

固体力学国内外发展：历史追溯与现状分析

杨可凡¹, 张大朋^{1*}, 姜溟予²

¹广东海洋大学船舶与海运学院, 广东 湛江

²广东海洋大学电子与信息工程学院, 广东 湛江

收稿日期: 2024年5月6日; 录用日期: 2024年5月29日; 发布日期: 2024年6月11日

摘要

力的作用与物质的运动是自然界和人类活动中最基本的现象。固体力学作为力学的一个重要分支, 在工程和国民经济中所起的重大作用, 其近年来发展迅速, 特别是在与生物、化学、前沿技术等交叉的学科方面。现今, 固体力学知识体系日趋完整, 在许多领域中的作用日益重要。文章对固体力学进行了回顾, 追溯了固体力学的历史, 并且对固体力学的现状进行了分析, 阐述了固体力学在许多领域的应用。

关键词

固体力学, 追本溯源, 固体力学的应用现状

Domestic and International Development of Solid Mechanics: Historical Tracing and Current Situation Analysis

Kefan Yang¹, Dapeng Zhang^{1*}, Haoyu Jiang²

¹School of Shipping and Maritime Transportation, Guangdong Ocean University, Zhanjiang Guangdong

²School of Electronic and Information Engineering, Guangdong Ocean University, Zhanjiang Guangdong

Received: May 6th, 2024; accepted: May 29th, 2024; published: Jun. 11th, 2024

Abstract

The action of force and the motion of matter are the most fundamental phenomena in nature and human activities. Solid mechanics, as an important branch of mechanics, plays a significant role in engineering and national economy, and its development has been rapid in recent years, especially

*通讯作者。

in the intersection of disciplines with biology, chemistry, cutting-edge technology and so on. Nowadays, the knowledge system of solid mechanics is becoming more and more complete, and its role in many fields is increasingly important. The article reviews solid mechanics, traces the history of solid mechanics, and analyzes the current situation of solid mechanics, describing the application of solid mechanics in many fields.

Keywords

Solid Mechanics, Tracing Back the History, Current Status of the Application of Solid Mechanics

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

固体力学是物理学和工程学领域中一门重要的学科，这门学科主要研究固体机械性质，是连续介质力学的一个分支[1]，其应用范围广泛，且其重要性不容忽视。在工程结构设计、材料力学、生物力学等诸多领域中，固体力学都发挥着重要作用。它在工程、材料科学以及生物医学领域中都有广泛应用，对提升产品质量与性能、以及保障人类生命和财产安全具有重大意义。固体力学主要研究固体在外界因素[2]作用下所产生的位移、运动、应力、应变和破坏等问题。追溯固体力学的发展历史可以帮助我们更好地认识固体力学的基本概念和原理，了解其研究方法和技术的发展历程，以及为固体力学的未来发展提供新的思路 and 方向。

自古以来，人们对固体力学的研究与应用就一直存在，在古代，人们主要通过观察和实验来研究固体力学。例如，古希腊学者亚里士多德就研究了物体的弹性和塑性变形，并发现了一些基本的力学定律；在中世纪，阿拉伯学者阿尔-哈桥丁研究了弹性体的力学性质，并发现了弹性模量的概念。固体力学经历了漫长而辉煌的发展历程。固体力学的发展史可以追溯到很久以前，但是真正意义上的固体力学是在牛顿[3]在陈述运动定律方面取得巨大成就之后，在数学和物理研究的涌现中发展起来的。在18世纪，制造大型机器、建造大型桥梁和大型厂房等需要的技术催生了固体力学的发展。在十九世纪，弹性理论作为数学物理的分支，得到了重大的发展，弹性理论及其在木结构和金属结构的材料力学和结构力学中的实际应用，是当时的研究重点。二十世纪，随着计算机技术的发展，数值模拟方法逐渐成为固体力学研究的主要手段之一[4]，同时量子力学的出现使得人们能够更深入地研究固体物质的力学行为，量子力学为固体力学的发展提供了新的思路和方法[5]。而在二十一世纪，智能材料、纳米技术和生物力学等新技术的发展，也为固体力学的研究提供了新的思路和方法[6]。我们不难看出固体力学的发展历程分为几个阶段，分别是早期阶段，经典力学阶段，量子力学阶段，现代固体力学阶段，见图1，用思维导图梳理了固体力学发展史。总的来说，固体力学的发展历程是一个不断深化和扩展的过程，涉及到物理学、数学、工程学等多个学科的交叉和融合。

