

DOI: 10.7652/xjtuxb201701001

结合面切向接触等效黏性阻尼分形模型

温淑花, 张学良, 陈永会, 兰国生, 李齐, 王开威

(太原科技大学机械工程学院, 030024, 太原)

摘要: 基于MB接触分形理论、结合面切向接触阻尼耗能机理以及阻尼损耗因子的定义,建立了结合面切向接触等效黏性阻尼的分形模型及其损耗因子模型。所建模型表明,结合面切向接触等效黏性阻尼与结合面法向接触载荷、摩擦系数、材料塑性指数、结合面上的切向动态载荷幅值与法向接触载荷之比(简称切法向载荷比)、结合面分形维数以及分形粗糙度参数之间具有复杂的非线性关系,而结合面切向接触阻尼损耗因子与结合面分形维数和分形粗糙度参数无关,仅与切法向载荷比和摩擦系数有关。模型的仿真结果表明,结合面切向接触阻尼损耗因子随着切法向载荷比的增大而增大,随结合面摩擦系数的增大而减小;结合面切向接触等效黏性阻尼随着结合面法向接触载荷、摩擦系数、材料塑性指数的增大而增大,随着结合面分形粗糙度的增大而减小;结合面切向接触等效黏性阻尼随结合面分形维数的变化规律较为复杂,先随着分形维数的增大而增大,在分形维数值1.65附近出现最大值,而后随着分形维数的增大而减小。

关键词: 机械结构;结合面;切向接触阻尼;损耗因子;分形模型

中图分类号: TH113.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2017)01-0001-08

Fractal Model of Equivalent Viscous Damping for Tangential Contact in Joint Interfaces

WEN Shuhua, ZHANG Xueliang, CHEN Yonghui, LAN Guosheng, LI Qi, WANG Kaiwei

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

Abstract: Based on the MB contact fractal theory and the mechanism of energy dissipation of tangential contact damping in joint interfaces as well as the definition of damping energy dissipation factor, the fractal model of equivalent viscous damping for tangential contact in joint interfaces and its energy dissipation factor model are proposed. It is shown from the models that there exist complex nonlinear relationships between the equivalent viscous damping of tangential contact in joint interfaces and such factors as the normal contact load, the friction coefficient, the plastic index of contact materials, the ratio of the tangential dynamic load amplitude to normal contact load (named tangential-normal load ratio for short), the fractal dimension, and the fractal roughness of joint interfaces. However, the energy dissipation factor of tangential contact damping is independent of the fractal dimension and fractal roughness, but only depends on the tangential-normal load ratio. Numerical simulations of the models show that the energy dissipation factor increases with the tangential-normal load ratio, but decreases with the friction coefficient of joint interfaces. The tangential contact equivalent viscous damping of joint interfaces increases with the normal contact load, the friction coefficient, and the plastic index of

收稿日期: 2016-05-02。 作者简介: 温淑花(1963—),女,教授。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51275328);山西省自然科学基金资助项目(201601D011062)。

网络出版时间: 2016-10-20

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20161020.1538.018.html>

contact materials, but decreases with the fractal roughness. The variation rule of equivalent viscous damping with the fractal dimension is very complex: firstly it increases with the fractal dimension, and approaches a max value when the fractal dimension is equal to 1.65 or so, then decreases with the fractal dimension.

Keywords: mechanical structure; joint interface; tangential contact damping; energy dissipation factor; fractal model

结合面的接触刚度和接触阻尼对机械结构的静、动态特性具有重要影响,其中机械结构总阻尼的90%以上来源于结合面的接触阻尼,即结合面接触阻尼占有绝对优势^[1-2]。国内外学者针对结合面接触刚度和接触阻尼的理论建模做了许多研究工作,例如:文献[3-4]分别首次提出了结合面法向接触刚度和切向接触刚度的分形模型,并进行了仿真计算,揭示了结合面分形参数等对结合面接触刚度的影响规律;基于这些研究工作,文献[5-6]分别提出了考虑域扩展因子影响的结合面法向和切向接触刚度的分形模型;文献[7]基于结合面的切向接触阻尼耗能机理和球体与平面接触的切向接触阻尼耗能理论,提出了结合面切向接触阻尼耗能的分形模型,并进行了仿真计算分析,获得了一些重要结果;文献[8-10]基于结合面法向接触阻尼的耗能机理——法向塑性接触变形耗能,提出了结合面法向接触阻尼的分形模型。

文献[11]基于接触分形理论、赫兹理论以及干摩擦阻尼等效黏性阻尼系数的计算方法,建立了考虑摩擦因素影响的结合面切向接触阻尼的分形预估模型,并通过仿真研究揭示了有关参数对结合面切向接触阻尼的影响规律,但是其中式(6)的推导存在不合理性。在文献[11]中,单个接触点黏着区域的位移 $\delta_{\text{stick}} = \frac{1}{4G_s} r \mu \pi p_0 \left[1 - \left(\frac{r'}{r} \right)^2 \right]$, 单个接触区域一个加载周期的内耗能 $e_d = \frac{24(\mu Q)^2}{5r} \frac{3}{4} \frac{1}{G_s} \Delta$, 结合面在一个周期内的耗能 $E_d = \frac{1}{1.5 - 0.5D} \frac{9(\mu Q_n)^2 \pi^{0.5} D}{5G_s A_r^2}$ 。 $\Delta \phi^{1-0.5D} a_{\max}^{1.5}$, 干摩擦阻尼等效黏性阻尼系数 $c_{te} = \frac{E_d}{\pi \bar{\omega}_s \delta_{\text{stick}}^2}$, 将 E_d 和 δ_{stick} 的最大值代入 c_{te} 的表达式求得 $c_{te} = \frac{64G_s \pi^{0.5-7/3} D}{\bar{\omega}_s (7.5 - 2.5D) [(3/4E)(Q_n/A_r)]^{2/3}}$ 。 $\frac{\Delta \phi^{1-0.5D} a_{\max}^{1.5}}{(a^{1+0.5D} G^{1-D})^{2/3}}$, 其中 $c_{te} = \frac{E_d}{\pi \bar{\omega}_s \delta_{\text{stick}}^2}$ 是不合理的, 因为每个接触点黏着区的位移 δ_{stick} 是不一样的, 而且文献[11]认为 $\bar{\omega}_s$ 是周期也有误。

