

铸型尼龙端面扭动摩擦接触模型及实验验证

滕 兵^{1,2}, 王世博^{1,2,3*}

- (1. 中国矿业大学 机电工程学院, 江苏 徐州 221116;
2. 中国矿业大学 摩擦学与可靠性工程研究所, 江苏 徐州 221116;
3. 清华大学 摩擦学国家实验室, 北京 100084)

摘 要: 基于刚性平冲头压在弹性半无限空间的理论研究, 建立了玻璃纤维增强铸型尼龙 (MC 尼龙) 复合材料与 45[#] 钢的端面扭动摩擦模型, 并开展了铸型尼龙端面扭动摩擦学试验. 结果表明: 摩擦扭矩 - 角位移 ($T - \theta$) 曲线随角位移幅值的增加由直线形、椭圆形最终转变为准平行四边形; 纯 MC 尼龙及其复合材料 (3% GF、5% GF) 在扭动角分别为 0.5°、1° 和 2° 时, 扭动接触界面处于完全滑移状态, 其不同的摩擦系数直接影响黏着半径与扭动角的关系, 即导致了不同的扭动界面接触机制; MC 尼龙复合材料的扭矩随扭动角的增加急剧减小至稳定状态, 由扭矩与扭动角的关系还可知部分滑移状态时的扭矩值高于完全滑移状态的扭矩. 不同角位移下的实验扭矩与计算曲线相似, 揭示了该扭动摩擦模型可近似预测 MC 尼龙复合材料的扭矩.

关键词: 扭动摩擦模型; $T - \theta$ 曲线; 摩擦系数; 接触机制

中图分类号: TH117.3

文献标志码: A

文章编号: 1004 - 0595 (2014) 01 - 0073 - 06

Friction Contact Model and Experimental Investigation of MC Nylon Composite under Face - on - Face torsion

TENG Bing^{1,2}, WANG Shi - bo^{1,2,3*}

- (1. School of Mechanical and Electronic Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China
2. Institute of Tribology and Reliability Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China
3. The State Key Laboratory of Tribology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Based on the theoretical study of a rigid flat punch acting on an elastic half - space, a face - on - face torsional friction model of glass fiber reinforced monomer casting nylon (MC nylon) against 45[#] steel was built. In addition, their tribological behavior was studied to validate the model. The results indicate that the shape of $T - \theta$ curves varied from linear, elliptical into quasi - parallelogram curves with increasing angular displacement. Torsional contact interface of MC nylon filled with 0%, 3% and 5% glass fiber was gross slip regimes, correspondingly under their torsional angular displacement of 0.5°, 1° and 2°. Friction coefficient directly influenced the variation of adhesion radius as a function of torsional angle, i. e. it resulted in different torsional interfacial contact regimes. The torsional torque of MC nylon composite underwent a sharp decrease to stable state with increasing torsional angle. From the above - mentioned relationship, the torque of torsional contact under partial slip was higher than that under gross slip. Good agreement between the calculated torque and experimental torque was found under different angular displacements, which indicated the torsional friction model could approximately predict the torque of MC nylon composite.

Key words: torsional friction model, $T - \theta$ curve, friction coefficient, contact regime

Received 27 June 2013, revised 28 August 2013, accepted 29 September 2013, available online 28 January 2014.

* Corresponding author. E - mail address: wangshb@cumt.edu.cn, Tel: +86 - 516 - 83591916.

The project was supported by the National Nature Science Foundation of China (51005235 and 50875253).

国家自然科学基金项目 (51005235 和 50875253) 资助.

扭动摩擦广泛存在于杵臼关节、球窝配合件、工程机械中的端面回转轴承以及运输交通中的回转件(如火车转向架心盘)。目前扭动摩擦主要集中于模拟试验研究, Briscoe 等^[1-2]报导了医用关节材料 PMMA 的扭动摩擦磨损行为, 蔡振兵等^[3-5]对球/平面扭动微动在大气中和不同湿度条件下的动力学特性和损伤特征进行了探讨, 张纱等^[6]开展了铸型尼龙端面扭动与滑动的摩擦学行为对比研究, 这些研究基于微动理论, 根据 $T-\theta$ 曲线形状定性解释了扭动界面滑移机制的变化过程。Wang^[7]利用有限元软件模拟了纯 MC 尼龙、3% MC 和 5% MC 尼龙复合材料的接触状态, 呈现不同大小的黏着、黏-滑、滑移接触区域。实验和仿真研究无法进一步解释 $T-\theta$ 曲线的差异以及黏着、黏-滑、滑移接触区域的划分, 针对端面扭动摩擦模型的理论研究还十分有限。