现代固体力学在中国的发展历程可以追溯到20世纪初。20世纪30年代，当时中国开始大规模开展工业建设和科学技术研究，固体力学作为一门基础学科也逐渐引起了人们的重视。20世纪50年代，随着国家工业化的进程，我国的固体力学研究也得到了进一步的发展，我国的力学研究也开始逐渐形成自己的特色。从那时起，中国科学院成立了力学研究所，国内的力学工作者开始进行对固体力学的研究工作，同时我国的一些高校也开始开设了力学专业，例如：1952年，北京大学创立了新中国第一个力学专

业[7],同时,我国的一些研究机构也开始开设了固体力学的培训课程,为我国的力学工作者提供了更多的学习和交流机会。20世纪60年代,中国开始进行国防建设和军事技术研究,固体力学在这一时期得到了广泛的应用和发展,例如:火箭技术[8],导弹技术[9],飞行器设计[10]等固体力学方面的应用。在20世纪80年代以后,我国的固体力学研究进入了一个新的发展阶段。在这个时期,国家将力学确认是一级学科。此后我国在力学界的国内外学术交流开始活跃,并取得了一些成就[11],例如:对于复合材料、纳米材料、超导材料等,我国的研究人员进行了深入地研究,并取得了许多重要的研究成果。21世纪以来,随着我国科技水平的不断提高,中国固体力学研究的重点逐渐转向材料力学、结构力学、非线性力学等领域,开展了大量的研究,并在这些领域取得了一系列重要成果。总的来说,中国的现代固体力学研究经历了从起步到逐步发展壮大过程,并在各个领域都取得了重要的成果。

本综述将从固体力学的发展历史、研究内容和方法等方面,对固体力学的发展进行全面的介绍和总结,以期对固体力学研究者提供参考和帮助。本文进行了详细的分析讨论,将从固体力学的发展历史、研究内容和方法等方面,对固体力学的发展进行全面的介绍和总结,并通过国内外相关研究成果的梳理,揭示出现代固体力学在当前阶段所面临的问题和挑战,本文在某种程度上能够为固体力学研究者提供参考和帮助。

