文章编号:1006-3080(2012)01-0123-04

纤维增强聚合物圆柱体与刚性平面接触应力场的有限元分析

任　超，　陈建钧，　潘红良
(华东理工大学机械与动力工程学院,上海 200237)

摘要:对纤维增强聚合物圆柱体与刚性平面线接触问题进行了有限元分析,研究了接触区内纤维的存在以及取向变化对基体和纤维上应力的影响。结果表明:纤维的存在使得纤维下方基体的应力降低,纤维上方基体应力增大;纤维上的最大应力以及纤维端面上的接触应力均与纤维轴向角成线性关系,且受切向角影响较小;纤维的弹性能随着纤维轴向角和切向角均线性变化,且受轴向角影响更大。

关键词:纤维复合材料; 接触应力; 有限元分析; 纤维取向
中图分类号:TG115.28　　**文献标志码**:A

FEM Analysis of Contact Stress Field of Fiber Reinforced Polymer Cylinder with Rigid Plane

REN Chao，　*CHEN Jian-jun*，　*PAN Hong-liang*
(*School of Mechanical and Power Engineering*, *East China University of Science and Technology*, *Shanghai* 200237, *China*)

Abstract: Contact problem of fiber reinforced polymer cylinder with rigid plane was analyzed by finite element method(FEM). Stress distribution in fiber and matrix were studied considering different fiber orientation angles, when fiber lied on the contact surface. The result reveals that the stress on the matrix beneath the fiber is released and intensified above the fiber. Meanwhile, the maximum stress on fiber as well as the contact stress on fiber surface increases linearly with its axial-distribution angle and effected barely by its tangent-distribution angle. The elastic energy of fiber is proportional with both its axial-distribution angle and its tangent-distribution angle, but the former scale coefficient is larger.

Key words: fiber reinforced composite; contact stress; FEM analysis; fiber orientation

聚合物经纤维填充后可有效改善材料的力学性能和摩擦学性能,提高材料刚度和强度的同时又能降低材料的摩擦因数和磨损量,使得聚合物材料在工业领域中的应用更加广泛[1-4]。在纤维复合材料等效力学性能方面,Eshelby 等效夹杂理论、自洽法和 Mori-Tanaka 法可以有效预测复合材料的宏观模量,剪切滞后理论[5]及有限元法从细观力学上进一步分析了代表体积单元的应力场分布,阐明了纤维的增强机理。在复合材料滑动摩擦学性能方面,普遍认为纤维对基体起承载耐磨作用,Wang 等[6]证明了纤维的存在有效减少了基体的摩擦因数和磨损量。Golden 等[2]通过双盘滚滑试验研究了纤维增强尼龙复合材料与钢环滚滑接触时的摩擦学性能,也得出类似的结论。滚动接触的摩擦学性能与接触区的应力场分布密切相关,目前关于纤维对接触区应力场影响方面的报道较少。本文针对纤维增

收稿日期:2011-07-12
作者简介:任　超 (1983-),男,山东人,博士生,主要研究纤维复合材料摩擦学性能。
通讯联系人:潘红良,E-mail: hlpan@ecust.edu.cn

强聚合物圆柱体与刚性平面的接触问题,借助有限元方法研究了接触区内纤维的存在以及取向变化对基体和纤维上应力的影响。分析了纤维取向分布对纤维及基体应力场以及纤维弹性能的影响,对复合材料摩擦磨损性能和机理研究都具有理论指导意义。

1 有限元模型的建立

1.1 几何接触模型

圆柱体复合材料与刚性平面线接触模型如图1(a)所示。半径为 R、宽度为 d 的半圆柱体与刚性平面接触,接触区内含有单根长度 L、直径为 Φ 的纤维,以纤维表面几何中心为坐标原点,纤维模型如图1(b)所示,定义纤维与圆柱面切线方向夹角为 φ,与圆柱面轴线方向夹角为 θ。

