

一类功能梯度材料表面接触力学 研究进展

陈培见^{1,2} 陈少华^{3,†}

¹ 中国矿业大学力学与建筑工程学院, 江苏徐州 221116

² 中国矿业大学深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 江苏徐州 221116

³ 中国科学院力学研究所非线性力学国家重点实验室, 北京 100190

摘 要 针对一类杨氏模量梯度变化的功能梯度材料, 考虑摩擦、微动磨损和黏附等因素, 综述了梯度材料有限尺寸、梯度变化规律、梯度涂层厚度、界面摩擦热、压头形状等对表面接触力学性能的影响; 根据不同接触模型中接触界面应力场分布, 分析多种因素影响下功能梯度材料表面抵抗磨损的能力; 最后给出了功能梯度材料接触力学研究中仍存在的主要科学问题及进一步研究展望.

关键词 功能梯度材料, 表面接触力学, 有限厚度, 摩擦, 磨损, 黏附

中图分类号: O341 文献标识码: A DOI: 10.6052/1000-0992-13-097

收稿日期: 2013-12-26; 录用日期: 2014-02-20; 在线出版时间: 2014-04-01

† E-mail: shchen@LNM.imech.ac.cn

引用方式: 陈培见, 陈少华. 一类功能梯度材料表面接触力学研究进展. 力学进展, 2014, 44: 201401

Chen P J, Chen S H. Progress in contact mechanics of a type of functional gradient materials.

Advances in Mechanics, 2014, 44: 201401

© 2014《力学进展》版权所有

1 引 言

作为一种典型的非均匀材料,功能梯度材料的力学特性沿某一个方向或几个方向呈现一种梯度变化的特征.该梯度特征的形成可以分为几类:同种材料,但尺寸分布具有明显梯度变化,如最近材料学家关注的纳米晶梯度材料;两种不同材料,其中一种通过渗入方式融入另一种均匀材料内部;多种不同材料沿某一个或几个方向通过体积分数变化,呈现出宏观梯度特性;梯度材料有别于多层复合材料,不存在明显界面,而宏观性能在空间位置呈现梯度变化.通过设计梯度变化特征可以满足不同的性能要求.

该类新型功能梯度材料由于其优越的材料、力学特性,已经引起国际材料力学界科研工作者的广泛关注.然而,人类创新性源泉大多数收益于自然.功能梯度材料的概念早就被自然界通过长时间的演化和进化所发掘,例如,动物的骨头(图 1)和牙齿,其外部坚韧,内部疏松多孔,就是一种典型的梯度结构(Suresh 2001).值得一提的是我国出土的越王勾践剑(图 2)深埋地下 2400 多年,在 1965 年出土时依旧寒光逼人,锋利无比.剑的主要成分是铜和锡,各部位铜和锡的比例不一,形成良好的成分梯度,因而可以看到其剑锋、刃部和主体的颜色不同.虽然一些美国的学者在 20 世纪 50~80 年代对该类材料进行了初步的研究,但是没有明确提出这一概念.直到 1984 年,“功能梯度材料”这个术语由日本新野正之、平井敏雄等材料学家们提出,在内部组分、结构、性能方面,从材料的一部分到另一部分呈连续变化或分层阶梯式变化的新型材料是一种特殊类型的复合材料,组分材料在性能上存在较大差异,通过梯度分布可以发挥不同的作用(Chen et al. 2005, Chen et al. 2007, Liu & Wang 2008, 王保林和杜善义 1999, 李春雨等 2001, 程红梅等 2008, 陈伟球和赵莉 2009, 马海龙和李星 2005).另一个特点就是,这种成分或结构的变化是逐渐过渡的,可有效缓解材料两侧存在的温差所引起的巨大应力,因此它能够耐热冲击,且具有良好的机械强度(Zhou & Chen 2008).

梯度材料概念的正式提出引起了国际上的广泛关注,已成为力学、材料学等研究领域最活跃的方向之一.除日本外,美国、英国、法国、瑞士、芬兰、俄罗斯等国都在不同程度上开始重视功能梯度材料的研究.梯度材料的优异力学性质及广阔应用前景亦引起我国科研工作者的高度重视,我国已经将功能梯度材料(FGM)列入国家“863”重大项目计划(863-715-21-64).国家自然科学基金委员会也大力资助梯度材料相关的项目,在早年编撰的《自然科学学科发展战略研究报告》中,就已经将“新型功能梯度复合材料制备和技术研究”、“功能梯度材料设计”列为我国无机非金属材料优先发展的基础项目(国家自然科学基金委员会 1997).

功能梯度材料初始的应用目标是针对航天飞机的防热系统和发动机等部件,以解



图 1

动物的骨头



图 2

越王勾践剑

决新一代航天飞机热保护系统中出现的热应力失效问题 (Suresh 2001). 2003 年, 美国“哥伦比亚”号航天飞机爆炸, 原因就是航天飞机的左翼在起飞时遭到从燃料箱上脱落的泡沫绝缘材料撞击 (如图 3 所示), 造成机体表面隔热保护层出现大面积松动和破损, 形成“热气进入的空洞”, 返航途中因超高温空气的进入而彻底解体. 科学家通过大量的研究指出: 按照基体/陶瓷比率设计具有梯度的金属基/碳基复合结构可有效地解决该问题. 陶瓷/金属功能梯度材料能够充分地发挥陶瓷材料耐高温、抗腐蚀、高韧性和金属高强度特点, 亦能很好地解决陶瓷和金属强行匹配而引起的粘结强度低和热膨胀系数不协调等问题. 按照该思路, 日本科学家开发了小动力火箭燃烧器和热遮蔽材料用的功能梯度材料, 目前已研制出能耐 1700°C 的 ZrO_2/Ni 功能梯度材料, 用作马赫数大于 20 并可重复使用的航天飞机机身材料.

随着功能梯度材料在高温环境热机械方面显示出的巨大应用潜能, 其应用已经扩展到光学 (电光学、磁光学)、生物医学、电子元件、化学工业、核能等众多工程技术领域 (仲政等 2010). 一方面, 功能梯度材料被认为是高温环境中最有前途的复合材料之一; 另一方面, 功能梯度材料在常温下也有着广泛的应用前景, 其中出现的力学问题

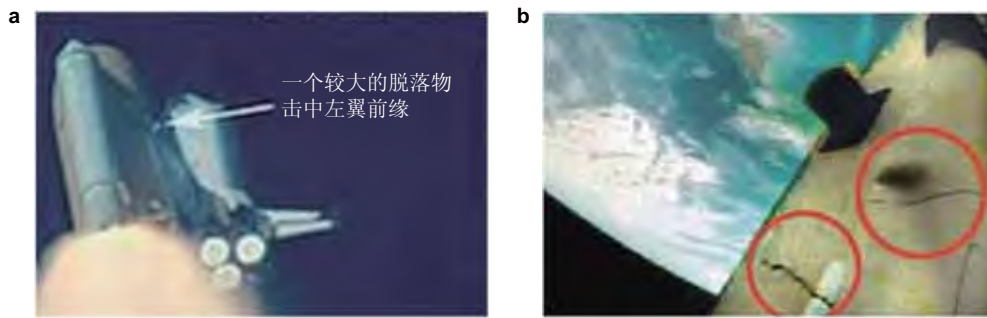


图 3

(a) “哥伦比亚”航天飞机起飞时燃料箱的脱离物击中机翼, (b) 机翼裂纹.

同样为力学、材料学工作者所关注. 最近 10 年来开展的一些研究表明, 梯度材料用于表面涂层可以有效地提高结构部件抑制由压痕、侵入、摩擦滑动、微动疲劳和滚动以及相关的磨损过程引起的接触损伤和摩擦破坏. 正是由于功能梯度材料在抑制接触破坏方面的潜在应用, 带动了最近十几年功能梯度材料接触力学的快速发展 (Suresh 2001). 本文将简单介绍最近几年来有关梯度材料表面摩擦、黏附和微动接触的多个研究工作, 包括实验研究工作、接触力学理论分析及一些初步的应用. 主要介绍本课题组对功能梯度材料接触力学方面的理论工作, 并最终对功能梯度材料表面接触力学的进一步研究提出展望.

2 梯度特性材料的制备及其接触性质研究

1998 年, Jitcharoen (1998) 等将铝硅酸盐玻璃作为第二相材料渗透到细粒氧化铝基体表面制备了梯度变化的复合物 (如图 4 所示), 由于基体材料与第二相材料的弹性模量相差较大 (氧化铝的弹性模量为 $E = 386 \text{ GPa}$, 而铝硅酸盐玻璃的弹性模量为 $E = 72 \text{ GPa}$), 但热膨胀系数和泊松比非常接近, 制备出的复合材料仅弹性模量沿着厚度发生梯度变化. 利用该梯度材料进行 Hertz 压入实验, 结果发现, 在同样的载荷下均匀氧化铝和铝硅酸盐玻璃表面都出现了明显的 Hertz 型接触裂纹, 而弹性模量呈梯度变化的复合材料有效地抑制了该类裂纹的出现. Pender 等制备了更为实用的氮化硅 (Si_3N_4)/氮氧化硅玻璃 (2001a) 和氮化硅 (Si_3N_4)/碳化硅 (SiC) 复合梯度材料 (2001b), 并开展了类似的 Hertz 压入实验 (如图 5 所示). 研究同样发现, 与均匀材料相比, 复合梯度材料在相同的法向载荷作用下能有效地抑制表面圆锥裂纹的出现. Suresh 等 (1999) 利用铝硅酸盐玻璃和多晶氧化铝制备了一种具有梯度特性的复合材料, 并进行了滑动摩擦压痕实验, 分别针对均匀多晶氧化铝、均匀铝硅酸盐玻璃和两种材料形成的复合梯度材料. 压痕实验对比发现 (如图 6 所示), 均匀材料的接触边缘均出现明显

