0.3$ μm 。在 RSW-2 摩擦磨损试验机上进行摩擦学实验。轮试样安装在主动轴, 轨材料试样安装在从动轴, 两轴平行且各自由一个伺服电机控制, 此外, 从动轴与涡流制动器相连, 可以给从动轴施加反向力矩, 涡流制动器的反向力矩可以通过调节电流实现连续可控, 从而实现了滑差率的连续控制。实验时, 室温约为 20 $^{\circ}\text{C}$, 湿度为 25%~35%。主动轴的转速为 400 r/min, 垂向载荷 $P=1400$ N, 使接触区最大接触压力约为 1000 MPa。为了与经过激光毛化处理的试样进行对照, 用另一组未作激光毛化的、表面抛光的轮轨试样进行相同条件的实验。润滑油牌号为 Ub-3。通过白光干涉仪测得 3 种形貌及光滑试样的表面粗糙度, 据此可计算出润滑实验时, 中心膜厚 h_c 的范围在 0.02~0.5 μm , 总的粗糙度范围在 0.6~2 μm , 所

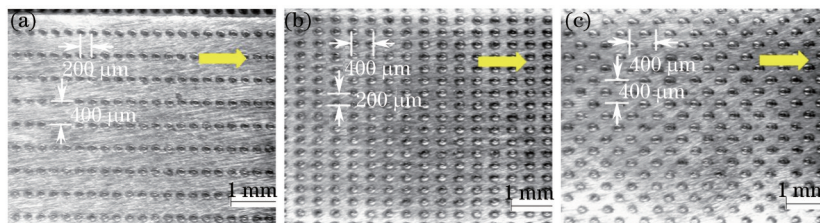


图 1 3 种激光毛化形貌。箭头方向为滚动方向。(a) 纵纹; (b) 横纹; (c) 菱形

Fig.1 Three laser textured patterns. The arrows indicate the directions of rolling. (a) Longitudinal; (b) transverse; (c) rhombus

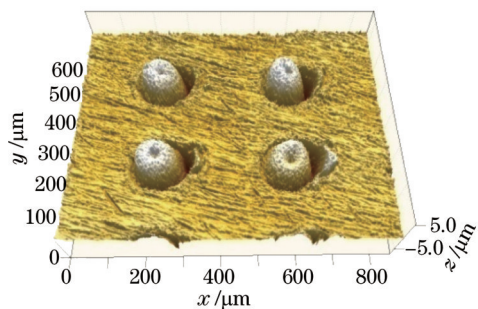


图2 实验前实测的激光形貌

Fig.2 Real surface morphologies with laser patterns before tribological testing

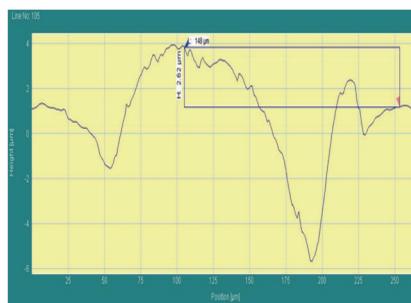


图3 实验前实测的激光作用点截面轮廓

Fig.3 Real cross-section profile of a single laser pattern before tribological testing

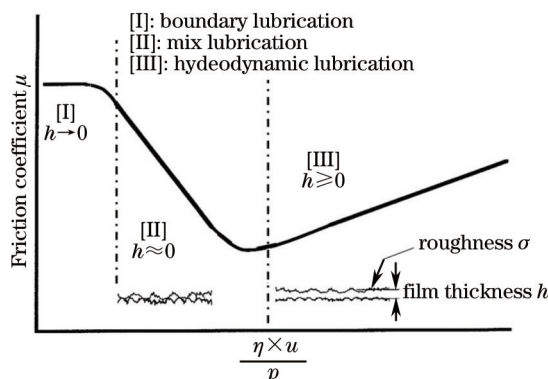


图4 典型的Stribeck曲线图

Fig.4 Typical Stribeck curve

以, $h_e < \sigma$ ^[23]。由 Stribeck 曲线(见图 4)及 Evans 的润滑状态判据^[23]可知,实验轮轨试样接触区处于混合润滑状态。

