

国家自然科学基金 (No.11402292和No.11404393)

中央高校基本科研业务费专项资金 (No.2014QNA73和No.2014QNA61)

江苏省基础研究计划 (自然科学基金) ——青年科学基金 (No.BK20140179)

中国矿业大学“启航计划”

一类梯度特性材料的表/

界面力学研究

陈培见 彭娟 著

中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

国家自然科学基金(No. 11402292 和 No. 11404393)

中央高校基本科研业务费专项资金(No. 2014QNA73 和 No. 2014QNA61)

江苏省基础研究计划(自然科学基金)——青年科学基金(No. BK20140179)

中国矿业大学“启航计划”

一类梯度特性材料的表/ 界面力学研究

陈培见 彭娟 著

中国矿业大学出版社

内 容 摘 要

本书主要研究材料参数在空间中连续变化的一类梯度材料的表面与界面力学性质,从固体力学理论、材料物理相结合的角度深入探讨了考虑结构尺寸、多场耦合效应和微尺度力学效应的材料接触理论及抗磨损机理。本书的主要特色是:详细介绍了一类梯度材料表/界面的复杂力学行为,注重理论方面的创新,由分析结果给出材料抗磨损设计的指导意见。这些特征使读者很容易抓住问题的物理本质,了解梯度材料表/界面力学的研究现状。

本书适合固体力学、材料科学、摩擦学和机械表面处理等领域的研究生、教师和专业技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

一类梯度特性材料的表/界面力学研究 / 陈培见, 彭娟著. — 徐州: 中国矿业大学出版社, 2015. 3

ISBN 978 - 7 - 5646 - 2639 - 6

I. ①一… II. ①陈… ②彭… III. ①复合材料—界面—力学—研究 IV. ①TB33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 041175 号

书 名 一类梯度特性材料的表/界面力学研究
著 者 陈培见 彭娟
责任编辑 章毅 夏然
出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司
(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)
营销热线 (0516)83885307 83884995
出版服务 (0516)83885767 83884920
网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com
印 刷 徐州中矿大印发科技有限公司
开 本 787×1092 1/16 印张 6.75 字数 200 千字
版次印次 2015 年 3 月第 1 版 2015 年 3 月第 1 次印刷
定 价 26.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

梯度材料作为一种新型材料,具有许多均匀材料不具备的优异材料力学性能,因而受到科技界的高度重视。在实际应用过程中,其表面力学性能的优劣直接影响着梯度材料的工程需求,因此对梯度材料表/界面力学性能的研究日益成为力学、材料等领域重点关注的方向之一:一方面该研究对材料的工程应用和设计提供了理论依据和技术支持;另一方面该研究还进一步发展了梯度材料的表/界面力学。

目前,已有很多关于该类材料力学性能及其表/界面力学性能的理论 and 实验研究,但仍有很多科学问题没有解决,尤其是真实工程应用中涉及的材料和结构为有限尺寸(已有理论大多数讨论了无限大尺寸的情况)、微尺度应用中的微观力作用(黏附效应)以及梯度材料应用中的多场耦合效应等。本书正是围绕此类问题展开研究,主要研究内容及成果如下:

首先,考虑实际工程应用中材料和结构的有限尺寸问题,建立了二维刚性压头与弹性基底上有限厚梯度涂层的接触模型。采用 Fourier 变换和数值求解的方法,得到梯度涂层结构的接触响应信息。进一步考虑涂层的梯度变化规律、膜层厚度、摩擦因数、压头形状等因素对接触响应的影响。研究发现:梯度变化规律和涂层厚度对接触区的应力分布和应力强度因子具有重要影响;与指数型变化规律相比,当涂层性质符合线性变化规律时,平压头下的应力在边缘处具有更小的应力集中;当膜层厚度超过一定值时,涂层厚度对结果的影响可以忽略。

其次,考虑界面摩擦热效应,建立了有限厚梯度膜层的摩擦热接触模型,结果显示热量的产生对接触区的应力分布以及应力奇异性具有重要的影响。接触界面的横向张应力对表面滑动接触损伤具有重要的作用。通过增加有限厚梯度层表面与底部剪切模量比值(μ_1/μ_3)、降低摩擦因数、增大滑动速度或表面与底部热传导系数比(k_1/k_3),可有效地避免表面损伤。与已有的均匀半无限大空间的模型相比,该模型的边界条件对接触应力和温度分布具有明显的影响。