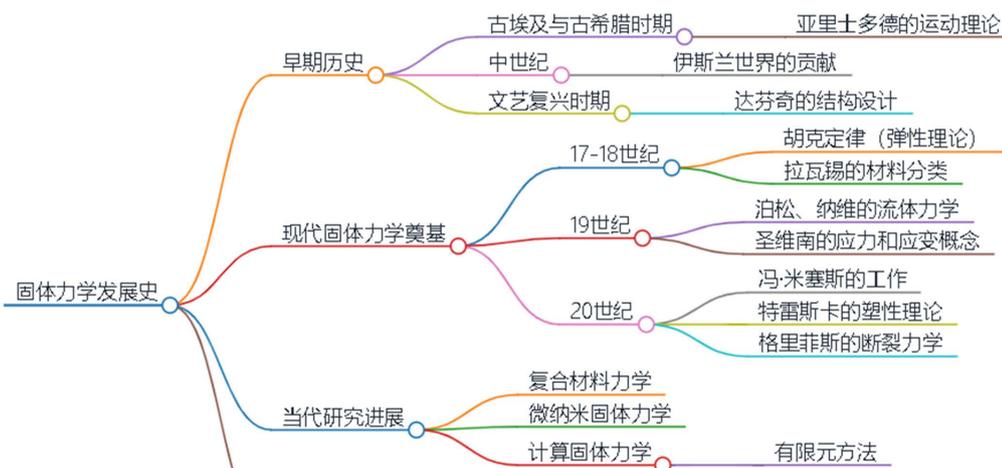


Figure 1. Mind map of the history of solid mechanics
图 1. 固体力学发展史思维导图

2. 研究历史以及现状

2.1. 国外研究

国外的固体力学的研究源远流长,最早的突破主要来自欧洲国家17世纪,伽利略·伽利莱的重力、弹性体和刚体力学理论[12]为固体力学的奠基工作做出了重要贡献。18世纪,欧拉和伯努利等清晰地形式化了广义的应力和应变概念,并建立了最初的弹性理论[13]。19世纪,克莱因和亥姆霍兹等继续推进了弹性理论,并为固体力学的数学基础做出了重要的贡献。20世纪,随着机械、航空航天和材料科学的发展,固体力学在国外得到了迅速的进展,国外的固体力学研究发现达到了高峰期——19世纪末和20世纪初。在现代矢量分析领域,克利福德做出了重要贡献,他的工作主要集中在矢量分析和流体力学领域。克利福德的主要贡献之一是发明了矢量分析的基本概念,如矢量、矢量加法、矢量乘法、标量积和叉积等。他还发展了一种新的矢量分析方法,称为克利福德代数[14],它是基于克利福德向量和克利福德积的。在流体力学领域,克利福德的工作主要集中在流体的运动和变形上。他提出了一种新的流体动力

学方法，称为克利福德流体力学，它是基于克利福德矢量和克利福德积的。克利福德的工作对现代矢量分析和流体力学领域的发展产生了深远的影响，他的工作为后来的数学家和物理学家提供了重要的基础。在力学模型方面，法国物理学家 J.W.Biot 提出了连续介质力学和粘弹性理论，纽约大学数学科学学院首任院长 Courant 和德国数学家戴维·希尔伯特使用变分法探索了变形力学的数学基础。在应力分析方面，德国力学家 Ludwig Prandtl 开创了应用弹性力学理论解决实际问题的方法，提出了满足边界条件的解析解，为近代力学的研究打下了基础。在材料力学方面，Von Mises 和 Tresca 提出了材料的 von Mises 屈服准则，Tresca 屈服准则。同时 Mises Levy 提出了材料的塑性理论。结构力学方面，俄罗斯力学家铁木辛柯和 Goodier 等人开创了弯曲、扭转和振动等问题的数学模型。

在全世界高新技术迅速发展的今天，国外学者在固体力学领域的研究取得了丰硕的成果，例如，在 2023 年 12 月份 dos Santos Oliveira Estherh 和 Nackenhorst Udo 在 *Sparse polynomial chaos expansion for high-dimensional nonlinear damage mechanics* 中指出固体力学中的有限元模拟这种强有力的方法具有考虑不确定性的现象[15]，因此两位学者研究了关于优化不同的误差度量和优化的算法。这一研究为其他的学者提供了一个全新的视角。此外，还有许多其他国外学者在固体力学方面进行了深入研究。长期以来固体力学始终与土建、机械、船舶、航空等工程技术紧密结合，在 21 世纪上半叶固体力学也渗入和指导了生物医学工程和生命仿真技术的进展。

2.1.1. 高性能材料力学

近年来，固体力学在高性能材料力学方面取得了显著进展(见图 2)。随着科技的发展和极端环境应用的需求增加，研究者们致力于开发具有优异力学性能的新材料，并深入探究其力学行为和失效机制。首先，轻质高强度的材料如碳纤维增强复合材料和高性能金属合金(例如高温钛合金和镍基超合金)得到了广泛的研究与应用。这些材料能够在承受高应力的同时保持较低的密度，适用于航空航天和汽车工业等领域。其次，纳米技术的兴起使得纳米复合材料成为研究热点。通过在材料中引入纳米尺度的增强相，如纳米管或纳米粒子，可以显著提高材料的力学性能，包括强度、韧性和耐磨性。第三，研究者们还关注于智能材料和自修复材料的研究。智能材料能够响应外界刺激(如温度、电场或磁场)而改变其性质，应用于传感器和执行器等领域。自修复材料则能在发生微小损伤后自动恢复原有性能，这为延长材料寿命提供了新的可能性。此外，极端环境下的材料力学行为测试技术和仪器设备的进步也推动了材料性能的提升。例如，高温高压环境下的测试技术可以帮助我们更好地理解材料在这些条件下的行为，从而指导新材料的开发。第四，研究者们还关注于有关复合材料的研究，例如，硬磁软材料，它是将硬磁颗粒嵌入到软聚合物基体中得到的一类磁响应复合材料，因为其在响应磁载荷时具有复杂、非拴系、可逆和快速变形的能力，所以它们在形状变形系统、软体机器人、生物医疗设备和主动超材料中得到了广泛的应用[16]。最后，本构关系的改进也是固体力学领域的一个重点。本构模型能够描述材料内部结构和物理化学性质与其宏观力学行为之间的关系，这对于预测材料的力学性能和优化设计至关重要。