接触力学是摩擦学研究的理论基础, Hertz^[8]基于线弹性半无限空间理论建立了球/球、球/盘式接触模型。Lubkin^[9]基于 Hertz 接触理论研究了两个弹性相似的球体在法向载荷作用下的扭转接触, 建立了扭矩、扭转角与黏着半径的定量关系式。然而在大面积、有摩擦的面/面接触研究中, Hertz 的小接触区域和无摩擦假设不再成立, 线弹性半无限空间理论仍然适用^[10]。Johnson^[11]建立了刚性平冲头作用在弹性半无限空间的扭动接触模型, 得出了扭矩与扭转角之间的关系。Jaeger^[12]进一步阐述了接触界面处于完全黏着、部分滑移条件下的力学状态, 得出了部分滑移区域扭矩和扭转角分别与黏着半径的关系。Qiu 等^[13]研究了弹性相似材料的端面扭动摩擦接触行为, 提出了接触界面黏着、黏-滑、滑移三个区域的划分方法, 发现了扭矩随黏着半径和滑移方向的变化规律。本文作者基于弹性半无限空间理论, 建立刚性平冲头作用在弹性半无限空间的端面扭动摩擦模型, 获得了端面扭动扭矩与扭动角的关系, 并以 45# 钢/MC 尼龙端面扭动摩擦试验对模型进行了验证。

1 扭动摩擦模型

本文建立的端面扭动的摩擦模型, 其摩擦副和计算选取的微单元如图 1 所示。在单独法向载荷作用下, 平底刚性圆柱冲头对弹性半空间进行冲压时, 假设引起加载圆的均匀法向位移, 则其法向应力分布^[11,14]:

$$P_z = \begin{cases} 0, & r \geq a \\ \frac{p_0}{\sqrt{a^2 - r^2}}, & r \leq a \end{cases} \quad (1)$$

式中: a 为名义接触区域半径; r 为半径。法向集中 F_z 由(1)积分得:

$$F_z = \int_0^a 2\pi r p_z dr = 2\pi a P_0 \quad (2)$$

将(2)式代入(1)式得:

$$p_z = \frac{F_z}{2\pi a \sqrt{a^2 - r^2}} \quad (3)$$

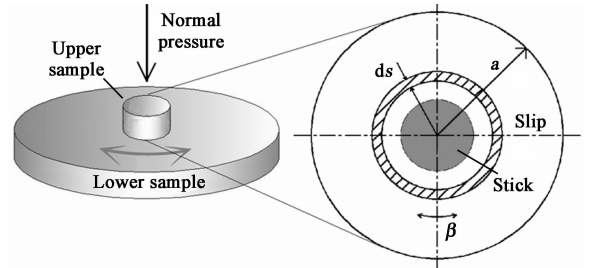


Fig. 1 Schematic of torsional friction pair and torsional calculation

图 1 扭动摩擦副和扭动计算示意图

对平底刚性冲头施加较小的扭矩载荷, 黏着条件下的切向应力 $q(r)$ 、角位移幅值 β 和扭矩 M_z 的公式^[9,12]:

$$q(r) = \frac{q_0 r}{\sqrt{a^2 - r^2}},$$

$$\beta = \frac{\pi q_0}{4G}, \quad M_z = \frac{4}{3} \pi a^3 q_0 \quad (4)$$

$$\mu_\theta = \begin{cases} \frac{\pi q_0}{4G} r, & r \leq a \\ \frac{q_0}{2G} \left(r \sin^{-1} \frac{a}{r} - a \sqrt{1 - \frac{a^2}{r^2}} \right), & r \geq a \end{cases} \quad (5)$$

$$\mu_z = \mu_r = 0 \quad (6)$$

式中: μ_θ, μ_r, μ_z 为极坐标下三方向的应变。

由于在 $r = a$ 的接触边缘出现应力集中, 接触边缘一定发生滑移。中心黏着区域可继续看作刚体的旋转, 而滑移区域满足库仑定律。依据公式(4)获得黏着区和滑移区和周向应力相似表达式:

$$\sigma_{z\phi} = \begin{cases} \int_r^a \frac{r q_0(s)}{\sqrt{s^2 - r^2}} ds = f P_z, & a \geq r \geq a^* \\ \int_{a^*}^a \frac{r q_0(s)}{\sqrt{s^2 - r^2}} ds, & r \leq a^* \end{cases} \quad (7)$$

