

文章编号: 1006-4710(2012)02-0221-04

双粗糙表面接触模型中微观摩擦系数的确定

赵金娟¹, 王世军²

(1. 西安理工大学 印刷包装工程学院, 陕西 西安 710048;

2. 西安理工大学 机械与精密仪器工程学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 通过考察双粗糙表面接触模型中微观摩擦系数的取值对接触表面的法向变形与法向载荷关系的影响, 研究了磨削表面接触模型中微观摩擦系数的取值问题。采用表面轮廓仪测量磨削表面的轮廓数据, 然后建立二维弹塑性有限元模型, 计算不同微观摩擦系数时试样的法向变形与法向载荷关系。计算结果表明, 接触表面间的微观摩擦系数对低面压下的接触变形影响比较大, 载荷比较高的时候, 摩擦系数的取值并不显著影响接触变形。在微观摩擦系数不为零时, 法向变形与法向载荷关系曲线存在一个下陷区, 摩擦系数越小, 下陷区越小。与实验结果对比, 发现忽略摩擦系数的计算结果与通过实验获得的法向变形与法向载荷关系最为接近, 双粗糙表面接触模型中忽略微观摩擦系数比较合适。此外还根据计算结果研究了微观摩擦系数的取值对最高接触应力和真实接触面积的影响, 发现忽略微观摩擦时, 接触应力水平降低, 真实接触面积有减小的趋势。

关键词: 有限元; 粗糙; 接触; 模型; 摩擦系数

中图分类号: O344.1, O343.3 **文献标志码:** A

Determination of Microcosmic Friction Coefficient in Contact Model of Double Rough Surfaces

ZHAO Jinjuan¹, WANG Shijun²

(1. Faculty of Printing and Packaging Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. Faculty of Mechanical and Precision Instrument Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: The problem of value determination of microcosmic friction coefficient in contact model of ground surface is studied by means of analysis of influence upon microcosmic friction coefficient on relation between normal deformation and normal load in the contact model of double rough surfaces. Data of surface profile obtained by surface profiler are adopted and then two dimension model based on finite element method is built to calculate relation between normal deformation and normal load in samples of different microcosmic coefficients. Computation results show that microcosmic friction coefficient between two contact surfaces markedly influences contact deformation under low pressure but microcosmic friction coefficient hardly influences contact deformation under high pressure. When microcosmic friction coefficient is not equal to zero, there exists a subsidence range in curve of relation between normal deformation and normal load, and the subsidence range is small when friction coefficient is lower. By comparison with trial result of relation between normal deformation and normal load, computation results ignoring friction coefficient is closest to trial result. Therefore, in contact model of double rough surfaces, microcosmic friction coefficient should be ignored. Moreover, by means of analysis of numerical computation, influence of microcosmic friction coefficient is studied on the highest contact stress and real contact area. Level of contact stress and real contact area are decreased in tendency when microcosmic friction is ignored.

Key words: finite element; coarse; contact; model; friction coefficient

机械结构的有限元分析中, 对于单个零件的分析, 有限元计算能够可靠地替代一部分实验, 加快设

收稿日期: 2011-12-28

基金项目: 国家重点基础研究发展计划基金资助项目(2009CB724406); 国家科技重大专项基金资助项目(2009ZX04014-032); 西安理工大学科技创新计划基金资助项目(102-210916); 陕西省教育厅科学研究计划基金资助项目(08JK393)。

作者简介: 赵金娟(1974-), 女, 硕士, 讲师, 研究方向为机械结构动态性能分析。E-mail: zhaojinjuan@xaut.edu.cn。

王世军(1967-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为结合部性质及整机性能分析方法。E-mail: wsjxaut@xaut.edu.cn。

计进度,降低设计成本。对于包含多个零件的整机分析的结果往往与实验结果存在比较大的差距,主要的原因在于对零件之间包括接触面间的接触刚度和接触阻尼的接触性质没有准确地认识和掌握,无法进行准确建模和计算。对零件之间接触性质的研究,是结构分析由单件走向整机的关键。