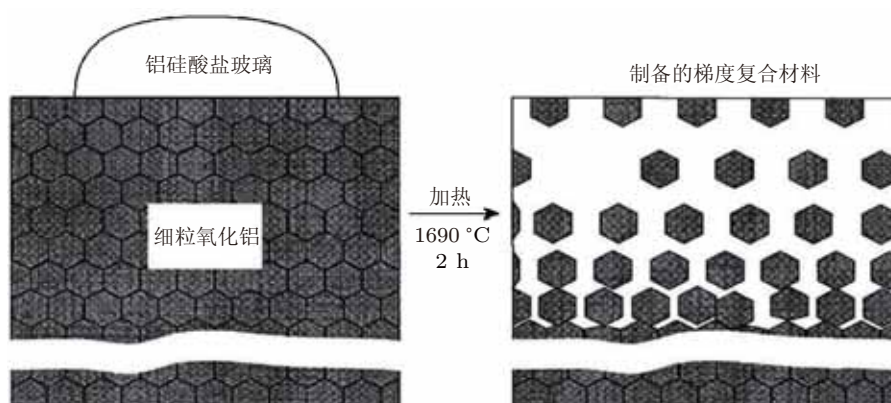


图 4

铝硅酸盐玻璃和多晶氧化铝制备的一种具有梯度特性的复合材料 (Jitcharoen et al. 1998)

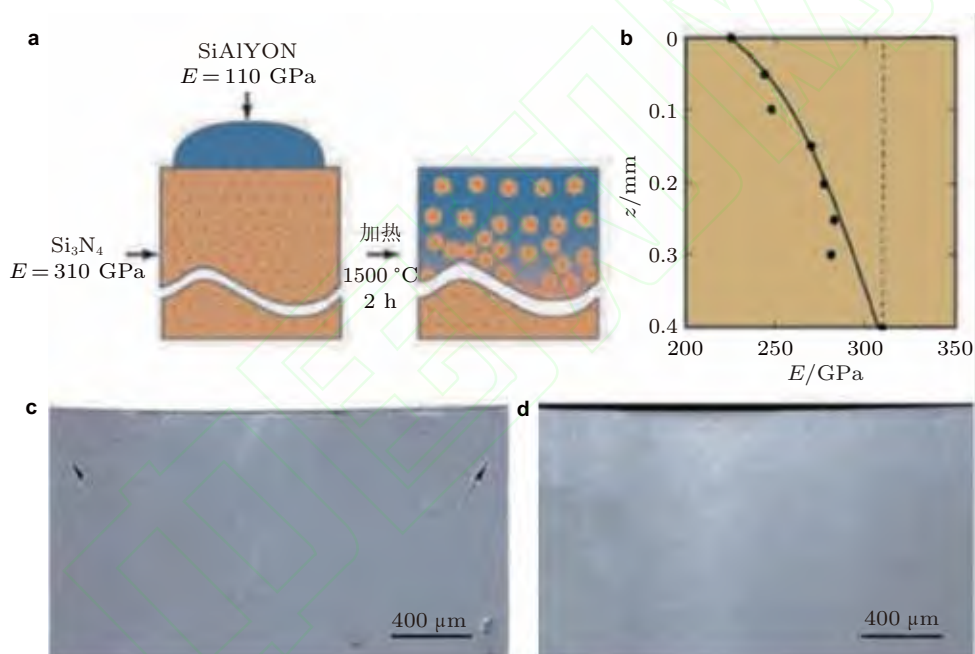


图 5

氮化硅 (Si_3N_4)/氧氮化硅玻璃 Hertz 接触的表面损伤图像 (Pender et al. 2001a)

的 Hertz 圆锥裂纹, 而同样的摩擦载荷下复合梯度材料却未出现任何明显的开裂.

科学工作者通过不同尺度的压痕实验评估功能梯度材料各方面力学性能, 包括弹性模量、屈服强度、应变硬化指数、硬度、断裂韧性和拉伸强度等. 美国材料学家 Suresh 等 (1997a, 1997b) 制备了 γ -TiAl/Y-TZP 和 Ni/ Al_2O_3 梯度材料 (如图 7(a) 所示),

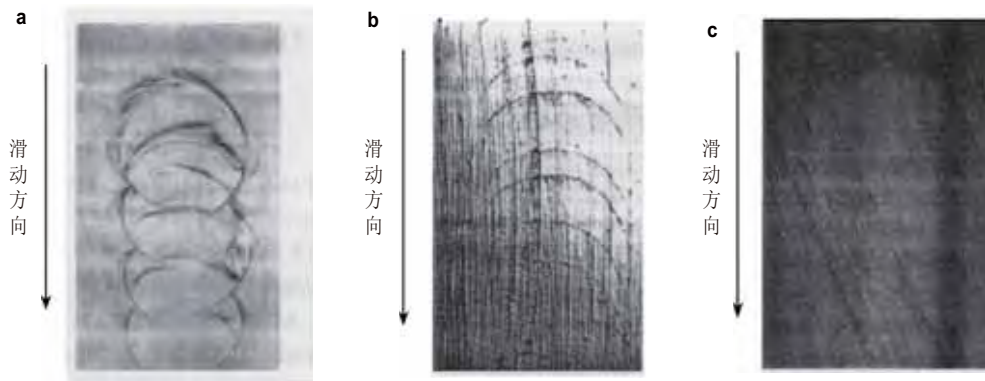


图 6

均匀多晶氧化铝 (a), 均匀铝硅酸盐玻璃 (b) 和复合梯度材料 (c) 在滑动摩擦接触时的表面损伤图像 (Suresh et al. 1999)

并使用球形压头进行了 Hertz 压痕实验. 根据得到的 $P-h$ 曲线, 评估得到梯度材料弹性模量的梯度变化特性 (如图 7(b) 所示). 同时他们指出梯度层局部组分、梯度层塑形流动和预应变、梯度层制备过程形成的空隙和微裂纹、预处理导致的内应力, 以及两相材料的热不匹配将不同程度上影响实验结果精度. Krumova 等 (2001) 将 SiC 颗粒按照一定比例含量掺入环氧树脂基体, 制备出聚合物复合材料, 并用压痕技术测试得到了该梯度材料的硬度变化规律. Jorgensen 等 (1998) 实验制备了碳纤维增强层状复合材料 (如图 8), 每层碳纤维角度随着厚度增加逐渐变化 (碳纤维角度在平行于层间界面的平面内以小增量发生变化), 利用压痕方法测试了该材料的接触响应. 结果表明该种梯度设计有效地抑制了层间裂纹的出现; 而对于常规的层状复合材料, 压痕实验会导致明显的界面裂纹. 在制备过程中, 各组分相的各向异性和热不匹配都会导致结构内部很强的内应力, 然而这种阶梯变化的纤维梯度增强复合材料仍然能表现出优异的力学性质.

牙齿作为典型的自然界梯度材料 (He & Swain 2009), 自然成为科研工作者们研究的重要对象. 牙齿由外层牙釉质, 内层牙本质及内外层间 DEJ (Dentin-Enamel-Junction) 梯度层构成. Kelly (1999)、Francis 等 (1995)、Lin 和 Douglas (1994) 利用实验测得外层牙釉质弹性模量为 $70 \sim 400$ GPa, 牙本质弹性模量约为 18 GPa, DEJ 层厚度约为 $10 \sim 100 \mu\text{m}$, DEJ 层弹性模量则由外部釉质的弹性模量逐渐过渡到牙本质的值, 属于典型的梯度过渡层. Marshall 等 (2001) 利用压痕技术测得了 DEJ 层弹性模量的梯度变化曲线 (如图 9 所示). 受牙齿组分结构的启发, Huang 等 (2007) 设计并制备了人工类 DEJ 过渡层梯度结构, 梯度变化规律类似于牙齿的线性规律, 实验研究了应力分布和临界裂纹长度的变化. 实验发现, 梯度过渡层的应用有效地降低了陶瓷表面应力,

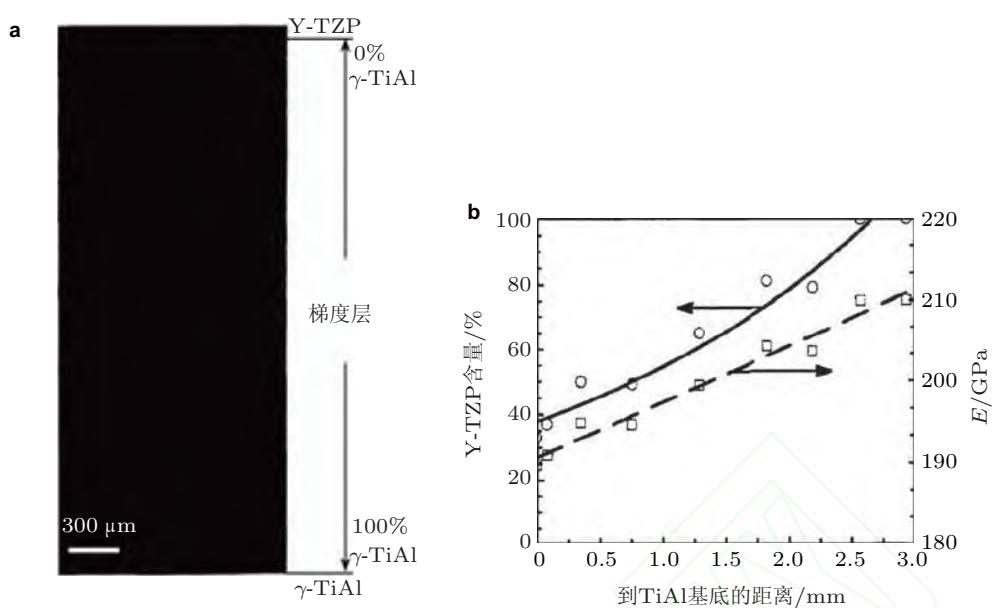


图 7

(a) 实验制备 γ -TiAl 梯度材料, (b) 压痕实验测得模量变化规律. (Suresh et al. 1997a, 1997b)

