

平面结合面切向接触阻尼分形模型及其仿真

张学良, 温淑花, 兰国生, 丁红钦, 张宗阳, 王晓伟, 刘志恒
(太原科技大学机械工程学院, 030024, 太原)

摘要: 基于接触分形理论和结合面接触阻尼耗能机理, 以及球体与平面接触时的阻尼耗能理论, 建立了平面结合面切向接触阻尼的分形模型, 通过数值仿真直观揭示了平面结合面切向接触阻尼耗能与结合面法向载荷以及结合面表面粗糙轮廓分形维数之间的非线性关系. 仿真结果表明: 平面结合面切向接触阻尼的耗能随着结合面法向载荷的增大而减小; 当结合面表面粗糙轮廓分形维数小于等于 1.2 时, 平面结合面切向接触阻尼耗能随结合面表面粗糙轮廓分形维数的增大而增大; 当结合面表面粗糙轮廓分形维数大于 1.2 时, 平面结合面切向接触阻尼耗能随结合面表面粗糙轮廓分形维数的增大而减小. 仿真结果验证了模型的有效性.

关键词: 平面结合面; 接触阻尼; 分形模型

中图分类号: TH113.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2011)05-0074-04

Fractal Model for Tangential Contact Damping of Plane Joint Interfaces with Simulation

ZHANG Xueliang, WEN Shuhua, LAN Guosheng, DING Hongqin,
ZHANG Zongyang, WANG Xiaowei, LIU Zhiheng

(Mechanical Engineering College, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: Based on the contact fractal theory and mechanism of contact damping dissipating energy of joint interfaces as well as damping dissipating energy theory between a sphere and a plane, a fractal model for tangential contact damping of joint interfaces is proposed. Numerical simulation reveals the nonlinear relationship between tangential contact damping dissipating energy and the normal load on joint interfaces. It is concluded that the tangential contact damping dissipating energy of joint interfaces decreases with the normal load on joint interfaces. The tangential contact damping dissipating energy of joint interfaces increases with the fractal dimension D when $D \leq 1.2$, but when $D > 1.2$ it decreases with D . The effectiveness of the model is verified by the experiment.

Keywords: plane joint interfaces; tangential contact damping; fractal model

结合面在机械结构中大量存在, 由于存在着接触刚度和接触阻尼, 因此对机械和机械结构的静动态特性产生了重要影响. 研究表明, 机械结构的阻尼约有 90% 是由其中的结合面所产生的, 因此人们对结合面接触刚度和接触阻尼做了许多理论与实验研究工作^[1], 并提出了结合面接触刚度的分形模型^[2-6]. 文献[7]对结合面阻尼机理的研究成果进行

了总结, 认为在结合面间不存在油介质的情况下, 法向交变力使结合面之间耗能很小, 而切向交变力则耗损振动能量形成阻尼作用. 文献[4]在对结合面阻尼机理综合分析研究的基础上, 认为, 结合面间的微观滑移是固定结合面接触阻尼产生的主要原因. 文献[8-10]对结合面切向动态特性的实验研究结果表明, 结合面切向动态特性具有迟滞非线性, 并且这种

迟滞非线性是结合面阻尼产生的主要原因,且每个振动周期的阻尼耗能与振动频率无关.文献[10]认为,结合面间的微观滑移是结合面切向接触阻尼产生的原因,但由于结合面接触阻尼的复杂性,因此对其所做的理论研究工作依然很少.本文基于接触分形理论和结合面的阻尼耗能机理,以及球体与平面接触时的阻尼耗能理论,研究建立了结合面接触阻尼分形模型,并通过数值仿真研究揭示了结合面的有关参数对接触阻尼的影响规律.