4 数值计算

在求解 Reynolds 方程时,需要判断何时进行简化处理。引入两个无量纲参数 $\varepsilon_1=0.000001$ 和 $\varepsilon_2=0.00001$ 作为判断依据^[12],当无量纲膜厚 $H = h/a > \varepsilon_1$ 时,认为求解点处在流体区,用(1)式求解;当 $H \leq \varepsilon_1$ 且 $\partial h/\partial x \geq \varepsilon_2$ 时,表示求解点处于边界润滑状态,用(4)式求解;当 $H \leq \varepsilon_1$ 和 $\partial h/\partial x \leq \varepsilon_2$ 时,表示已达到稳态,求解点处于固体接触区,用(5)式求解。求解过程用同一个循环迭代,采用的是 Zhu^[14,24]提出的渐进网络加密(PMD)方法。

求解过程中,材料参数 $E'=220$ GPa,粘度 $\eta_0 = 0.02$ Pa·s,粘压系数 $\alpha=9.887$ GPa⁻¹,几何参数: $R'_x = (1/r_1 + 1/r_2)^{-1} = 11.35$ mm, $B=5.0$ mm。由 Hertz 接触理论^[25],求解域应为一矩形区域,最大 Hertz 接触应力 $P_H = 0.591\sqrt{PE'/LR'_x} = 0.9743$ GPa,接触半宽 $a = 1.08\sqrt{PR'_x/LE'} = 0.183$ mm。速度 $u=0.95$ m/s,滑差率 $S = (u_1 - u_2)/u = 0.002$,润滑剂粘压方程采用 Barus 公式:

$$\eta = \eta_0 \exp(\alpha p), \quad (8)$$

式中 η_0 为常温常压下润滑剂的初始粘度。

润滑油密度-压力关系为

$$\rho = \rho_0 \left(1 + \frac{0.6 \times 10^{-9} p}{1 + 1.7 \times 10^{-9} p} \right). \quad (9)$$

采用二维分段周期函数拟合上述 3 种激光毛化表面纹理:

$$z(x, y) = \begin{cases} \sqrt{R^2 - x_s^2 - y_s^2} - Z_a, & \sqrt{x_s^2 + y_s^2} \leq R_1 \\ a \left(\sqrt{x_s^2 + y_s^2} - R_1 \right) \left(\sqrt{x_s^2 + y_s^2} - R_2 \right), & R_1 < \sqrt{x_s^2 + y_s^2} \leq R_2, \\ \text{rand}(h), & \text{else} \end{cases} \quad (10)$$

(10)式的第一部分表示球冠的一部分,第二部分表示旋转抛物面的一部分,第三部分表示未被激光处理的部分,此处用平均值为0.3(模拟原始抛光表面的粗糙度 $R_a=0.3\mu\text{m}$)的随机数来表示。该二维分段函数的截面示意图如图5(a)所示,其中 $z_a=R-R_a$, $R=314.5\mu\text{m}$, $R_1=50\mu\text{m}$, $R_2=70\mu\text{m}$ 。图5(b)为一个周期内 $z(x,y)$ 所示的曲面,表示单个激光作用点的拟合情况。表面纹理不同, x_s 和 y_s 也不同:

$$\begin{aligned} x_s &= x - 400T, \quad y_s = y - 400T, \quad \text{菱形} \\ x_s &= x - 400T, \quad y_s = y - 200T, \quad \text{横纹} \quad (T \text{为整数}), \\ x_s &= x - 200T, \quad y_s = y - 400T, \quad \text{纵纹} \end{aligned}$$

对于不同的纹理,选取的计算域也不同:

$$\begin{aligned} -3.0 \leq x \leq 3.559, \quad -3.279 \leq y \leq 3.279, & \quad \text{菱形} \\ -3.5 \leq x \leq 3.059, \quad -1.640 \leq y \leq 1.640, & \quad \text{横纹}, \\ -3.5 \leq x \leq 1.966, \quad -3.279 \leq y \leq 3.279, & \quad \text{纵纹} \end{aligned}$$

对应的计算网格的单位长度为

$$\begin{aligned} \Delta x = 0.02562, \Delta y = 0.02562, & \quad \text{菱形} \\ \Delta x = 0.02562, \Delta y = 0.01281, & \quad \text{横纹}, \\ \Delta x = 0.02135, \Delta y = 0.02562, & \quad \text{纵纹} \end{aligned}$$