文献[12]建立了结合面切向接触阻尼能量耗散弹塑性分形模型,并通过仿真计算获得了一些重要结论;文献[13]从结合面切向接触阻尼属于迟滞结构阻尼的角度出发,提出了结合面切向接触迟滞结构阻尼的分形模型,并进行了仿真计算。

本文基于 MB 接触分形理论、结合面切向接触阻尼耗能机理以及阻尼损耗因子的定义,将结合面切向接触阻尼等效为黏性阻尼,研究建立结合面切向接触等效黏性阻尼及其损耗因子的分形模型,并通过仿真计算分析揭示各相关参数的影响规律。

1 结合面接触力学建模

结合面可以等效为一粗糙表面和一刚性平面的接触,粗糙表面上的单个微凸体可以近似等效为半球体,其等效曲率半径为 R ,如图 1a 所示;在法向接触载荷 p 作用下,接触区域半径为 r ,法向变形为 δ ,如图 1b 所示;若在平行于结合面的方向再施加切向载荷 t ,将产生切向变形 δ_s ,接触状态如图 1c 所示。

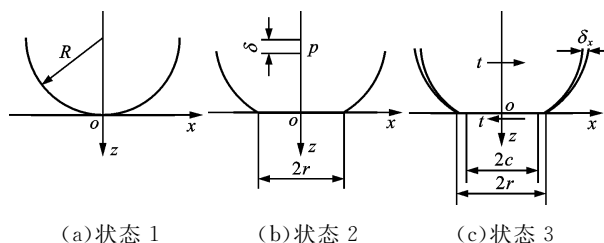


图1 等效半球体与刚性平面的3种接触状态

半球体的半径即是微凸体顶端的曲率半径^[14]

$$R = \frac{a^{D/2}}{2^{(2-D)/2} \pi G^{D-1}} \quad (1)$$

式中: G 为结合面分形粗糙度; D 为结合面分形维数, $1 \leq D < 2$ 。

具有截面积 a' 的微接触微凸体的变形^[14]

$$\delta = G^{(D-1)} (a')^{(2-D)/2} \quad (2)$$

当微凸体的变形在弹性范围内(即 $\delta < \delta_c$, δ_c 为微凸体由弹性变形进入塑性变形的临界变形量)时,根据赫兹接触理论,单个微凸体的法向弹性接触载荷^[14]

$$p_e = \frac{4}{3} E^* R^{1/2} \delta^{3/2} \quad (3)$$

式中: E^* 为等效(复合)弹性模量; $E^* = [(1-\nu_1^2)/E_1 + (1-\nu_2^2)/E_2]^{-1}$, 其中 E_1 、 E_2 为两接触材料的弹性模量, ν_1 、 ν_2 为两接触材料的泊松比。

当微凸体法向变形量进入塑性变形范围(即 $\delta > \delta_c$)时, 单个微凸体的法向塑性接触载荷可表示为

$$p_p(a') = k\sigma_y a' = k\sigma_y a \quad (4)$$

式中: $k = H/\sigma_y$, H 为较软材料的硬度; σ_y 为较软材料的屈服强度。

将式(1)和式(2)代入式(3), 可以得到弹性微凸体的截面积 a' 与法向弹性接触载荷 p_e 的关系

$$p_e(a') = \frac{4}{3(2\pi)^{1/2}} E^* G^{D-1} (a')^{(3-D)/2} \quad (5)$$

微凸体的切向变形^[15]

$$\delta_x = \frac{3\mu p}{16Gr} \left[1 - \left(1 - \frac{t}{\mu p} \right)^{2/3} \right] \quad (6)$$

式中: G' 为两接触材料的当量切变模量, 其中 $1/G' = (2-\nu_1)/G_1 + (2-\nu_2)/G_2$, G_1 、 G_2 分别为两接触材料的剪切模量; μ 为两接触材料的摩擦系数。由式(6)可得

$$t = \mu p \left[1 - \left(1 - \frac{16G'r\delta_x}{3\mu p} \right)^{3/2} \right] \quad (7)$$

基于文献[7]中的假设——粗糙表面的微观形貌各向同性、粗糙表面上各微凸体之间的相互作用可以忽略不计、各微凸体所受的力与其接触面积的大小成正比, 可得作用于单个微凸体接触面积 a 上的切向载荷 t 、法向预加载荷 p 分别为

$$t = aT/A_r$$

$$p = aP/A_r$$

式中: T 为作用于整个结合面上的切向动态载荷的幅值; P 为作用于整个结合面上的法向接触载荷; A_r 为结合面上的实际接触面积。于是有

$$\left. \begin{aligned} \frac{t}{p} &= \frac{T}{P} \\ \delta_x &= \frac{3\mu p}{16Gr} \left[1 - \left(1 - \frac{T}{\mu P} \right)^{2/3} \right] \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

