

有限厚梯度材料部分粘滑接触的研究*

陈培见 陈少华

(中国科学院力学研究所, 北京, 100190)

摘要 本文研究了具有任意形状的刚性压头与有限厚度的梯度层的部分粘滑接触问题, 梯度层的剪切模量沿着厚度按照指数函数变化。利用传递矩阵和 Fourier 变换, 得到了一组具有 Cauchy 奇异性的积分方程组, 依据 Goodman 假设将积分方程组简化, 再通过数值的迭代求解, 得出摩擦系数、膜层厚度等参数对表面接触法向应力、切应力以及粘滑半径的影响。结果表明: 有限厚梯度层的结论与采取无限大半空间的结果有着明显的区别, 该结果对于实际工程的应用和功能梯度材料的设计具有重要的指导作用。

关键词: 粘滑接触, 梯度膜层, 奇异积分方程组

一、引言

梯度材料作为材料设计规范性的概念是由日本学者于 20 世纪 80 年代首先提出。目前梯度材料的研究引起了人们的广泛关注, 已经成为力学、材料学等领域的最活跃的方向之一。梯度材料是指材料组分在某一空间方向上呈现连续变化的一种典型的复合材料 [1]。最初关于梯度材料的研究集中在其在高温环境下的优异的热机械性能(如航空航天领域)探索, 其应用正逐步扩展至电子、化工、核能、生物医学、建筑等众多工程技术领域, 即在常温下也有着广泛的应用前景, 其中的力学问题同样为力学工作者所关注。最近的研究发现仅通过控制功能材料的模量变化就能够有效地减小接触所产生的变形和破坏, 这是常规材料所不可比拟的。Giannakopoulos 和 Suresh[2]研究了功能梯度半空间在集中载荷、球形和圆锥形压头作用下的二维接触问题的解析解。Guler 和 Erdogan[3]系统分析了材料呈现指数变化的功能梯度涂层在刚性压头下的二维接触问题。Dag 和 Erdogan[4]又进一步分析了功能材料与裂纹的耦合问题。Wang[5]等人提出了一种线性分层的模型, 系统地分析了功能材料的平面接触、轴对称接触问题。然而, 在工程应用中构件经常发生微动磨损等, 功能梯度材料在抑制微动磨损的性能如何? 目前仅有很少的文章涉及了该类材料粘滑接触问题, 而且这些文章都是把接触物体考虑成无限大空间或者平面来考虑, 而考虑成一个有限尺寸的膜层则更为合理。本文主要分析了平面应变下有限梯度膜层的粘滑接触问题, 梯度变化采用指数模型, 最后给出表面接触应力、切向应力以及粘滑接触半径。

二、接触模型和理论分析

* 国家自然科学基金: (10972220、10732050、11021262).

† 通讯作者: 电话: +86-10-82543960; 传真: +86 10 82543977.

电子邮件: chenshaohua72@hotmail.com (陈少华).

对于该粘滑问题, 我们建立的模型为: 一个厚度为 h 的梯度膜层上部与一个任意形状的刚性压头接触, 压头承受法向外载荷作用, 接触区的中部是粘附区域, 两边是滑动区域, 膜层下部固定在一个刚性基地上。通过分析, 我们可以得到的控制方程为:

膜层表面 ($x=0$) 的位移为:

$$\frac{\partial v(x,0)}{\partial x} = -\frac{1}{2\pi} \int_{-b}^{+b} [iK_{11}(x,r)\sigma_{yy}(r,0) - K_{12}(x,r)\tau_{xy}(r,0)] dr \quad (1)$$

$$\frac{\partial u(x,0)}{\partial x} = -\frac{1}{2\pi} \int_{-b}^{+b} [K_{21}(x,r)\sigma_{yy}(r,0) + iK_{22}(x,r)\tau_{xy}(r,0)] dr \quad (2)$$

获得了接触应力以后, 可由 $\sigma_{xx}(0,y) = -p(y)$, 滑动区域内满足库伦摩擦的条件, 粘附区域则采用 $q(x) = \eta p(x) \frac{x}{a} + q^*(x)$, 得到一组 Cauchy 核的奇异积分方程组, 为了处理方便, 采用 Goodman 假设后, 控制方程为:

$$\frac{1}{\pi} \int_{-b}^b \frac{p(r)}{r-x} dr + \frac{1}{\pi\alpha_1} \int_{-b}^b k_{11}(x,r)p(r) dr = -\frac{1}{\alpha_1} f^*(x), \quad |x| < b \quad (3)$$

$$\int_{-1}^1 p(\lambda) d\lambda = \frac{P}{b}, \quad (4)$$

采用数值迭代的方法对控制方程进行求解, 本文对常见的压头进行的算例分析, 得到接触区内法向应力、切应力以及粘滑接触半径的值。

三、结论

本文研究了具有任意形状的刚性压头与有限厚度的梯度层的部分粘滑接触问题, 得到了表面接触应力、切应力以及粘滑接触半径。通过分析它们膜层厚度和摩擦系数等参数的影响, 我们发现合适地改变它们可以有效地提高膜层的抗磨损性能。主要结论包括:

- (1) 膜层的厚度对接触区应力分布及粘滑半径具有很大的影响。
- (2) 沿着厚度具有逐渐增大模量的膜层将具有更高的微动疲劳寿命。
- (3) 较大的摩擦系数将有助于界面滑动的产生。

这些结果对于实际工程的应用和功能梯度材料的设计具有重要的指导作用。

参 考 文 献

- 1 S. Suresh. Graded materials for resistance to contact deformation and damage. Science. 2001; 292: 2447-2451.
- 2 A. E. Giannakopoulos and P. Pallot. Two-dimensional contact analysis of elastic graded materials. J. Mech. Phys. Solids. 2000; 48: 1597-1631.
- 3 M. A. Guler and F. Erdogan. Contact mechanics of graded coatings. Int. J. Solids Struct. 2004; 41: 3865-3889.
- 4 S. Dag and F. Erdogan. A surface crack in a graded medium loaded by a sliding rigid stamp. Eng. Fract. Mech. 2002; 69: 1729-1751.
- 5 L. L. Ke and Y. S. Wang. Two-dimensional contact mechanics of functionally graded materials with arbitrary spatial variations of material properties. Int. J. Solids Struct. 2006; 43: 5779-5798.