总之，高性能材料力学是一个快速发展的领域，涉及材料的设计、制备、测试和模拟等多个方面。这些研究成果不仅增强了我们对材料力学行为的科学理解，也为实际工程问题的解决提供了强有力的工具。但是在高性能材料力学领域，还面临着很多挑战，例如：

- 1) 材料设计的多尺度模拟：为了实现从原子级别到宏观结构的全面理解，需要开发能够整合不同尺度信息的模拟工具。这包括分子动力学、有限元分析和其他计算材料科学的方法。
- 2) 可持续性问题的材料生命周期评估对于确保环境的可持续性至关重要。研究者需要开发绿色合成路径，减少能耗和废弃物的产生，同时保持材料的性能。
- 3) 复合材料的界面强化：高性能复合材料往往因为界面性能不佳而受到限制。改善纤维与基体之间

的结合力，提高材料的整体力学性能，是当前的研究重点之一。

4) 自修复材料的开发：材料在使用过程中不可避免会出现损伤。开发能够在损伤发生时自动修复的材料，可以显著延长材料的使用寿命并减少维护成本。

5) 功能集成与智能化：将传感器、执行器等功能集成到材料中，使材料能够响应外部刺激，实现智能化的自适应调节。等等许多具体的研究领域问题。

不过高性能材料力学领域未来方向因其快速发展的特点，使得其未来的研究将更加注重新学科交叉、可持续性以及智能化，以应对全球性的挑战并为人类社会的发展做出贡献，例如：人工智能与机器学习在材料设计中的应用，增材制造技术(3D 打印)的创新应用，纳米技术与微结构控制以及对环境友好型材料的开发等等。

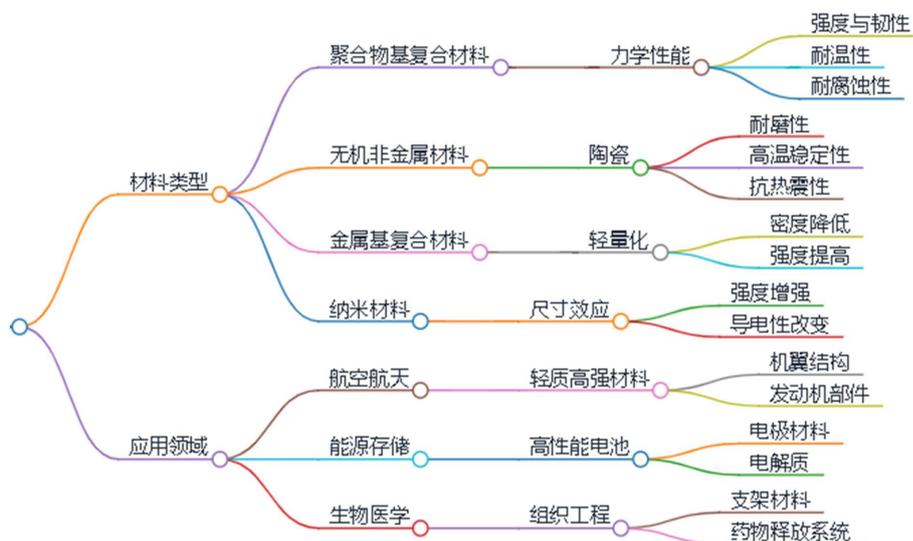


Figure 2. Recent research results on mechanics of high performance materials

图 2. 近年来高性能材料力学的研究成果

2.1.2. 多尺度建模和计算力学

国外的研究者广泛应用多尺度建模[17]和计算力学方法[18]，深入研究材料在不同尺度下的力学行为。例如，在金属材料的研究中，借助原子力显微镜和分子动力学模拟等技术，研究者能够观察到原子级别的位错运动和塑性变形过程，从而更好地理解材料的塑性机制。