两个机械零件表面之间的实际接触状况和接触性质不易通过实验直接观察和测量,利用粗糙表面接触模型研究其接触状况和接触性质具有重要意义。粗糙表面的接触分析过程可以分为粗糙表面的描述和接触算法两个部分。常用的三种基本的粗糙表面描述方法是统计方法^[1]、分形方法^[2]和有限元方法^[3]。这些方法目前对接触模型中微凸体之间的微观摩擦系数取值一直没有统一的认识,且采用的多数不是真实的工程表面数据,只是在一定程度上反映了粗糙表面的某些特征,根据这些方法得到的结论往往并不一致,也难以从数值上与实验结果比较,因而确定较为准确的微观摩擦系数则更为困难。

本文根据实测表面轮廓数据直接建立有限元模型,建模过程中不需要统计或者分形假定,能够比较准确地反映粗糙表面的轮廓特征。该模型在建模过程中遇到的主要问题之一也是粗糙表面微凸起之间摩擦系数的确定。由于难以直接通过实验测量微凸体间的摩擦系数,本文考察了该模型在不同摩擦系数下的法向变形与法向载荷之间的关系,然后与法向变形-载荷关系的实验结果对比,确定微凸体接触间比较合理的摩擦系数。最后分析了不同的微观摩擦系数对真实接触面积和接触应力的影响。

1 有限元模型和实验装置

图1是基于两个粗糙表面建立的有限元接触模型。两个粗磨表面的粗糙度 $R_a = 1.34$,材料为45钢,通过TR300型表面形貌测量仪沿垂直磨削纹理方向扫描试样表面获得二维表面轮廓数据,利用该轮廓数据构建二维的粗糙接触表面。该模型由上下两个试样构成,宏观外形相同,宽和高均为5.6 mm,通过两个粗糙表面间的接触单元实现接触,接触算法采用罚函数法。单元类型采用四边形的双线性平面应变单元,共计32 236个单元,37 691个结点。下试样的下表面法向自由度被约束,下表面左侧的结点水平自由度被约束,均布载荷施加在上试样的上表面。材料模型采用弹塑性双线性强化模型,材料的弹性模量 $E = 207$ GPa,材料屈服极限 $\sigma_s = 360$ MPa,强化阶段曲线的斜率 $E_r = 1.22$ GPa。材料的泊松比 $\mu = 0.3$ 。材料进入屈服状态的判据采用

Mises判据。下试样底面沿垂直方向约束,同时在左下角结点水平方向施加约束,这样下试样有充分的约束条件,上试样的约束依靠粗糙的接触表面实现,在上试样的上表面逐步施加均布载荷至0.8 MPa。

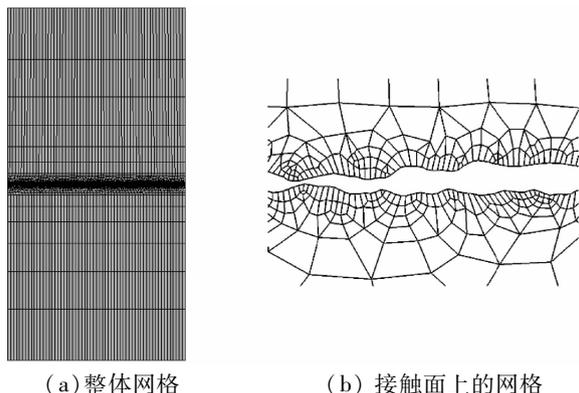


图1 接触模型的有限元网格

Fig. 1 Finite element mesh of contact model

图2所示为实验装置的原理图,上下两个试样均为圆柱体。受轮廓仪测量范围和有限元计算量的限制,图1所示有限元模型中,试样的宽和高均为5.6 mm,这样小的试样不便加载和测量。为了方便加载和测量,实际使用的试样直径为25 mm,高度也为25 mm,此外还在试样靠近接触面设计了凸缘,用两个凸缘的位移差反映接触层的变形。传感器1、2是两个旁式的电感式位移传感器(旁式也叫杠杆式,测量时测头是摆动的,测量空间狭小的时候可以从旁边测量,所以叫旁式),分别用来测量两个试样凸缘的位移量,测量差值既包含试样基体的变形,也含有接触层的变形。在两个垫块上通过直径3 mm的钢球施加法向集中载荷,为了使传递在试样上的载荷趋于均匀,在垫块与试样之间涂有胶层。在不考虑粗糙表面时,对这样的实验装置进行有限元接触分析的结果表明,接触面上的Mises应力波动不超过1%,可以认为这个实验装置能够达到接触面上有均匀接触压力的实验要求。