1 平面结合面接触阻尼分形模型

平面结合面实质上是由2个粗糙表面组成的,可以将其简化为一个粗糙表面与一个理想的刚性平面的接触问题.对于粗糙表面上的单个微凸体,可以将其近似等效为球体,其等效曲率半径为 R .单个微凸体与平面接触时,一个简谐振动周期内的接触阻尼耗能可以表示为^[11]

$$e = \frac{(2-\nu)t^3}{36G'r\mu p}, \quad r = (a/\pi)^{1/2} \quad (1)$$

式中: G' 、 ν 和 μ 分别为结合面两接触材料的当量剪切弹性模量、泊松比和摩擦系数; p 为作用于微凸体上的法向预加载荷; t 为作用于微凸体上的切向动态载荷的幅值; r 为微接触区域的半径; a 为接触面积.

本文基于如下3个基本假设^[3-4,6]:①粗糙表面的微观形貌各向同性;②粗糙表面上各微凸体之间的相互作用可以忽略不计;③各微凸体所受的力与其接触面积的大小成正比.作用于 a 上的 t 可以表示为

$$t = aT/a_r \quad (2)$$

式中: T 为作用于整个结合面上的切向动态载荷的幅值; a_r 为结合面上的真实接触面积.

作用于 a 上的法向面压力为

$$p = ap_u/a_r \quad (3)$$

$$e = \frac{(2-\nu)\pi^{1/2}T^3a^{3/2}}{36G'\mu p_u a_r^2} \quad (4)$$

式中: p_u 为作用于整个结合面上的法向预加载荷^[2-4].

结合结合面接触阻尼耗能机理,平面结合面的切向接触阻尼耗能为

$$E_d = \int_{a_c}^{a_1} en(a) da \quad (5)$$

$$n(a) = \frac{D}{2} \frac{a_1^{D/2}}{a^{(D/2+1)}} \quad (6)$$

$$a_c = \frac{G^2}{(k\varphi/2)^{2/(D-1)}}, \quad k = H/\sigma_y \quad (7)$$

$$\varphi = \sigma_y/E$$

式中: a_c 为临界接触面积; a_1 为最大接触点的接触面积; $n(a)$ 为微接触点的(面积)分布函数^[2-4]; D 为结合面表面粗糙轮廓分形维数; G 为结合面表面粗糙轮廓分形特征长度; H 表示较软材料的硬度; σ_y 表示较软材料的屈服强度.

将式(4)、式(6)和式(7)代入式(5),得

$$E_d = \frac{(2-\nu)\pi^{1/2}T^3(2-D)^2}{36(3-D)G'\mu p_u D} \cdot a_1^{(D/2)-2} [a_1^{(3-D)/2} - a_c^{(3-D)/2}] \quad (8)$$

$$p_u = \frac{4\pi^{1/2}EDG^{(D-1)}a_1^{D/2}}{3(3-2D)} [a_1^{(3/2)-D} - a_c^{(3/2)-D}] + \frac{k\sigma_y Da_1^{D/2}}{2-D} a_c^{1-D/2}, \quad D \neq 1.5 \quad (9)$$

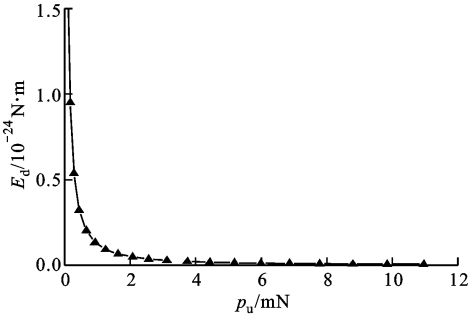
$$p_u = \pi^{1/2}G^{1/2}Ea_1^{3/4} \ln\left(\frac{a_1}{a_c}\right) + 3k\sigma_y a_1^{3/4} a_c^{1/4}, \quad D = 1.5 \quad (10)$$

式中: E 为结合面两接触材料的弹性模量.由于 E_d 和 p_u 均是 a_1 的函数,因此由式(8)和式(9)、式(10)就建立了 E_d 和 p_u 之间的非线性隐函数关系,从而构成了平面结合面切向接触阻尼的分形模型.

