



Peridynamic Theory
and Its Application

近场动力学 理论及其应用

【美】埃尔多安·马德西 【英】额尔坎·奥特库斯 著
余音 胡祎乐 译



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

近场动力学理论及其应用

Peridynamic Theory and Its Application

【美】埃尔多安·马德西 【英】额尔坎·奥特库斯 著

余音 胡祎乐 译



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

内容提要

本书旨在对近场动力学理论在统一的框架中进行阐述,除了介绍了理论基础之外,还给出了数值方法。首先介绍了近场动力学理论及其本构方程的导出,随后建立了近场动力学与经典局部理论之间的联系,并导出各向同性材料和复合材料的常规态型近场动力学方程。书中详细介绍了用于近场动力学分析的数值计算方法和具体实施步骤,并且为读者提供了丰富的基准算例,以及众多求解静力学、动力学问题的应用例题。这些例子有助于读者更直观地理解近场动力学理论和分析方法。本书的另一重要内容是与近场动力学方法相关的耦合分析方法,包括了近场动力学和有限元方法的耦合,以及近场动力学热-力耦合的分析方法。本书主要目的是为研究近场动力学的学生和研究人员提供理论基础和实际应用参考,也可用作多物理场和多尺度分析、非局部计算力学和计算损伤预测的教程。书中基准问题的求解代码可在网站 <http://extras.springer.com> 上获得,该代码可以根据需要自行修改。

图书在版编目(CIP)数据

近场动力学理论及其应用/(美)埃尔多安·马德西(Erdogan Madenci);(英)额尔坎·奥特库斯(Erkan Oterkus)著;余音,胡祎乐译.—上海:上海交通大学出版社,2019

(大飞机出版工程)

ISBN 978-7-313-20658-9

I. ①近… II. ①埃…②额…③余…④胡… III. ①动力学—研究 IV. ①O313

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 273475 号

近场动力学理论及其应用

著 者:[美]埃尔多安·马德西
[英]额尔坎·奥特库斯

译 者:余音 胡祎乐

出版发行:上海交通大学出版社

地 址:上海市番禺路 951 号

邮政编码:200030

电 话:021-64071208

印 制:苏州市越洋印刷有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:710mm×1000mm 1/16

印 张:17.5

字 数:293 千字

版 次:2019 年 7 月第 1 版

印 次:2019 年 7 月第 1 次印刷

书 号:ISBN 978-7-313-20658-9/O

定 价:150.00 元

版权所有 侵权必究

告读者:如发现本书有印装质量问题请与印刷厂质量科联系

联系电话:0512-68180638

将此书献给 Stewart A Silling 博士，
近场动力学之父(美国 Sandia 国家实验室)

序

结构的疲劳、损伤、断裂与破坏是在航空、航天、土木、机械、交通、水工等领域经常遇到且尚未很好解决的结构分析难题。现行的结构力学模型和数值方法,如有限元方法、边界元方法和有限差分方法等,都是基于经典的连续介质力学和热力学理论,根据物体内变形和应力的连续性,利用能量、动量和质量守恒原理,引入材料的应力-应变关系,将结构体系的静态或动态问题转化为偏微分方程的初值和边值问题,进而将其离散成线性、非线性,或时程积分方程,进行数值求解。但是,当结构在长时间、复杂荷载或超限荷载作用下,材料内部发生微结构演变、裂纹萌生和扩展时,原本连续的位移、应力场将不再连续,从而导致裂纹尖端、界面等部位的应力奇异性,使原平衡方程失效,致使连续的模型和算法无法得到定解。

在材料损伤、断裂与裂纹扩展的研究中,目前使用较为广泛的是内聚区单元(cohesive zone element, CZE)和扩展有限元方法(extended finite element method, XFEM)。CZE单元通常被放置在相邻单元的界面上,裂纹只能沿预设的单元扩展,具有极强的网格依赖性。XFEM方法通过引入额外的节点自由度和局部强化函数(enrichment function),以表征裂纹面两侧的位移不连续性。它允许裂纹沿任意方向扩展,但是要求裂纹在相邻单元的界面上保持连续,这对于三维问题及在处理裂纹分叉与裂纹相互作用时会招致较大的计算复杂性。