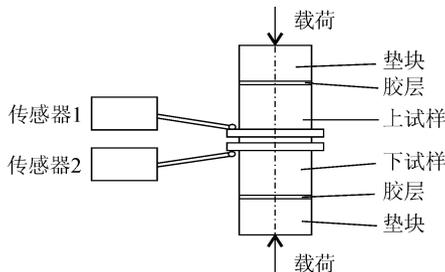


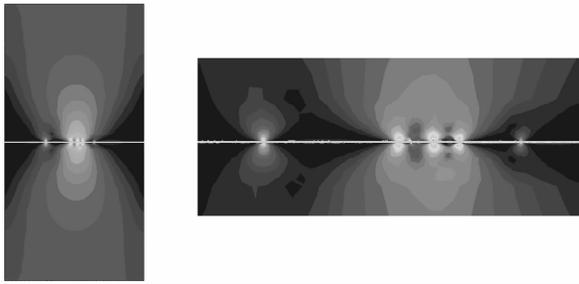
图2 实验原理图

Fig. 2 Schematic diagram for experiment setup

2 计算和实验结果

图3是粗糙表面间的微观摩擦系数为0时计算

获得的结构应力分布图。由于接触点相同,采用不同摩擦系数时的应力分布类似,只是数值上存在差异。



(a) 整体应力分布 (b) 接触点附近的应力分布

图3 有限元分析的应力分布

Fig.3 Stress distribution from finite element analysis

图4是计算获得的采用不同摩擦系数时接触层的法向变形与载荷的关系以及实验的结果,曲线的余切就是两个接触面的法向刚度。

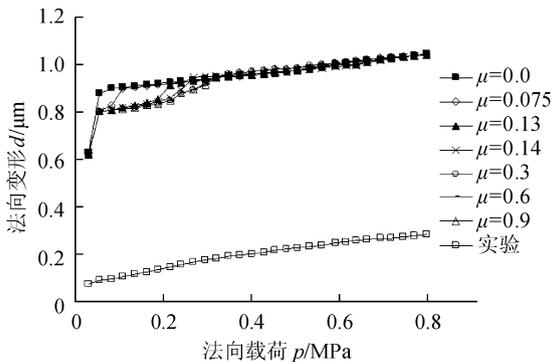


图4 摩擦系数对法向接触变形的影响

Fig.4 Effect of friction coefficient on normal contact deformation

实验获得的曲线与计算获得的曲线大体平行,说明计算获得的法向接触刚度与实验结果是吻合的。实验曲线与计算曲线间的距离主要跟计算模型中两个粗糙表面的初始间隙有关。建立有限元模型时,上下试样之间的法向准确位置难以事先确定,无法建立一个上下粗糙表面刚好接触的几何模型,只能预估一个比较小的间隙,确保两个粗糙表面不会发生交叠,最终的接触位置依靠接触计算的迭代过程确定,即计算曲线在垂直方向上的位置主要是受建模时上下两个粗糙接触表面之间的间隙影响,不一定是真正的接触变形,实验曲线与计算曲线在垂直方向上的距离不影响接触面之间的法向刚度。

图4中计算模型的摩擦系数采用不同的值时,计算结果并不完全相同。差别在于摩擦系数不为零时,曲线都有明显的下陷区,这与实验结果不符。摩擦系数越大,下陷的区域越大,并且下陷区域存在一

个极限。摩擦系数为零时,曲线最平滑,与实验结果吻合最好。摩擦系数超过0.3以后,变形-载荷曲线已经差别不大。摩擦系数对曲线的影响主要是低载荷区,对高载荷区没有显著影响。