在研究方法上,本书针对实际工程结构部件常见的微动磨损问题,放弃了半空间的假设,分析了梯度材料膜层的黏滑接触问题。研究发现:梯度膜层的厚度会对接触应力和黏附半径产生重要影响,即半无限大平面的黏滑模型无法有效地预测有限厚梯度膜层的结果。随着膜层厚度的增加,该有限厚模型将退化成均匀半无限大平面模型。

考虑微尺度界面黏附效应,建立了二维和三维梯度材料黏附接触模型,利用理论方法得到刚性圆柱压头与梯度材料黏附接触时界面缺陷不敏感的条件,发现该解析结果能

有效地退化到均匀材料的情况。

最后,放弃经典接触力学中接触表面光滑假设,研究了刚性粗糙表面与梯度半空间的黏附接触问题,分析载荷与接触距离的关系,揭示了物体粗糙度对黏附接触的影响。随着粗糙度的增大,两表面的黏附强度降低,然而减小 $E \times R / \Delta \gamma$ 或增大 k 和 α 将有效地提高接触界面的黏附性能,其中 $E \times R / \Delta \gamma$ 、 k 和 α 为材料相关的参数。

著 者

2014年10月

目 录

1 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 均匀材料表/界面接触力学研究现状	2
1.3 功能梯度材料的表/界接触力学的研究进展	7
1.4 本书研究目的和内容	10
2 梯度涂层/基底结构的接触力学分析	13
2.1 引言	13
2.2 理论模型	14
2.3 算例分析	20
2.4 结果与讨论	21
2.5 本章小结	25
3 有限厚梯度层的摩擦热接触力学研究	27
3.1 引言	27
3.2 平压头接触模型	28
3.3 圆压头接触力学模型	46
3.4 本章小结	53
4 刚性压头与有限厚梯度材料部分滑移接触的研究	54
4.1 引言	54
4.2 部分滑移接触模型	55
4.3 理论分析	55
4.4 界面应力和位移的关系	57
4.5 奇异积分方程组的数值解法	59
4.6 结果与讨论	63
4.7 本章小结	71

5 梯度材料的纳米黏附接触	72
5.1 引言	72
5.2 模型分析和讨论	73
5.3 本章小结	76
6 考虑表面粗糙度的梯度材料黏附接触分析	77
6.1 引言	77
6.2 理论模型	78
6.3 数值分析与讨论	81
6.4 本章小结	84
7 结论与展望	85
7.1 全文总结	85
7.2 本书的创新点	86
7.3 工作展望	87
参考文献	88

CHAPTER

1

绪 论

1.1 引言

近年来,随着材料科学的发展与工艺技术的进步,非均质材料由于其优异的力学性能引起人们的高度重视。功能梯度材料(Functionally Graded Material: FGM)作为非均质材料的典型代表在工程实际中得到广泛应用,该类材料一般由两种物理性质完全不同的材料(比如陶瓷和金属)复合而成。宏观上,各组分的体积含量在空间位置上连续变化,其力学、热学等材料参数没有突变,因而大大缓解了由于材料性质失配引起的局部应力集中,使结构的不同部位能够在不同服役条件下完成其承担的任务并保证整个结构的完整性和可靠性^[1]。功能梯度材料作为材料设计的新概念由日本材料科学家新野正之、平井敏雄和渡边龙三于 20 世纪 80 年代首次提出,它的出现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重视功能梯度材料的研究。功能梯度材料的优异力学性质及广阔应用前景亦引起了我国科研工作者的的高度重视,我国已经将 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 FGMs 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^[2]。

功能梯度材料一开始的应用目标定在航天飞机的防热系统和发动机等部件,以解决新一代航天飞机热保护系统中出现的热应力失效问题,随着其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^[3]。

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^[4-6],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、高韧性和金属强度高优点,亦能很好地解决陶瓷和金属强行匹配而引起的黏结强度低和热膨胀系数不协调等问题。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同样为力学、材料学工作者所关注。最近十年来开展的一些研究表明,把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^[7]。为了能够充分发挥功能梯度材料的特性,满足工程实际需求,在材料设计上需要寻求最佳的分布梯度模式,以最大限度地缓和由机械行为或热机械行为失配引起的应力不均匀。此外,功能梯度材料的制备和加工过程中不可避免地会出现粗糙界面、裂纹等缺陷,这将对这类材料性能的发 挥产生重要的影响。因此,对功能梯度材料表/界面力学性质的研究成为迫切需要解决的重大科学问题。

