

橡胶磨损花纹裂纹角的分形计算法

杨兆春¹, 张嗣伟²

(1 北京石油化工学院 机械系, 北京 102600;

2 石油大学 研究生院, 北京昌平 102200)

摘要: 在考察橡胶磨损花纹裂纹角与橡胶磨损表面分形维数关系的基础上, 提出了用分形计算橡胶磨粒磨损的磨损花纹裂纹角的新方法, 发现丁苯橡胶和丁腈橡胶磨损花纹的裂纹角在不稳定磨损阶段基本保持不变, 而在稳定磨损阶段则随法向载荷的增大而减小

关键词: 橡胶; 磨损花纹裂纹角; 分形

中图分类号: TQ 331

文章标识码: A

文章编号: 1004-0595(1999)04-0372-05

橡胶磨粒磨损的物理过程主要是微观分子断裂和宏观分层剥落, 后者是橡胶表层产生周期性撕裂, 形成舌状物和舌状物端部断裂的结果^[1,2]. 裂纹扩展方向与水平线的夹角称为磨损花纹的裂纹角, 裂纹角的形成对于磨损花纹的产生和发展影响很大, 因此, 确定裂纹角的大小对于深入揭示橡胶磨粒磨损机理具有十分重要的意义. Southern 等^[3,4]根据测出的磨损花纹移动速率和橡胶的线性磨损率来计算裂纹角, 但计算过程繁琐. 分形几何作为描述混沌现象的有效方法已广泛应用于众多学科领域. 80 年代末, 美国 Stupak^[5,6]等首次采用这种方法对橡胶磨损表面和磨屑进行了分析, 得到了橡胶磨损表面的分形维数与载荷及滑动速度的试验关系. 本文在此基础上进一步研究橡胶磨粒磨损花纹裂纹角与其磨损表面分形维数之间的关系, 从而建立一种确定其裂纹角的新方法.

1 磨损表面分形维数与磨损花纹裂纹角之间的关系

张嗣伟^[1]发现在橡胶表面的磨损状态从非稳态向稳态发展的过程中, 尺度较小的磨损花纹会发展成形态相似但尺度更小的次级磨损花纹. 随后, Stupak 等根据文献[1]对天然橡胶、丁苯橡胶和聚丁二烯 3 种材料进行了磨损试验, 并根据其试验结果从数学上说明了橡胶磨损表面的分形特征^[5,6], 但未能阐明其物理意义. 为了揭示橡胶磨损表面分形维数与磨损花纹裂纹角之间的内在关系, 我们提出如图 1 所示的橡胶磨粒磨损的生成元模型.

取 $AB = 1$, $CA = k$, 则测量次数 N 为:

$$N = k + 1 \quad (1)$$

相似比 r ^[7]: $1/r = (k^2 + 1 + 2k \cos \beta)^{\frac{1}{2}}$ (2)

则维数 D_f 为^[7]:

$$D_f = \lg N / \lg (1/r) = \lg (k + 1) / \lg (k^2 + 1 + 2k \cos \beta)^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

当 $\beta=90^\circ$ 时, $k=\operatorname{ctg}\alpha$, 则:

$$D_f=2\lg(\operatorname{ctg}\alpha+1)/\lg(\operatorname{ctg}^2\alpha+1). \tag{4}$$

式中: D_f 为橡胶磨损表面的分形维数; α 为橡胶磨损花纹裂纹角, 即磨损花纹与水平方向的夹角. 由式 (4) 可以看出, 维数 D_f 与 α 之间存在着对应关系. 因此, 可以通过测量分形维数来确定裂纹角.

2 磨损花纹裂纹角的确定

为了获得实际橡胶磨损表面以计算其裂纹角, 采用 W-1 型微量摩擦磨损试验机在不同的法向载荷和滑动速度下对丁苯橡胶和丁腈橡胶进行磨损试验. 图 2 所示为法向载荷 8 N, 滑动速度 0.10 m/s 条件下橡胶磨损表面形貌 SEM 照片. 可以看到磨损表面存在尺度较小的磨损花纹. 用 S4000 型表面形貌仪测出其磨损表面形貌, 再用变差法^[6,8]计算出磨损

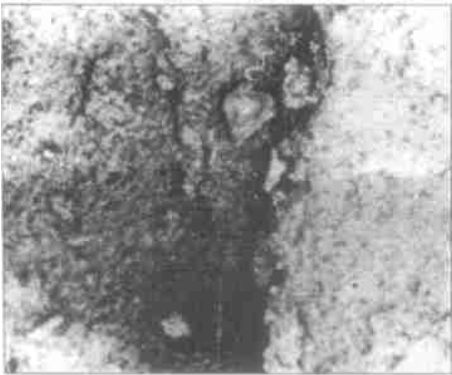


Fig 2 The abrasive pattern on the worn surface of NBR (100×)

图 2 丁腈橡胶磨损表面磨损花纹 (×100)

表面的分形维数即可确定相应的裂纹角. 图 3 给出了橡胶磨损表面的轮廓测量曲线.