为了突破已有的结构力学模型和数值方法对分析疲劳、损伤、断裂及颗粒复合材料结构问题的限制,美国 Sandia 国家实验室的 Stewart Silling 博士基于空间积分方程和非局部作用思想,重新构建了弹性力学基本方程,使之在连续和不连续区域均有定义,规避了按连续介质力学方法处理不连续问题的困难,实现了按统一的框架进行结构分析建模,分析疲劳损伤、裂纹萌生与断裂演化问题,建立了近场动力学的理论和算法。

近场动力学在处理损伤、断裂问题方面具有独特优势,裂纹可以自然萌生和自由扩展,不需要预设扩展路径,并允许多条裂纹相互作用。故自2000年问世以来,已受到广泛关注,发展极为迅速,已经从单纯的模型和方法研究迈入了精细分析和工程应用,众多学者已经将近场动力学的理论和方法应用于岩土力学、功能梯度材料、土木工程和复合材料结构分析中。近场动力学已经发展成为固体力学的一个新兴分支。

由于近场动力学的概念和参量与传统固体力学具有一定差异,因此给初学者带来了一定困难。为了使初学者尽快入门,我们推荐这本《近场动力学理论及其应用》。本书由美国亚利桑那大学的 Madenci 教授和 Oterkus 博士所著,他们对近场动力学已有深入研究,本书在其研究成果基础上吸纳了相关文献,系统整理而成。

本书的理论部分是常规态型的近场动力学,作者应用图示直观地解释了近场动力学参量的物理意义,叙述具有系统性和数学上的简洁性。全书分为两部分:第一部分为前七章,包括近场动力学基本理论、损伤描述和数值方法;第二部分为后六章,侧重于近场动力学应用,包括基准问题的求解、与有限元方法的耦合、热传导问题、热-力耦合问题等。书中还给出了可供下载的近场动力学 Fortran 程序的网址和众多算例的计算参数,有利于读者通过算例理解近场动力学的理论和方法,独立编写计算程序。

在序的最后,我们向余音教授、胡祎乐博士表示诚挚的感谢,感谢他们为读者轻松迈入近场动力学的门槛提供了便利,为近场动力学在中国的发展和应用付出了心血,做出了奉献。

是为序。

中国工程院院士,中国科学院数学与系统科学院研究员



中国力学学会计算力学专业委员会副主任,河海大学教授



译 序

近场动力学方法采用积分形式的控制方程,它避免了对裂纹尖端位移场求空间导数,可有效减小裂尖的奇异性。近场动力学方法不需要预置裂纹起始位置和扩展路径,可以模拟多裂纹在三维空间内的复杂交互作用,可以同时分析裂纹扩展和场量扩散的过程。此外,近场动力学方法是一种考虑非局部作用的方法,其作用范围可根据问题的时空尺度调整,具有在统一的计算框架内进行多尺度分析的能力。

近场动力学方法特别适用于模拟和分析具有复杂破坏机理和多裂纹共存的不连续问题,已在多个领域的研究中得到应用。经过十几年的发展,全球已有众多学者长期关注近场动力学方法,并取得了丰硕的研究成果。为了进一步推动近场动力学方法在我国的发展和应用,需要凝聚更多学者和科研人员的智慧和创新工作,也需要做好基础理论的传播工作,为初学者投入近场动力学研究提供便利。

本书为英文书籍《Peridynamic Theory and Its Applications》的译著,主要阐述了近场动力学基础理论、各向同性材料近场动力学模型、复合材料层合板近场动力学模型、损伤预测方法、数值计算方法、近场动力学热扩散理论及其与机械变形的完全耦合分析。本书非常适合固体力学和复合材料力学专业的研究生了解和学习近场动力学基本概念;此外,本书翻译语言通俗易懂,图文并茂,通过大量的基准算例为读者提供了学习近场动力学基本原理和方法的有效途径。本书引用了多篇参考文献,也非常值得读者仔细研读。