2.1.3. 生物力学研究

生物力学是将固体力学应用于生物体的研究领域，其研究成果在医学和生物工程方面具有重要意义。国外的研究者在骨骼系统、人体关节和血管系统等方面进行了深入研究[19]，并开发了计算模型和仿真技术，用于研究力学环境对生物组织的影响和应变响应。

2.1.4. 结构优化和可持续设计

国外的研究者借助数值优化算法和先进的计算技术，开展了结构优化[20]和可持续设计[21]的研究。例如，他们通过模拟和优化方法，设计出更轻、更强、更节能的结构，以满足不同工程需求和环境要求。这些研究成果推动了高效结构的设计与制造，并促进了可持续发展的实践。

2.1.5. 前沿技术应用

固体力学的研究成果在前沿技术领域得到了广泛应用。例如，针对温度对于飞行器结构[22]材料影响

(见表 1)的研究成果推动了航空航天技术的发展,提高了飞机的安全性与性能。

Table 1. Physical properties of commonly used metallic materials
表 1. 常用金属材料的物理性能

金属名称	符号	密度(20°C) kg/m ³	熔点/°C	热导率 λ W/m·K	线膨胀系数 α (0~100°C) 10 ⁻⁶	电阻率 ρ 10 ⁻⁶ · Ω ·cm
银	Ag	10490	960.8	418.6	19.7	1.5
铜	Cu	8960	1083	393.5	17	1.67
铝	Al	2700	660	221.9	23.6	2.66
镁	Mg	1740	650	153.7	24.3	4.47
钨	W	19300	3380	166.2	4.6	5.1
镍	Ni	8500	1453	92.1	13.4	6.84
铁	Fe	7870	1538	75.4	11.76	9.7
锡	Sn	7300	232	62.8	2.3	11.5
铬	Cr	7190	1903	67	6.2	12.9
钛	Ti	4508	1677	15.1	8.2	45
锰	Mn	7430	1244	4.98 (-192)	37	185

此外,固体力学的研究成果还在新兴领域,如:柔性电子学[23]和 3D 打印[24]方面发挥了重要作用,为这些新技术的性能和可靠性提供了理论基础和设计指导。通过这些例子,我们可以看到国外固体力学领域的研究成果非常丰富和多样化。这些成果不仅推动了材料和结构领域的进步,也为解决工程实际问题和推动科学研究提供了关键的支持。

2.2. 国内研究

固体力学作为一门重要的学科,在国内也得到了长足的发展和进步。国内固体力学研究的发展起源于上世纪 50 年代,当时,国内学者主要关注弹性力学和塑性力学方面的基础研究。在弹性力学理论研究方面:中国学者在弹性理论、弹性杆件的强度计算、弹性材料的本构关系等方面进行了初步的研究;在塑性力学理论研究方面:中国学者在塑性理论、塑性杆件的强度计算、塑性材料的本构关系等方面做出了重要的贡献;在断裂力学研究方面:中国学者在断裂力学理论、断裂强度计算、断裂韧性计算等方面也做出了重要的贡献。总的来说,上世纪 50 年代,中国固体力学的研究虽然还比较初步,但是已经取得了一些重要的成果,为后续的固体力学研究奠定了基础。随着工程领域的不断发展,固体力学开始广泛应用于工程结构、建筑设计、材料工程和航空航天等领域。80 年代以后,随着计算机技术的普及,有限元分析成为国内固体力学研究的主要方法之一。从那时起,国内固体力学研究迅速发展,涌现出大量的具有国际水平的研究成果。在 20 世纪初期至中期,这一阶段,中国学者开始接触和学习西方的固体力学理论,如弹性力学、塑性力学、断裂力学等。20 世纪中后期,中国学者在固体力学的研究上取得了显著的成果,如弹性理论、塑性理论、断裂理论、复合材料力学等领域的研究。