文献[14]给出的引入微接触大小分布域扩展因子 ψ 的微接触截面积 a' 的分布函数为

$$n(a') = \frac{D}{2} \psi^{(2-D)/2} (a'_1)^{D/2} (a')^{-(D+2)/2} \quad (0 < a' \leq a'_1) \quad (9)$$

式中: a' 为被刚性平面所截得的微凸体截面的面积, 其半径为 r' ; a'_1 为最大的微接触截面积; ψ 为域扩展因子, 其值满足下列方程

$$\frac{\psi^{(2-D)/2} - (1 + \psi^{-D/2})^{-(2-D)/D}}{(2-D)/D} = 1 \quad (\psi > 1)$$

ψ 的求解方法见文献[14]。

因此, 结合面法向接触载荷 P 与结合面实际接触面积 A_r 之间的关系为

$$\left. \begin{aligned} P &= \int_{a'_c}^{a'_1} p_e(a') n(a') da' + \int_0^{a'_c} p_p(a') n(a') da' \\ P &= \frac{4}{3(2\pi)^{1/2}} E^* G^{D-1} \int_{a'_c}^{a'_1} n(a') (a')^{(3-D)/2} da' + \\ &\quad k\sigma_y \int_0^{a'_c} n(a') a' da' \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

$$a'_1 = 2a_1 = \frac{2(2-D)}{D} \psi^{-(2-D)/2} A_r \quad (11)$$

$$a'_c = 2a_c = \frac{2G^2}{(k\varphi/2)^{2/(D-1)}} \quad (12)$$

式中: $\varphi = \sigma_y/E^*$ 。

当 $1 \leq D < 2$ 、 $D \neq 1.5$ 时

$$P = \frac{2^{(6-D)/2} E^* D G^{D-1} \psi^{(2-D)/2}}{3\pi^{1/2} (3-2D)} a_1^{D/2} (a_1^{(3-2D)/2} - a_c^{(3-2D)/2}) + \frac{Dk\sigma_y \psi^{(2-D)/2}}{2-D} a_1^{D/2} a_c^{(2-D)/2} \quad (13)$$

当 $D = 1.5$ 时

$$P = \frac{2^{1/4}}{\pi^{1/2}} E^* G^{1/2} \psi^{1/4} a_1^{3/4} \ln \frac{a_1}{a_c} + 3k\sigma_y \psi^{1/4} a_1^{3/4} a_c^{1/4} \quad (14)$$

由于对于确定的粗糙表面 a_c 为常数, 故法向接触载荷 P 就取决于最大微凸体接触的实际接触面积 a_1 。

令 A_a 代表结合面的名义接触面积, 将式(13)、式(14)进行归一化处理, 则有

$$P^* = \begin{cases} \frac{(G^*)^{D-1} g_2(D)}{3\pi^{1/2}} \psi^{(2-D)/2} (A_r^*)^{D/2} \cdot \\ \left[\psi^{(-2D^2+7D-6)/4} \left(\frac{2-D}{D} \right)^{(3-2D)/2} (A_r^*)^{(3-2D)/2} - \right. \\ \left. (a_c^*)^{(3-2D)/2} \right] + k\phi g_3(D) \psi^{(2-D)/2} (A_r^*)^{D/2} \cdot \\ (a_c^*)^{(2-D)/2} & (D \neq 1.5) \\ \frac{2^{1/4}}{\pi^{1/2}} (G^*)^{1/2} \psi^{1/16} \left(\frac{A_r^*}{3} \right)^{3/4} \ln \left(\frac{A_r^*}{3\psi^{1/4} a_c^*} \right) + \\ 3k\phi \psi^{1/16} \left(\frac{A_r^*}{3} \right)^{3/4} (a_c^*)^{1/4} & (D = 1.5) \end{cases} \quad (15)$$

$$\text{式中: } P^* = \frac{P}{E^* A_a}; A_r^* = \frac{A_r}{A_a}; G^* = \frac{G}{A_a^{1/2}}; a_c^* = \frac{a_c}{A_a} = \frac{(G^*)^2}{(k\phi/2)^{2/(D-1)}}; g_2(D) = 2^{(6-D)/2} \left(\frac{2-D}{D} \right)^{D/2} \frac{D}{3-2D};$$

$$g_3(D) = \left(\frac{D}{2-D} \right)^{(2-D)/2}.$$

2 结合面切向接触等效黏性阻尼分形模型

当结合面在法线方向受预加载荷 P 作用时,再施加切线方向的作用力 T ,在此切向力的作用下使两接触体产生剪切变形。文献[16]表明,小于极限摩擦力的切向力 ($T < \mu P$) 将使一部分交界面上产生小的相对运动,称之为“微滑”;交界面的其余部分没有相对运动而只发生弹性变形,即产生“黏附”的表面区域。同理,对于单个微凸体而言,当作用在单个微凸体上的切向力 $t < \mu p$ 时,微凸体与平面接触的外边缘环形区域也将产生微滑,接触的其余内部区域没有相对运动而只发生弹性变形,即产生黏附区域。文献[1]表明,固定结合面切向接触阻尼机理的本质是结合面间的微观(局部)滑移阻尼耗能。