计算过程中时间的迭代步长 $\Delta T=0.015$ 。

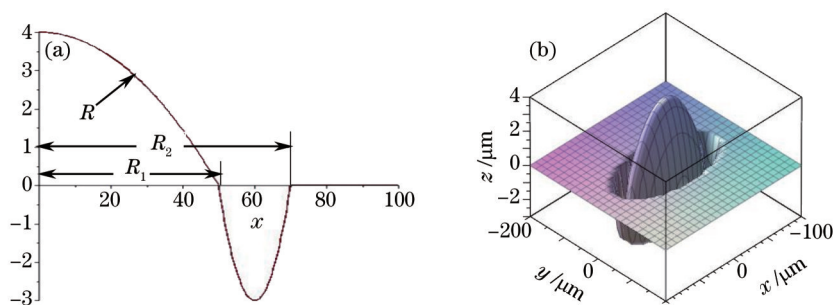


图5 激光作用点的拟合轮廓。(a)半个激光作用点的拟合轮廓;(b)单个激光作用点的三维拟合图

Fig.5 Fitted profiles of laser patterns. (a) Fitted profile of half laser pattern; (b) 3D fitted profile of a single laser pattern

5 结果和讨论

计算结果表明:相比抛光表面,经过激光毛化,油润滑条件下的摩擦系数显著增大,菱形形貌的摩擦系数比纵纹和横纹高约10%,纵纹和横纹的摩擦系数差别不大[见图6(a)]。图6(b)是实验测得的各种形貌的摩擦系数,尽管其数值与计算结果有一定的差异,但基本趋势是一致的,即:油润滑条件下,激光毛化后的摩擦系数远大于未用激光处理的、抛光表面的摩擦系数,其中菱形形貌摩擦系数最大,纵纹和横纹的摩擦系数接近,纵纹略大。当滑差率变化时(见图7),激光毛化后的形貌以及未用激光处理的抛光表面对应的摩擦系数

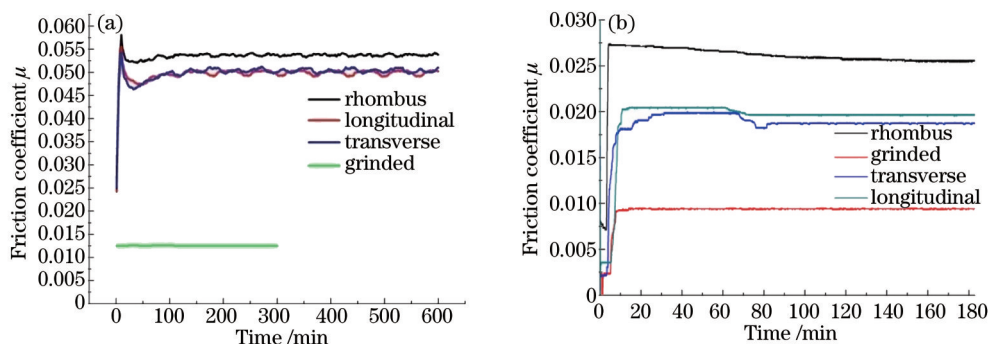


图6 各种形貌的摩擦系数随时间的变化。滑差率 $S=0.2\%$,转速 $n=400\text{ r/min}$ 。(a)计算结果;(b)实验结果

Fig. 6 Friction coefficients of laser patterns versus time.Slip ratio $S=0.2\%$, rotate speed $n=400\text{ r/min}$. (a) Calculated results; (b) experimental results

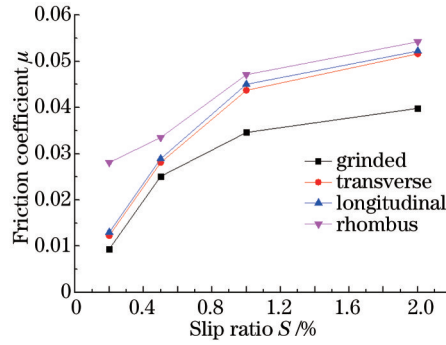


图7 三种激光表面纹理摩擦系数随滑差率变化曲线

Fig.7 Friction coefficient curves of three kinds of laser textured patterns with different slip ratios

随滑差率的增大而增大,相同滑差率条件下,菱形形貌摩擦系数最大,纵纹和横纹的摩擦系数接近,纵纹略大,随着滑差率的增加,菱形形貌与纵纹以及横纹的摩擦系数的差距相对减小。

