

高速摆动条件下 PTFE 编织复合材料 干摩擦热行为研究

Study on Friction Thermal Behavior of PTFE Braided
Composites Under High-speed Oscillating Conditions

康克家, 杜三明, 张永振, 赵 飞

(河南科技大学 材料科学与工程学院, 河南 洛阳 471003)

KANG Ke-jia, DU San-ming, ZHANG Yong-zhen, ZHAO Fei

(School of Materials Science and Engineering, Henan University of
Science and Technology, Luoyang 471003, Henan, China)

摘要: 利用自制高速摩擦实验机, 以聚四氟乙烯 (PTFE) 编织复合材料为研究对象, 与不锈钢 9Cr18Mo 配副, 进行高速摆动下的干摩擦实验, 研究摩擦热的影响因素及变化规律; 利用扫描电子显微镜对摩擦表面进行观察, 分析其磨损机制。结果表明: 摩擦温度随载荷增加而升高, 在摩擦初期摩擦温度随频率增加而降低, 之后又随频率增加而升高, 并最终达到动态平衡; 摩擦因数随时间的增加先急剧降低后小范围缓慢回升, 最终保持相对稳定, 且与摩擦温度有一定的对应关系; 磨损机制以剥落与黏着磨损为主, 温度是影响摩擦过程与磨损机制的重要因素。

关键词: PTFE; 编织复合材料; 干摩擦; 摩擦热

中图分类号: TH117 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2011)11-0015-03

Abstract: The dry friction test of polytetrafluoroethene (PTFE) braided composites under high-speed Oscillating conditions has been carried out on the special high-speed tribo machine and 9Cr18Mo as counterpart, the influences and the variation rules of friction heat has been studied. Results show that friction temperature increases with the increasing of load; and the temperature decreases with increases in frequency of short duration in the initial friction stage, later increases with increased frequency, and finally reach temperature dynamic balance; the friction coefficient rises slowly in small range before a sharply reduces with the increase in time, ultimately, it maintains a relatively stable state, and has certain corresponding relationship with friction temperature; The main abrasion mechanism of friction pair is adhesive wear, and temperature is an important factor that influences friction process and the wear mechanism.

Key words: PTFE; braided composites; dry friction; friction heat

摩擦过程中^[1], 由于摩擦功大部分转变成热能, 而导致表面温度的升高, 即为摩擦热。由于摩擦生热, 接触区的温度升高会导致黏着磨损现象的发生, 严重影响摩擦副的正常工作, 研究认为, 摩擦热是影响摩擦磨损机理的重要作用因素^[2]。国内外研究摩擦热对机构零件产生影响的比较多, CHEN^[3]用有限元法分析刹车过程中轮轨温度场分布和钢轨波磨对轮轨热接触的影响, V Abouei 等^[4]人利用热电偶测量表面的摩擦温度, 研究低速低载的条件下摩擦热对表面的影响, 徐建生等^[5]利用 ANSYS 有限元软件分析摩擦副表面滑动接触过程中, 在摩擦热和力场的耦合作用下, 接触区表现出的局部温度变化、应力变化等特性。但是对实际工况下产生摩擦热的影响因素及变化规律却很少涉

及。因此, 开展高速条件下摩擦表面摩擦热的研究, 探讨摩擦热的一些变化规律、摩擦热对摩擦表面摩擦因数和摩擦机制的影响, 具有十分重要的实际意义和理论价值^[6]。

聚四氟乙烯 (PTFE) 纤维织物衬垫早在 20 世纪 50 年代中期因关节轴承自润滑功能的需求应运而生^[7]。织物衬垫作为自润滑关节轴承的重要组成部分, 通常粘接在关节轴承外圈内表面, 因其性能直接影响着自润滑关节轴承的寿命, 受到了国内外学者的广泛关注^[8-13]。本工作在自制的高速摩擦实验机上对 PTFE 编织材料进行干摩擦实验, 模拟工况条件下, 对产生摩擦热的影响因素及变化规律进行研究。