本书的编写得到了孙璐妍、张劲松、刘肃肃、王其政、张卓越、陈欣华等研究生们的热情帮助,在此表示感谢。本书在编写过程中的疏漏错误之处恳请

读者指正。

谨以此书奉献给近场动力学领域的工作者和学子们,祝愿我国近场动力学研究不断突破,人才辈出,硕果累累。

余 音 胡祎乐

2019 年于上海交通大学

前 言

以有限元为代表的现代数值计算技术在模拟材料失效破坏方面的能力远远落后于传统的应力分析能力。出现这一困难的原因是这些计算方法所依据的数学理论都假定物体在变形时始终保持连续。目前,用于模拟连续体断裂问题的计算方法都建立在经典连续介质力学偏微分方程的基础之上,但 these 方法都存在固有的缺陷,即构成偏微分方程的空间偏导数在裂纹尖端或沿裂纹表面是不存在的。因此,一旦物体中出现裂纹,则方程中的基本数学架构就会失效。针对于此,断裂力学理论发展出了多种特殊方法来解决这个问题。这些方法的普遍思路是重新定义一个不包含裂纹的连续体,然后将裂纹以边界条件的形式加入模型中。此外,现有的模拟裂纹的方法都需要借助额外的裂纹扩展准则,还可能需重新划分网格。这些准则根据连续介质内的局部状态来控制裂纹的演变和扩展过程。由于需要跟踪裂纹前端的运动轨迹,尤其是三维裂纹的变化过程,也可能是裂纹在不同的材料组分、界面和铺层之间的扩展过程,因此要提供准确的裂纹扩展准则并非易事。

通过分子动力学仿真或建立原子晶格模型可以解决一部分经典连续介质力学所遇到的困难。虽然这类原子(尺度的)方法能够帮助我们深入理解一些材料的断裂机理,但却难以成为工程结构建模的实用工具,因此原子方法无法用来模拟实际结构的断裂过程。

近场动力学理论可以提高材料和结构渐进失效的建模能力,并且为多物理与多尺度问题提供解决途径。尽管目前已经有大量关于近场动力学发展与应用的期刊文章和会议论文,但是近场动力学对于工程技术人员仍然是一个全新的理论。由于近场动力学理论不是建立在常用的传统概念上的,因此

本书将在一个独立框架内对近场动力学理论进行说明。书中不仅介绍了近场动力学的基础理论,而且提供了它的数值计算过程。本书的开头是近场动力学理论的概述与基本方程推导;然后构建了近场动力学与经典连续介质力学的关系,从而推导出了适用于各向同性材料和复合材料的常规态型近场动力学方程;通过多个基准与示范例题的求解,详细地给出了近场动力学方程的数值计算方法;为了充分利用近场动力学和有限元方法各自的优势,本书还介绍了一种两个方法的耦合技术;最后介绍了近场动力学理论在热扩散与热-力完全耦合问题上的研究与拓展。

书中用于求解范例的参考算法可以在网站 <http://extras.springer.com> 上获得,以便研究人员和研究生们对这些算法进行调整和修改,编写出属于自己的求解特定问题的算法。本书的编写目的是为学生与研究人员提供近场动力学的理论与实践知识,以及提高自行编写算法和分析工程问题的能力。

致 谢

我们要感谢美国国家航空航天局兰利研究中心(NASA LaRC)的 Alex Tessler 博士、美国空军科学研究局(AFOSR)的 David Stargel 博士和波音公司(Boeing Company)的 Abe Askari 博士对本书的撰写所提供的大力支持。此外,本书的第一作者在美国桑迪亚国家实验室(Sandia National Laboratories)的学术休假期间,与 Stewart Silling 博士、Richard Lehoucq 博士、Michael Parks 博士、John Mitchell 博士和 David Littlewood 博士等研究人员展开了卓有成效的学术讨论。最后同样重要的是,本书的第一作者想要感谢美国海军航空系统司令部(NAVAIR) Nam Phan 博士的鼓励和支持。

我们非常感激 Connie Spencer 女士为了本书的出版工作,在编写、编辑和协助整理材料方面所做的宝贵努力。同时,我们还想对 Abigail Agwai 博士、Atila Barut 博士、Kyle Colavito 先生、Ibrahim Guven 博士、Bahattin Kilic 博士和 Selda Oterkus 女士在亚利桑那大学期间,在近场动力学理论研究和算例分析中所做出的重要贡献表示感谢。