一般来说,表面纹理对混合润滑区内的固体接触面积和压力分布有显著影响^[13-14]。为了说明上述计算和实验结果的物理意义,考察无量纲膜厚 H 的计算结果。图8为3种激光毛化形貌在计算域内的无量纲膜厚 H 。图中,每一个小圆圈表示激光处理点,白色部分代表固体接触区。表面粗糙度越大,固体接触区越大,流体接触区就越小,从而直接影响到接触压力和膜厚的分布,进而影响总的摩擦系数的大小。为了定量比较接触区内固体接触区所占面积的多少,引入接触面积比这一概念,即实际粗糙峰的接触区与总接触区的比值。3种激光表面纹理的接触面积比如图9所示,从图中可以看出菱形的接触面积比最大,横纹和纵纹的接触面积比相近,但纵纹的接触面积比略高于横纹。

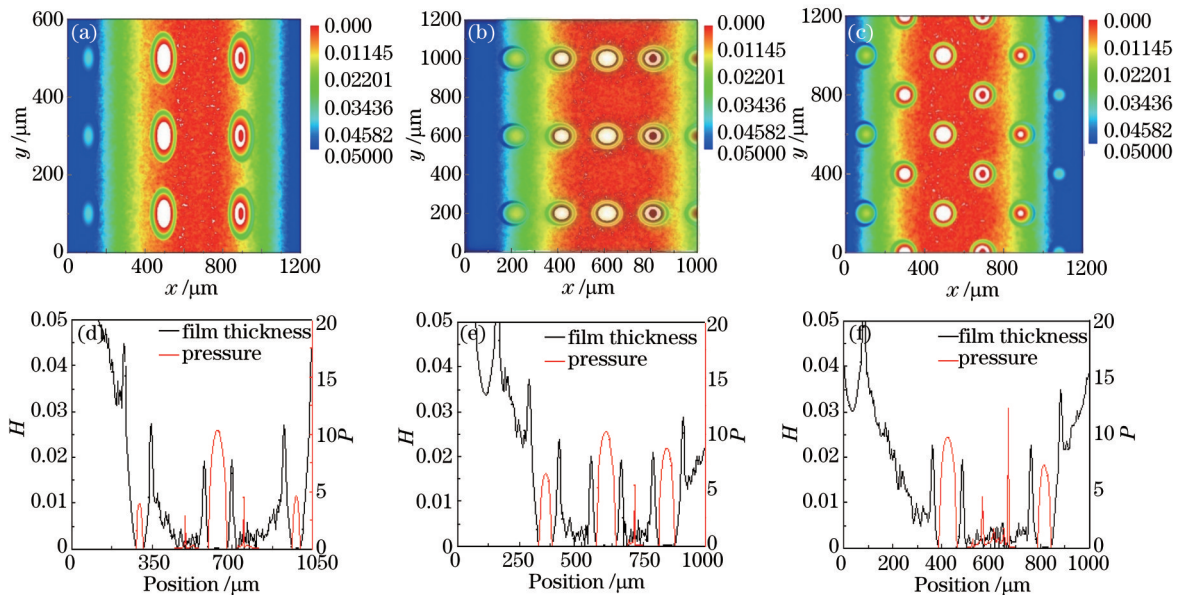


图8 (a) 横纹、(b) 纵纹、(c) 菱形激光表面纹理;(d) 横纹、(e) 纵纹、(f) 菱形在计算域内的无量纲膜厚和压力曲线

Fig.8 (a) Transverse, (b) longitudinal, (c) rhombus laser patterns; dimensionless film thickness and pressure curves within part of nominal contact strip of (d) transverse, (e) longitudinal, (f) rhombus patterns

但是,摩擦系数并不完全取决于接触面积比。模拟计算及实验结果显示的横纹与纵纹摩擦系数的差别并不像接触面积比显示的那么大。造成这种微小差别的原因可能在于表面纹理对于接触区流体的阻碍作用^[7]。实验的接触区半宽为0.183 mm,即:沿流动方向(x方向)接触区的宽度为0.366 mm,垂直流动方向(y方向)接触区的长度为5 mm,因此,可以看作是一个宽轴承,但是,横纹点阵沿流动方向的间隔为0.4 mm,即:在一个接触区内没有两排横纹,与文献[4]所指的宽轴承中横纹的情况有一定差距,因此,其阻挡流动的效果是有限的,不能使流体的承载力增大,这可能就是横纹摩擦系数比纵纹略小的一个重要原因。