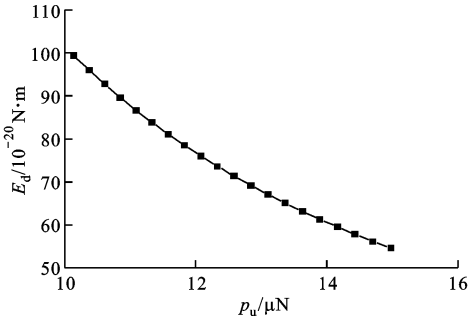
2 平面结合面切向接触阻尼分形模型的数值仿真

由式(8)、式(9)和式(10)可知,给定固定的 a_1 ,便可以计算得到 p_u 和 E_d .根据文献[2-4], $k=1.0$, $\varphi=1.0$, $G=1.19 \times 10^{-9}$ m, $E=2.1 \times 10^{11}$ Pa, $G'=8.0 \times 10^{10}$ Pa, $\sigma_y=3.53 \times 10^9$ Pa, $\nu=0.3$, $\mu=0.2$, $T=2.0 \times 10^{-8}$ N,而 $D=1.1 \sim 1.9$.图1、图2给出了数值仿真计算结果,且图中所给数据均满足结合面间不发生宏观相对滑移的条件.

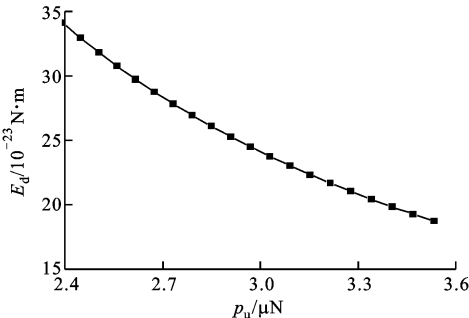
数值仿真计算结果表明:①在平面结合面切向简谐动态载荷幅值一定,且结合面间不发生宏观相对滑移的情况下(即为固定平面结合面), E_d 随着 p_u 的增大而减小,二者之间具有很强的非线性关系,说明在作用于平面固定结合面上的切向动态载荷的幅值一定的情况下,平面结合面法向载荷增大时,平面结合面的切向接触阻尼耗能则减小,这与平面结合面法向和切向接触刚度的情况相反;② E_d 随着 D 的变化情况较为复杂,当 $D=1.1 \sim 1.2$ 时, E_d 随着 D 的增大而增大,当 $D>1.2$ 时, E_d 随着 D 的增大而减小,这与平面结合面法向和切向接触刚度的情况也是相反的.