1.2 均匀材料表/界面接触力学研究现状

1.2.1 接触力学理论简介

接触力学作为研究表/界面力学性质最主要的理论工具之一得到越来越广泛的应用^[8]。下面介绍几种最典型的接触力学理论。

1.2.1.1 Hertz 接触理论

1882年,Hertz^[9]首次研究了两个弹性球体法向无摩擦接触问题,假设接触区外部不存在相互作用,接触区内法向应力为:

$$p(r) = \frac{2E^*}{\pi R} \sqrt{a^2 - r^2}, r \leq a \quad (1.1)$$

式中 a ——接触半径。

接触半径与外力的关系可表示为:

$$a^3 = \frac{3PR}{4E^*} \quad (1.2)$$

式中 P ——外部压力载荷;

R ——模型系统的等效半径: $1/R = 1/R_1 + 1/R_2$, R_1 和 R_2 分别为两个弹性球体的半径;

E^* ——等效杨氏模量: $1/E^* = (1-\nu_1^2)/E_1 + (1-\nu_2^2)/E_2$, E_1, E_2, ν_1 和 ν_2 分别表示两接触弹性球体的杨氏模量和泊松比。

在外力载荷 P 作用下,两球心的相对位移可表示为:

$$\delta = \frac{a^2}{R} \quad (1.3)$$

接触体的弹性变形及相互作用力可通过进一步计算获得。

Hertz 接触模型开创了接触力学的先河。在许多宏观接触问题中,经典的 Hertz 模型得到广泛应用。随后,Roberts^[10]和 Kendall^[11]分别针对不同材料组成的光滑圆球对其接触半径与外力的关系展开实验研究,实验结果发现:当外载荷较大时,实验测得的接触半径与 Hertz 理论的预测值非常吻合;但当外载荷较小时,两球体间的接触面积远远大于 Hertz 理论的预测结果,尤其当外力减小到零时,接触面积趋于非零常数,与 Hertz 理论此时预测的零接触面积完全不符。究其原因是由于固体表面分子间产生了相互作用力。大量试验研究表明,随着物体尺度及刚度的减小,接触物体间表面相互作用不能忽略^[12-13],即表/界面黏附。

1.2.1.2 JKR (Johnson-Kendall-Roberts)理论

1971年,Johnson等人^[14]应用 Griffith 能量平衡准则研究了两弹性球体接触区内的表面引力对其接触行为的影响。物体表面间的相互引力与表面能相关,若两球体的接触半径为 a ,分离两个黏附接触的球体需要克服的黏附能为 $U_s = -\pi a^2 \Delta\gamma$,其中 $\Delta\gamma$ 表示两物体接触时单位面积表面能的改变, $\Delta\gamma = \gamma_1 + \gamma_2 - \gamma_{12}$ (γ_1, γ_2 和 γ_{12} 分别为两接触物体的表面能及界面能)。由总能量最小 $dU_T/da = 0$,可得到接触半径随外力的变化关系:

$$a^3 = \frac{R}{K} (P + 3\pi R \Delta\gamma + \sqrt{6\pi R P \Delta\gamma + (3\pi R \Delta\gamma)^2}) \quad (1.4)$$

其中 $K = 4E^*/3$ 。当外力消失,即 $P = 0$,由上式可得表面黏附力引起的接触半径为 $a_0^3 = 6\pi R^2 \Delta\gamma / K$ 。由于黏附力的存在,两球分开所需拉脱力为:

$$P_{\text{pull-off}} = -\frac{3}{2} \pi R \Delta\gamma \quad (1.5)$$

且两物体拉脱时刻的瞬时拉脱半径并非为零,而是 $a = (9\pi R^2 \Delta\gamma / 8E^*)^{1/3}$ 。

1.2.1.3 DMT (Derjaguin-Muller-Toporov)理论

与 JKR 理论的假设不同,DMT 理论^[15]仅考虑了接触区外部的黏附力影响,并假设该黏附力不影响接触区内部的应力分布,即内部仍为 Hertz 接触。此时接触半径与外力的关系为:

$$a^3 = \frac{R}{K} (P + 2\pi R \Delta\gamma) \quad (1.6)$$

当外力 $P = 0$ 时,物体间黏附力产生的接触半径为 $a_0^3 = 2\pi R^2 \Delta\gamma / K$ 。两物体拉脱时的接触半径在 DMT 模型中为零,此时所需拉脱力为:

$$P_{\text{pull-off}} = -2\pi R \Delta\gamma \quad (1.7)$$

1.2.1.4 MD (Maugis-Dugdale)理论

JKR 模型和 DMT 模型的理论结果存在差异,该差异在无量纲参数,即 Tabor 常数 $\mu = (R \Delta\gamma^2 / E^* \epsilon^2)^{1/3}$ 的引入后得以理解。Tabor 常数可理解为由黏附引起的弹性变形与表面力的有效作用范围之比,其中 ϵ 为分子间平衡距离。