对于单个微凸球体和平面接触,一个简谐振动周期内的切向接触阻尼耗能 w_d 可以表示为^[16]

$$w_d = \frac{9\mu^2 p^2}{10rG'} \left\{ 1 - \left(1 - \frac{t}{\mu p} \right)^{5/3} - \frac{5t}{6\mu p} \left[1 + \left(1 - \frac{t}{\mu p} \right)^{2/3} \right] \right\} = \frac{9\mu^2 p^2}{10rG'} \left\{ 1 - \left(1 - \frac{T}{\mu P} \right)^{5/3} - \frac{5T}{6\mu P} \left[1 + \left(1 - \frac{T}{\mu P} \right)^{2/3} \right] \right\} \quad (16)$$

式中: r 为微凸体的实际接触区域的半径; p 为微凸体上的法向接触载荷; t 为微凸体上的切向动态载荷的幅值。

需要说明的是,文献[7]的式(1)是本文式(16)的近似,而且文献[7]在此基础上仅仅涉及到了结合面切向接触阻尼耗能,并没有涉及到其接触等效黏性阻尼或结构阻尼问题。

文献[13]将结合面切向接触阻尼按迟滞(结构)阻尼来处理,由此提出了结合面切向接触迟滞(结构)阻尼的分形模型。本文将微凸体的切向接触阻尼耗能等效为黏性接触阻尼耗能,则其切向接触等效黏性阻尼系数

$$c_t = \frac{w_d}{\pi \omega \delta_x^2} \quad (17)$$

式中: ω 为切向动态载荷的角频率。

式(17)不同于文献[11]的式(5):其一,它是针对微凸体的,而不是像文献[11]是针对结合面的;其二, ω 为切向动态载荷的角频率,而非文献[11]中的周期。

将式(8)、式(16)代入式(17),整理得

$$c_t = \frac{128G'a^{1/2}}{5\pi^{3/2}\omega} \frac{\kappa}{\Lambda} \quad (18)$$

$$\text{式中: } \kappa = 1 - \left(1 - \frac{T}{\mu P} \right)^{5/3} - \frac{5T}{6\mu P} \left[1 + \left(1 - \frac{T}{\mu P} \right)^{2/3} \right];$$

$$\Lambda = \left[1 - \left(1 - \frac{T}{\mu P} \right)^{2/3} \right]^2.$$

结合面的切向接触等效黏性阻尼是结合面间所有接触的微凸体的切向接触等效黏性阻尼并联的贡献,因此,结合面的切向接触等效黏性阻尼

$$C_t = \int_{a'_c}^{a'_1} c_t n(a') da' \quad (19)$$

将式(9)和式(18)代入式(19),得

$$C_t = \int_{a'_c}^{a'_1} \frac{128G'a^{1/2}}{5\pi^{3/2}\omega} \frac{\kappa}{\Lambda} \frac{D}{2} \psi^{(2-D)/2} (a'_1)^{D/2} \cdot (a')^{-(D+2)/2} da' \quad \left. \begin{aligned} C_t &= \frac{128G'D}{5 \times 2^{1/2} \pi^{3/2} \omega (1-D)} \frac{\kappa}{\Lambda} \psi^{(2-D)/2} (a'_1)^{D/2} \cdot \\ &\quad ((a'_1)^{(1-D)/2} - (a'_c)^{(1-D)/2}) \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

由于 $a'_1 = 2a_1$, $a'_c = 2a_c$, 所以

$$C_t = \frac{128G'D}{5\pi^{3/2}\omega(1-D)} \frac{\kappa}{\Lambda} \psi^{(2-D)/2} a_1^{D/2} \cdot (a_1^{(1-D)/2} - a_c^{(1-D)/2}) \quad (21)$$

式(21)不同于文献[11]的式(6),而文献[11]中式(6)的推理存在不当。式(21)也不同于文献[13]的结合面切向接触迟滞(结构)阻尼(即文献[13]中的式(33),它是基于迟滞(结构)阻尼推理得到的)。

单个微凸体在切向力 t 的作用下一个周期 (2π) 内所获得的输入能 w_{in} (即切向力 t 所做的功)^[13] 为

$$w_{in} = 2\pi \int_0^{\delta_x} t d\delta_x \quad (22)$$

将式(7)、式(8)代入式(22),得

$$w_{in} = 2\pi \frac{3\mu^2 a^2 P^2}{16A_r^2 G' r} \left[\frac{3}{5} + \frac{2}{5} \left(1 - \frac{T}{\mu P} \right)^{5/3} - \left(1 - \frac{T}{\mu P} \right)^{2/3} \right] \quad (23)$$

$$\text{令 } \alpha = \frac{3}{5} + \frac{2}{5} \left(1 - \frac{T}{\mu P} \right)^{5/3} - \left(1 - \frac{T}{\mu P} \right)^{2/3}, \text{ 则有}$$

$$w_d = \frac{9\pi^{1/2} \mu^2 a^{3/2} P^2}{10G'A_r^2} \kappa \quad (24)$$

$$w_{in} = 2\pi \frac{3\mu^2 a^2 P^2}{16A_r^2 G' r} \alpha \quad (25)$$

于是,微凸体的切向弹性能 w_e (即切向能量存储)为

$$w_e = w_{in} - w_d \quad (26)$$

根据阻尼损耗因子的定义,单个微凸体的切向接触阻尼损耗因子^[13]

$$\eta = \frac{w_d}{w_e} \quad (27)$$

将式(24)~(26)代入式(27),可得

$$\eta = \frac{\omega_d}{\omega_{in} - \omega_d}$$

$$\eta = \frac{9\pi^{1/2}\mu^2 a^{3/2} P^2}{10G_r' A_r^2} \kappa \left\{ 2\pi \frac{3\mu^2 a^2 P^2}{16A_r^2 G_r' r} \alpha - \frac{9\pi^{1/2}\mu^2 a^{3/2} P^2}{10G_r' A_r^2} \kappa \right\}^{-1} = \left(\frac{5\pi}{12} \frac{\alpha}{\kappa} - 1 \right)^{-1}$$