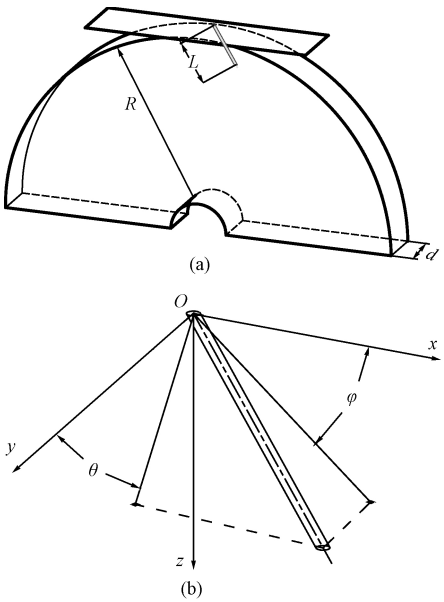


图1 几何接触模型

Fig. 1 Geometric contact model

1.2 本构方程

假设基体与纤维为各向同性弹性材料,由胡克定律得出本构方程为

$$\boldsymbol{\sigma}_{ij}^{\mathrm{m}} = \boldsymbol{E}_{ijkl}^{\mathrm{m}}\boldsymbol{\varepsilon}_{kl}^{\mathrm{m}},\boldsymbol{\sigma}_{ij}^{\mathrm{f}} = \boldsymbol{E}_{ijkl}^{\mathrm{f}}\boldsymbol{\varepsilon}_{kl}^{\mathrm{f}} \tag{1}$$

式中:$\boldsymbol{\sigma}_{ij}$ 表示应力张量;$\boldsymbol{E}_{ijkl}$ 表示弹性张量;$\boldsymbol{\varepsilon}_{kl}$ 表示应变张量,上标 m 和 f 分别表示基体和纤维。

1.3 平衡方程

刚性平面在载荷 $\boldsymbol{P}_0$ 的作用下垂直与圆柱体接触,忽略接触界面的摩擦力,则基体和纤维的平衡方程表示为

$$\boldsymbol{\sigma}_{ij}^{\mathrm{m}}\mid_j = 0,\boldsymbol{\sigma}_{ij}^{\mathrm{f}}\mid_j = 0 \tag{2}$$

$$\boldsymbol{P}_i^{\mathrm{m}} = \boldsymbol{\sigma}_{ij}^{\mathrm{m}}n_j^{\mathrm{m}},\boldsymbol{P}_i^{\mathrm{f}} = \boldsymbol{\sigma}_{ij}^{\mathrm{f}}n_j^{\mathrm{f}} \tag{3}$$

式中 $\boldsymbol{P}_i^{\mathrm{m}}$ 和 $\boldsymbol{P}_i^{\mathrm{f}}$ 分别表示刚性平面作用在基体和纤维上的外力。

1.4 边界条件

假设基体与纤维的界面尺度无穷小且具有足够的强度,则

$$\boldsymbol{u}_i^{\mathrm{m}} = \boldsymbol{u}_i^{\mathrm{f}}\mid_{\partial\Omega},E_i^{\mathrm{m}}\frac{\partial\boldsymbol{u}_i^{\mathrm{m}}}{\partial n} = E_i^{\mathrm{f}}\frac{\partial\boldsymbol{u}_i^{\mathrm{f}}}{\partial n}\bigg|_{\partial\Omega} \tag{4}$$

$$\boldsymbol{u}_y^{\mathrm{m}} = 0\mid_{y=0},\boldsymbol{u}_z^{\mathrm{m}} = 0\mid_{z=\pm d/2} \tag{5}$$

$$\boldsymbol{P}_y^{\mathrm{m}} + \boldsymbol{P}_y^{\mathrm{f}} = \boldsymbol{P}_0 \tag{6}$$

式中:$\boldsymbol{u}_i^{\mathrm{m}}$ 和 $\boldsymbol{u}_i^{\mathrm{f}}$ 分别表示基体和纤维的位移自由度;$\boldsymbol{u}_y^{\mathrm{m}}$ 和 $\boldsymbol{u}_z^{\mathrm{m}}$ 分别表示基体边界 y 方向和 z 方向的位移初始条件;∂n 表示边界法向;$\partial\Omega$ 表示纤维与基体间的界面。