21 世纪初至今,随着科技的进步和社会的发展,固体力学的研究领域进一步拓宽,包括纳米力学、生物力学、环境力学等新兴领域。中国学者在固体力学的理论研究上取得了一系列的成果,发展了一些新的理论模型和方法,解决了一些重要的理论问题。例如:在 2023 年 10 月份董树林,金宁,李晶等学者在《离轴四反光学系统的多物理场耦合仿真》提出了一种基于有限元仿真分析软件 COMSOL Multiphysics,耦合固体传热学、固体力学以及几何光学的多物理场耦合建模方法[25]。光机热仿真是利用计算

机模拟技术,对光学、机械和热力学等多个学科领域的相互作用进行仿真分析,以预测和优化系统的性能和可靠性,是一种预测光学系统光学性能及结构优化的有效手段。这种仿真技术可以帮助工程师在产品设计和制造过程中,快速地发现和解决潜在的问题,提高产品的质量和性能。几位学者的发现为后续开展光学系统的优化提供了一种有效手段,使光机热仿真在各个领域更可靠,广泛的应用。此外,中国的固体力学研究者也取得了一系列重要的研究成果。

2.2.1. 纳米力学研究

纳米力学是固体力学的一个分支,中国学者在纳米材料力学性质、纳米材料的本构关系、纳米材料的力学行为进行研究。由于纳米尺度下物体的尺寸和结构与宏观物体有很大的不同(见图 3)。

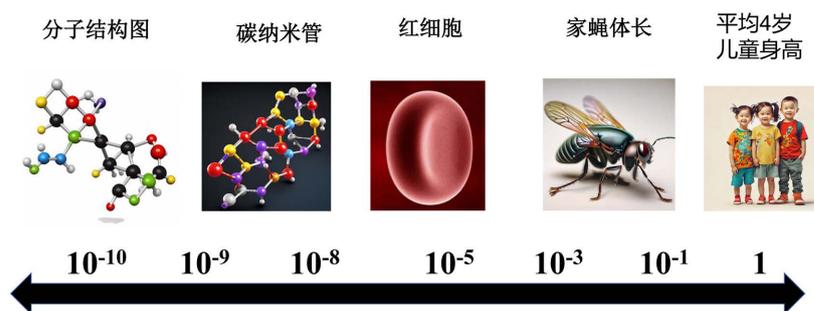


Figure 3. Schematic representation of the nanoscale
图 3. 纳米尺度示意图

因此纳米力学的研究具有很大的挑战性和重要性。纳米力学的研究对于纳米材料的应用和开发具有重要意义。例如,纳米材料在电子器件、能源材料[26]、生物医学、环境保护等领域都有广泛的应用,而纳米力学的研究则为纳米材料的应用和开发提供了重要的理论和技术支持。

2.2.2. 生物力学研究

上文提及到了国外的研究者在生物力学方面的研究。国内的固体力学研究者也对生物力学展开了一系列的研究。例如:李博闻在 2023 年 8 月份发表的《不同类型篮球运动员 ACL 损伤危险因素的随机生物力学模型分析》中用随机生物力学模型,对专业和非专业的篮球运动员进行比较分析,探讨影响 ACL 损伤的各种因素,如运动员的身体素质、技术水平、训练方法和使用的装备等[27],由此可知,国内在生物力学模型研究和应用方面有很大的进步与发展。除了在生物力学模型方面的研究,国内的学者也在生物组织力学[28]、生物力学实验技术等方面做出了重要的贡献。

2.2.3. 环境力学研究

中国的环境力学研究始于 20 世纪 80 年代,目前已经成为中国力学领域的重要研究方向之一。环境力学研究的主要内容包括环境介质力学、环境工程力学、环境污染控制等方面。中国的环境力学研究在过去几十年中取得了长足的进展,涌现出了许多优秀的学者和研究成果。例如:刘莉,王利行,张正在 2023 年 8 月份发表了一篇《航空航天飞行器热端部件用高温材料极端环境力学性能测试标准分析及展望》[29],这篇文章对极端环境材料力学性能测试技术及相关标准体系建设提出展望,给其他的学者提供了一个全新的视角。未来,随着环境问题的日益突出和人们对环境保护的重视程度不断提高,中国的环境力学研究将面临更加广阔的发展空间和机遇。