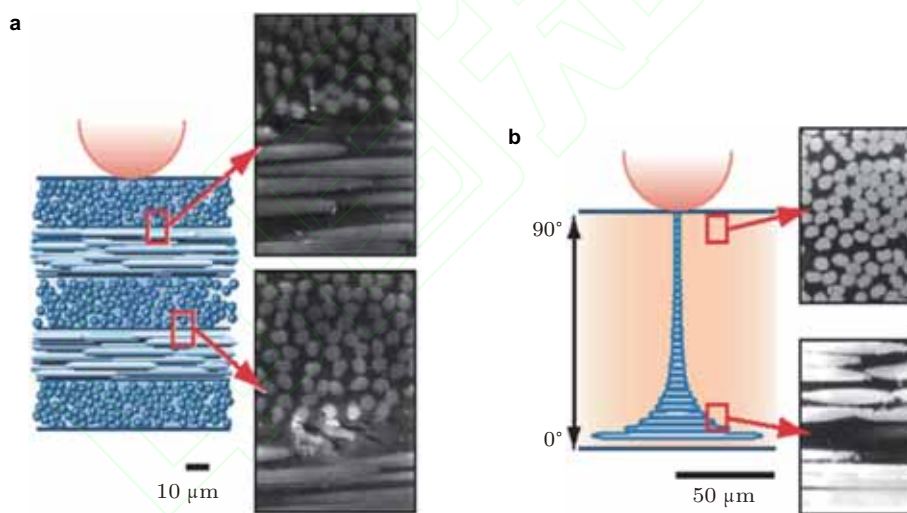


图 8

(a) 碳纤维增强层状复合材料, (b) 该梯度材料纤维角度沿厚度的变化规律. (Jorgensen et al. 1998)

且裂纹扩展临界长度明显增大. Niu 等 (2009) 仿生研究了牙齿的多层结构, 外层材料为陶瓷, 内层则选择聚合物填充的陶瓷基 (如图 10(a)), 分别选择梯度材料和均匀材

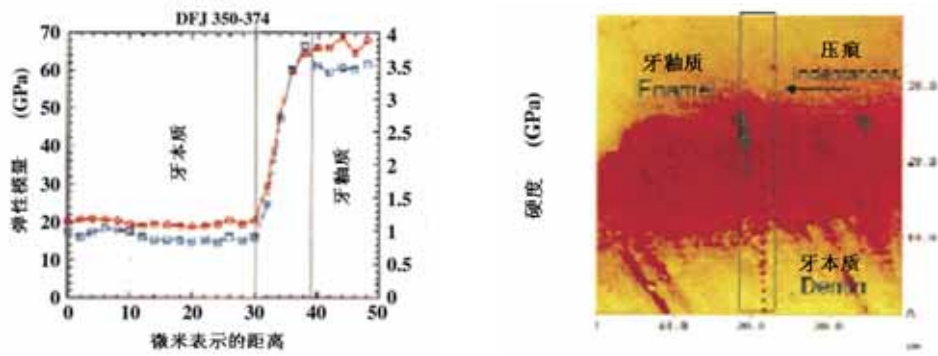


图 9

DEJ 层弹性模量变化 (Marshall et al. 2001)

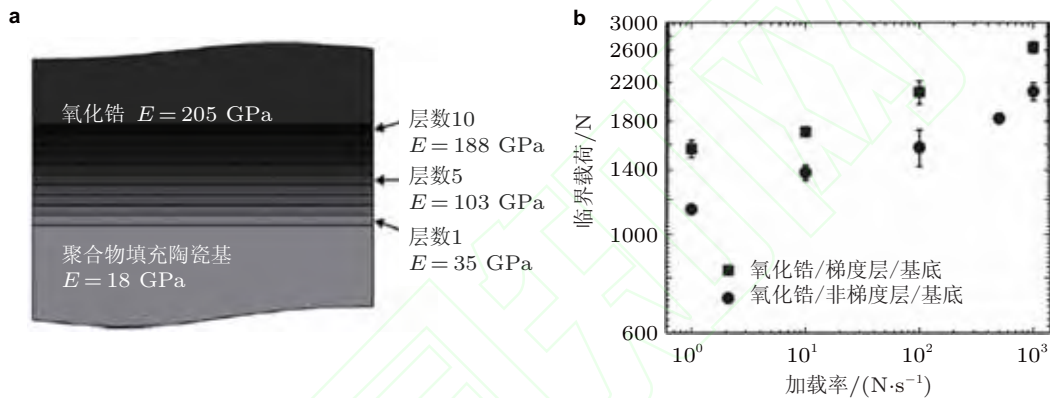


图 10

(a) 人工制备的多层结构, 外层为陶瓷层, 内层为聚合物填充陶瓷基, (b) 不同结构材料的 Hertz 接触实验结果. (Niu et al. 2009)

料作为内外层间的过渡层进行 Hertz 接触实验, 研究结果同样发现含梯度层的结构对应着更高的临界载荷 (如图 10(b)).

3 功能梯度材料接触力学理论模型

接触力学问题早在 1882 年由 Hertz 首先涉及, 解决了两个弹性球体间的接触, 给出了著名的 Hertz 解, 即接触区内的法向应力分布, 外载荷与接触半径之间的显式解析表达. 在 Hertz 解中, 假设了接触边界处的应力为 0, 且外力消失则对应着接触半径为 0. 后来的实验发现两个球体接触, 即使外力消失, 也存在有限的接触半径, 且接触界面可以承受一定的拉伸载荷. 该问题的彻底解决是 1971 年提出的著名 JKR 解, 由 Johnson 等人考虑接触界面黏附, 即表面分子间作用力, 建立了球体黏附接触力学模

型, 得到了外载与接触半径的函数关系, JKR 解显示: 接触边界处应力具有奇异性, 且两个球体分开时, 对应着一定的临界拉脱力及分离半径. 同样针对弹性球体间的黏附接触, Derjaguin 等人建立另一种有别于 JKR 黏附接触的模型, 学术界称之为 DMT 模型. 与 JKR 模型不同的是, 在 DMT 模型中引入接触区外的黏附力, 但忽略了该黏附力对接触体变形的影响, 并获得了外法向载荷与接触半径的关系. DMT 模型对应着两个球体彼此分离存在一个临界拉脱力, 而此时的临界半径为 0. 很明显可以发现 JKR 与 DMT 模型的不一致性. 该矛盾的解决直至著名的 MD 模型的出现, 并应用一个无量纲 Tabor 数将 JKR 与 DMT 模型联系起来. 结果表明, 当球体曲率半径较大、刚度较小时, JKR 解适用; 而球体曲率半径较小、刚度较大时, 则 DMT 解更为精确; 介于两者之间, 则适用 MD 模型.

以上 3 种著名的接触力学模型是时代的产物, 都是针对均匀弹性材料间的接触问题. 而梯度材料引起人们广泛关注的时间还不到 20 年, 但有关梯度材料力学性能的研究却早已存在, 主要以土壤地质材料为研究对象, Gibson, Booker 等可算为该方面代表人物. 土壤地质材料为典型的一类梯度材料, 此类科研人员将土壤考虑为弹性模量随深度呈现线性梯度变化的弹性半空间, 或假定弹性模量沿着厚度方向满足幂次变化规律 $E(z) = E_0 z^k$, ($0 \leq k < 1$), $k = 0$ 则退化为均匀材料情况 (Booker et al. 1985, Brown & Gibson 1972, Gibson 1967, Rostovtsev 1964), 解决了表面集中点载荷、线载荷的平面及轴对称情况, 该类研究很少涉及面面接触问题, 如常见的球形压头、锥形压头、圆柱形压头和棱锥压头等.

1997 年, Giannakopoulos 和 Suresh (1997a, 1997b) 针对弹性梯度半空间, 给出了点载荷和轴对称压头下无摩擦接触模型的 Hertz 解. 模型中同时考虑了半空间弹性模量沿厚度方向满足幂次函数 $E(z) = E_0 z^k$ ($0 \leq k < 1$) 和指数函数 $E(z) = E_0 e^{\alpha z}$ 的情况, 其中 $1/\alpha$ 具有长度的量纲, 表示半空间梯度变化程度. 首次从理论上得到了梯度半空间接触问题的外载荷与压入深度关系 (如图 11 所示). 结果表明, 弹性模量梯度变化将极大地降低压头周围应力, 可有效地避免 Hertz 裂纹在接触边缘的出现. 2000 年, Giannakopoulos 和 Pallot (2000) 考虑了刚性压头与二维弹性梯度半平面接触问题, 弹性模量满足 $E(z) = E_0 z^k$ ($0 \leq k < 1$). 发现弹性半空间的弹性模量趋于线性变化规律时, 平压头及圆形压头接触区应力分布都趋于平缓 (如图 12 所示).

Erdogan 与合作者 (2004, 2006, 2007) 提出了二维弹性半平面含表面梯度涂层的一系列摩擦接触模型, 梯度层变化都满足指数型变化规律. 假定接触区内满足库伦摩擦条件, 结果发现: 材料非均匀参数、摩擦系数和长度参数等对接触应力分布均有重要的影响, 通过控制这些参数可以有效抑制梯度涂层表面裂纹的萌生. Ke 和 Wang (2006) 利用线性逼近法对该问题进一步进行了研究, 即厚度方向上离散弹性模量, 适当选择离散层数, 可以有效地分析指数和幂次变化梯度材料的接触问题. Choi 和 Paulino (2010)

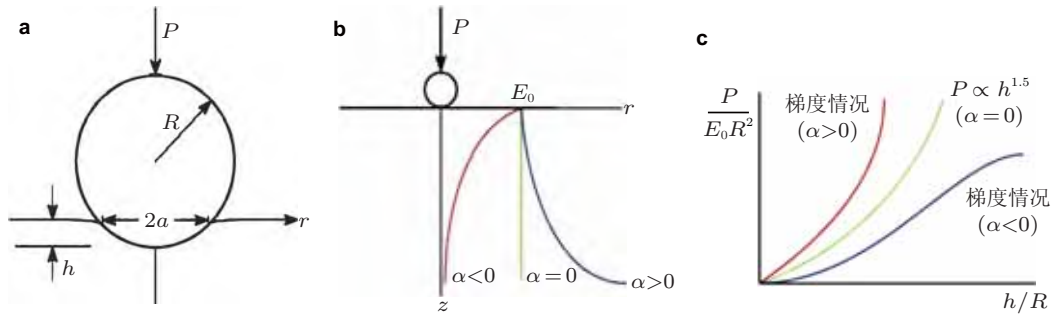


图 11

(a) 轴对称压头与弹性梯度半空间的无摩擦轴对称接触模型, (b) 半空间梯度变化满足指数函数 $E(z) = E_0 e^{\alpha z}$ 时, α 取值对应的梯度变化, (c) 外载荷与压入深度关系示意图. (Giannakopoulos & Suresh 1997a, 1997b)