1992年, Maugis建立了著名的MD模型^[16], 应用Dugdale模型^[17]近似接触区外表面间的黏附作用(黏结区), 应用接触边缘处应力非奇异性条件, 得到接触半径与黏结区长度的关系, 并得到球体黏附接触时的半解析理论解, 合理地将JKR理论解与DMT解联系起来, 并给出了与Tabor常数等价的无量纲参数 $\lambda = 2\sigma_0 (9R/16\pi\Delta\gamma E^2)^{1/3}$, 其中 $\sigma_0 = 16\Delta\gamma/(9\sqrt{3}\epsilon)$ 。当Tabor常数 $\mu < 0.1$ 时, DMT理论与实验结果非常接近; 当 $\mu > 5$ 时, JKR理论与实验结果吻合, 即DMT理论适用于小曲率半径、低黏附能、高弹性模量体系, 而JKR理论则适用于大曲率半径、高黏附能和低弹性模量体系。

1.2.2 均匀材料的热弹性接触

经典的弹性接触理论都假设温度均匀, 然而很多接触问题不可避免地涉及热场的耦合。一方面, 物体内部温度的变化本身能引起热应力, 但也由于其表面轮廓的热变形而改变接触条件。另一方面, 当接触物体的界面处或其附近产生热量时, 将会出现某些不同于等温时的情况, 一个明显的例子是滑动接触时的摩擦生热^[18]。当传统的铁材料应用于汽车的刹车和离合系统时, 摩擦产生的热量将是一个必须考虑的关键问题^[19-22]。在汽车运动过程中使用刹车时, 动能会转化成热量。因为产生的热能不能很快地耗散, 高温和热应力将对结构产生不利影响, 如出现表面裂纹和永久畸变^[23-24]。工业界急需摆脱热接触引起的破坏, 因此热弹性接触问题很早就引起了工程师和力学工作者的注意。

Carslaw和Jaeger^[25]的专著详细阐述了固体热传导理论。他们给出了半空间表面的同一区域内保持恒定温度时的稳态温度分布, 比拟研究了刚性圆形平压头压入弹性半空间的问题。为了研究滑动接触中摩擦生热引起的温度场, 他们还进一步研究了如图1.1所示的模型, 给出了表面上具有移动热源的半空间的温度分布。随后, Boley和Weiner^[26]推导出任意定常温度分布引起的弹性半空间内应力和位移的方程。Williams^[27]则利用两个双协调函数表示出了弹性半空间中热弹性应力和位移。

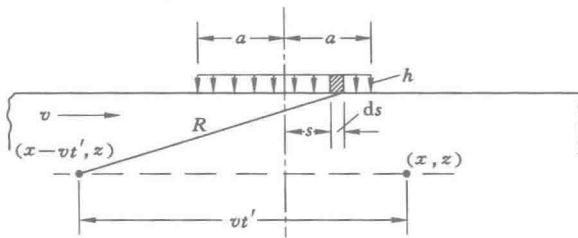


图 1.1 热源在半空间表面的移动模型^[25]

Barber对均匀材料热接触理论作出了卓越贡献, 得到了很多创新性结果^[28-31]。他从理论上得到了稳态的点热源和圆形热源作用下半空间表面位移的一般性表达, 分析了两个不同温度的无限大体的接触问题^[28], 研究发现: 当接触物体材料性质不同时, 热流将引