1 实验

实验在自制高速摩擦实验机上进行,采用自制 PTFE 编织材料,试样厚度为 (0.38 ± 0.02) mm,试样宽度为 (40 ± 0.05) mm,长度约为 53 mm。粘贴于曲率半径为 (50 ± 0.05) mm、弧度为 $60^\circ \pm 0.5^\circ$ 的试样台上。配副材料采用不锈钢(9Cr18Mo),符合 GB/T3086 高碳铬不锈钢轴承钢技术条件。进行冷处理,处理温度控制在 -55°C 以下,保温时间不少于 1 h。尺寸为 $\phi 50$ mm \times 50 mm,表面粗糙度 $R_a = 0.16 \mu\text{m}$ 。试样托采用不锈钢(9Cr18Mo)。实验前用丙酮对试样环进行去油处理,晾干后装机,然后静止加载 15 min 后开始实验,并用实验机上配有的热电偶对试样表面温度进行跟踪测定。实验室环境为室温 25°C ,相对湿度 60%。实验参数水平如表 1 所示。

表 1 实验参数水平表

Table 1 Factors and levels of experiments

Factors	Factors and levels		
	1	2	3
Load/kN	40	80	120
Frequency/Hz	5	15	25

2 结果与分析

2.1 载荷、频率对摩擦热温度的影响

图 1(a)为不同载荷条件下温度随摩擦循环次数的变化曲线。从图中可以看出,不同载荷条件下,摩擦温度均在摩擦初期急剧升高,且其随着摩擦时间的增加,变化渐缓,最终达到动态平衡。同时比较三条曲线可以看出,在频率和摆动角度一定时,摩擦温度随载荷的增大而升高,载荷为 40 kN 时摩擦温度在 60°C 左右达到动态平衡(在一定范围内波动)。80, 120 kN 条件下摩擦温度可达到更高,且达到平衡阶段所需时间更

长。图 1(b)为不同频率条件下温度随摩擦循环次数的变化曲线,从图中可以看出,不同频率条件下,摩擦循环约 2000 次前,摩擦温度急剧升高,之后随着摩擦时间的延长,其变化渐缓,且频率为 5 Hz 时最先达到动态平衡,而 15, 25 Hz 条件下,温度仍在升高。同时比较三条曲线可以看出,在载荷和摆动角度一定时,摩擦温度在摩擦循环约 2000 次前,频率越小温度上升越快,出现低频温升高于高频的瞬间,之后随着摩擦时间的延长,低频的温度变化率变缓,高频的摩擦温度又超过低频,最终呈现频率越大温度越高的规律。图 1(b)中出现交点 A,这可用热力学理论中摩擦热在摩擦副间的分配情况不同来进行解释,公式(1):

$$\frac{q_1}{q_2} = \sqrt{\frac{c_1 \rho_1 \lambda_1}{c_2 \rho_2 \lambda_2}} \quad (1)$$

式中: c, ρ, λ 分别表示比热容、密度、导热系数。金属摩擦副热扩散率大,热量在物体中传播快,受热影响的区域大。一般认为,两物性相差不大及其几何形状相近的摩擦副,可使二者形成的摩擦热均匀分布在摩擦副内^[14]。当摩擦副材料的物理化学性能差别较大时,从式(1)可以看出,摩擦过程产生的热会较多地传入导热性能好的配副材料中去。在本实验中因摩擦配副材料为不锈钢(9Cr18Mo)与 PTFE 编织复合材料,很明显较多热量会传入不锈钢(9Cr18Mo)中去。由于摩擦副在相对滑动过程中热量产生的同时伴随热量的散失,同时频率越高热量散失越快(实验中 PTFE 编织材料试样固定,不锈钢做高速摆动,摆动频率越高散热越快),可以认为图 1(b)所示中,摩擦开始阶段热量传导处于不平衡状态,低频率情况下由于此时产生的热量虽然小于高频率,但其热量散失也小于高频率时,当其产生热量与散失热量的差值大于高频率时,便出现 A 点以前低频率摩擦温度升高大于高频率时的情况。又因高频率摆动下产生热量多,更易达到热传导平衡,从而积聚较多热量,摩擦温度又很快超过低频率时,表现出频率越高温度越高的现象。