式中: f 为摩擦系数; $\sigma_{z\phi}$ 为周向应力。将(7)在黏着区内进行积分得:

$$q_0(s) = -\frac{2f}{\pi} \frac{d}{ds} \int_s^a \frac{p_z(a, x)}{\sqrt{x^2 - s^2}} dx \quad (8)$$

黏着区域和滑移区域的扭动角保持一致,扭动角和扭矩由式(4) 叠加得到:

$$\beta(0, a^*) = \beta(a^*, a) = \frac{\pi}{4G} \int_{a^*}^a q_0(s) ds \quad (9)$$

$$M_z(0, a^*) = \frac{4\pi}{3} \int_0^{a^*} s^3 q_0(s) ds \quad (10)$$

将等式(8) 代入(9) 和(10) 得 $\beta(0, a^*)$ 和 $M_z(0, a^*)$:

$$\beta(0, a^*) = \frac{f}{2G} \int_{a^*}^a \frac{p_z(a, x)}{\sqrt{x^2 - a^{*2}}} dx \quad (11)$$

$$M_z(0, a^*) = \frac{4\pi}{3} \int_0^{a^*} s^3 \left(-\frac{2f}{\pi} \frac{d}{ds} \int_s^a \frac{p_z(a, x)}{\sqrt{x^2 - s^2}} dx \right) ds \quad (12)$$

在滑移区域, 接触端面所受的总摩擦力矩 $M_z(a^*, a)$ 为:

$$M_z(a^*, a) = \int_{a^*}^a 2\pi f p_z r ds = \int_{a^*}^a \frac{F_z}{a \sqrt{a^2 - r^2}} r^2 dr \quad (13)$$

因此,总扭矩 M_z 为:

$$M_z = M_z(0, a^*) + M_z(a^*, a) \quad (14)$$

2 试验材料和方法

端面扭动摩擦试验在自制的端面扭动摩擦试验机^[6]上进行,扭动角位移幅值为 0.5° 、 1° 和 2° ,扭动频率为 3 Hz,法向载荷为 123 N,循环次数为 10 000 次.试验条件为干摩擦,室温,相对湿度为 45% ~ 60%.扭动摩擦试验上试样选取直径 10 mm 的 45# 钢销,下试样选取直径 40 mm 的纯 MC 尼龙及其复合材料(3%、5% 玻璃纤维填充)圆盘,试验材料的前期准备过程详见参考文献[15].MC 尼龙复合材料的机械性能和摩擦学性能列于表 1 中.

3 结果与讨论

3.1 $T-\theta$ 曲线

图 2 为 MC 尼龙复合材料在不同角位移幅值下的摩擦扭矩-角位移($T-\theta$) 试验曲线.典型的微动图理论^[16-17]表明:不同形状的 $T-\theta$ 曲线代表了不同的摩擦接触机制.纯 MC 尼龙的 $T-\theta$ 曲线在 0.5° 、 1° 和 2° 角位移幅值下均呈现准平行四边形,说

表 1 MC 尼龙复合材料机械性能和摩擦学性能^[7]

Table 1 Mechanical and tribological properties of MC nylon composite^[7]

Materials	Compressive Strength/MPa	Tensile Strength/MPa	Shear modulus/GPa	Friction Coefficient
Pure MC nylon	118.3	63.0	1.00	0.162
3% GF/MC nylon	112.2	64.5	1.01	0.474
5% GF/MC nylon	121.0	63.4	1.01	0.574

明扭动摩擦界面始终处于完全滑移状态.MC 尼龙复合材料(3% GF、5% GF)的 $T-\theta$ 曲线在角位移幅值为 0.5° 时为准直线形,扭动界面大部分处于黏着区.当角位移随之增大至 1° 时,3% GF-MC 尼龙复合材料的 $T-\theta$ 曲线为准平行四边形,表明运动状态已由部分滑移转变为完全滑移.5% GF-MC 尼龙复合材料的 $T-\theta$ 曲线呈现椭圆形,界面仍处于部分滑移区.当角位移随之增大至 2° 时,MC 尼龙复合材料的 $T-\theta$ 曲线转变为准平行四边形,表明运动状态已由部分滑移转变为完全滑移.在不同的角位移幅值下,纯 MC 尼龙及其复合材料(3% GF、5% GF)的 $T-\theta$ 曲线形状发生转变.