起附加的接触压力,以致消除两接触表面变形轮廓的失配;温度差的增加将进一步引起两表面相对曲率的增加和接触面积的减小。Barber 还得到了弹性半空间与刚性热圆球接触问题的解析解^[29]。而且,他进一步分析了刚性冷压头与半空间接触时不存在稳态解的问题^[30],研究发现:矛盾产生的原因是接触区域采用了“理想接触”的温度边界条件,即越过界面时温度不间断并且接触区之外是理想绝热。通过在模型中引入一个附加的“非理想接触”状态(实际上当两表面接触时,从理想绝热到理想传导的变化将不是间断的。当间隔足够小时,借助于辐射或通过间隙中的气体能够传递热量),这一困难即可消除。非理想接触环带对热通量的影响不大,界面导热性的减小一定程度上被接触尺寸的增加所补偿。Comninou 等人^[32]、Panek 和 Dundurs^[33]则对类似的柱体间二维接触问题和名义平坦波状表面间的接触问题进行了研究。

Hills 和 Barber^[34-35]通过假定库仑摩擦产生的热量在界面发生耗散,研究了绝热的刚性平压头/圆压头在导热半平面表面稳定滑动时的摩擦热接触问题,分析了热量对接触压力的影响,并得到了压头下缘的温度分布。Ting 和 Winer^[36]理论分析考虑了表面粗糙度对均匀材料摩擦热接触的影响。Barber 等人^[37]发现在摩擦热接触问题中,接触物体的表面粗糙度将导致接触变得集中并使局部温度升高,从而导致“热弹性失稳”。Ciavarella 等人^[38]研究了“热弹性失稳”过程中接触阻抗与摩擦生热的耦合作用,并得到失稳的临界速度。Mastrojannis 等人^[39]则对热载荷下刚性圆平板与均匀弹性半空间的轴对称黏附接触问题进行了研究。当两个接触物体间摩擦产生了足够多的热量时,热效应将会使得两个物体分离^[38,40],最近 Afferrante 和 Ciavarella^[41-42]成功解释了这一有趣的现象。

1.2.3 均匀材料的微动接触问题

微动是指两接触表面在循环载荷作用下的振幅极小的运动,通常发生在振动环境中近似密切配合的接触表面。如图 1.2 所示,根据微动的相对运动方向,可以将其分成几种基本模式^[43-44]:

- ① 平移式微动,或切向式微动,这是最普遍的微动方式;
- ② 径向微动;
- ③ 滚动式微动;
- ④ 扭转微动。

微动接触可以造成接触表面的摩擦损伤,亦可以导致疲劳裂纹的加速萌生和扩展,使构件的疲劳寿命降低。目前,微动损伤已成为工业设备中大量零部件失效的主要原因之一,因而引起了工程师和科学家的重视。

早在 1911 年,科研工作者就发现微动与疲劳的密切联系。20 世纪中叶以后,人们对该问题开展了大量的理论和实验研究。已有理论大多是建立在均匀材料的基础上的。Cattaneo^[45]最早研究了由均匀材料构成的两接触体之间的微动接触问题,因为在

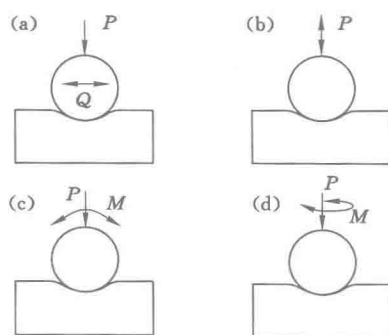


图 1.2 微动的基本形式

(a) 平移式微动; (b) 径向微动; (c) 滚动式微动; (d) 扭转微动^[43-44]

法向加载过程中两物体的表面质点经历相同的切向位移,不发生相对滑动,因而切向和法向的接触应力不耦合。Mindlin^[46]也独立地解决了该问题。随后, Mindlin 和 Deresiewicz^[47]研究了循环切向载荷作用下的接触问题,得到了加卸载过程中切向接触力的分布形式。Truman 等人^[48]考虑了三维圆锥压头和二维楔形压头的微动接触问题。

Ciavarella^[49]通过假设接触区分为一个中心黏着区和两个对称分布于两端的滑动区,成功考虑了不同形状弹性体的单调切向加载问题。此外, Ciavarella 解决了很多复杂形状弹性压头的微动接触问题,如两端光滑的平压头^[50]、尖端光滑的楔形压头^[51]、立方样条形状的压头^[52]。Jager^[53-57]也独立发展了切向加载的微动接触理论,考虑了一系列相似体(由同种材料构成的弹性体)之间的微动接触问题,包括单调增加的斜载荷作用下的微动接触问题^[57]和扭转载荷作用下的轴对称微动接触问题^[53]。