实际上,摩擦系数的大小受很多因素的影响,而不仅仅限于接触面积比或者流体膜承载力等因素。Zhu^[14]

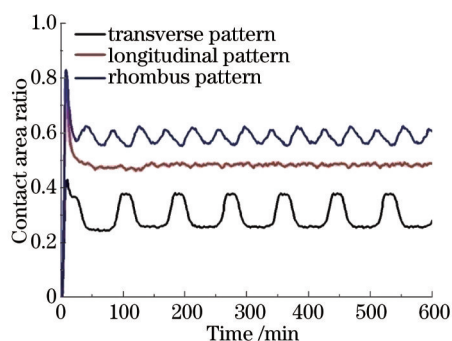


图9 3种激光表面纹理在计算域内的接触面积比随时间的波动

Fig.9 Direct contact area ratios of laser patterns versus time

指出,表面造型以及纹理方向对平均膜厚的影响是有限的,并非随机模型所预测的那样显著。Nanbu等^[8]发现,摩擦系数还与润滑剂的粘压系数、接触区的平均接触压力、两粗糙表面的运动速度及滑差率有关。因此,激光毛化点对流体的阻碍作用以及当粘压系数、相对运动速度等条件发生改变时对混合润滑摩擦系数的影响耦合在一起,作用机理比较复杂,在后续的研究工作中有待深入研究。

6 结 论

提出用激光毛化技术在车轮试样上形成规则形貌,提高混合润滑状态下的摩擦系数,解决雨雪天气高速列车轮轨摩擦力不足的问题。用基于Reynolds方程的统一的确定性模型和实测表面形貌数据为基础,通过数值模拟和实验,研究了车轮试样激光规则表面纹理对油介质混合润滑的影响规律,结果表明:

1) 滑差率为0.2%时,与未用激光处理的抛光表面相比,激光表面纹理大幅提高油介质混合润滑的摩擦系数,其中,菱形对应的摩擦系数最高,纵纹与横纹对应的摩擦系数相差不多,纵纹略高。

2) 当滑差率变化时,激光形貌以及抛光形貌摩擦系数随滑差率的增大而增大,而且,3种激光形貌对于摩擦系数的提高效果不随滑差率变化而改变,菱形形貌对应的摩擦系数最大,纵纹与横纹接近,纵纹略微大于横纹。因此,在油污条件下,要使轮轨获得较好的增加摩擦系数的效果,建议使用菱形形貌。

3) 接触面积比是表面纹理影响摩擦系数的主要原因之一,在3种激光形貌中,菱形的接触面积比最高,增加了接触区内固体接触的承载能力,减小了流体的承载力,从而有效地提高了摩擦系数。

参 考 文 献

- 1 Ohyama T, Maruyama H. Traction and slip at higher rolling speeds: Some experiments under dry friction and water lubrication[C]. The 1st International Conference on Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel Systems, 1983: 395-418.
- 2 Ohyama T. Tribological studies on adhesion phenomena between wheel and rail at high speeds[J]. Wear, 1991, 144(1-2): 263-275.
- 3 Zhang W H, Chen J Z, Wu X J, *et al.*. Wheel/rail adhesion and analysis by using full scale roller rig[J]. Wear, 2002, 253(1-2): 82-88.
- 4 Chen H, Ban T, Ishida M, *et al.*. Adhesion between rail/wheel under water lubricated contact[J]. Wear, 2002, 253(1-2): 75-81.
- 5 Patir N, Cheng H S. An average flow model for determining effects of three-dimensional roughness on partial hydrodynamic lubrication[J]. J Lubri Technol Trans ASME, 1978, 100(1): 12-17.
- 6 Chen H, Ishida M, Nakahara T. Analysis of adhesion under wet conditions for three-dimensional contact considering surface roughness[J]. Wear, 2005, 258(7-8): 1209-1216.
- 7 Krupka I, Vrbka M, Hartl M. Effect of surface texturing on mixed lubricated non-conformal contacts[J]. Tribology International, 2008, 41(11): 1063-1073.
- 8 Nanbu T, Yasuda Y, Ushijima K, *et al.*. Increase of traction coefficient due to surface micro texture[J]. Tribol Lett, 2008, 29(2): 105-118.
- 9 Akbarzadeh S, Khonsari M M. On the prediction of running-in behavior in mixed-lubrication line contact[J]. J Tribol Trans ASME, 2010, 132(3): 032102.
- 10 Akbarzadeh S, Khonsari M M. Experimental and theoretical investigation of running-in[J]. Tribology International, 2011, 44 (2): 92-100.
- 11 Chen H, Ban T, Ishida M, *et al.*. Experimental investigation of influential factors on adhesion between wheel and rail under wet conditions[J]. Wear, 2008, 265(9-10): 1504-1511.