1.5 有限元模型

ANSYS 几何建模并划分网格模型如图2所示,基体和纤维材料采用 SOLID 185 单元、表面结合粗面选用 CONTACT 174 单元,刚性目标面选用 TARGE 170 单元,接触面摩擦力为0。模型几何尺寸及材料属性如表1所示。

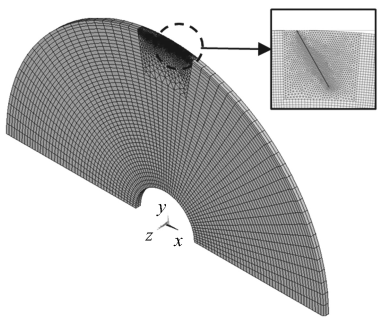


图2 有限元接触模型

Fig. 2 Finite element matel contact model

表1 有限元模型参数

Table 1 Finite element model contact parameters

E^{m}/MPa	ν^{m}	E^{f}/MPa	ν^{f}	F/N	R/mm	d/mm	Φ/mm	L/mm
1 520	0.4	7.5×10^4	0.3	1	32.5	3	0.01	2.5

ν is possion's ratio

2　数值结果及分析

图 3(a)和图 3(b)分别给出了纤维取向 $\theta=35°$，$\varphi=0°$和 $\theta=0°$，$\varphi=75°$时，纤维周边 Von Miss 应力等值线图。图 3(a)表明纤维的存在改变了基体应力等值线左右的对称性，纤维上方的基体应力升高，尤其是近接触面且位于纤维上方的基体，应力由 1.092 MPa 升高到 2.063 MPa。图 3(b) 同样表明纤维右侧基体应力普遍高于同深度左侧基体应力。因此，纤维对下方的基体具有保护作用，但会使得其上方的基体承受更高的应力，因此该位置的基体更容易发生磨损[7]。

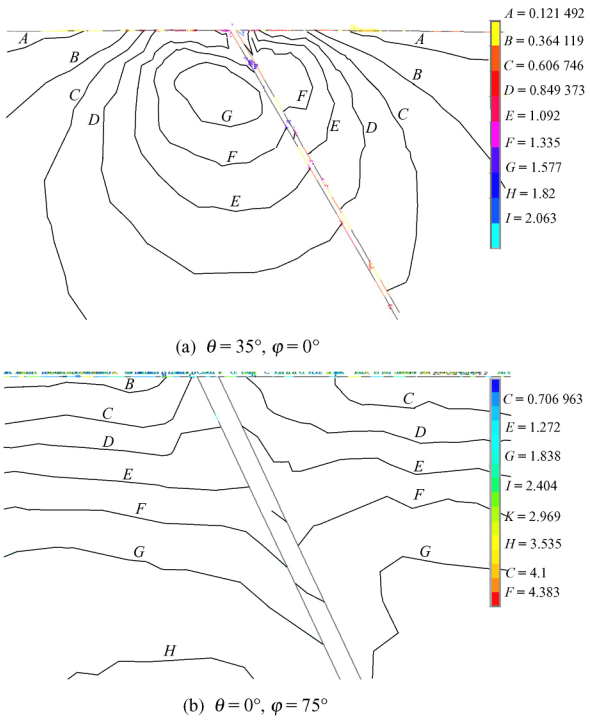


图 3　纤维周边 Von Miss 应力等值线图

Fig. 3　Von Miss tress contour contact near fiber

图 4(a)和图 4(b)分别给出了同样接触载荷和边界条件下，纤维上最大应力(σ^f)及纤维整体弹性能(w^f)受纤维轴向角和切向角变化的影响。图 4(a)说明纤维最大等效应力和纤维弹性能受纤维轴向角影响较大，几乎与纤维轴向角成线性关系，且最大值均产生在 $\theta=90°$时。纤维轴向角度从 0°增大到 90°，纤维最大等效应力增大了 5 倍，弹性能增大了 6 倍。相比之下，纤维切向角度对纤维最大等效应力和弹性能影响较小。如图 4(b)所示，纤维最大等效应力位于 120～150 MPa 之间，最小值出现在 $\theta=45°$时。纤维弹性能几乎随切向角线性增长，$\varphi=90°$时的弹性能为 $\varphi=25°$时的 1.7 倍。因此，在复合材料接触强度设计时，应以 $\theta=90°$且 $\varphi=90°$时的纤维最大应力为破坏判定准则。为了提高纤维的增强作用，应尽可能提高纤维的切向角 φ 和轴向角 θ。