上述结果主要研究了两接触体由均匀材料组成的接触问题。当两接触体材料性质不同时,在加载过程中两接触体表面质点将经历不同的切向位移,因此,即使在法向加载过程中,法向和切向接触力也会变得完全耦合。由于这种耦合的影响,使得微动接触问题依赖于加载历史,即只能求解出法向加载问题之后,才能进一步求解对应的切向加载问题。

Galini^[58]最先考虑了存在摩擦的法向接触问题,假设接触区由中心黏着区和两个滑移区构成,然后利用保角映射方法得到了问题的解。Goodman^[59]用增量的方法分析了完全黏着的法向轴对称接触问题,增量方法是指在增加接触区的过程中同时计算接触应力。为了处理方便, Goodman 使用了一个近似理论,即忽略切向接触力对法向接触力的影响,从而使问题解耦。Spence^[60-62]利用自相似假设(自相似假设在单调增加的载荷过程中,每一增量步对应的应力场都是相似的)分析了完全黏着接触问题以及二维圆柱形压头和三维球压头在法向加载作用下的部分滑移接触问题。结果发现:在法向加载过程中黏着区和接触区尺寸之比是恒定值,仅仅依赖于摩擦因数和泊松比的变化。根据

Spence 的结果^[61], Nowell 等人^[63]和 Hills 等人^[64]研究了两非相似的弹性圆柱体之间的法向接触问题。最近, Zhupanska 和 Ulitko^[65]利用 Wiener-Hopf 方法和自相似假设得到了摩擦接触问题的解析解, 验证了 Spence 的结果^[61]。Keer 等人^[66]还研究了两非相似体三维切向加载问题。Keer 和 Farris^[67]考虑了循环切向加载的问题, 并考虑了材料厚度对接触应力分布的影响。Hanson 和 Keer^[68]则考虑了两弹性非相似体在循环切向加载下的微动接触问题。

1.3 功能梯度材料的表/界面接触力学的研究进展

研究表明, 将梯度材料用于表面涂层可以有效地抑制结构部件产生接触损伤和摩擦破坏。著名的材料学家 Suresh 在 2001 年的《Science》的一篇综述文章^[7]中指出: 将功能梯度材料用作涂层以抵制表面变形和接触损伤(该损伤可能是由于垂直、滑动、滚动、磨损和微动接触引起的); 通过有效地控制材料梯度变化, 为设计抑制变形和断裂的表层提供了前所未有的机会, 这是常规均质材料无法达到的。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。

实验方面, Suresh 等人^[69]利用铝矽酸盐玻璃(Aluminosilicate Glass)和多晶氧化铝(Polycrystalline Alumina)制备的一种具有梯度特性的复合材料(如图 1.3 所示)进行滑动摩擦压痕实验, 将均匀多晶氧化铝、均匀铝矽酸盐玻璃和制备的复合材料的压痕实验对比发现(如图 1.4 所示): 均匀材料的接触边缘均出现 Hertz 圆锥裂纹, 而等载荷下梯度复合材料却未出现任何明显的开裂。Pender 等人^[70-71]制备了更实用的氮化硅(Si_3N_4)—氧氮化硅玻璃(Oxynitride Glass)和氮化硅(Si_3N_4)—碳化硅(SiC)梯度复合材料, 并进行了 Hertz 压入实验。研究发现: 与均匀材料相比, 梯度复合材料在相同的法向载荷下能有效地抑制圆锥裂纹的出现。此外, 在纳米、微米和宏观尺度上, 科学工作者还通过压痕实验评估梯度材料的各种力学性能, 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。Suresh 等人^[72-73]、Jorgensen 等人^[74]和 Jitcharoen 等人^[75]分别设计了压痕实验, 通过实验评估了梯度材料的弹性模量梯度。Krumova 等人^[76]利用压痕测试技术测定了梯度材料的硬度和弹性模量。

理论和数值方面, Giannakopoulos 和 Suresh^[77-78]研究了功能梯度材料半空间在集中载荷、球形和圆锥压头作用下的轴对称问题。他们假设弹性模量沿着厚度呈现梯度变化, 并用两种给定的数学模型来描述: ① 幂次函数: $E(z) = E_0 z^k$ ($0 \leq k < 1$), 其中 E_0 为半空间表面处的弹性模量, k 为表征材料梯度变化的幂次指数; ② 指数函数 $E(z) = E_0 e^{\alpha z}$, 其中 $\alpha < 0$ 表示较硬的表面, $\alpha > 0$ 表示较软的表面, 研究发现: 通过控制半空间材料梯度变化, 压头接触区周围的应力发生明显变化, 从而使得梯度半空间有效抑制 Hertz 裂纹