即

$$\eta = \left(\frac{5\pi}{12} \frac{\alpha}{\kappa} - 1 \right)^{-1} \quad (28)$$

因为结合面的切向接触阻尼是结合面间所有接触的微凸体的切向接触阻尼的总和,所以式(28)也是结合面的切向接触阻尼损耗因子(详细推导不再赘述,结果一致)。由式(28)可见,结合面切向接触阻尼损耗因子 η 与结合面分形参数(即结合面等效粗糙表面的分形参数,其确定方法见文献[15,17]) D 和 G 无关,仅与 T/P (称为切法向载荷比, T 为施加在结合面上的切向动态载荷幅值, P 为结合面法向预加载荷)以及摩擦系数 μ 有关。

对结合面切向接触等效黏性阻尼 C_t 进行归一化,得

$$C_t^* = \frac{C_t \omega}{G'(A_a)^{1/2}} = \frac{128D}{5\pi^{3/2}(1-D)} \frac{\kappa}{\Delta} \phi^{(D-2)^2/4} \cdot \left(\frac{2-D}{D} \right)^{D/2} (A_r^*)^{D/2} \left[\left(\frac{2-D}{D} \right)^{(1-D)/2} \phi^{(D-2)(1-D)/4} \cdot (A_r^*)^{(1-D)/2} - (a_c^*)^{(1-D)/2} \right] \quad (29)$$

式(21)或(29)与式(28)即为结合面切向接触等效黏性阻尼的分形模型。同时,由式(15)、式(21)或(29)以及式(28)可知,结合面切向接触等效黏性阻尼 C_t (或 C_t^*)和结合面切向接触阻尼损耗因子 η 都是切法向载荷比 T/P 的复杂非线性函数。

3 结合面切向接触阻尼分形模型的仿真计算与结果分析

由式(15)、(28)和(29)可知,给定量纲一的真实接触面积 A_r^* 、切法向载荷比 T/P 和结合面摩擦系数 μ ,即可求得量纲一的法向预加载荷 P^* 、结合面切向接触阻尼损耗因子 η 和切向接触等效黏性阻尼 C_t^* 。根据文献[18-19],分别取泊松比 $\nu = \nu_1 = \nu_2 = 0.25$,塑性指数 $\varphi = 0.7, 1.5, 2.5, k = 2.8$,量纲一分形粗糙度 $G^* = 10^{-9}, 10^{-10}, 10^{-11}$,分形维数 $D = 1.1 \sim 1.9$,结合面摩擦系数 $\mu = 0.15 \sim 0.3$,切法向载荷比 $T/P = 0.02 \sim 0.1$,采用本文提出的结合面切向接触等效黏性阻尼分形模型进行仿真计算,得到 η 和 C_t^* 随 P^* 、 T/P 的变化规律,以及 D 、 G^* 、 φ 、 μ 对 C_t^* 影响的仿真结果,分别如图 2~图 7 所示。

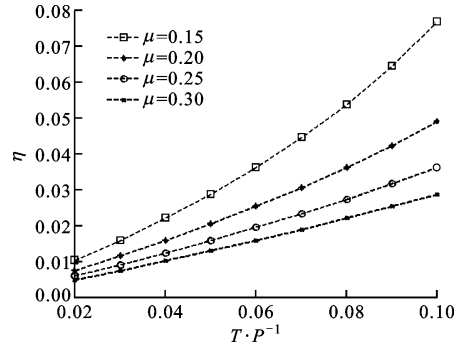
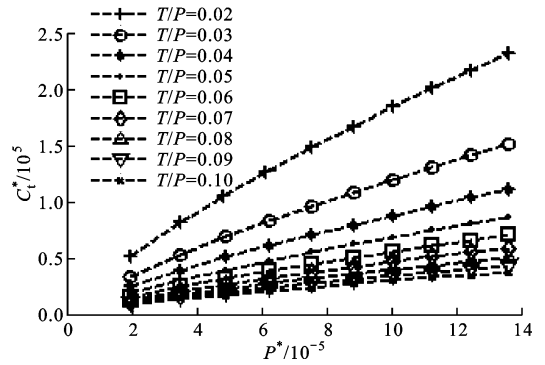
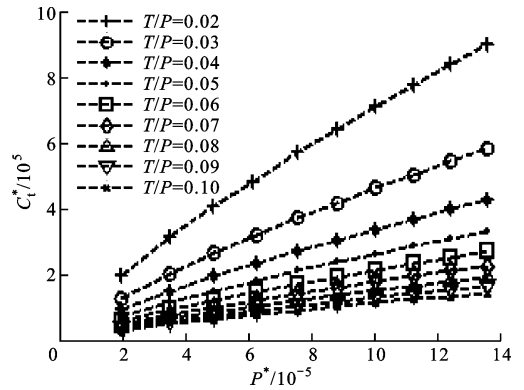