目 录

- 1 绪论 1
 - 1.1 经典局部理论 1
 - 1.1.1 失效预测方面的缺陷 1
 - 1.1.2 改进方法 3
 - 1.2 连续介质的非局部理论 4
 - 1.2.1 近场动力学理论基础 7
 - 1.2.2 特点与现状 7
 - 参考文献 12

- 2 近场动力学理论 19
 - 2.1 基本概念 19
 - 2.2 变形 20
 - 2.3 力密度 21
 - 2.4 近场动力学状态 22
 - 2.5 应变能密度 23
 - 2.6 运动方程 24
 - 2.7 初始条件和约束条件 27
 - 2.7.1 初始条件 27
 - 2.7.2 约束条件 28
 - 2.7.3 外载荷 29
 - 2.8 守恒定律 31
 - 2.9 键型近场动力学 34
 - 2.10 常规态型近场动力学 35

- 2.11 非常规态型近场动力学 37
 - 参考文献 40
- 3 局部作用的近场动力学 42
 - 3.1 运动方程 42
 - 3.2 柯西应力与近场动力学力(密度)的关系 43
 - 3.3 应变能密度 45
- 4 各向同性材料近场动力学模型 48
 - 4.1 材料参数 48
 - 4.1.1 三维结构 51
 - 4.1.2 二维结构 55
 - 4.1.3 一维结构 59
 - 4.2 表面效应 61
 - 参考文献 66
- 5 复合材料层合板近场动力学模型 67
 - 5.1 基础 67
 - 5.2 纤维增强复合材料单层板 68
 - 5.3 复合材料层合板 71
 - 5.4 近场动力学材料常数 78
 - 5.4.1 单层板的材料常数 78
 - 5.4.2 横向变形的材料常数 87
 - 5.5 表面效应 92
 - 参考文献 100
- 6 损伤预测 101
 - 6.1 临界伸长率 101
 - 6.2 损伤起始 106
 - 6.3 局部损伤 107
 - 6.4 失效载荷与裂纹扩展路径预测 107
 - 参考文献 110

-
- 7 数值方法** 111
- 7.1 空间离散 112
 - 7.2 体积修正 114
 - 7.3 时域积分 115
 - 7.4 数值稳定性 118
 - 7.5 自适应动力松弛法 120
 - 7.6 数值收敛 122
 - 7.7 表面效应 125
 - 7.8 初始条件和边界条件的施加 126
 - 7.9 预置裂纹和不失效区 127
 - 7.10 裂纹扩展的局部损伤 127
 - 7.11 质点的空间划分 129
 - 7.12 并行计算的利用和负载平衡 130
- 参考文献 131
- 8 基准算例** 133
- 8.1 杆的轴向振动 133
 - 8.2 受拉伸的杆 135
 - 8.3 受单轴拉伸或温度均匀变化的各向同性平板 136
 - 8.4 受单轴拉伸或温度均匀变化的单层板 139
 - 8.5 受拉伸载荷的长方体 143
 - 8.6 受横向载荷的长方体 145
 - 8.7 受压缩载荷的长方体 147
 - 8.8 内部具有球形空心的长方体受径向内压 150
- 参考文献 152
- 9 非冲击问题** 153
- 9.1 含圆孔平板受准静态拉伸载荷 153
 - 9.2 含裂纹平板边界施加快速载荷 156
 - 9.3 双材料板受到均匀温度变化 159
 - 9.4 矩形板受温度梯度作用 161
- 参考文献 163

- 10 冲击问题 164
 - 10.1 冲击模型 164
 - 10.1.1 刚性冲击物 164
 - 10.1.2 可变形冲击物 165
 - 10.2 有效性验证 166
 - 10.2.1 两个相同的可变形杆撞击 166
 - 10.2.2 矩形板受刚性圆盘冲击 168
 - 10.2.3 Kalthoff-Winkler 实验 170
 - 参考文献 172