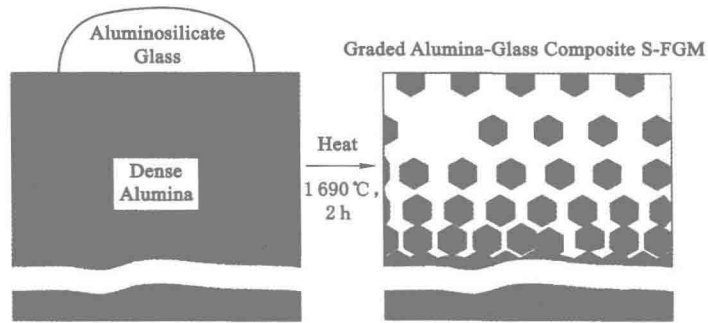


图 1.3 铝矽酸盐玻璃和多晶氧化铝制备的一种具有梯度特性的复合材料^[69]

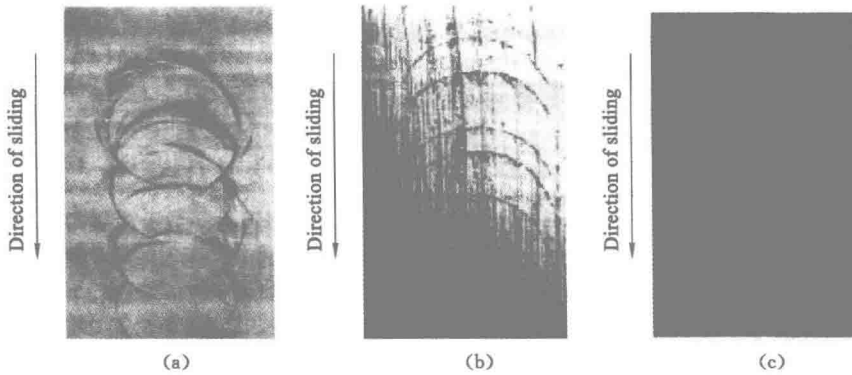


图 1.4 在滑动摩擦接触时显示的压痕图像^[69]

(a) 均匀多晶氧化铝; (b) 均匀铝矽酸盐玻璃; (c) 制备的复合材料

和接触损伤的出现。该模型很好地解释了实验和数值计算结果。Giannakopoulos 和 Pallot^[79] 给出了材料模量呈幂次函数变化时圆柱形压头作用下的二维接触问题的解析解,分析了无摩擦、滑动摩擦和滚动摩擦问题。Guler 和 Erdogan^[80-82] 系统地分析了材料模量呈现指数型变化的功能梯度涂层在刚性平压头、尖角压头、圆柱形压头和抛物线压头作用下的二维接触力学问题,并进一步解决了两个带有涂层的弹性体之间的滑动摩擦接触问题。Ke 和 Wang^[83-84]、Yang 和 Ke^[85] 提出了一种线性逼近的方法进一步研究了这些问题。El-Borgi 等人^[86] 和 Elloumi 等人^[87] 分别研究了半无限大弹性基底上的功能梯度涂层的退让接触和部分滑移接触模型。Choi 和 Paulino^[88] 分析了刚性平压头在复合涂层结构(均匀涂层和均匀弹性半平面之间有一层梯度过渡层)上滑动的接触模型和耦合裂纹/接触模型。

上述模型属于 Hertz 接触模型。然而,当材料尺寸达到微纳量级就不得不考虑分子间作用力对接触问题的影响,少量文献涉及了功能梯度材料的黏附接触问题。Chen 等^[89] 建立了刚性球体与梯度半空间黏附接触模型,假设材料的杨氏模量在厚度方向呈现

幂次变化,如图 1.5 所示。理论分析了拉脱力和接触半径的关系,解析给出三维梯度材料黏附接触拉脱力与梯度变化率 k 呈线性关系。Jin 和 Guo^[90]、Guo 等人^[91]则进一步分析了平面应变和轴对称的无滑动黏附接触模型。