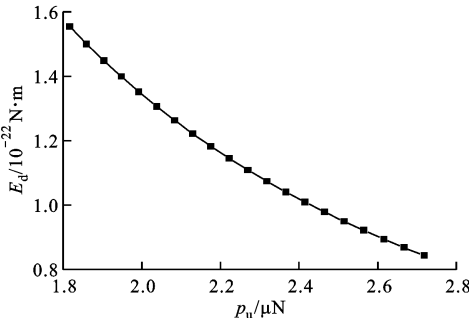
(a) $D=1.1$



(b) $D=1.5$



(c) $D=1.6$

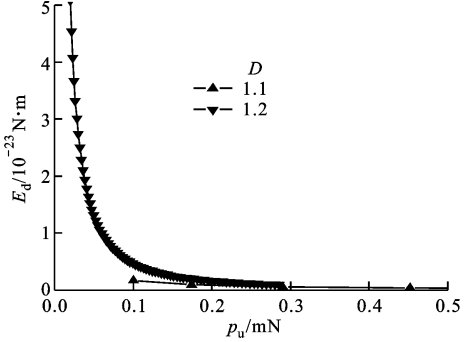


(d) $D=1.8$

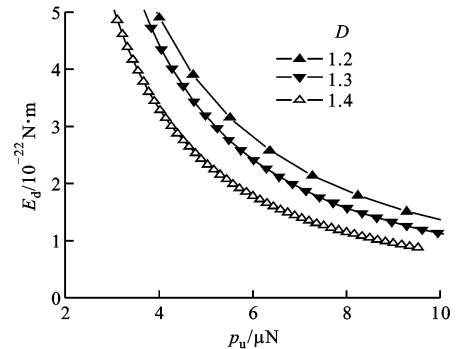
图 1 结合面接触阻尼耗能与法向载荷之间的关系

3 平面结合面切向接触阻尼实验

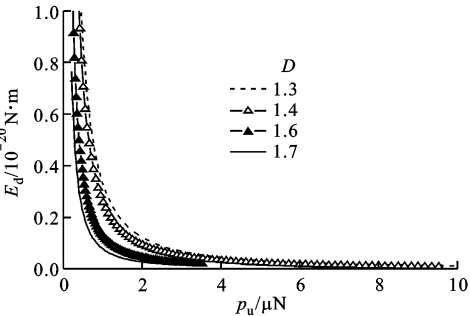
为了验证平面结合面切向接触阻尼分形模型的有效性,本文对平面结合面切向接触阻尼进行了实验研究,实验装置与方法见文献[12],实验结果如图 3 所示.图 3a、b 和 c 均表明:平面结合面切向接触



(a) D 在 1.1~1.2 时, E_d 随 D 的增大而增大



(b) D 在 1.2~1.4 时, E_d 随 D 的增大而减小



(c) D 在 1.3~1.7 时, E_d 随 D 的增大而减小

图 2 结合面表面粗糙轮廓分形维数
对接触阻尼耗能的影响

阻尼损耗因子 δ 随着结合面法向面压力的增大而减小,这与上述平面结合面切向接触阻尼分形模型的仿真结论是一致的.图 3c 说明平面结合面切向接触阻尼损耗因子随着结合面粗糙度 R_a 的减小而减小,而结合面粗糙度的减小说明 D 在增大,因此平面结合面切向接触阻尼损耗因子随着 D 的增大而减小,这与上述仿真结论相一致.