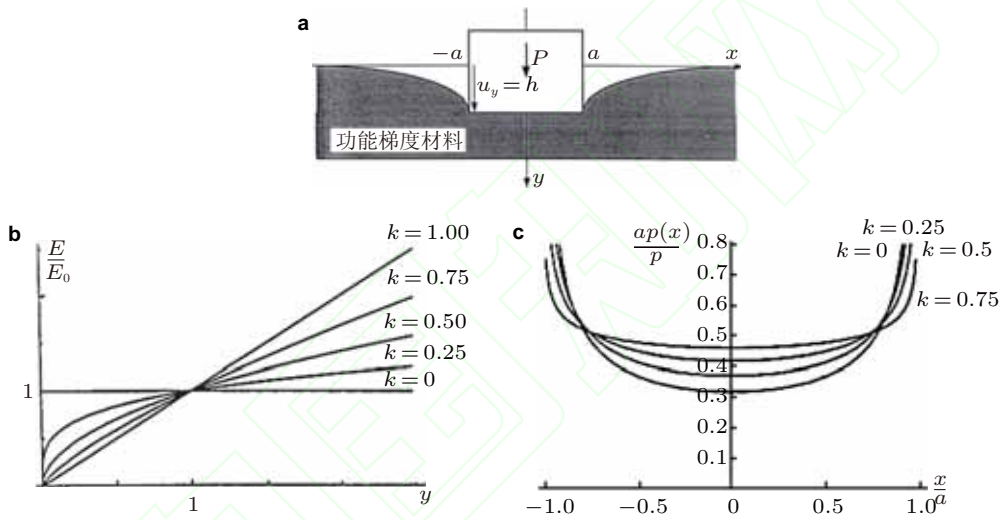


图 12

(a) 刚性压头与二维梯度弹性半平面接触模型, (b) 半平面弹性模量梯度变化规律, (c) 接触区法向应力分布.

考虑了如图 13 所示的梯度材料过渡层模型, 结构由均匀涂层、梯度过渡层及基底组成, 在梯度过渡层与基底界面存在界面裂纹, 研究层状结构在抑制表面裂纹萌生方面的表现. 结果发现接触与裂纹发生相互作用, 混合型裂纹的应力强度因子是压头位置的函数.

较早关于梯度材料表面接触力学的问题一般仅限于单一力载荷问题及接触物体假设为半无限大空间, 且主要研究了 Hertz 型接触. 作为一种新型先进复合材料, 梯度材料将广泛应用于各类工程领域, 发挥其优异的功能. 考虑实际工程应用中材料与结

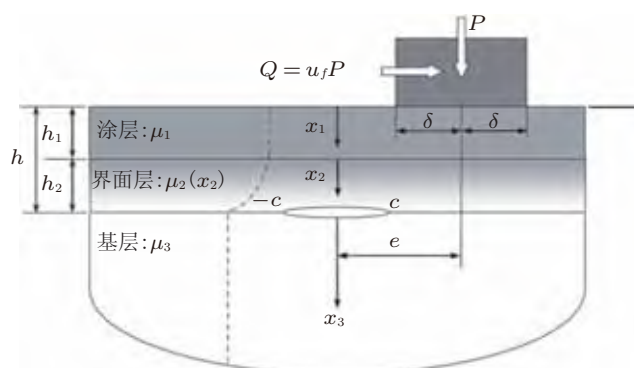


图 13

刚性压头与存在界面裂纹的梯度材料层状结构接触模型 (Choi & Paulino 2010)

构的有限尺寸特点, 梯度材料表面接触热场效应及微尺度梯度材料的应用等问题, 本文作者在功能梯度材料的接触力学方面也开展了相应的研究, 对实际工程应用具有一定的理论指导意义.

4 涂层梯度变化规律的影响

对于弹性梯度半空间, Giannakopoulos 和 Pallot(2000) 发现半无限大空间的弹性模量趋近于线性规律变化时, 接触区的应力分布呈现更平缓的趋势. 由于工程应用中梯度材料的尺度有限, 有限尺度的涂层与无限大半空间问题是否具有同样的结论? 弹性模量的变化规律如何影响接触区应力分布和应力强度因子? 对这些问题的回答只有通过有限尺寸模型的建立才能给出合理的解答.

Aizikovich 等 (2002) 建立了球形压头与有限厚梯度涂层/均匀弹性半空间结构的轴对称 Hertz 接触模型, 提出了一套解决轴对称接触问题的分析方法, 该方法可以给出有限厚涂层/半无限平面结构压痕接触问题的渐近解. 应用该方法, 进一步分析了刚性圆柱与有限厚梯度涂层/均匀弹性半空间结构的扭转接触问题 (Aizikovich et al. 2010). Chen 和 Chen(2012) 建立了刚性平压头与有限厚涂层/弹性基底结构的摩擦接触模型, 涂层剪切模量满足线性梯度变化规律 (如图 14(a) 所示). 假设结构组分材料的泊松比基本一致, 剪切模量的线性变换体现了弹性模量变化的基本特征, 与牙齿梯度层的梯度变化规律一致 (Niu et al. 2008). 图 14(b) 给出了刚性平压头无摩擦情况下无量纲接触应力分布, 接触边缘应力具有明显的奇异性. 对比线性梯度涂层和指数型梯度涂层结构可以看出: 线性规律模型中接触区应力相对更小、更平缓. 应用应力奇异性指数 β_1 和 β_2 以及应力奇异性因子 $k_1(a)/Pa^{\beta_2}$ 和 $k_1(-a)/Pa^{\beta_1}$ 定量分析接触边缘处应力奇异性大小: 与指数型变化规律的模型相比, 当涂层模量符合线性变化规律时, 刚性平

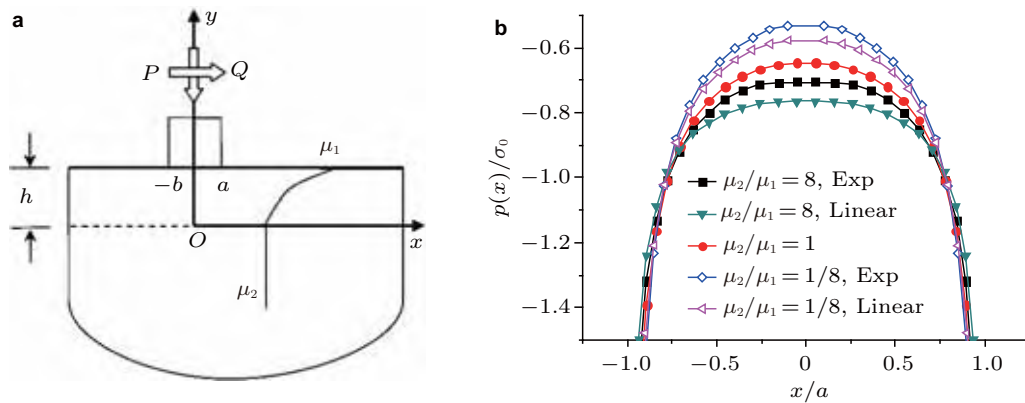


图 14

(a) 刚性压头与梯度涂层/弹性基底的接触模型, (b) 平压头与指数和线性型梯度变化系统接触区法向应力分布.

压头与涂层接触区边缘处应力集中减弱 (如表 1 所示). 考虑接触区摩擦的影响, 我们发现接触区后缘的应力奇异性指数 β_2 明显大于接触区前缘的值 β_1 , 与摩擦实验中裂纹一般出现在压头后缘的现象一致, 亦即接触区后缘由于应力值更大, 导致后缘首先发生磨损破坏. 对于均匀弹性半空间基底覆盖较小模量梯度层, 可以有效地抑制裂纹的产生, 与 Pender 等理论研究结果及实验和有限元分析结果一致 (Pender et al. 2001a, 2001b). 近期, Volkov 等 (2013) 建立了刚性圆柱平压头与“硬”弹性基底涂有有限厚梯度涂层的轴对称接触模型, 考虑梯度层弹性模量沿厚度满足线性梯度变化规律和非单调三角函数变化规律, 同样发现梯度层内不同的弹性模量梯度变化规律会导致接触表面应力分布出现明显的差异.

表 1 线性梯度和指数变化规律下平压头接触边缘应力奇异性指数 ($a/h = 0.5, \nu = 0.3$)

	$\eta = 0.0$		$\eta = 0.1$		$\eta = 0.3$		$\eta = 0.5$	
	$\beta_1 = -0.5$	$\beta_2 = -0.5$	$\beta_1 = -0.4909$	$\beta_2 = -0.5091$	$\beta_1 = -0.4728$	$\beta_2 = -0.5272$	$\beta_1 = -0.4548$	$\beta_2 = -0.5452$
μ_2/μ_1	$\frac{K_1(a)}{Pa^{\beta_2}}$	$\frac{K_1(a)}{Pa^{\beta_2}}$	$\frac{K_1(-a)}{Pa^{\beta_1}}$	$\frac{K_1(a)}{Pa^{\beta_2}}$	$\frac{K_1(-a)}{Pa^{\beta_1}}$	$\frac{K_1(a)}{Pa^{\beta_2}}$	$\frac{K_1(-a)}{Pa^{\beta_1}}$	$\frac{K_1(a)}{Pa^{\beta_2}}$
8(Exp)	0.2086	0.1973	0.2199	0.1754	0.2422	0.1549	0.2635	
8(Linear)	0.1779	0.1714	0.1850	0.1572	0.2022	0.1451	0.2181	
1	0.3183	0.3182	0.3182	0.3171	0.3171	0.3151	0.3151	
1/8(Exp)	0.6011	0.6178	0.5844	0.6510	0.5511	0.6834	0.5185	
1/8(Linear)	0.5427	0.5474	0.5377	0.5555	0.5266	0.5619	0.5145	

5 摩擦热接触

表面摩擦接触产生热的最熟悉的例子是汽车刹车和离合系统, 摩擦产生热量是一个必须考虑的关键问题 (Lee & Barber 1993, Zagrodzki 1990, Zagrodzki et al. 2001). 在汽车运动过程刹车时, 动能会转化成热能. 热能不能很快耗散到空气中, 高温和热应力将对结构产生不利的影响 (王保林等 1999), 将出现表面裂纹和永久畸变, 甚至破坏 (Barik et al. 2008, Jang & Ahn 2007). 此外, 接触压力也反过来影响热效应 (Chen et al. 2004, Zhou & Lee 2011). 避免接触引起的破坏是很多工业领域需要解决的问题, 功能梯度材料亦成为替代传统材料的选择引起工程师和科学家的高度关注 (Zhou et al. 2011). Barik 等人 (2008) 考虑了导热梯度压头与刚性绝热半平面的接触问题. Choi 和 Paulino (2008) 分析了刚性平压头与复合涂层结构滑动接触模型, 该复合结构由均质涂层/梯度过渡层/均匀弹性半平面构成.