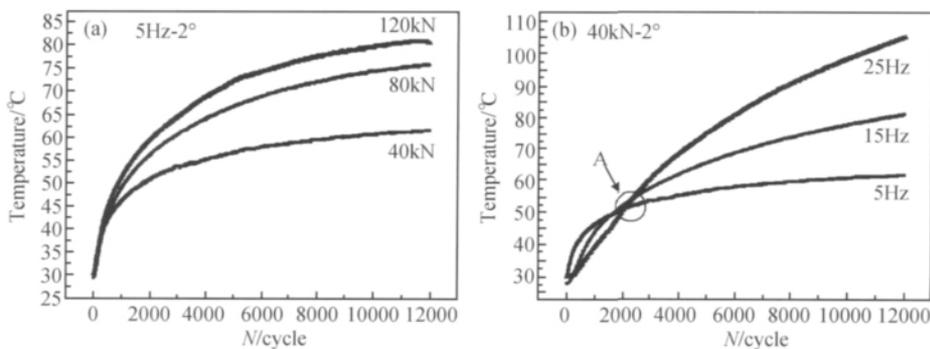


图 1 不同载荷(a)和频率(b)下温度随摩擦循环次数的变化曲线

Fig. 1 Temperature-circle curves under different load (a) and frequency (b) conditions

2.2 摩擦因数与摩擦热的关系

图 2 为摩擦因数与摩擦温度随时间变化曲线。从图 2 中可以看出,摩擦因数在实验初期有一个由较高值迅速回落的过程,这一过程与实验前静载 15min,实验开始时由静摩擦因数转变为动摩擦因数相对应。图 2 中的摩擦因数与摩擦温度也呈现出一定对应关系。

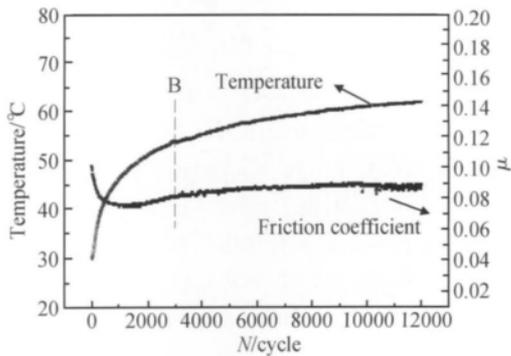


图 2 摩擦因数与摩擦温度随摩擦循环次数变化曲线(40kN-5Hz-2°)

Fig. 2 Friction coefficient-circle and temperature-circle curves

从图 2 中可以看出,实验初期摩擦因数在摩擦温度转变较大的 B 段前,出现不稳定现象,摩擦因数先急剧降低,又在较小范围内缓步回升,最后达到动态平衡,这是在摩擦初期摩擦过程与磨损机制变化的磨合现象。在实验装卸过程中发现不锈钢 9Cr18Mo 摩擦副上有转移膜的生成(见图 3)。摩擦过程中摩擦热的不断积聚,导致编织材料表面局部软化,减少了接触面的剪切应力,在摩擦配副表面形成的 PTFE 转移膜,使得此时摩擦副之间的接触表现为转移膜与编织材料之间的接触,这种接触大大减轻了摩擦阻力,显著降低摩擦因数,与此同时,实验中转移膜不断地被挤向两边,出现转移膜的破裂与生成共同作用,因此在磨损中出现摩擦因数缓慢增加而又最终达到基本稳定的过程^[8, 9]。

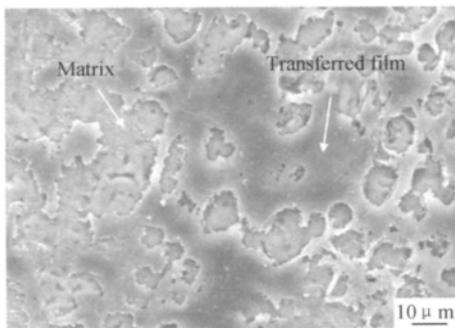


图 3 对偶环表面转移膜的 SEM 照片(40kN-5Hz-2°)