4 结 论

(1)平面固定结合面切向接触阻尼与作用在结合面上的法向载荷之间具有很强的非线性关系,且随着法向载荷的增大,平面固定结合面切向接触阻

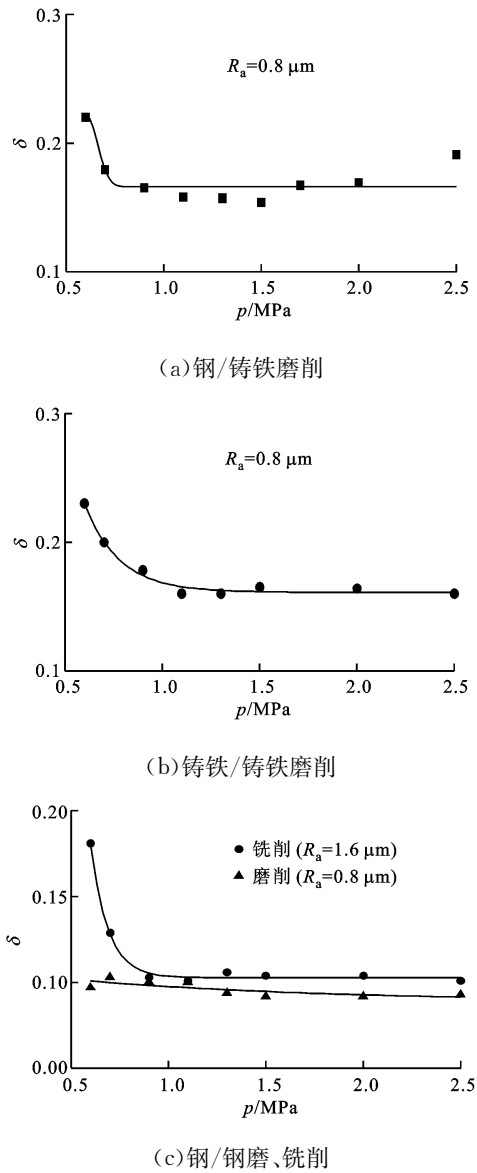


图 3 结合面切向接触阻尼损耗因子的实验结果

尼减小,因此对于干结合面,要想通过调节结合面的法向载荷(面压力)来同时提高结合面的接触刚度和接触阻尼是不能实现的。

(2)结合面表面粗糙轮廓分形维数的大小在一定程度上反映了其粗糙程度,较小的分形维数对应着较大的表面粗糙度。对于干结合面,当结合面较为粗糙(如 $D=1.1\sim 1.2$)时,平面结合面切向接触阻尼随分形维数的增大而增大;当结合面的表面粗糙度较小(如 $D>1.2$)时,结合面切向接触阻尼随分形维数的增大而减小。因此,减小结合面表面粗糙度不利于改善平面结合面的接触阻尼,但却能提高平面结合面的接触刚度。

(3)实验结果验证了本文所提出的平面结合面切向接触阻尼分形模型的有效性。

参考文献:

[1] 张学良,温淑花. 机械结合面静动态特性研究回顾与展望[J]. 太原重型机械学院学报, 2002, 23(3): 276-281.

ZHANG Xueliang, WEN Shuhua. Review and prospect of the research on the static and dynamic characteristics of machine joint surfaces [J]. Journal of Taiyuan Heavy Machinery Institute, 2002, 23(3): 276-281.

[2] 张学良,黄玉美,温淑花. 结合面接触刚度分形模型研究[J]. 农业机械学报, 2000, 31(4): 89-91.

ZHANG Xueliang, HUANG Yumei, WEN Shuhua. Fractal model of contact stiffness of joint surfaces [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2000, 31(4): 89-91.

[3] 张学良,温淑花. 基于接触分形理论的结合面切向接触刚度分形模型[J]. 农业机械学报, 2002, 33(2): 91-97.

ZHANG Xueliang, WEN Shuhua. A fractal model of tangential contact stiffness of joint surfaces based on the contact fractal theory [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2002, 33(2): 91-97.

[4] 张学良. 机械结合面动态特性及应用[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2002: 9.

[5] 温淑花, 张学良, 文晓光, 等. 结合面法向接触刚度分形模型与仿真[J]. 农业机械学报, 2009, 40(11): 197-202.

WEN Shuhua, ZHANG Xueliang, WU Meixian, et al. Fractal model and simulation of normal contact stiffness of joint interfaces and its simulation [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(11): 197-202.

[6] 温淑花, 张学良, 文晓光, 等. 结合面切向接触刚度分形模型及其仿真[J]. 农业机械学报, 2009, 40(12): 223-227.

WEN Shuhua, ZHANG Xueliang, WEN Xiaoguang, et al. Fractal model of tangential contact stiffness of joint interfaces and its simulation [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(12): 223-227.

[7] 戴德沛. 阻尼减振降噪技术[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1986: 6.

[8] ROGERS P F, BOOTHROYD G. Damping at metallic interfaces subjected to oscillating tangential loads [J]. ASME J Eng for Industry, 1975(8): 1087-1093.

[9] DEKONINCK C. Deformation properties of metallic contact surfaces of joints under the influence of dynam-

- ic tangential loads [J]. International Journal of Machine Design and Research, 1972(12): 193-199.
- [10] 堤正臣. 机床螺栓结合面的阻尼机理 [J]. 机床译丛, 1980(2): 26-29.
TSUTSUMI M. The damping mechanism for machine tool bolted joints [J]. Machine Tools Translations, 1980(2): 26-29.
- [11] YAMADA A, KAKUBARI T. Prediction of dynamic characteristics of beam containing junction [J]. Journal of the Japan Society of Precision Engineering, 1986, 52(12): 2051-2057.
- [12] ZHANG Xueliang, WEN Shuhua. Experiment research on tangential dynamic characteristics of machined plane joint interfaces [J]. Advanced Materials Research, 2011, 145: 584-589.

(编辑 管咏梅)