考虑有限厚梯度膜层覆盖的刚性基底结构, 我们建立了刚性压头作用下的热弹性接触模型 (Chen & Chen 2013b, Chen et al. 2012), 如图 15(a) 所示, 膜层剪切模量、热传导系数、热膨胀系数沿厚度方向呈现指数型规律变化:

$$\mu_2(x) = \mu_1 e^{\beta x}, \quad k_2(x) = k_1 e^{\delta x}, \quad \alpha_2(x) = \alpha_1 e^{\gamma x} \quad (1)$$

其中下标“1”表示膜层表面, “2”表示膜层内部, δ , β 和 γ 分别为各自参量随厚度变化的梯度系数.

接触界面处横向正应力的大小直接影响滑动接触表面损伤. 研究表明, 通过增加 μ_1/μ_3 、降低摩擦系数可有效地避免表面摩擦破坏. 图 15(b) 给出了无量纲热传导系数 k_1/k_3 对接触区横向正应力分布的影响. 随着 k_1/k_3 的增加, 压头后缘横向受压, 即可推测, 梯度膜层表面具有较高的热传导系数能有效地抑制滑动摩擦引起的裂纹破坏. 图 15(c) 给出了不同滑动速度情况下接触界面处无量纲温度 θ/θ_0 的分布. 由于热传导效应的影响, 接触后缘温度高于接触前缘的值; 当滑动速度为零时, 表面相对温度也会消失; 随着滑动速度的增加, 表面温度呈现明显的增加趋势. 该模型的结果对实际应用新型功能材料设计具有一定的指导意义.

6 微动磨损接触

很多工程部件涉及循环应力工况和微动接触问题, 导致表面破坏, 被称为微动磨损 (Elloumi et al. 2010). 均匀材料的微动接触问题已开展了很多研究 (Ciavarella 1998, Ciavarella & Hills 1999, Hanson & Keer 1989, Nowell et al. 1988, Spence 1973, Wang et al. 2010), 梯度材料由于其优异的力学性能, 应用日益广泛. 然而, 很少文献涉及功能梯度材料的微动接触问题. Ke 和 Wang (2007) 研究了具有梯度涂层的弹性半空间在单调增

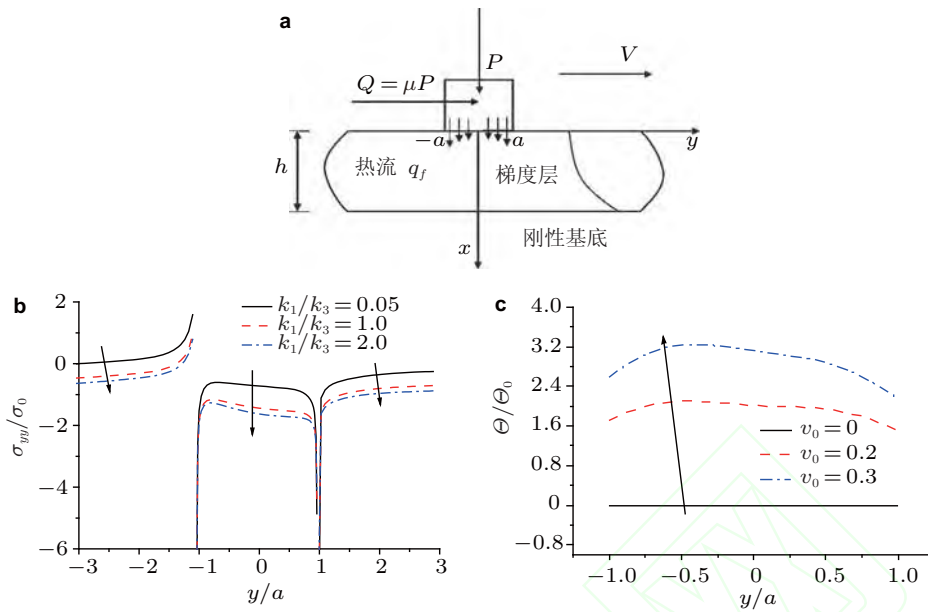


图 15

(a) 刚性平压头与有限厚梯度层摩擦热接触理论模型, (b) 接触区横向正应力分布, (c) 接触区表面温度分布.

加法向载荷作用下的微动接触问题. Elloumi 等 (2010) 分析了完全耦合的功能梯度半空间黏滑接触问题.

对于均匀膜层结构, 已有大量的实验和理论模型分析了有限尺度的问题 (Araújo & Nowell 1999, Argatov 2001, Dini & Nowell 2004, Fellows et al. 1995, Nowell & Hills 1988). Fellows 等 (1995) 就指出“很多常见的微动接触实验与结构的尺寸相关”、“即使当试样的厚度达到接触半径的 10 倍时, 半无限大平面模型也无法近似给出实验结构的应力分量”. 一个显而易见的问题不难提出: 已有关于功能梯度材料微动接触的模型基本都假设梯度材料为半无限大体, 关于有限厚梯度材料磨损结果如何? 半无限大空间解是否适用于有限厚情况? 为了澄清该类问题, 我们建立了如图 16(a) 任意形状刚性压头与有限厚梯度膜层的广义黏滑接触模型, 其中 a 为黏附接触半径, 而 a 至 b 区间为滑动区域 (Chen & Chen 2013a). 梯度膜层剪切模量沿厚度方向符合指数型变化规律. 在该模型中, $\gamma (= (1/h) \log(\mu_3/\mu_1))$ 表示梯度参数 (h 表示膜层厚度, μ 表示剪切模量, 下标“1”表示膜层表面, “3”表示膜层底部). 显然, 当梯度参数趋于零且接触半径远小于梯度层厚度, 该模型将退化成均质弹性半空间的部分滑移接触情况 (Nowell et al. 1988, Spence 1973). 若梯度参数 γ 为常数且接触半径远小于膜层厚度, 该模型将退化成刚性压头与功能梯度半平面黏滑接触问题 (Elloumi et al. 2010, Kallel-Kamoun et

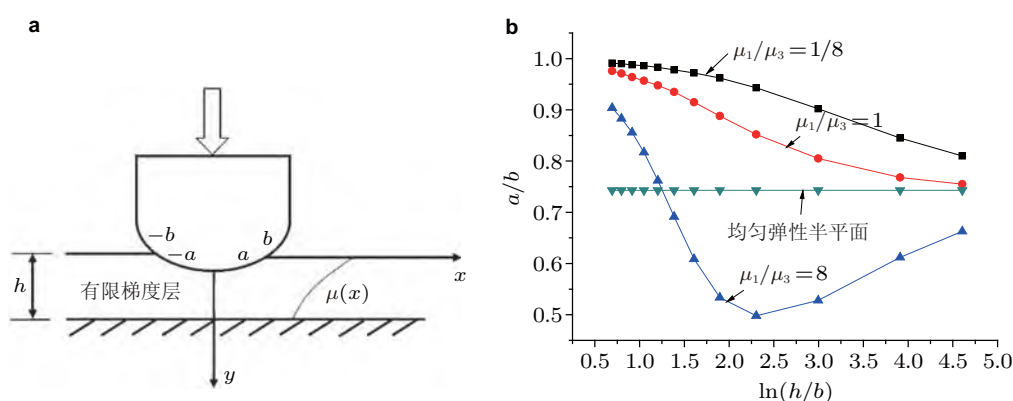


图 16

(a) 刚性压头与有限厚度梯度层部分滑动接触的理论模型, (b) 黏附区域所占比重随着膜层厚度的变化图 (Chen & Chen 2013a)

al. 2010).

我们分析了平压头和圆压头两种情况, 给出了黏滑接触模型中接触应力和接触半径的关系. 结果显示: 减小表界面剪切模量、增大接触界面的摩擦系数将改变接触应力分布; 增大黏附半径, 可有效提高膜层抵抗裂纹萌生和扩展的能力, 并有效地提高膜层疲劳接触寿命. 不同剪切模量比 μ_1/μ_3 情况下, 平压头和圆压头接触模型中膜层厚度 h/b 和黏附半径 a/b 的关系如图 16(b) 所示. 随着膜层厚度 h/b 的增加, 边界效应减弱, 结果趋于均质半平面的值. 即使对于 $\mu_1/\mu_3 = 1$ 均质膜层情况, 有限厚模型的结果亦偏离均质半空间模型的解. 可见无限大半平面假设所得到的结果在实际有限厚结构应用中将带来一定的偏差.

7 黏附接触

Hertz 接触只是考虑接触物体间相互挤压而产生的排斥力, 适用于宏观物体间接触. 但当材料尺寸达到微纳米量级, 微观力的影响不容忽视, 即表面黏附力, 包括范德华力、毛细力、静电力等. 微机电系统的失效原因之一就是构件间的微尺度黏附. 原子力显微镜接近和离开被测物体时, 往往发生黏附突跳现象, 也是由于物体间微观表面力的相互作用. 微尺度接触模型中表面分子作用对接触的影响非常明显, 不能忽略 (陈少华和苏爱嘉 2007), 另一方面, 黏附接触力学的研究也是仿生探索一类生物黏附爬行影响因素的理论工具, 对于揭示生物和仿生结构的黏附机制具有重要指导意义 (Zhang et al. 2012), 例如壁虎、苍蝇、蚂蚁、蝉等生物主要依靠黏附系统的微观结构与固体表面间的微观力作用达到超强的黏附能力. 实验发现蝉的黏附系统就是典型的功能梯度材料, 对功能梯度材料的黏附接触理论研究成为必然.