通常, 磨损表面仅在一定尺度范围和层次中才表现出分形特征, 其两端都受到某种特征尺寸的限制, 这个具有自相似性的范围叫“无标度区”. 分析磨损表面形貌发现, 磨损花纹宽度在 35~500 μm 范围内, 因此在计算中应在此范围内取步长 (测量尺度 R).

采用法向载荷 10 N, 滑动速度 0.16 m/s, 分形维数 $D_f=1.28$, 在摩擦行程 150 周次时橡胶磨损表面的分形计算结果见图 4, 由式 (4) 即可确定其相应的裂纹角. 根据文献 [3, 4] 的试验结果, 在载荷 10 N 的条件下橡胶线接触于磨粒磨损的线性磨损率为 6 μm/r, 磨损花纹的移动率为 17 μm/r, 由此可计算出裂纹角 $\alpha=\arctan(6/17)=22^\circ$. 而按我们提出的上述方法测得

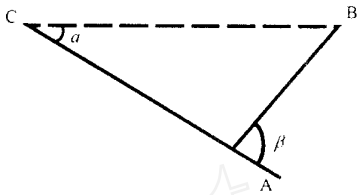


Fig 1 The original model of rubber abrasion

图 1 橡胶磨粒磨损的生成元模型

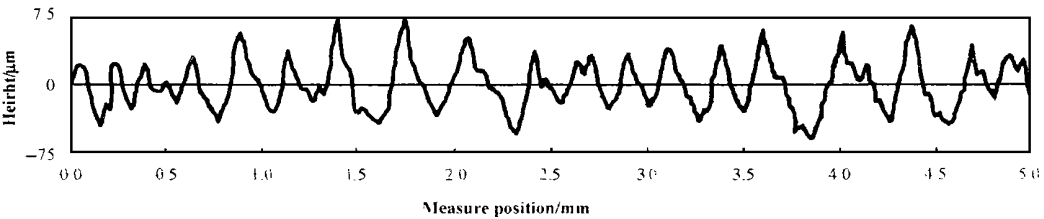


Fig 3 The worn surface profile of NBR ($p=8\text{ N}$, $v=0.10\text{ m/s}$)

图 3 丁腈橡胶磨损表面轮廓测量曲线 ($p=8\text{ N}$, $v=0.10\text{ m/s}$)

分形维数 $D_f=1.28$, 其对应的裂纹角为 23° ; 与上面的计算值 22° 相近, 表明本文提出的确定裂纹角的方法实用可行.

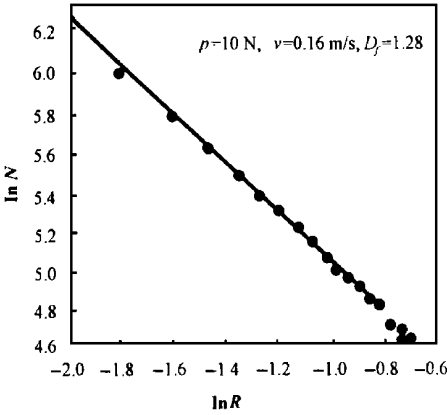


Fig 4 $\ln(R_i) \sim \ln(N_i)$ of typical worn surface of SBR

图 4 典型的丁苯橡胶

磨粒磨损表面的 N_i 与 R_i 的对数关系图

3 磨损表面的分形维数及裂纹角的影响

3 1 摩擦行程的影响

在非稳态磨损阶段,摩擦行程对丁苯橡胶和丁腈橡胶磨损表面的分形维数及裂纹角的影响见表 1。可见,在非稳态磨损阶段,磨损表面的分形维数随摩擦行程的增大而保持不变,其相应的裂纹角也保持不变。这是由于在磨损过程中,在摩擦力作用下舌状物根部的裂纹扩展方向与磨损花纹表面基本平行,因而其裂纹角保持不变。

3 2 法向载荷的影响

稳态磨损阶段,法向载荷对丁苯橡胶和丁腈橡胶磨损表面分形维数及裂纹角的影响见表 2。可见,在稳态磨损阶段,分形维数随着法向载荷的增大而减小,其相应的裂纹角也随之而减小。