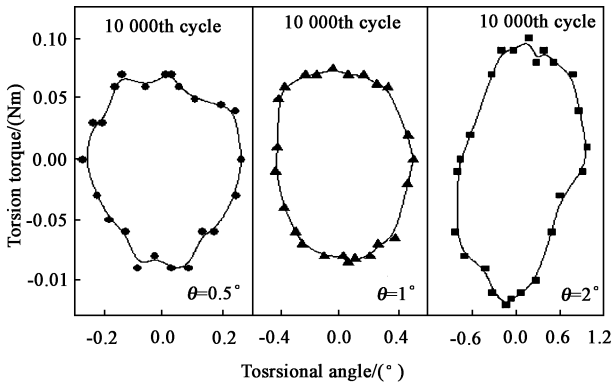
3.2 模型计算与讨论

图 3 为初始接触条件下 MC 尼龙的法向应力变化曲线,呈“浴盆型”,忽略切应力对法向应力的二次影响.中心区域(半径 $0 \sim 0.002$ m)的法向应力约为 1.1 MPa;中间区域(半径 $0.002 \sim 0.004$ m)的法

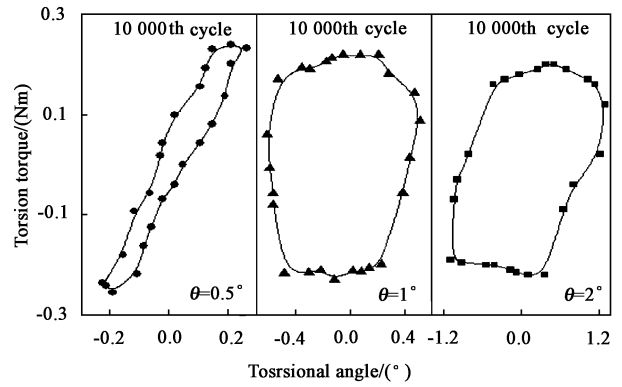
向应力由约 1.1 MPa 增长为约 1.7 MPa,Wang^[6]利用有限元分析验证了计算的正确性.然而在平底冲头的棱角处(半径 0.005 m)出现法向应力集中,有限元分析因其收敛标准而无法获得真实应力结果.

图 4 和图 5 分别为黏着区域和滑移区域的扭矩随黏着半径的变化曲线.随黏着半径的增加($0 \sim 0.001$ m),黏着区域和滑移区域扭矩变化平缓,滑移区扭矩在端面总扭矩中起主导作用;黏着半径增加直至 0.005 m 时,黏着区扭矩急剧上升,滑移区扭矩则显著下降.该模型中只考虑弹性变形且忽略磨损形貌等对扭矩的影响,黏着区域和滑移区域的扭矩均随摩擦系数的增大而线性增加.

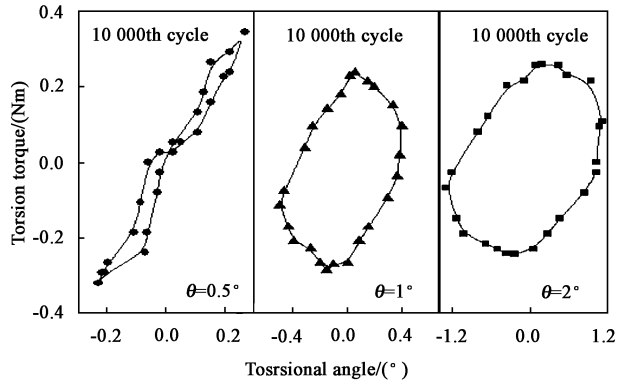
由公式(11)可得出,不同摩擦系数下黏着半径与扭动角的变化曲线如图 6 所示.在扭动角为 0.5° 时,纯 MC 尼龙及其复合材料(3% GF、5% GF)的黏着半径分别约为 0.025、2.2 和 3.4 mm,表明纯 MC 尼龙($f=0.162$) 已处于完全滑移状态,而 MC 尼龙