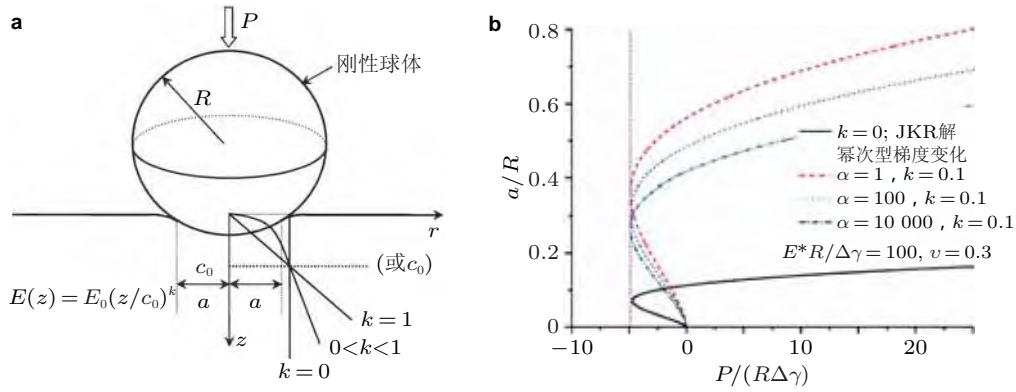


图 17

(a) 刚性球体与弹性梯度半空间黏附接触模型, (b) 外载荷与接触半径关系.

受蝉脚部黏附系统宏观梯度特征的启发, 作者等人 (Chen et al. 2009b) 建立了梯度材料的黏附接触模型, 如图 17 所示, 半径为 R 的刚性球体在法向外载作用下与梯度半空间黏附接触. 假设梯度材料各组分的泊松比近似相同, 而梯度材料的杨氏模量在厚度方向呈现幂次变化, 即 $E = E_0(z/c_0)^k$ ($0 < k < 1$), 其中 c_0 表征梯度变化程度的特征尺寸. 理论分析最终首次解析给出了黏附接触界面拉脱时对应的临界拉脱半径为

$$a_{\text{cr}} = \left[\frac{\pi^2 \theta^* (1+k)^2 (3+k)^2 R^2 \Delta\gamma}{8 \cos(\pi k/2)} \right]^{1/(3+k)} \quad (2)$$

以及实验者更为关注的临界拉脱力为

$$P_{\text{cr}} = -\frac{k+3}{2} \pi R \Delta\gamma \quad (3)$$

其中 $\Delta\gamma$ 为接触界面黏附能. 可以发现梯度材料的黏附接触拉脱力与材料的杨氏模量等参数无关, 只依赖于材料的幂次梯度变化指数、球体半径及界面黏附能, 与均匀材料三维黏附接触 JKR 解一致, 如图 17(b) 所示; 当幂次梯度变化指数为 0 时, 梯度材料退化为均匀弹性材料, 临界拉脱力则退化为 JKR 的特殊情况. 作者等人 (Chen et al. 2009a) 进一步建立了二维梯度材料黏附接触模型, 分析了半径为 R 的刚性圆柱与弹性模量呈幂次变化弹性半平面的黏附接触情况, 给出了黏附接触区应力分布、外载荷与黏附接触宽度的显式表达. 结果显示: 对于给定 R/c_0 值, 存在一个临界幂次指数 k , 使得二维黏附接触的拉脱力达到最大值; 对于恒定 k 值, 拉脱力则随 R/c_0 增大而增大. 在 (Chen et al. 2009a, 2009b) 工作的基础上, 大连理工大学郭旭课题组建立了多个黏附接触理论模型, 发展了一套求解轴对称无摩擦 JKR 黏附接触问题的通用方法 (Jin et al. 2013b), 深入考察了表面粗糙度 (Zhang et al. 2014)、内聚力黏附区 (Jin et

al. 2013a) 和完美黏附界面剪切应力对黏附接触解的影响 (Guo et al. 2011, Jin & Guo 2010). 当只考虑法向外载荷时, 完美黏附界面剪应力对黏附拉脱力及临界拉脱半径的影响可以忽略, 与均匀材料模型的结论相似 (Chen & Gao 2006), 具体分析结果可以参见大连理工大学靳凡博士学位论文 (靳凡 2013).

对于有限尺寸弹性均匀柱状纤维与刚性基底黏附接触问题, Gao 等 (2005) 和 Chen 等 (2008) 分别研究了弹性柱状纤维在拉伸和扭转载荷下界面黏附分离的尺寸效应. 结果表明: 在拉伸和扭转载荷下, 分别存在两个不同的纤维临界半径, 使得均匀弹性柱状纤维与刚性基底黏附接触界面达到最大, 即界面的理论强度, 且扭转情况下纤维临界半径远小于拉伸载荷的情况. 通过两种载荷下临界半径的比较, 解释了壁虎黏附撕脱时通过扭转更易脱黏的现象. 拉伸载荷下, 黏附接触区强度与纤维半径的关系如图 18 所示, 可以发现当纤维的半径小于某一个临界半径时, 界面黏附强度达到界面理论强度, 称为缺陷不敏感现象或黏附尺寸效应 (陈少华和彭志龙 2012). 针对有限尺寸刚性压头与梯度弹性半空间黏附接触的尺寸效应问题, Chen 和 Chen(2010) 建立了小尺寸刚性压头与梯度弹性半空间平面应变和三维黏附接触模型 (如图 19(a) 所示), 梯度半空间的弹性模量沿厚度方向满足幂次变化规律, 解析得到了平面应变情况下缺陷不敏感的刚性压头临界尺寸为

$$a_{cr} = \left[\frac{2k(1-k^2)I_k \Delta \gamma E^*}{\sigma_{th}^2 c_0^k \beta \sin(\pi\beta/2) (2-2^{1-k})} \right]^{\frac{1}{1-k}} \quad (4)$$

轴对称情况下刚性压头的临界尺寸为

$$a_{cr} = \left[\frac{(1-k) E_0 \delta_0}{2\pi\sigma_{th} B c_0^k} \right]^{\frac{1}{1-k}} \cdot \left[1 - \frac{\Gamma(1-k)}{\Gamma(\frac{1-k}{2}) \Gamma(\frac{3-k}{2})} \right]^{\frac{-1}{1-k}} \quad (5)$$

当刚性压头的特征尺寸小于上述临界尺寸时, 黏附界面的强度达到界面的理论强度, 界面分离不会由于裂纹扩展而发生破坏, 而是黏附界面应力均匀达到理论应力时的突然断开. 其中 δ_0 为表面间最大有效作用距离, σ_{th} 为界面理论强度, c_0 表征梯度半空间杨氏模量梯度变化快慢程度的特征尺寸. 临界尺寸依赖于梯度变化指数 k 、特征长度 c_0 以及有效作用距离 δ_0 (如图 19(b) 所示). 对于该类梯度半空间的纳米黏附接触, 缺陷不敏感更依赖于表面附近材料性质. 当弹性梯度半空间退化到弹性均匀半空间的黏附接触情况, 缺陷不敏感条件与均质情况的结果一致 (Chen & Soh 2008, Hui et al. 2004).

8 结论与展望

随着材料科学技术的发展, 无论航空航天科技中遇到的涂层隔热和材料抗磨损难题, 还是先进仿生材料、仿生器件的设计, 功能梯度材料作为一种先进功能材料都得

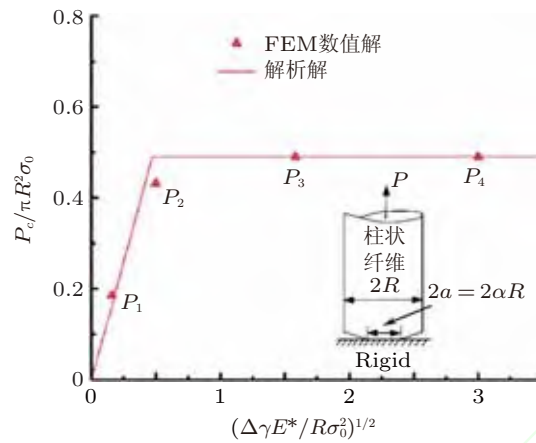


图 18

柱状纤维在拉伸载荷下的尺寸效应 (Gao et al. 2005)

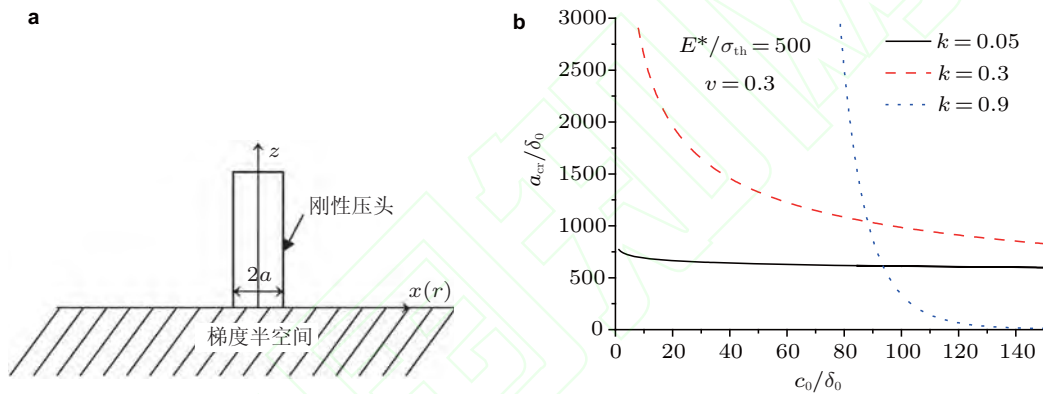


图 19

(a) 小尺寸刚性压头与梯度弹性半空间平面应变和三维黏附接触模型, (b) 临界尺寸随特征长度的变化.

到和将得到更为广泛的应用和发展. 近年来, 梯度材料力学及其表/界面力学作为一个新的研究方向也在国际科研界引起了广泛的关注, 世界各国对功能梯度材料的探索都在如火如荼地展开. 梯度材料表面/界面接触问题的研究正是受启于工程实际应用中表/界面抵御磨损、疲劳破坏的要求开展的. 其他高科技领域的发展, 例如高频写入和读取的高性能磁媒介, 纳米和微米尺度电弹结构, 结构部件的绝缘涂料, 牙齿植入, 人造关节表面修饰, 防弹背心和装甲车防护板等问题也极大地推动了梯度材料接触问题的研究. 虽然梯度材料的表面接触问题已经取得了很大的进展, 仍然存在一些关键的科学问题需要研究和解决. 目前, 功能梯度材料的工程应用中涉及到的瞬态生热问

题、非傅里叶热传导问题、电磁耦合问题和表面润滑问题, 以及梯度材料变形过程中不可避免的塑性、黏弹性性质 (彭凡等 2012, 2013) 等还存在很多理论和技术上的难题. 梯度材料的高温、抗冲击性能研究也将是一个重要的研究方向. 一方面开展梯度材料力学性能的理论研究, 另一方面设计不同功能性质的梯度复合材料, 并开展相关的材料力学实验, 全面分析梯度材料可能带来的新材料技术革命, 是十分必要的. 期望不久的将来, 轻质、多功能梯度材料能够为更多工业领域带来更多的惊喜.