这是由于橡胶表面裂纹的萌生遵循最大剪应力原则^[9],而橡胶材料表面的剪应力随法向

表 1 丁苯橡胶和丁腈橡胶磨损表面的分形维数及裂纹角随摩擦行程的变化

Table 1 The variation of fractal dimension and crack angle of worn surfaces of SBR and NBR with sliding distance during unsteady state

M aterials	Sliding distance/r	Fractal dimension D_f	Crack angle/($^{\circ}$)
SBR *	150	1.28	23
	300	1.28	23
	450	1.31	24
NBR **	450	1.28	23
	900	1.28	23
	1 350	1.26	22

Note: SBR *: $p=10\text{ N}$, $v=0.20\text{ m/s}$; NBR **: $p=8\text{ N}$, $v=0.10\text{ m/s}$

注: 试验条件: SBR *: $p=10\text{ N}$, $v=0.20\text{ m/s}$; NBR **: $p=8\text{ N}$, $v=0.10\text{ m/s}$

表 2 丁苯橡胶和丁腈橡胶磨损表面分形维数及裂纹角随法向载荷的变化

Table 2 The variation of fractal dimension and crack angle of worn surfaces of SBR and NBR with the normal load during steady state

M aterials	p/N	Fractal dimension D_f	Crack angle/($^{\circ}$)
SBR	8	1.35	25.0
	10	1.28	23.0
	12	1.20	18.0
NBR	5	1.50	33.5
	8	1.28	23.0
	12	1.13	14.0

载荷的增大而增大,其中剪应力线与水平线的夹角也随剪应力值的增大而增大^[10]。因此,对

于同一种橡胶材料,其裂纹萌生和扩展方向与水平线的夹角随着法向载荷的增大而减小

4 结论

橡胶磨损表面的分形维数与磨损花纹的裂纹角存在内在的联系,在此基础上所提出的测量裂纹角的新方法比较简便。在非稳态磨粒磨损阶段,丁苯橡胶和丁腈橡胶磨损花纹的裂纹角大致保持不变;而在稳态磨损阶段,其磨损花纹的裂纹角随法向载荷的增大而减小。

[参考文献]

- [1] Zhang S W. Investigation of Abrasion of Nitrile Rubber[J]. Rubber Chem Technol, 1984, 57: 769~ 778
- [2] Zhang S W. Theory of Rubber Abrasion by a Line Contact[M]. Polymer Wear and Its Control, Lee L H (ed), ACS, Washington D C, 1985
- [3] Southern E, Thomas A G. Studies of Rubber Abrasion[J]. Rubber Chem Technol, 1979, 52: 1 008~ 1 018
- [4] Uchiyama Y, Ishino Y. Pattern Abrasion Mechanism of Rubber[J]. Wear, 1992, 158: 141~ 155
- [5] Stupak P R, Donovan J A. Fractal analysis of rubber wear surfaces and debris[J]. J Mater Sci, 1988, 23: 2 230~ 2 242
- [6] Stupak P R, Kang J H, Donovan J A. Fractal characteristics of rubber wear surfaces as a function of load and velocity[J]. Wear, 1990, 141: 73~ 84
- [7] 谢和平, Sanderson D J. 动态裂纹扩展中的分形效应[J]. 力学学报, 1995, 27(1): 15~ 21
- [8] 葛世荣, 索双富. 表面轮廓分形维数计算方法的研究[J]. 摩擦学学报, 1997, 17(4): 354~ 362
- [9] Moore D F. 摩擦学原理和应用[M]. 黄文治, 谢振中, 杨明安 译. 北京: 机械工业出版社, 1982
- [10] Suh N P. 固体材料的摩擦与磨损[M]. 陈贵耕, 陈听漂, 赵忠义 译. 北京: 国防工业出版社, 1992

Fractal Method to Compute the Crack Angle of Abrasive Pattern of Rubber

YANG Zhao-chun¹, ZHANG Si-wei²

(1. Department of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Petro-chemical Technology, Beijing 102600, China;

2. Graduate School, University of Petroleum, Beijing 102200, China)

Abstract: The crack angle of the abrasive pattern of rubber is closely related with the abrasive pattern generation and wear mechanisms of rubber. Thus it is of great importance to determine the crack angle of the abrasive pattern of rubber. Based on the relation between the fractal dimension of worn surface of rubber and the crack angle of the abrasive pattern, a fractal method to determine the crack angle has been established. It has been found that the crack angle in unsteady state of rubber abrasion for styrene-butadiene rubber (SBR) and nitrile rubber (NBR) is almost unchanged; however, that in steady state decreases with normal load increasing.

Key words: rubber; abrasive pattern; crack angle; fractal

Classifying number: TQ 331