

梯度材料的黏附接触解析解

陈少华

中国科学院力学研究所 LNM 室, 北京 100190

实验发现一类爬行生物的黏附系统属于一种多分级结构, 其宏观弹性模量表现为梯度变化的特征。弹性模量的梯度变化对生物黏附的影响成为仿生黏附关注的科学问题之一。然而梯度材料的黏附接触理论解至今未能建立。为了揭示梯度特性在生物黏附中的作用, 获得梯度材料的黏附接触理论解成为必要, 同时也是促进表面/界面接触力学发展的需要。

本文开展了梯度材料黏附接触问题的首次研究。材料的弹性模量随深度呈一般的幂次硬化, $E = E_0(z/c_0)^k$, E_0 为参考弹性模量, c_0 为梯度变化特征长度, k 为梯度变化指数, $0 < k < 1$ 。图 1 表示一个刚性球体与梯度材料弹性半空间的三维黏附接触模型。本文针对梯度材料的二维及三维黏附接触模型, 分别进行了相应的理论分析, 得到了外力与黏附接触宽度 (或接触半径) 之间的关系。

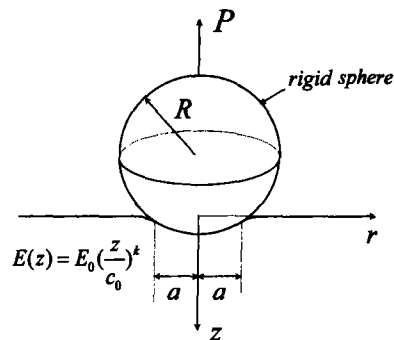


图 1 三维黏附接触模型

在三维模型中, 给出了一般梯度材料黏附接触模型的理论封闭解, 包括外力与接触面积的显式表达, 临界拉脱力及拉脱时刻的瞬时接触面积等。尤其是工程应用中最关注的临界拉脱力 P_{cr} 的表达式相当简单:

$$P_{cr} = (k+3)\pi R\Delta\gamma/2$$

其中 $\Delta\gamma$ 为界面黏附能, R 为球体半径。当 $k=0$ 时, 一般梯度材料退化为各向同性材料, 理论封闭解则同样退化为著名的 JKR 理论解, 临界拉脱力则为 $P_{cr} = 3\pi R\Delta\gamma/2$ 。

当 $k=1$ 时, 得到 Gibson 材料的黏附接触封闭解, 临界拉脱力则可写为 $P_{cr} = 2\pi R\Delta\gamma$ 。

梯度材料黏附接触解析解的获得不仅发展了表面/界面黏附接触力学, 极大地方便了工程应用, 更为进一步研究梯度特性在生物黏附中的作用提供了理论研究基础。

关键词: 梯度材料; JKR 模型; 黏附接触; 解析解

资助基金: 国家自然科学基金 10672165, 10732050, 10721202、留学回国人员启动基金及中科院知识创新项目

E-mail: shchen@lnm.imech.ac.cn