2.2.4. 非线性力学研究

中国对非线性力学的研究涵盖了非线性弹性力学、非线性塑性力学、非线性流体力学、非线性电磁

力学等多个领域，涉及到多个学科领域，例如数学、物理、化学等。在理论方面，中国学者在非线弹性力学、非线性塑性力学、非线性流体力学、非线性电磁力学等领域都做出了重要的贡献，提出了一系列新的理论模型和方法，为非线性力学的发展做出了重要的贡献。例如：明瑞典，刘云飞，王计真等人在 2023 年 8 月份发表了一篇《数据/物理驱动的复合材料非线性力学响应代理模型》[30]，这篇综述通过对代表性体积单元等效力学行为的预测，综合对比分析了三种代理模型在计算效率、精度和适用性等方面的表现，为平衡数据驱动和物理解释性、建立有效的复合材料力学响应代理模型提供了参考。非线性力学的研究对于工程领域和科学研究都具有重要的意义。例如，在工程领域中，非线性力学的研究可以为材料设计和结构优化[31]提供理论基础和技术支持，提高工程结构的安全性和可靠性。在科学研究中，非线性力学的研究可以揭示自然界中的复杂现象和规律[32]，推动物理学、材料科学、生命科学等领域的发展。

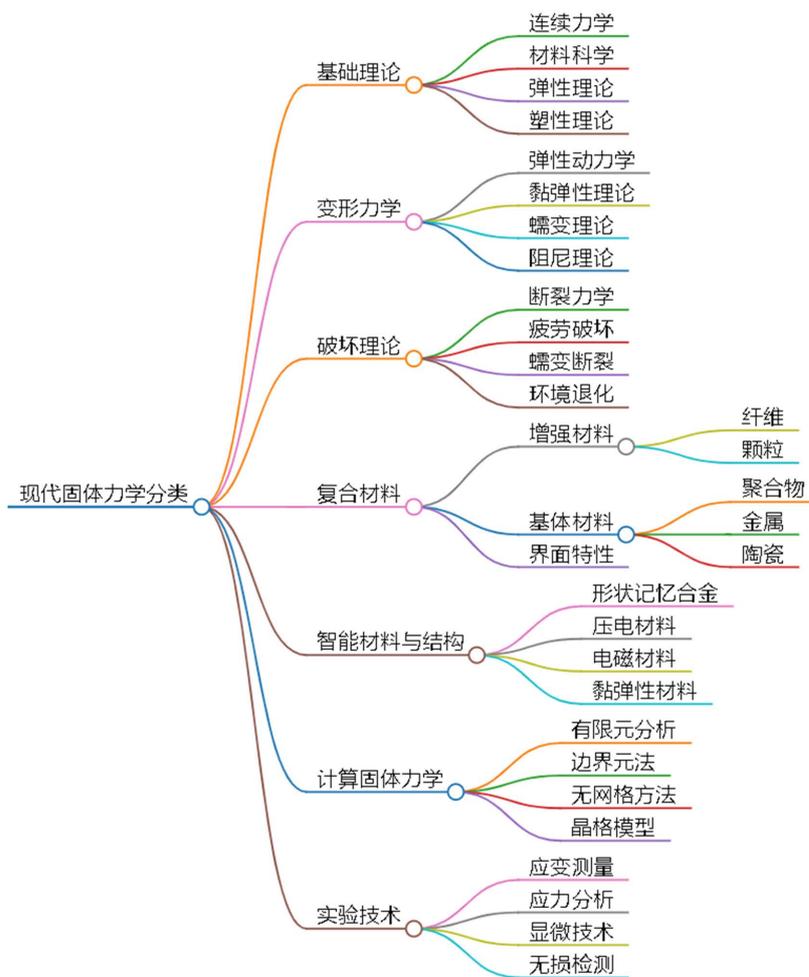


Figure 4. Classification of modern solid mechanics
图 4. 现代固体力学分类情况

2.2.5. 智能材料力学研究

中国的智能材料力学研究在理论和应用方面都取得了很多重要的成果。现如今，中国的智能材料力学研究团队在国际会议和期刊上发表了大量高水平的论文，并与国际上的同行进行了广泛的合作和交流。在理论方面，中国学者在智能材料的力学性质、力学行为、力学性能等方面做出了重要的贡献，提出了