Fig. 3 SEM micrographs of transferred film

2.3 摩擦热对磨损机制的影响

图 4 为 PTFE 编织材料磨损 SEM 照片。在高速摆动情况下,摩擦副表面间因相对滑动而发生摩擦,摩擦生热致使材料表面软化,PTFE 编织材料在摩擦过程中产生疲劳与黏着损伤,随着材料整体温升,引发黏着磨损与剥落(见图 4)。研究认为,高速条件下的 PTFE 编织材料磨损状况,温度起着非常重要的作用。

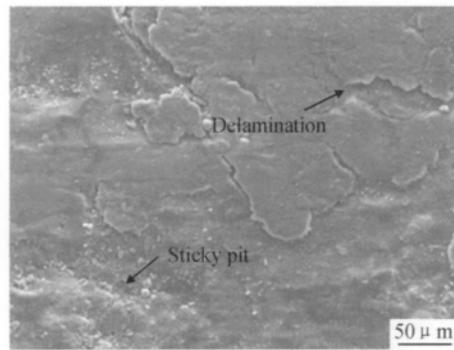


图 4 PTFE 编织材料磨损 SEM 形貌(40kN-25Hz-2°)

Fig. 4 SEM wearing morphology of PTFE braided composites

3 结论

- (1)高速摆动条件下产生大量摩擦热,因 PTFE 编织材料导热性能差,摩擦表面温度急剧升高,且其随载荷和频率的增加而升高,并最终达到平稳状态。
- (2)摩擦因数与摩擦温度呈现一定的对应关系。
- (3)磨损机制以剥层与黏着磨损为主,且温度是影响摩擦过程与磨损机制的重要因素。

参考文献

[1] 周仲荣. 摩擦学发展前沿[M]. 北京: 科学出版社, 2006.

[2] 邱小艳, 薄玉成. 基于有限元的滑动摩擦副温度影响因素分析[J]. 机械工程与自动化, 2007, 145(6): 48-50.

[3] CHEN Y C, KUANG J H, CHEN L W, et al. Wheel-rail thermal contacton rail corrugation during brak-ing[C]// Proceedings of 2005 ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, 2005, Orlando, Florida USA, Orlando: ASME, 2005. 417-424.

[4] ABOUEI V, SAGHAFIAN H, KHEIRANDISH SH. Effect of microstructure on the oxidative wear behavior of plain carbon steel [J]. Wear, 2007, 262: 1225-1231.

[5] 徐建生, 王仕仙, 卢霞, 等. 滑动摩擦热-结构耦合的有限元分析[J]. 润滑与密封, 2009, 34(3): 25-31.

[6] 段海涛, 杜三明, 张永振, 等. 高速干滑动条件下钢/铜摩擦副摩擦磨损表面摩擦热规律研究[J]. 润滑与密封, 2007, 32(10): 39-42.

[7] FRIEDRICH K. Friction and Wear of Polymer Composites[M]. Amsterdam: Elsevier Science Publishers B V, 1986. 363-396.

和试验验证,得出厚度为 0.7mm GMW2+0.7mm GMW2SPR 接头,搭接宽度为 20mm 和 25mm 时,接头的失效形式与搭接宽度为 15mm 时接头的失效形式完全相同,均为铆钉脱出失效。图 11 为在 3 种不同搭接宽度下,模拟结果与验证试验结果的峰值载荷与搭接宽度之间的关系。

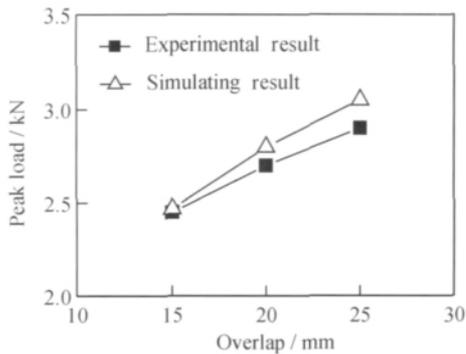


图 11 SPR 接头计算与试验结果的力-搭接宽度曲线对比
Fig. 11 Comparison of the load-overlap curve between calculating and experimental result