(a) Pure MC nylon



(b) Composites filled with 3% GF



(c) Composites filled with 5% GF

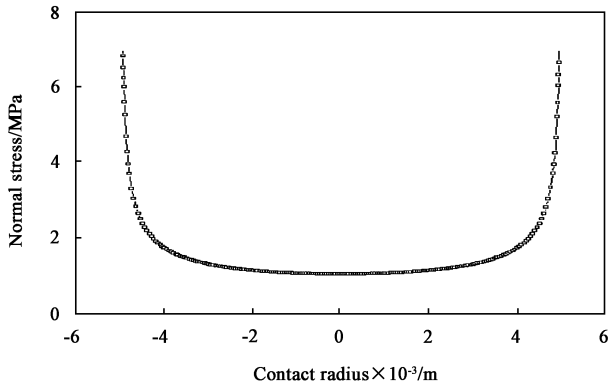
Fig. 2 $T-\theta$ curves under different torsion angles图2 MC尼龙在不同角位移幅值条件下的 $T-\theta$ 曲线

Fig. 3 Variation of normal pressure of MC nylon under initial contact condition

图3 初始接触条件下MC尼龙的法向应力变化曲线

复合材料界面大部分处于黏着区,可由实验 $T-\theta$ 曲线得到验证(图2).在扭动角为 1° 时,3% GF-MC 尼龙复合材料($f=0.474$)的黏着半径约为 0.2 mm ,几乎处于完全滑移状态[图2(b)];5% GF-MC 尼龙复合材料($f=0.574$)的黏着半径约为接触半径的 $1/10$,接触中心仍有较大黏着区域.在扭动角为 2° 时,5% GF-MC 尼龙复合材料($f=0.574$)的黏着半

径约为 0.01 mm ,处于完全滑移状态[图2(c)].MC 尼龙复合材料呈现相似的剪切模量,不同的摩擦系数直接影响黏着半径与扭动角的关系,即导致了不同的扭动界面接触机制.由图6还可以看出:在 0° 扭动角时(初始接触),纯MC尼龙及其复合材料(3% GF,5% GF)的黏着半径分别为 4.71 、 4.76 和 4.85 mm ,在边缘处存在一定的相对“微滑”,主要是因为平冲头的棱角处法向应力集中,产生无穷大的

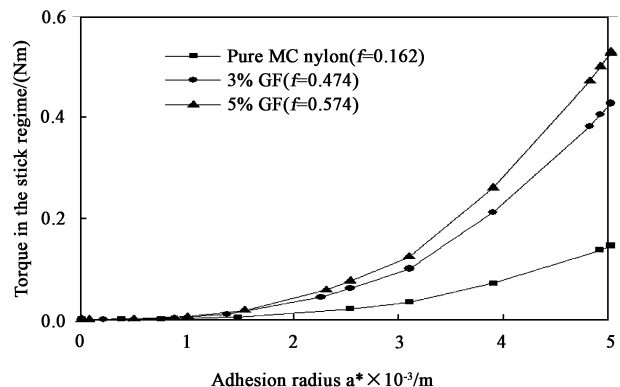


Fig. 4 Torque in the stick regime as a function of adhesion radius under different friction coefficients

图4 黏着区域的扭矩随黏着半径的变化曲线

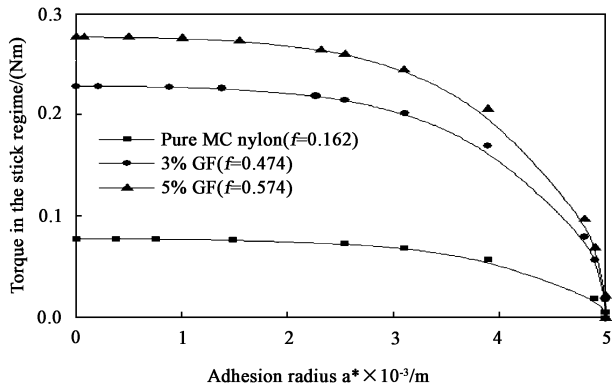


Fig. 5 Torque in the slip regime as a function of adhesion radius under different friction coefficients