图5是对3个同类试样建立的有限元模型的计算结果。3个试样的材料、加工方法和表面粗糙度相同,模型 m_1 、 m_2 、 m_3 中的微观摩擦系数为0.15,模型 m_4 、 m_5 、 m_6 中的摩擦系数为0。为了便于比较,图4中的实验结果也显示在图5中。比较图5和图4可以看到,微观摩擦系数不为零时,不同的试样,下陷区域的大小不同,但是下陷的区域都在低载荷区,高载荷区仍然保持平行。微观摩擦系数为零时,不同模型的位移-载荷曲线都能与实验曲线保持平行,没有下陷区,与实验结果吻合较好。

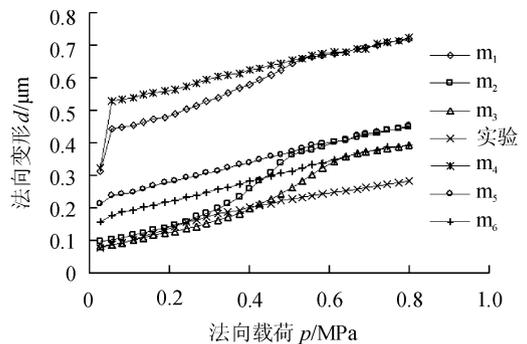


图5 不同模型的法向变形比较

Fig.5 Comparison of normal deformations of different models

图6是计算获得的不同摩擦系数时最高 Mises 应力与载荷的关系。由图中可以看到,随着摩擦系数的增大,接触应力有升高的趋势,摩擦系数超过0.6以后的曲线基本重合,对应力水平的影响不明显,低于0.6时,摩擦系数对应力水平的影响比较大。

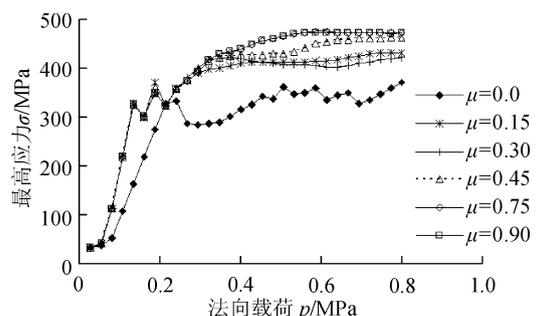


图6 摩擦系数对最高应力的影响

Fig.6 Effect of friction coefficient on maximum stress

根据文献[4-8]的研究,接触压力越高,宏观摩擦系数越小,对微观摩擦系数而言应该有类似的结论,本文接触模型中采用比较小的摩擦系数有其合理性。图6中摩擦系数为零时,应力水平最低,但波

动最为剧烈。与此类似的是,文献[9]在2005年基于分形方法建立了三维有限元粗糙接触模型,应变计算结果也存在较大分散性。进一步的计算分析发现,这种波动主要与材料的弹性模量、接触模型和摩擦有关。文献[10]中采用的材料弹性模量是连续变化的,本文的材料模型则是双线性的弹塑性强化模型,材料应力超过屈服点后,弹性模量会突变,随着变形的继续增加,接触峰的应力不再按照原来的速度继续增加,导致应力波动。另外,文献[10]的模型采用粗糙面与平面接触,粗糙峰的接触都发生在峰顶,本文模型中多数接触出现在粗糙峰的侧面,微观接触面在宏观法向载荷作用下存在切向运动的趋势,微观摩擦系数的大小会影响切向应力的方向,微观摩擦系数的大小会影响切向应力的方向。图5中不论摩擦系数取值大小,接触应力在开始接触的很小载荷下就快速上升到屈服极限附近,即接触点的应力一开始就处在比较高的水平,这与一般摩擦学对于微观接触性质的认识一致^[11]。