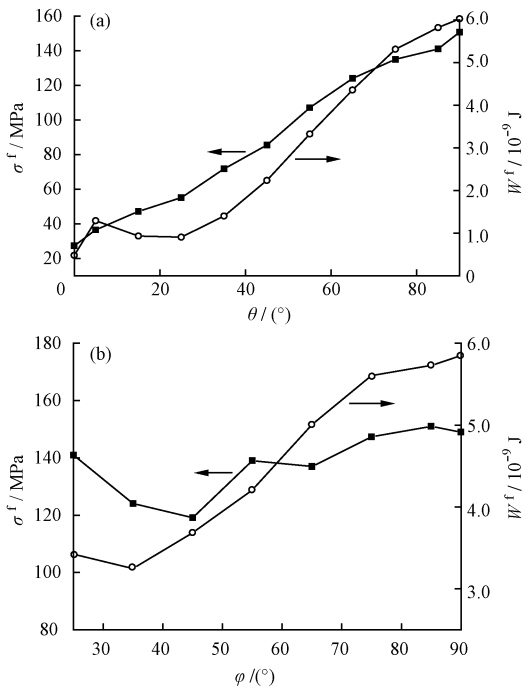


图 4　纤维取向角对纤维最大应力及纤维弹性能的影响

Fig. 4　Effect of fiber orientation angle on maximum stress and elastic energy of fiber

图 5(a)和图 5(b)分别给出了接触区内，纤维端面上的接触应力。图 5(a)表明，纤维端面接触应力随纤维轴向角 θ 线性增大，且变化幅度较大。轴向角 $\theta=90°$时的最大接触应力 118 MPa 为轴向角 $\theta=0°$时的 9 倍。图 5(b)表明，纤维端面应力受纤维切向角 φ 影响较小，应力值在 105～120 MPa 之间，随切向角增大应力值先降低后升高，最小值对应 $\varphi=55°$。纤维端面接触应力的增大，提高了纤维的承载作用，对基体起支撑保护作用，在滑动摩擦中降低了摩擦因数与磨损量[4]。

图 6(a)和图 6(b)给出了不同纤维轴向角和切向角时的纤维轴向应力分布。如图 6(a)所示，当纤维基体表面平行轴向，即 $\theta=0°$时，纤维上各处应力基本相同。随着轴向角的增大，纤维上应力分布差异逐步增大，靠近表面纤维端应力值较高，且最大值出现在纤维近表面同一位置。根据剪切滞后理论，纤维圆柱体侧面载荷由基体通过界面剪应力传递，因