从图 11 可以看出,SPR 接头的峰值载荷随着搭接宽度的增加而增大,有限元模拟结果与试验结果的趋势一致。由此可见,本研究所建立的有限元模型能够对 SPR 接头的剪切强度进行预测分析。

4 结论

(1)根据自冲铆接接头的截面形状及尺寸,考虑材料之间的接触形式而建立的有限元模型,可较好地预

测 SPR 接头的失效形式和拉剪强度。

(2)通过对 SPR 接头拉剪过程的数值模拟与试验验证分析表明,SPR 接头的拉剪过程存在不同的失效模式:铆钉拉脱失效和母材失效。这两种失效模式的发生与材料的强度、板材厚度等因素密切相关。

参考文献

- [1] VOELKNER W. Present and future developments of metal forming selected examples [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2000, 106(1-3): 236-242.
- [2] LAPENSEE M. Self-pierce riveting technology: a joining solution for light metals[J]. Light Metal Age, 2003, 61(9-10): 32-35.
- [3] 李晓静, 李晓雷. 汽车制造业中自冲铆接的新型连接工艺初探[J]. 天津职业院校联合学报, 2007, 9(5): 16-18.
- [4] 岁波, 都东, 常保华, 等. 轻型车身自冲铆连接技术的发展[J]. 汽车工程, 2006, 28(1): 85-89.
- [5] 苏鸿英. 自攻铆接技术—轻金属连接方法[J], 世界有色金属, 2004, (3): 50-51.
- [6] 成大先. 机械设计手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2010.
- [7] SUN X, STEPHENS E V, KHALEEL M A. Fatigue behaviors of self-piercing rivets joining similar and dissimilar sheet metals [J]. International Journal of Fatigue, 2007, 29: 370-386.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51005004);北京市自然科学基金资助项目(3102002)

收稿日期:2010-12-27;修订日期:2011-05-20

作者简介:钟毅(1985-),男,硕士研究生,研究方向:材料连接方法,联系地址:北京市朝阳区平乐园 100 号,北京工业大学材料学院 336 室(100124),E-mail: zhongyi@emails.bjut.edu.cn

(上接第 17 页)

- [8] 沈雪瑾, 曹磊, 陈有光, 等. 织物衬垫自润滑关节轴承的研究现状与展望[J]. 轴承, 2009, (3): 57-61.
- [9] 向定汉, 潘青林, 姚正军, 等. 聚四氟乙烯自润滑编织复合材料关节轴承的摆动摩擦磨损性能研究[J]. 摩擦学学报, 2003, 23(1): 72-75.
- [10] 狄葆璋, 洪富岳, 王云, 等. 自润滑关节轴承的磨损实验分析[J]. 轴承, 1999, (6): 25-26.
- [11] 杨咸启. 自润滑关节轴承寿命估算方法[J]. 轴承, 1994(10): 2-6.
- [12] GUO Qiang, SONG Yun-feng, QIAO Hong-bin, et al. The friction and wear properties of the spherical plain bearings with self-lubricating composite liner in oscillatory movement [J]. Journal of Wuhan University of Technology -Mater Sci Ed,

- [13] 向定汉, 潘青林, 骆心恪, 等. PTFE 编织复合材料重载关节轴承的旋转摩擦特性[J]. 复合材料学报, 2003, 20(6): 125-129.
- [14] BARBER J R. The conduction of heat from sliding solids[J]. Int J Heat Mass Transfer, 1970, 13: 857-869.

基金项目:国家自然科学基金(50975078);973 计划前期研究专项(2010CB635113);国家重点联合基金(U1034002)

收稿日期:2011-03-03;修订日期:2011-07-01

作者简介:康克家(1986-),男,硕士研究生,目前主要从事材料干摩擦学研究,联系地址:河南省洛阳市涧西区西苑路 48 号(471003),E-mail: kangkejia5@163.com