图7是计算获得的摩擦系数对接触面积比的影响。图中的接触面积比是接触表面的真实接触面积与名义接触面积的比值。

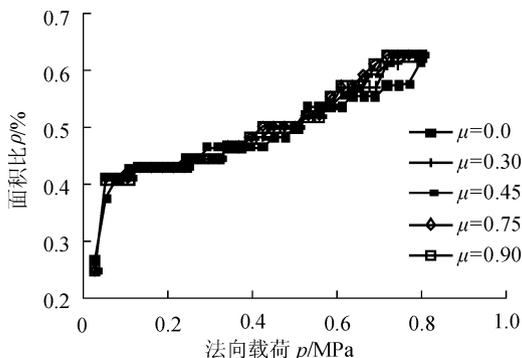


图7 摩擦系数对接触面积的影响

Fig. 7 Effect of friction coefficient on contact area

由图7可看出,真实的接触面积远小于名义的接触面积。在低载荷区域,不同摩擦系数对接触面积比的影响不大,在高载荷区,随着摩擦系数的增大,接触面积比有增大的趋势,这与文献[10]的模型中真实接触面积与法向载荷的关系一致。当微观摩擦系数超过0.3以后,各条曲线十分接近,微观摩擦系数对接触面积比的影响不大。在高载荷区,微观摩擦系数在0.3以下时,微观摩擦系数的取值对接触面积比的影响较大。

3 结论

研究了粗糙表面接触模型中微观摩擦系数的取值问题。通过分析法向接触变形与法向载荷的关系,发现摩擦系数取零值或者比较小的值,计算获得

的法向接触变形规律与实验结果最为接近,与文献中宏观摩擦实验的结果比较,粗糙接触模型中忽略微观摩擦系数或者取比较小的值较为合理。微观表面之间的粘结力在宏观实验中并不表现出来,在本文所述的微观接触模型中可以不考虑。

参考文献:

- [1] Greenwood J A, Willanson J B. Contact of nominally flat surfaces[J]. Proceeding of the Royal Society, Series A, 1966, 295: 300-319.
- [2] Majumdar A, Bhushan B. Fractal model of elastic-plastic contact between rough surfaces[J]. Journal of Tribology, 1991, 113: 1-11.
- [3] Komvopoulos K, Choi D H. Elastic finite element analysis of multi-asperity contacts[J]. ASME Journal of Tribology, 1992, 114: 823-831.
- [4] 盛选禹, 雒建斌, 温诗铸. 基于分形接触的静摩擦系数预测[J]. 中国机械工程, 1998, 9(7): 16-18.
Sheng Xuanyu, Luo Jianbin, Wen Shizhu. Static friction coefficient model based on fractal contact[J]. China Mechanical Engineering, 1998, 9(7): 16-18.
- [5] 赵振铎, 许洪民, 张志红, 等. 金属板料塑性成形摩擦机理的力学模型探讨[J]. 塑性工程学报, 2003, 10(1): 52-56.
Zhao Zhenduo, Xu Hongmin, Zhang Zhihong, et al. Approach of mechanical model on frictional mechanism in metal sheet plastic deformation[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2003, 10(1): 52-56.
- [6] 赵振铎, 王家安, 王丽君. 金属塑性成形平均摩擦系数与接触压力的关系研究[J]. 锻压装备与制造技术, 2006, (1): 40-43.
Zhao Zhenduo, Wang Jiaan, Wang Lijun. Research on the relationship between average friction coefficient and contact press in metal plastic forming[J]. China Metal Forming Equipment & Manufacturing Technology, 2006, (1): 40-43.
- [7] Oden J T, Pires E B. Nonlocal and nonlinear friction laws and variational principles for contact problem in elasticity[J]. Journal of Applied Mechanics, 1983, 50: 67-76.
- [8] 徐飞英, 闫小青, 扶名福. 在金属塑性成形中表面微凸对接触力及摩擦系数的影响[J]. 南昌大学学报: 工科版, 2008, 30(3): 258-262.
Xu Feiying, Yan Xiaoqing, Fu Mingfu. Effect of asperities of surface on contact forces and friction coefficient in metal plastic forming[J]. Journal of Nanchang University (Engineering & Technology), 2008, 30(3): 258-262.
- [9] Pei L, Hyun S, Molinari J F, et al. Finite element modeling of elasto-plastic contact between rough surfaces[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2005, 53(11): 2385-2409.
- [10] Peng L F, Lai X M, Lee H J, et al. Friction behavior modeling and analysis in micro/meso scale metal forming process[J]. Materials and Design, 2010, 31: 1953-1961.
- [11] 温诗铸, 黄平. 摩擦学原理[M]. 第三版. 北京: 清华大学出版社, 2008.