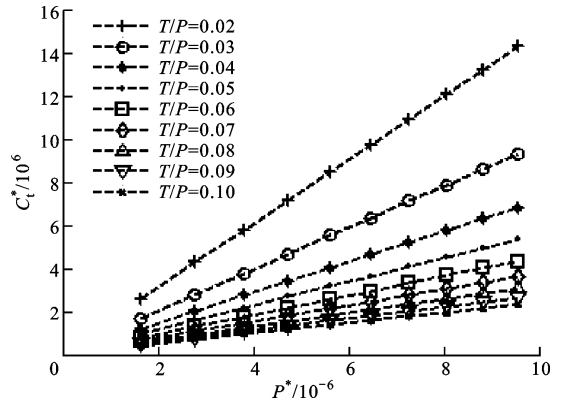
图 2 η 随 T/P 和 μ 的变化规律



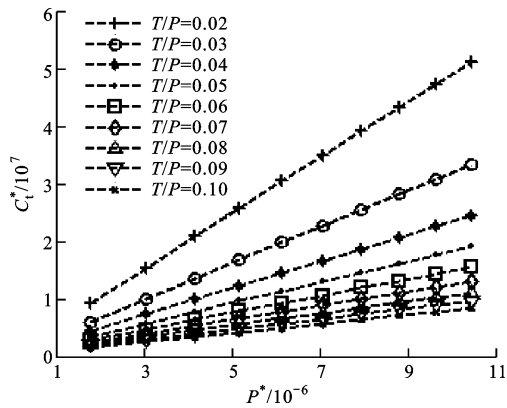
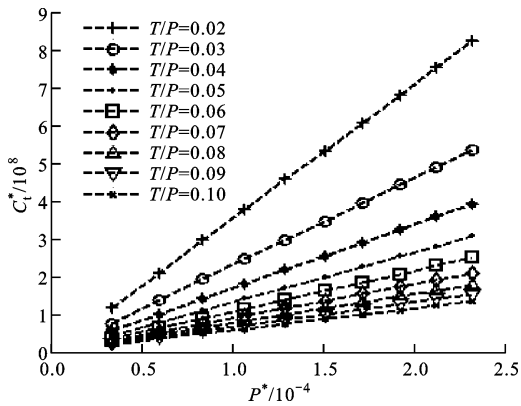
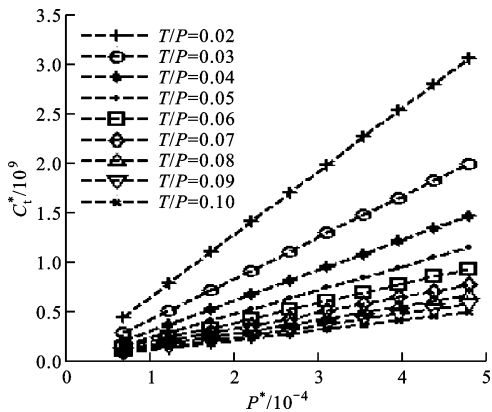
(a) $D = 1.3, G^* = 10^{-11}, \varphi = 0.7, \mu = 0.3$



(b) $D = 1.3, G^* = 10^{-11}, \varphi = 2.5, \mu = 0.3$



(c) $D = 1.5, G^* = 10^{-11}, \varphi = 0.7, \mu = 0.3$

(d) $D=1.5, G^*=10^{-11}, \varphi=2.5, \mu=0.3$ (e) $D=1.7, G^*=10^{-11}, \varphi=0.7, \mu=0.3$ (f) $D=1.7, G^*=10^{-11}, \varphi=2.5, \mu=0.3$ 图3 C_t^* 随 P^* 和 T/P 的变化规律

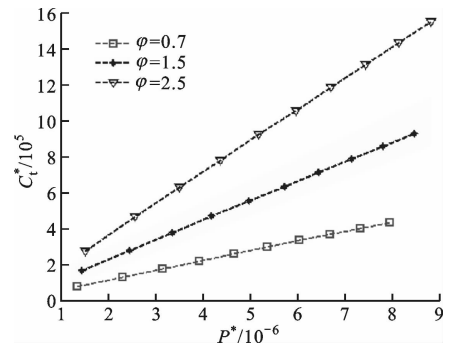
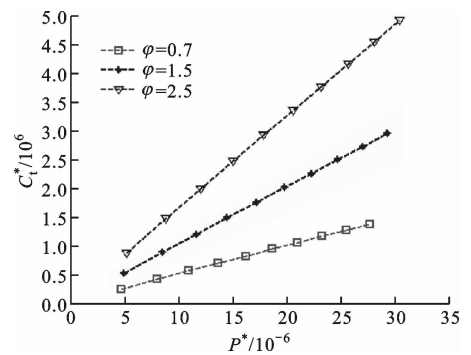
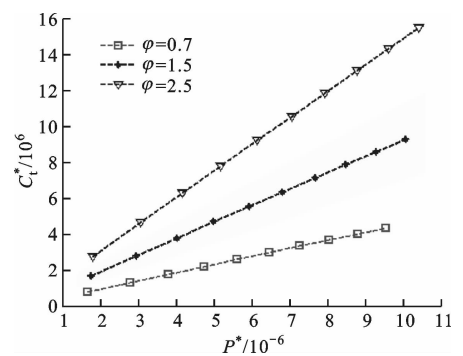
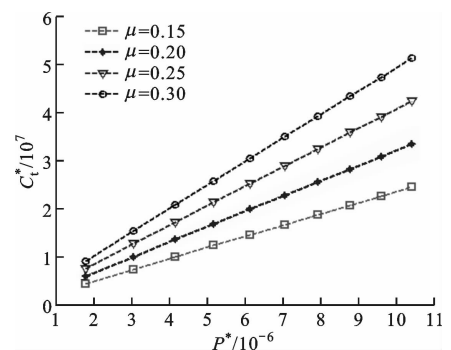
仿真结果分析如下。