致谢

国家自然科学基金 (11372317, 11125211) 和科技部重大科学研究计划 (2012CB937500) 项目资助.

参考文献

- Aizikovich S, Alexandrov V, Kalker J, Krenev L, Trubchik I. 2002. Analytical solution of the spherical indentation problem for a half-space with gradients with the depth elastic properties. *International Journal of Solids and Structures*, **39**: 2745-2772.
- Aizikovich S, Vasiliev A, Seleznev N. 2010. Inverse analysis for evaluation of the shear modulus of inhomogeneous media by torsion experiments. *International Journal of Engineering Science*, **48**: 936-942.
- Araújo J A, Nowell D. 1999. Analysis of pad size effects in fretting fatigue using short crack arrest methodologies. *International Journal of Fatigue*, **21**: 947-956.
- Argatov I I. 2001. The pressure of a punch in the form of an elliptic paraboloid on an elastic layer of finite thickness. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*, **65**: 495-508.
- Barik S P, Kanoria M, Chaudhuri P K. 2008. Steady state thermoelastic contact problem in a functionally graded material. *International Journal of Engineering Science*, **46**: 775-789.
- Booker J R, Balaam N P, Davis E H. 1985. The behavior of an elastic non-homogeneous half-space.1. line and point loads. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, **9**: 353-367.
- Brown P, Gibson R. 1972. Surface settlement of a deep elastic stratum whose modulus increases linearly with depth. *Canadian Geotechnical Journal*, **9**: 467-476.
- Chen P, Chen S. 2012. Contact behaviors of a rigid punch and a homogeneous half-space coated with a graded layer. *Acta Mechanica*, **223**: 563-577.
- Chen P, Chen S. 2013a. Partial slip contact between a rigid punch with an arbitrary tip-shape and an elastic graded solid with a finite thickness. *Mechanics of Materials*, **59**: 24-35.
- Chen P, Chen S. 2013b. Thermo-mechanical contact behavior of a finite graded layer under a sliding punch with heat generation. *International Journal of Solids and Structures*, **50**: 1108-1119.
- Chen P, Chen S, Peng Z. 2012. Thermo-contact mechanics of a rigid cylindrical punch sliding on a finite graded layer. *Acta Mechanica*, **223**: 2647-2665.
- Chen S, Gao H. 2006. Non-slipping adhesive contact of an elastic cylinder on stretched substrates. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Science*, **462**: 211-228.
- Chen S, Soh A K. 2008. Tuning the geometrical parameters of biomimetic fibrillar structures to enhance

- adhesion. *Journal of the Royal Society Interface*, **5**: 373-383.
- Chen S H, Chen P J. 2010. Nanoadhesion of a power-law graded elastic material. *Chinese Physics Letters*, **27**: 108102.
- 陈少华, 彭志龙. 2012. 壁虎黏附微观力学机制的仿生研究进展. *力学进展*, **42**: 1-12 (Chen S H, Peng Z L. 2012. Progress in the bionic study on gecko's micro-adhesion mechanism. *Advances in Mechanics*, **42**: 1-12).
- 陈少华, 苏爱嘉. 2007. 生物黏附与仿生黏附力学的进展. *力学与实践*, **29**: 9-17 (Chen S H, Soh A J. 2007. Progress in the bionic study on gecko's micro-adhesion mechanism. *Mechanics in Engineering*, **29**: 9-17).
- Chen S H, Xu G, Soh A K. 2008. Robust nanoadhesion under torque. *Tribology Letters*, **29**: 235-239.
- Chen S H, Yan C, Soh A. 2009a. Adhesive behavior of two-dimensional power-law graded materials. *International Journal of Solids and Structures*, **46**: 3398-3404.
- Chen S H, Yan C, Zhang P, Gao H J. 2009b. Mechanics of adhesive contact on a power-law graded elastic half-space. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, **57**: 1437-1448.
- Chen W, Lee K Y, Ding H. 2005. On free vibration of non-homogeneous transversely isotropic magneto-electro-elastic plates. *Journal of Sound and Vibration*, **279**: 237-251.
- Chen W, Wang H, Bao R. 2007. On calculating dispersion curves of waves in a functionally graded elastic plate. *Composite Structures*, **81**: 233-242.
- Chen W Q, Lee K Y, Ding H. 2004. General solution for transversely isotropic magneto-electro-thermo-elasticity and the potential theory method. *International Journal of Engineering Science*, **42**: 1361-1379.
- 陈伟球, 赵莉. 2009. 功能梯度材料平面问题的辛弹性力学解法. *力学学报*, **41**: 588-594 (Chen W Q, Zhao L. 2009. The symplectic method for plane elasticity problem of functionally graded materials. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, **41**: 588-594).
- 程红梅, 曹志远, 仲政. 2008. 不同功能梯度材料组分板件的跨尺度动力特性分析. *中国矿业大学学报*, **37**: 719-725 (Cheng H M, Cao Z Y, Zhong Z. 2008. Span-scale dynamic character analysis of FGM plates with variant material components. *Journal of China University of Mining & Technology*, **37**: 719-725).
- Choi H J, Paulino G H. 2008. Thermoelastic contact mechanics for a flat punch sliding over a graded coating/substrate system with frictional heat generation. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, **56**: 1673-1692.
- Choi H J, Paulino G H. 2010. Interfacial cracking in a graded coating/substrate system loaded by a frictional sliding flat punch. *Proceedings of the Royal Society a-Mathematical Physical and Engineering Sciences*, **466**: 853-880.
- Ciavarella M. 1998. The generalized Cattaneo partial slip plane contact problem. I-Theory. *International Journal of Solids and Structures*, **35**: 2349-2362.
- Ciavarella M, Hills D. 1999. Brief note: Some observations on oscillating tangential forces and wear in general plane contacts. *European Journal Mechanics A/Solids*, **18**: 491-497.
- Dini D, Nowell D. 2004. Flat and rounded fretting contact problems incorporating elastic layers. *International Journal of Mechanical Sciences*, **46**: 1635-1657.
- Eloumi R, Kallel-Kamoun I, El-Borgi S. 2010. A fully coupled partial slip contact problem in a graded half-plane. *Mechanics of Materials*, **42**: 417-428.
- Fellows L J, Nowell D, Hills D A. 1995. Contact stresses in a moderately thin strip (with particular reference to fretting experiments. *Wear*, **185**: 235-238.

- Francis L, Vaidya K, Huang H, Wolf W. 1995. Design and processing of ceramic-based analogs to the dental crown. *Materials Science and Engineering: C*, **3**: 63-74.
- Gao H, Wang X, Yao H, Gorb S, Arzt E. 2005. Mechanics of hierarchical adhesion structures of geckos. *Mechanics of Materials*, **37**: 275-285.
- Giannakopoulos A E, Pallot P. 2000. Two-dimensional contact analysis of elastic graded materials. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, **48**: 1597-1631.
- Giannakopoulos A E, Suresh S. 1997a. Indentation of solids with gradients in elastic properties. 1: Point force. *International Journal of Solids and Structures*, **34**: 2357-2392.
- Giannakopoulos A E, Suresh S. 1997b. Indentation of solids with gradients in elastic properties. 2: Axisymmetric indentors. *International Journal of Solids and Structures*, **34**: 2393-2428.
- Gibson R. 1967. Some results concerning displacements and stresses in a non-homogeneous elastic half-space. *Geotechnique*, **17**: 58-67.
- Guler M A, Erdogan F. 2004. Contact mechanics of graded coatings. *International Journal of Solids and Structures*, **41**: 3865-3889.
- Guler M A, Erdogan F. 2006. Contact mechanics of two deformable elastic solids with graded coatings. *Mechanics of Materials*, **38**: 633-647.
- Guler M A, Erdogan F. 2007. The frictional sliding contact problems of rigid parabolic and cylindrical stamps on graded coatings. *International Journal of Mechanical Sciences*, **49**: 161-182.
- 国家自然科学基金委员会. 1997. 自然科学学科发展战略研究报告: 无机非金属材料. 北京: 科学出版社 (National Natural Science Foundation of China. 1997. Strategic research on natural science: Inorganic metallic materials. Beijing: Science Press).
- Guo X, Jin F, Gao H J. 2011. Mechanics of non-slipping adhesive contact on a power-law graded elastic half-space. *International Journal of Solids and Structures*, **48**: 2565-2575.
- Hanson M, Keer L. 1989. Cyclic tangential loading of dissimilar elastic bodies. *International Journal of Mechanical Sciences*, **31**: 107-119.
- He L H, Swain M V. 2009. Enamel-A functionally graded natural coating. *Journal of Dentistry*, **37**: 596-603.
- Huang M, Niu X, Soboyejo W. 2007. Creep induced rate effects on radial cracks in multilayered structures. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, **18**: 65-69.
- Hui C Y, Glassmaker N, Tang T, Jagota A. 2004. Design of biomimetic fibrillar interfaces: 2. Mechanics of enhanced adhesion. *Journal of the Royal Society Interface*, **1**: 35-48.
- Jang Y H, Ahn S H. 2007. Frictionally-excited thermoelastic instability in functionally graded material. *Wear*, **262**: 1102-1112.
- 靳凡. 2013. 先进功能材料的微尺度黏附接触力学研究. [博士论文]. 大连: 大连理工大学 (Jin F. 2013. Mechanics of micro-scale adhesive contact on advanced functional materials. [PhD Thesis]. Dalian: Dalian University of Technology).
- Jin F, Guo X. 2010. Non-slipping adhesive contact of a rigid cylinder on an elastic power-law graded half-space. *International Journal of Solids and Structures*, **47**: 1508-1521.
- Jin F, Guo X, Gao H. 2013a. Adhesive contact on power-law graded elastic solids: The JKR-DMT transition using a double-Hertz model. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, **61**: 2473-2492.
- Jin F, Guo X, Zhang W. 2013b. A unified treatment of axisymmetric adhesive contact on a power-law graded elastic half-space. *Journal of Applied Mechanics*, **80**: 061024.
- Jitchareon J, Padture N P, Giannakopoulos A E, Suresh S. 1998. Hertzian-crack suppression in ceramics