- 11 近场动力学理论和有限元方法的耦合 173
 - 11.1 直接耦合 174
 - 11.2 直接耦合的有效性验证 178
 - 11.2.1 杆受拉伸载荷 178
 - 11.2.2 带孔板受拉伸载荷 180
 - 参考文献 182

- 12 近场动力学热扩散 184
 - 12.1 基础理论 184
 - 12.2 非局部热扩散 185
 - 12.3 态型 PD 热扩散 186
 - 12.4 热通量和近场动力学热流状态的关系 191
 - 12.5 初值和边界条件 193
 - 12.5.1 初值条件 194
 - 12.5.2 边界条件 195
 - 12.6 键型 PD 热扩散 197
 - 12.7 热响应函数 197
 - 12.8 近场动力学微导热系数 198
 - 12.8.1 一维分析 198
 - 12.8.2 二维分析 199
 - 12.8.3 三维分析 199
 - 12.9 数值过程 200
 - 12.9.1 离散方式和时间步长 201

- 12.9.2 数值稳定性 202
- 12.10 表面效应 204
- 12.11 数值验证 206
 - 12.11.1 具有温度边界条件的厚板 206
 - 12.11.2 具有热对流边界条件的厚板 208
 - 12.11.3 具有绝热边界的平板受热冲击载荷 210
 - 12.11.4 具有温度和绝热边界条件的长方体 211
 - 12.11.5 具有绝热裂纹的异质材料 213
 - 12.11.6 具有两个绝热斜裂纹的厚板 217
- 参考文献 220

13 热-力完全耦合的近场动力学分析 222

- 13.1 局部理论 223
- 13.2 非局部理论 224
- 13.3 近场动力学热-力耦合方程 225
 - 13.3.1 具有结构耦合项的近场动力学热传导方程 225
 - 13.3.2 具有热耦合项的近场动力学运动方程 228
 - 13.3.3 键型近场动力学热-力耦合方程 230
- 13.4 热-力耦合方程的无量纲形式 231
 - 13.4.1 特征长度和时间尺度 232
 - 13.4.2 无量纲参数 232
- 13.5 数值方法 235
- 13.6 验证 237
 - 13.6.1 半无限长杆受热载荷 238
 - 13.6.2 有限长杆的热弹性振动 239
 - 13.6.3 板受到压力冲击、温度冲击以及压力和温度组合冲击 241
 - 13.6.4 物体受热载荷 245

参考文献 247

附录 250

索引 256

1 绪 论

1.1 经典局部理论

经典理论中的基本假设之一是它的局部性。经典连续介质理论假设一个质点仅与其直接相邻的点有相互作用,因此它是一种局部理论。质点之间的相互作用由各种平衡法则控制。局部模型中的质点只与最靠近的质点进行质量、动量和能量的交换,所以在经典力学中某点的应力状态仅取决于该点处的变形。但是,该假设的有效性在不同的研究尺度下是存疑的。在宏观尺度下,该假设一般来说是可接受的。然而,原子理论清楚地表明了远程力的存在,当几何长度尺寸变得越来越小,并接近于原子尺度时,局部作用的假设就会失效。甚至在某些宏观尺度下,局部作用的有效性也有待确定,例如微小的特征与微观结构对整个宏观结构产生的影响。

尽管已经发展了许多重要的概念来预测材料中裂纹的萌生及扩展,但在经典连续介质力学框架中,这仍然是具有挑战性的课题。其主要困难在于数学方程假设物体产生变形时仍然保持连续。因此,当物体中出现不连续时,方程的基本数学架构就会失效。在数学上,经典理论是通过空间偏微分方程表述的,而空间偏导数在不连续处不存在,这导致了经典理论的一个固有缺陷,即当不连续现象(如裂纹)出现时,控制方程中定义的空间导数就失去了意义。

1.1.1 失效预测方面的缺陷

Griffith(1921)的开创性研究建立了线弹性断裂力学(linear elastic fracture mechanics, LEFM)的概念,他在经典连续介质力学范畴内推导出的裂纹应力场具有奇异性。在 LEFM 中,必须给材料定义一个初始裂纹,并且裂纹尖端的应力场在数学上是奇异的。因此,裂纹萌生和裂纹扩展需要分别引入外部准则进