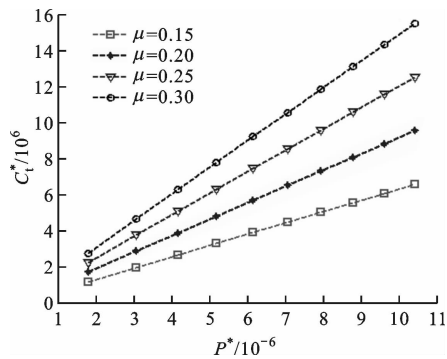
(1)由图2、图3可知:在 μ 一定的前提下, η 随着 T/P 的增大而增大,即在 T 一定的情况下, P 越大 η 就越小,反之则 η 越大;在 T/P 一定的情况下, η 随着 μ 的增大而减小。

(2)由图3~图6可知, C_t^* 随 P^*, φ, μ 的增大而增大,但却随着 T/P 和 G^* 的增大而减小。

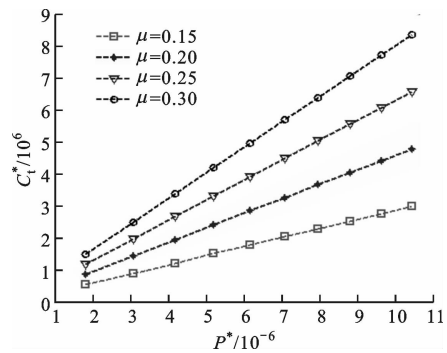
(3)由图7可以看出, C_t^* 随 D 的增大呈现先增大后减小的规律,约在 $D=1.65$ 附近取得最大值。

由此可见,通过合理设计结合面的分形维数可以达到优化结合面切向接触阻尼的目标,具有重要的实际工程意义。

(a) $G^*=10^{-9}, \mu=0.3, T/P=0.06, D=1.5$ (b) $G^*=10^{-10}, \mu=0.3, T/P=0.06, D=1.5$ (c) $G^*=10^{-11}, \mu=0.3, T/P=0.06, D=1.5$ 图4 C_t^* 随 P^* 和 φ 的变化规律(a) $G^*=10^{-11}, T/P=0.02, D=1.5, \varphi=2.5$