- with elastic-modulus-graded surfaces. *Journal of the American Ceramic Society*, **81**: 2301-2308.
- Jorgensen O, Giannakopoulos A E, Suresh S. 1998. Spherical indentation of composite laminates with controlled gradients in elastic anisotropy. *International Journal of Solids and Structures*, **35**: 5097-5113.
- Kallel-Kamoun I, Elloumi R, El-Borgi S. 2010. Partial slip contact problem in a graded half plane. *Journal of Computational and Theoretical Nanoscience*, **7**: 367-378.
- Ke L L, Wang Y S. 2006. Two-dimensional contact mechanics of functionally graded materials with arbitrary spatial variations of material properties. *International Journal of Solids and Structures*, **43**: 5779-5798.
- Ke L L, Wang Y S. 2007. Fretting contact with finite friction of a functionally graded coating with arbitrarily varying elastic modulus. Part 1: Normal loading. *Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, **42**: 293-304.
- Kelly J R. 1999. Clinically relevant approach to failure testing of all-ceramic restorations. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, **81**: 652-661.
- Krumova M, Klingshirn C, Hauptert F, Friedrich K. 2001. Microhardness studies on functionally graded polymer composites. *Composites Science and Technology*, **61**: 557-563.
- Lee K, Barber J R. 1993. Frictionally excited thermoelastic instability in automotive disk brakes. *Journal of Tribology*, **115**: 607-614.
- 李春雨, 邹振祝, 段祝平. 2001. 功能梯度材料裂纹尖端动态应力场. *力学学报*, **33**: 270-274(Li C Y, Zou Z Z, Duan Z P. 2001. Dynamic stress field around the crack tip in a functionally graded material. *Acta Mechanica Sinica*, **33**: 270-274).
- Lin C, Douglas W. 1994. Structure-property relations and crack resistance at the bovine dentin-enamel junction. *Journal of Dental Research*, **73**: 1072-1078.
- Liu T J, Wang Y S. 2008. Axisymmetric frictionless contact problem of a functionally graded coating with exponentially varying modulus. *Acta Mechanica*, **199**: 151-165.
- 马海龙, 李星. 2005. 半无限大功能梯度压电材料中反平面 Yoffe 型运动裂纹. *兰州大学学报: 自然科学版*, **41**: 89-95 (Ma H L, Li X. 2005. Anti-plane moving Yoffe-crack problem for an infinite functionally graded piezoelectric materials. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, **41**: 89-95).
- Marshall G, Balooch M, Gallagher R, Gansky S, Marshall S. 2001. Mechanical properties of the dentin-enamel junction: AFM studies of nanohardness, elastic modulus, and fracture. *Journal of Biomedical Materials Research*, **54**: 87-95.
- Niu X, Rahbar N, Farias S, Soboyejo W. 2009. Bio-inspired design of dental multilayers: Experiments and model. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, **2**: 596-602.
- Niu X, Yang Y, Soboyejo W. 2008. Contact deformation and cracking of zirconia/cement/foundation dental multilayers. *Materials Science and Engineering: A*, **485**: 517-523.
- Nowell D, Hills D, Sackfield A. 1988. Contact of dissimilar elastic cylinders under normal and tangential loading. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, **36**: 59-75.
- Nowell D, Hills D A. 1988. Contact problems incorporating elastic layers. *International Journal of Solids and Structures*, **24**: 105-115.
- Pender D C, Padture N P, Giannakopoulos A E, Suresh S. 2001a. Gradients in elastic modulus for improved contact-damage resistance. Part I: The silicon nitride-oxynitride glass system. *Acta Materialia*, **49**: 3255-3262.
- Pender D C, Thompson S C, Padture N P, Giannakopoulos A E, Suresh S. 2001b. Gradients in elastic modulus for improved contact-damage resistance. Part II: The silicon nitride-silicon carbide system. *Acta*

- Materialia*, **49**: 3263-3268.
- 彭凡, 顾勇军, 马庆镇. 2012. 热环境中黏弹性功能梯度材料及其结构的蠕变. 力学学报, **44**: 308-316(Peng F, Gu Y J, Ma Q Z. 2012. Creep behavior of viscoelastic functionally graded materials and structures in thermal environment. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, **44**: 308-316).
- 彭凡, 马庆镇, 戴宏亮. 2013. 黏弹性功能梯度材料裂纹问题的有限元方法. 力学学报, **45**: 359-366(Peng F, Ma Q Z, Dai H L. Finite element method for crack problem in viscoelastic functionally graded materials. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, **45**: 359-366).
- Rostovtsev N A. 1964. On the theory of elasticity of a nonhomogeneous medium. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*, **28**: 745-757.
- Spence D. 1973. An eigenvalue problem for elastic contact with finite friction. **73**: 249-268.
- Suresh S. 2001. Graded materials for resistance to contact deformation and damage. *Science*, **292**: 2447-2451.
- Suresh S, Giannakopoulos A E, Alcalá J. 1997a. Spherical indentation of compositionally graded materials: Theory and experiments. *Acta Materialia*, **45**: 1307-1321.
- Suresh S, Giannakopoulos A E, Alcalá J. 1997b. Spherical indentation of compositionally graded materials: Theory and experiments. *Acta Materialia*, **45**: 3087-3087.
- Suresh S, Olsson M, Giannakopoulos A E, Padture N P, Jitcharoen J. 1999. Engineering the resistance to sliding-contact damage through controlled gradients in elastic properties at contact surfaces. *Acta Materialia*, **47**: 3915-3926.
- Volkov S, Aizikovich S, Wang Y-S, Fedotov I. 2013. Analytical solution of axisymmetric contact problem about indentation of a circular indenter into a soft functionally graded elastic layer. *Acta Mechanica Sinica*, **29**: 196-201.
- 王保林, 杜善义. 1999. 功能梯度材料的热/机械耦合分析研究进展. 力学进展, **29**: 528-548(Wang B L, Du S Y. 1999. Thermomechanical coupling analysis advances of functionally graded material structure. *Advances in Mechanics*, **29**: 528-548).
- 王保林, 杜善义, 韩杰才. 1999. 非均匀复合材料的动态热弹性断裂力学分析. 力学学报, **31**: 550-562(Wang B L, Du S Y, Han J C. 1999. Dynamic fracture mechanics analysis for non-homogeneous composite material with multiple cracks. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, **31**: 550-562).
- Wang Z J, Wang W Z, Wang H, Zhu D, Hu Y-Z. 2010. Partial slip contact analysis on three-dimensional elastic layered half space. *Journal of Tribology*, **132**: 021403.
- Zagrodzki P. 1990. Analysis of thermomechanical phenomena in multidisc clutches and brakes. *Wear*, **140**: 291-308.
- Zagrodzki P, Lam K, Al Bahkali E, Barber J. 2001. Nonlinear transient behavior of a sliding system with frictionally excited thermoelastic instability. *Journal of Tribology*, **123**: 699-708.
- Zhang W, Jin F, Zhang S, Guo X. 2014. Adhesive contact on randomly rough surfaces based on the Double-Hertz model. *Journal of Applied Mechanics*, **81**: 051008.
- Zhang W L, Qian J, Yao H M, Chen W Q, Gao H J. 2012. Effects of functionally graded materials on dynamics of molecular bond clusters. *Science China-Physics Mechanics & Astronomy*, **55**: 980-988.
- Zhou Y T, Lee K Y. 2011. Thermo-electro-mechanical contact behavior of a finite piezoelectric layer under a sliding punch with frictional heat generation. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, **59**: 1037-1061.

- Zhou Y T, Lee K Y, Yu D H. 2011. Transient heat conduction in a functionally graded strip in contact with well stirred fluid with an outside heat source. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **54**: 5438-5443.
- 仲政, 吴林志, 陈伟球. 2010. 功能梯度材料与结构的若干力学问题研究进展. *力学进展*, **40**: 528-541(Zhong Z, Wu L Z, Chen W Q. 2010. Progress in the study of mechanics problems of functionally graded materials and struture. *Advances in Mechanics*, **40**: 528-541).
- Zhou Z G, Chen Z T. 2008. Basic solution of a Mode-I limited-permeable crack in functionally graded piezoelectric/piezomagnetic materials. *International Journal of Solids and Structures*, **45**: 2265-2296.

(责任编辑: 魏宇杰)



Progress in contact mechanics of a type of functional gradient materials

CHEN Peijian^{1,2} CHEN Shaohua^{3,†}

¹ School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China

² State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China

³ LNM, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100190, China

Abstract In regard to a type of materials with gradient varying Young's modulus in the depth direction, considering the effects of interfacial friction, fretting and adhesion, the influences of finite scale of materials, the varying gradient law, thickness of gradient coating, thermo-friction of interface and the shape of punch on the surface contact features are summarized. The performance of resistance to wear of the gradient material surface is mainly analyzed according to the interfacial contact stresses in different contact models. Unsolved problems and prospects of future study on contact mechanics of functional gradient materials are suggested finally.

Keywords Functional gradient material, surface contact mechanics, finite thickness, friction, wear, adhesion



陈少华, 男, 博士, 研究员, 固体力学博士生导师. 1999 年于北京交通大学获博士学位; 2001 年中国科学院力学研究所博士后出站, 于力学所非线性力学国家重点实验室工作至今. 2003 年 2005 年于德国马普金属研究所做访问学者; 2007 年 10-12 月及 2008 年 11-12 月, 香港大学做访问学者. 研究兴趣包括: 表面/界面力学、生物及仿生材料力学、微纳米尺度力学、先进复合材料力学等. 已出版专著 2 部, SCI 论文 70 余篇. 先后获中国科学院王宽诚博士后工作奖励基金、中国科学院优秀博士后、香港大学 "Sino-British Fellowship Trust Visitorship"、国家自然科学基金二等奖 (3/3)、中国力学学会青年科技奖、国家杰出青年科学基金、茅以升北京青年科技奖、中国科学院研究生优秀指导教师、入选中国科学院科技创新 "交叉与合作团队".

Received: 26 December 2013; accepted: 20 February 2014; online: 1 April 2014

† E-mail: shchen@LNM.imech.ac.cn

Cite as: Chen P J, Chen S H. Progress in contact mechanics of a type of functional gradient materials. *Advances in Mechanics*, 2014, 44: 201401

© 2014 *Advances in Mechanics*.