- 12 Hu Y Z, Zhu D. A full numerical solution to the mixed lubrication in point contacts[J]. *J Lubri Technol Trans ASME*, 1999, 122(1): 1-9.
- 13 Zhu X D, Hu Y Z. Effects of rough surface topography and orientation on the characteristics of EHD and mixed lubrication in both circular and elliptical contacts[J]. *Tribol Trans*, 2001, 44(3): 391-398.
- 14 Zhu D. Effect of surface roughness on mixed EHD lubrication characteristics[J]. *Tribol Trans*, 2003, 46(1): 44-48.
- 15 Lin Ziguang. Lasertex and tribologic design[J]. *Journal of Machine Design*, 2000, 17(4): 24-27.
林子光. 激光毛化与摩擦学设计[J]. *机械设计*, 2000, 17(4): 24-27.
- 16 Zhan Jian, Yang Mingjiang, Wang Hongcai. Effect of YAG laser pulse waveform to laser etching crater morphology on cylinder wall [J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(6): 0603032.
占 剑, 杨明江, 王红才. 脉冲 YAG 激光波形对缸套内壁激光刻蚀微坑形貌的影响[J]. *中国激光*, 2011, 38(6): 0603032.
- 17 Xing Xuhui, Li Zhengyang, Yang Mingjiang, *et al.*. Rolling wear properties of CL60 steel after pulsed Nd:YAG laser surface melting [J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(3): 0303006.
邢旭辉, 李正阳, 杨明江, 等. CL60 车轮材料表面激光离散熔凝的滚动磨损形貌[J]. *中国激光*, 2013, 40(3): 0303006.
- 18 Wang Baoan, Cai Baochun, Yang Bing, *et al.*. Effect of laser dispersed melting on contact fatigue with Low slip ratio[J]. *Applied Laser*, 2014, 34(6): 518-523.
王保安, 蔡宝春, 杨 兵, 等. 激光离散熔凝对小滑差率接触疲劳性能的影响[J]. *应用激光*, 2014, 34(6): 518-523.
- 19 Guo Shirui, Chen Zhijun, Zhang Qunli, *et al.*. Research progress on laser surface modification by high-power diode laser[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(5): 050004.
郭士锐, 陈智君, 张群莉, 等. 大功率半导体激光表面改性的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(5): 050004.
- 20 Izhak Etsion. State of the art in laser surface texturing[J]. *J Tribol Trans ASME*, 127(1): 248-253.
- 21 Deng Meng, Wang Yiqiang, Gu Yan, *et al.*. Microstructure and wear behaviour of laser hardened gray cast iron guideway[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(4): 0403009.
邓 猛, 王义强, 谷 岩, 等. 激光强化灰铸铁导轨的微观组织及磨损性能[J]. *中国激光*, 2014, 41(4): 0403009.
- 22 Zhong Jinshan, Lu Jinzhong, Luo Kaiyu, *et al.*. Influence of laser shock processing on tensile properties and tribological behaviours of AISI304 stainless steel[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(5): 0503002.
钟金山, 鲁金忠, 罗开玉, 等. 激光冲击对 AISI304 不锈钢拉伸性能和摩擦磨损性能的影响[J]. *中国激光*, 2013, 40(5): 0503002.
- 23 Evans C R, Johnson K L. Regimes of friction in elastohydrodynamic lubrication[J]. *Proc IMechE, Part C: J Mech Eng Sci*, 1986, 200(5): 313-324.
- 24 Zhu D. On some aspects of numerical solutions of thin-film and mixed[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 2007, 221(5): 561-579.
- 25 Timoshenko S P, Goodier J N. *Theory of Elasticity*[M]. New York: McGraw-Hill Colleye, 1970: 409-420.

栏目编辑: 张 雁