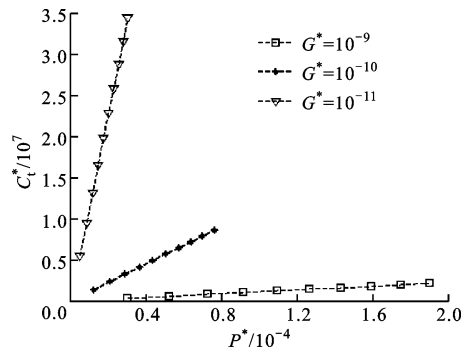


(b) $G^* = 10^{-11}$, $T/P = 0.06$, $D = 1.5$, $\varphi = 2.5$

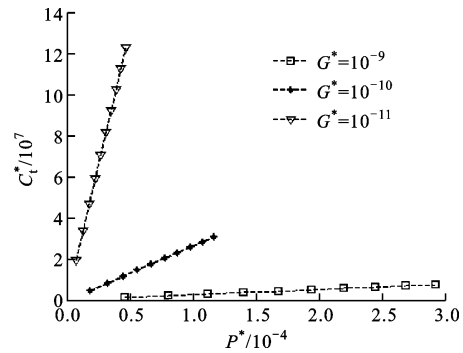


(c) $G^* = 10^{-11}$, $T/P = 0.10$, $D = 1.5$, $\varphi = 2.5$

图 5 C_t^* 随 P^* 和 μ 的变化规律

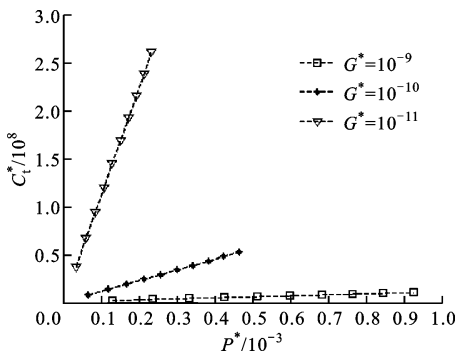


(c) $D = 1.6$, $\varphi = 0.7$, $\mu = 0.3$, $T/P = 0.06$

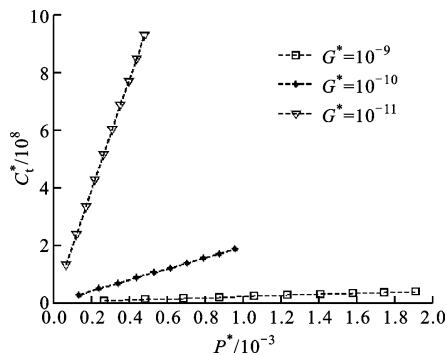


(d) $D = 1.6$, $\varphi = 2.5$, $\mu = 0.3$, $T/P = 0.06$

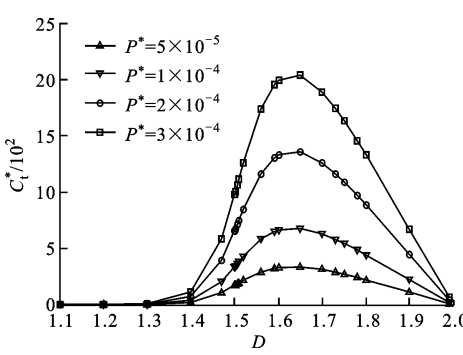
图 6 C_t^* 随 P^* 和 G^* 的变化规律



(a) $D = 1.7$, $\varphi = 0.7$, $\mu = 0.3$, $T/P = 0.06$



(b) $D = 1.7$, $\varphi = 2.5$, $\mu = 0.3$, $T/P = 0.06$



$T/P = 0.02$, $\mu = 0.15$, $\varphi = 0.7$, $G^* = 10^{-9}$

图 7 C_t^* 随 D 的变化规律

4 结 论

(1) 本文建立了结合面切向接触阻尼损耗因子的模型,它与结合面分形参数——分形维数和分形粗糙度参数无关,而仅与作用在结合面上的切法向载荷比以及结合面摩擦系数有关,且具有很强的非线性关系。同时,结合面切向接触阻尼损耗因子随着切法向载荷比的增大而增大,但随着结合面摩擦系数的增大而减小。

(2) 本文建立了结合面切向接触等效黏性阻尼

的分形模型,该模型表明,结合面切向接触等效黏性阻尼与结合面法向预加载荷、摩擦系数、材料塑性指数、结合面上的切法向载荷比、结合面分形维数以及分形粗糙度参数之间具有复杂的非线性关系。

(3)结合面切向接触等效黏性阻尼随着结合面法向预加载荷、摩擦系数、材料塑性指数的增大而增大,随着结合面分形粗糙度参数的增大而减小。

(4)结合面切向接触等效黏性阻尼随结合面分形维数的变化规律较为复杂,并在分形维数值 1.65 附近取得最大值,这一结果对工程实际具有重要的意义。

参考文献:

- [1] 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: 1-2.
- [2] 戴德沛. 阻尼减振降噪技术 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1986: 11, 234.
- [3] 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 for Agricultural Machinery, 2000, 31(4): 89-91.
- [4] 张学良, 温淑花, 徐格宁, 等. 结合部切向接触刚度分形模型研究 [J]. 应用力学学报, 2003, 20(1): 70-72.
ZHANG Xueliang, WEN Shuhua, XU Gening, et al. Fractal model of the tangential contact stiffness of machined surfaces in contact [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2003, 20(1): 70-72.
- [5] 温淑花, 张学良, 武美先, 等. 结合面法向接触刚度分形模型建立与仿真 [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, 武美先, 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, WU Meixian, 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] 张学良, 温淑花, 兰国生, 等. 平面结合面切向接触

阻尼分形模型及其仿真 [J]. 西安交通大学报, 2011, 45(5): 74-77, 136.

ZHANG Xueliang, WEN Shuhua, LAN Guosheng, et al. Fractal model for tangential contact damping of plane joint interfaces with simulation [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2011, 45(5): 74-77.

- [8] 尤晋闽, 陈天宁. 结合面法向动态参数的分形模型 [J]. 西安交通大学学报, 2009, 43(9): 91-94.
YOU Jinmin, CHEN Tianning. Fractal model for normal dynamic parameters of joint surfaces [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2009, 43(9): 91-94.
- [9] 尤晋闽, 陈天宁. 基于分形接触理论的结合面法向接触参数预估 [J]. 上海交通大学学报, 2011, 45(9): 1275-1280.
YOU Jinmin, CHEN Tianning. Estimation for normal parameters of joint surfaces based on fractal theory [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2011, 45(9): 1275-1280.
- [10] 张学良, 丁红钦, 兰国生, 等. 基于分形理论的结合面法向接触阻尼与损耗因子模型 [J]. 农业机械学报, 2013, 44(6): 287-294.
ZHANG Xueliang, DING Hongqin, LAN Guosheng, et al. Normal contact damping and dissipation factor model of joint interfaces based on fractal theory [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(12): 223-227.
- [11] 李小彭, 王伟, 赵米鹊, 等. 考虑摩擦因素影响的结合面切向接触阻尼分形预估模型及其仿真 [J]. 机械工程学报, 2012, 48(23): 46-50.
LI Xiaopeng, WANG Wei, ZHAO Mique, et al. Fractal prediction model for tangential contact damping of joint surface considering friction factors and its simulation [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(23): 46-50.
- [12] 张学良, 王南山, 温淑花, 等. 机械结合面切向接触阻尼能量耗散弹塑性分形模型 [J]. 机械工程学报, 2013, 49(12): 43-49.
ZHANG Xueliang, WANG Nanshan, WEN Shuhua, et al. Elastoplastic fractal model for tangential contact damping energy dissipation of machine joint interfaces [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(12): 43-49.
- [13] ZHANG Xueliang, WANG Nanshan, LAN Guosheng, et al. Tangential damping and its dissipation factor models of joint interfaces based on fractal theory with simulations [J]. ASME Journal of Tribology, 2014, 136(1): 011704.

(下转第 50 页)