图 5 滑移区域的扭矩随黏着半径的变化曲线

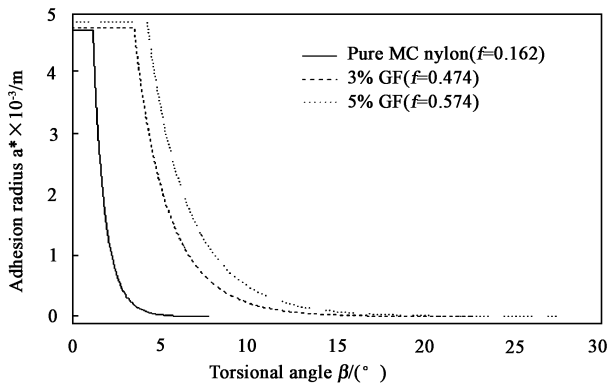


Fig. 6 Adhesion radius as a function of torsional angle under different friction coefficients

图 6 不同摩擦系数下黏着半径随扭动角的变化曲线

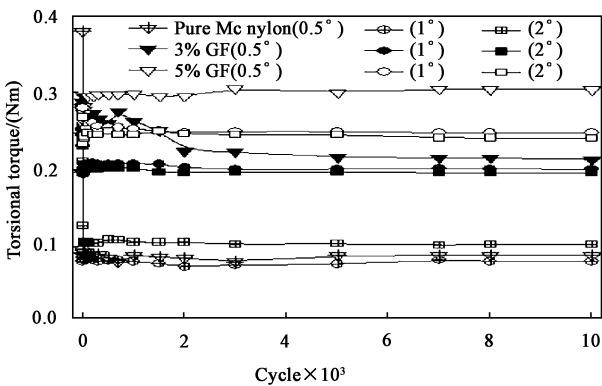


Fig. 7 Torsional friction torque vs cycle number

图 7 MC 尼龙实验摩擦扭矩随循环次数的变化曲线

切向应力。

图 7 为摩擦试验中扭矩随循环次数的变化曲线. 在 10 000 个循环周期内, 不同扭动角下的摩擦扭矩已趋于稳定值, 并绘制于图 8 中. 在扭动角为 0.5°时, MC 尼龙复合材料(3% GF、5% GF)摩擦扭

矩值偏大, 主要是因为摩擦界面部分处于黏着状态. 图 8 为摩擦模型和实验分别得出的摩擦扭矩与扭动角的关系. 纯 MC 尼龙及其复合材料(3% GF、5% GF)的端面总扭矩随扭动角的增加急剧减小至稳定状态, 分别为 0.078、0.228 和 0.276 N·m, 摩擦扭矩随摩擦系数的增大呈线性增加. 结合图 6 可知, 黏着半径 - 扭动角曲线有相同的变化趋势, 在较小角位移幅值时, 黏着半径较大, 接触界面处于部分滑移状态, 此时摩擦扭矩值较大; 在较大角位移幅值时,

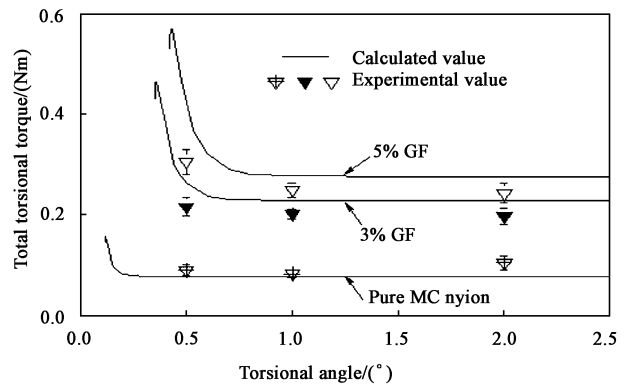


Fig. 8 Torsional friction torque versus torsion angle based on the friction model

图 8 MC 尼龙计算与实验摩擦扭矩随扭动角变化曲线

黏着半径较小, 接触界面出于完全滑移状态时, 摩擦扭矩值小. 所以, 部分滑移状态时的扭矩值高于完全滑移状态的扭矩. 对比可知, 不同角位移下的实验扭矩与计算曲线相似, 揭示了该扭动摩擦模型可近似预测 MC 尼龙复合材料的摩擦扭矩与扭动角的关系.