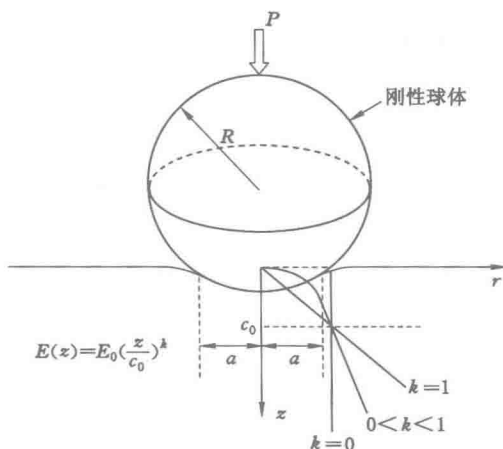


图 1.5 刚性球体与梯度半空间黏附接触模型^[89]

最近十几年来,功能梯度材料的断裂问题也引起了力学家、材料学家和工程师们的广泛关注,成为固体力学的热点问题之一^[92]。其中 Erdogan 在功能梯度材料断裂力学理论研究方面做了大量富有成效的工作,他和他的合作者^[93-95]解决了不同载荷情况下功能梯度材料断裂力学的一些基本问题。

Delale 和 Erdogan^[93]采用弹性模量沿着裂纹方向呈现指数型规律变化的模型(如图 1.6 所示),即

$$E(x) = E_0 \exp(\beta x) \quad (1.8)$$

式中 E_0 ——裂纹处的弹性模量;

β ——梯度变化指数。

发现:对于该类材料参数连续变化的非均匀材料,其裂纹尖端应力奇异性跟均匀材料情况一致,即具有平方根的奇异性。

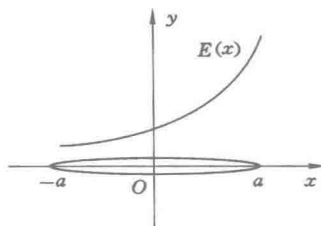


图 1.6 弹性模量沿着裂纹方向呈现指数型规律变化的模型^[93]

Konda 和 Erdogan^[95]在此基础上研究了无限大功能梯度平面的混合型裂纹问题,即裂纹方向与材料梯度具有任意的角度(如图 1.7 所示)。研究发现:材料的非均匀性对裂纹尖端应力强度因子有相当大的影响,裂纹尖端仍然具有平方根的奇异性。Dag 和 Erdogan^[96]研究了含表面裂纹功能梯度半平面在一般载荷作用下的断裂问题。Choi^[97]研究了 I 型和 II 型载荷条件下的周期性裂纹问题。Ozturk 和 Erdogan^[94]研究了功能梯度材料存在轴对称裂纹的断裂问题。由于实际的功能梯度材料往往是各向异性体,Ozturk 和 Erdogan^[98]用奇异积分方程方法研究了正交各向异性功能梯度材料 I 型断裂问题,裂纹方向平行于材料属性的梯度方向。此后,他们用相同方法研究了正交各向异性功能梯度材料混合型裂纹问题^[99]。

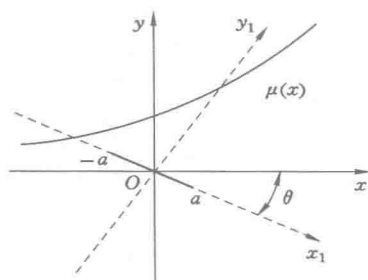


图 1.7 裂纹方向与材料梯度具有任意角度的模型^[99]

对于热弹性参数按指数型规律变化的功能梯度材料的热应力问题,Noda 和 Jin 开展了相关的研究。他们^[100]应用 Airy 应力函数研究了含 Griffith 裂纹的无限大非均匀体在稳态和非稳态温度场的热应力和热应力强度因子问题,考察了材料的非均匀特性对应力强度因子的影响。Cheng 和 Zhong^[101]假设剪切模量的导数为线性函数,而泊松比为常数,研究了该类功能梯度材料的断裂问题。Huang 等人^[102]给出了一种分层模型,利用线性逼近梯度变化的方法分析了梯度材料的断裂问题。

以上研究都假设材料尺寸无限大或半无限大。Gu 和 Asaro^[103-104]对有限厚功能梯度板边界裂纹开裂及裂纹扩展问题开展了研究。Erdogan 和 Wu^[105]研究了有限厚度功能梯度板 I 型内嵌裂纹和垂直于边界的边界裂纹问题。Wang 等人^[106]研究了含平行于界面的裂纹的有限厚功能梯度板的反平面断裂问题。

1.4 本书研究目的和内容

1.4.1 研究目的

功能梯度材料作为最有前途的复合材料之一,为了充分发挥其所有组分材料本身的