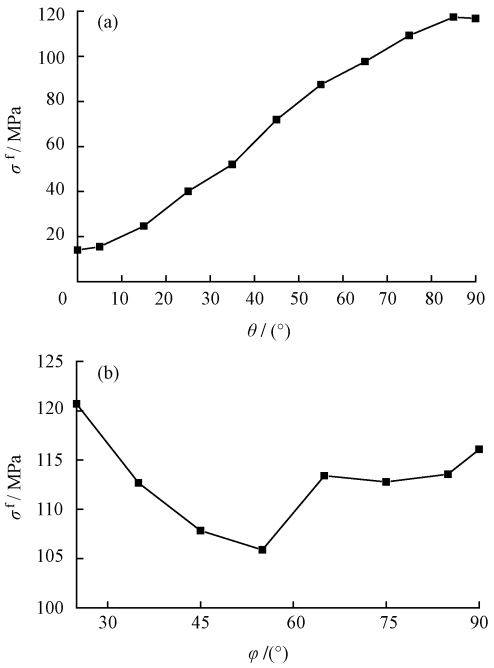


图5 纤维取向角对纤维端面接触应力的影响

Fig. 5 Effect of fiber orientation angle on contact stress of fiber

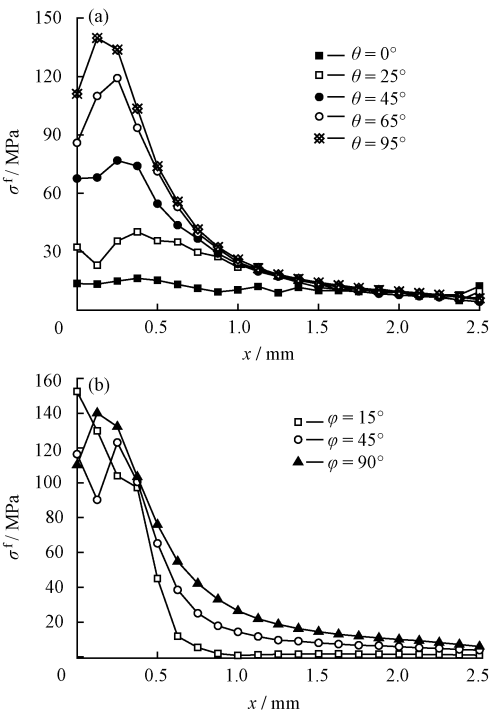


图6 纤维取向角对纤维轴向应力分布的影响

Fig. 6 Effect of fiber orientation angle on fiber axial stress

此纤维端部有部分无效长度,而纤维底面载荷通过接触面直接作用,因此纤维上最大应力出现在近表面位置[8]。图6(b)也同样说明纤维表面区域应力值较高。当纤维切向角较大时,纤维应力最大值同样出现在近表面位置;而当切向角较低时,纤维最大应力出现在纤维端面上,原因是此时纤维表面承受较大的弯应力所致。

3 结 论

本文采用有限元方法,在弹性范围内对纤维增强聚合物圆柱体与刚性平面接触问题进行了仿真分析,分别研究了接触区中含有纤维且纤维取向不同时,基体材料和纤维上应力场变化,主要结果表明:

(1) 纤维的存在使得纤维下方基体的应力降低,纤维上方基体应力增大。

(2) 纤维上的最大应力位于基体近表面位置,其值与纤维轴向角成线性关系,受切向角影响不大。

(3) 纤维弹性能随着纤维轴向角和切向角均线性变化,受轴向角影响更大。

(4) 纤维接触面上的接触应力随轴向角线性增长,受切向角影响较小。

参考文献:

[1] 李红周, 贾玉玺, 姜伟, 等. 纤维增强复合材料的细观力学模型以及数值模拟进展[J]. 材料工程, 2006, **65**(8): 57-60.

[2] Gordon D H, Kukureka S N. The wear and friction of polyamide 46 and polyamide 46/aramid-fibre composites in sliding-rolling contact [J]. Wear, 2009, **267**(1-4): 669-678.

[3] Harrass M, Friedrich K, Almajid A A. Tribological behavior of selected engineering polymers under rolling contact [J]. Tribology International, 2009, **43**(3): 635-646.

[4] Xian Guijun, Zhang Zhong. Sliding wear of polyetherimide matrix composites: I. Influence of short carbon fibre reinforcement [J]. Wear, 2005, **258**(5-6): 776-782.

[5] Hsueh C H. Young's modulus of unidirectional discontinuous-fibre composites [J]. Composites Science and Technology, 2000, **60**(14): 2671-2680.

[6] Wang Shibo, Ge Shirong, Zhang Dekun. Comparison of tribological behavior of nylon composites filled with zinc oxide particles and whiskers [J]. Wear, 2009, **266**(1-2): 248-254.

[7] Jiang Zhenyu, Gyurova L A, Schlarb A K, *et al*. Study on friction and wear behavior of polyphenylene sulfide composites reinforced by short carbon fibers and sub-micro TiO_2 particles[J]. Composites Science and Technology, 2008, **68**(3-4): 734-742.

[8] Wang J, Uma S, Klabunde K J. Visible light photocatalysis in transition metal incorporated titania-silica aerogels [J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2004, **48**(2): 151-154.