4 结论

a. MC 尼龙复合材料的摩擦扭矩 - 角位移 ($T-\theta$) 曲线随角位移幅值的增加由直线形、椭圆形最终转变为平行四边形. 在不同的角位移幅值下, 纯 MC 尼龙及其复合材料(3% GF、5% GF)的 $T-\theta$ 曲线形状发生转变. 初始接触条件下, MC 尼龙在平底冲头的棱角处出现法向应力集中.

b. 在扭动角分别为 0.5°、1°和 2°时, 纯 MC 尼龙及其复合材料(3% GF、5% GF)的扭动接触界面转变为完全滑移状态, 材料的摩擦系数直接影响黏着半径与扭动角的关系, 即导致了不同的扭动界面接触机制. MC 尼龙复合材料在边缘处存在一定的相对“微滑”区域.

c. MC 尼龙复合材料的扭矩随扭动角的增加

急剧减小至稳定状态,端面总扭矩随摩擦系数的增大呈线性增加.部分滑移状态时的扭矩值高于完全滑移状态的扭矩.不同角位移下的实验扭矩与计算曲线相似,揭示了该扭动摩擦模型可近似预测MC尼龙复合材料的扭矩.

参考文献:

- [1] Briscoe B J, Chateauminois A, Lindley T C, *et al.* Fretting wear behaviour of polymethylmethacrylate under linear motions and torsional contact conditions [J]. *Tribology International*, 1998, 31(11):701-711.
- [2] Briscoe B J, Chateauminois A, Lindley T C, *et al.* Contact damage of poly (methylmethacrylate) during complex micro-displacements [J]. *Wear*, 2000, 240(1-2):27-39.
- [3] Cai Z B, Zhu M H, Y J, *et al.* Experimental investigation and simulation of torsional fretting mode [J]. *Tribology*, 2008, 28(1):18-22 (in Chinese) [蔡振兵, 朱旻昊, 俞佳, 等. 扭动微动的模拟及其试验研究 [J]. *摩擦学学报*, 2008, 28(1):18-22].
- [4] Cai Z B, Zhu M H, Zhou Z R. An experimental study torsional fretting behavior of LZ50 steel [J]. *Tribology International*, 2010, 43:361-369.
- [5] Cai Z B, Yang S, Lin X Z, *et al.* Oxidation behavior in different humid environments induced by torsional fretting wear [J]. *Tribology*, 2010, 30(6):527-531 (in Chinese) [蔡振兵, 杨莎, 林修洲, 何莉萍, 朱旻昊. 扭动微动条件下含水气氛对氧化行为的影响 [J]. *摩擦学学报*, 2010, 30(6):527-531].
- [6] Zhang S, Wang S, Ge S R. Tribological behavior of MC nylon composite under face-on-face torsion and sliding [J]. *Tribology*, 2011, 31(4):375-380 (in Chinese) [张纱, 王世博, 葛世荣. 铸型尼龙端面扭动与滑动摩擦学行为研究 [J]. *摩擦学学报*, 2011, 31(4):375-380].
- [7] Wang S, Teng B, Zhang S. Torsional wear behavior of monomer casting nylon composites reinforced with GF: effect of content of glass fiber [J]. *Tribology Trans*, 2013, 56(2):178-186.
- [8] Hertz H R. On the contact of elastic solids [J]. *Reine Angew Math*, 1881, 92:156-171.
- [9] Lubkin J L. The torsion of elastic sphere in contact [J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1951, 7:183-187.
- [10] Gallego L, Nélias D, Deyber S. A fast and efficient contact algorithm for fretting problems applied to fretting mode I, II and III [J]. *Wear*, 2010, 258:208-222.
- [11] Johnson, K L. *Contact Mechanics*. Cambridge: Cambridge University Press, 1985.
- [12] Jaeger J. Torsional impact of elastic spheres [J]. *Archive of Applied Mechanics*, 1994, 64:235-248.
- [13] Qiu H, Dini D, Hills D A. Torsional contact of an elastic flat-ended cylinder [J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2008, 56, 3:352-3362.
- [14] Jager J. Axi-symmetric bodies of equal material in contact under torsion or shift [J]. *Archive of applied mechanics*, 1995, 65:478-487.
- [15] Wang S, Zhang S, Mao, Y. Torsional wear behavior of MC nylon composites reinforced with GF: effect of angular displacement [J]. *Tribology Lett*, 2012, 45:445-453.
- [16] Vingsbo O, Soderberg S. On fretting map [J]. *Wear*, 1988, 126:131-147.
- [17] Zhou Z R, Nakazawa K, Zhu, M H, *et al.* Progress in fretting maps [J]. *Tribology International*, 2006, 39:1068-1073.