一系列新的理论模型和方法,例如:吕海宝在2018年3月份发表了《智能材料与结构力学》[33],在这篇文章中,吕海宝通过研究智能材料与结构力学交叉的基础领域,解决了力学和物理学一些重要的基础交叉科学问题,为实现其在仿生医学、航空航天等重要领域的应用提供了理论基础,且在国际上产生重要影响,为智能材料力学的发展做出了重要的贡献。在应用方面,中国的智能材料力学研究也取得了显著的成就,例如在材料设计[34]、结构优化[35]、纳米力学[36]、流体力学等领域都有广泛的应用。此外,中国的智能材料力学研究也得到了政府和企业的大力支持,为智能材料力学的发展提供了良好的环境和条件。

3. 结论

固体力学作为一门重要的学科,近几年来在力学模型、应力分析、材料力学和结构力学等方面取得了许多重要的研究成果。这些研究成果不仅有助于推动固体力学领域的发展,逐渐增加以及完善现今固体力学的分类(见图4),也为工程实践提供了理论基础和技术支持。

然而,固体力学研究领域虽然取得了重要的进展,但仍然面临着一些挑战,这些挑战可能来自于以下几个方面:第一,随着科技的发展,新型复杂材料和结构的出现给固体力学研究带来了新的挑战。复合材料、纳米材料和多层结构等材料的非线性和多尺度特性,以及微观结构对宏观行为的影响是研究者需要解决的难题。对这些材料和结构进行力学分析和性能预测需要发展新的模型和方法。第二,是关于固体力学的科学计算的问题,在某些工程和科学应用中,材料和结构可能会发生大变形和非线性行为,在这些情况下,经典的线性弹性力学模型无法准确描述材料和结构的行为。因此,研究者需要开发更准确和适用的非线性力学模型和数值方法,以更好地预测和理解材料和结构的响应。第三,大数据和机器学习技术的快速发展为固体力学研究带来了新的机遇和挑战,通过利用大量实验数据和模拟数据,研究者可以发展出更准确和高效的模型,并提供更全面的材料和结构性能预测等等。如今,固体力学的研究面临着复杂材料和结构、大变形和非线性行为、环境和可持续发展、多物理场耦合以及数据驱动和机器学习等挑战,如何有效地整合和利用这些数据,并建立可靠的机器学习模型,仍然是一个需要解决的问题。为了解决这些挑战就需要继续发展先进的力学模型、数值方法和实验技术,并加强跨学科合作和知识交流。通过克服这些挑战,固体力学研究将为解决实际工程问题和推动科学发展做出更大的贡献。希望该文献综述在某种程度上能够为固体力学研究者提供参考和帮助。

参考文献

- [1] 詹世革,孟庆国.从国家自然科学基金的申请与资助看固体力学的发展[J].固体力学学报,2010,31(5):433-439.
- [2] 张妙,张载松.固体力学之我见[J].才智,2010(17):179.
- [3] 黄廖山.固体力学发展趋势之我见[J].引进与咨询,2003(9):1-2,5.
- [4] 杨泽天.固体力学的发展及其在航空航天工程中的应用研究[J].中国设备工程,2022(13):116-118.
- [5] 王敏.量子力学的发展历史及其应用[J].数字技术与应用,2014(1):57-58.
- [6] 余寿文.牛顿力学体系中固体力学研究框架的几点笔记[J].力学与实践,2020,42(1):110-115.
- [7] 武际可.北京大学力学系简介[J].力学与实践,1982,4(1):72-73.
- [8] 范长敏.我国第一颗人造卫星上的“宜昌元素”[J].湖北文史,2023(1):32-37.
- [9] 石仲泉.周恩来与“两弹一星”上天工程(下)——为纪念周恩来诞辰125周年而作[J].中国延安干部学院学报,2023,16(3):52-74.
- [10] 秦嘉政,周雨.守卫蓝天的战鹰——中华人民共和国战斗机发展史[J].百科探秘(航空航天),2022(7):5-21.
- [11] 郑哲敏.力学——自然科学学科发展战略调研报告[M].哲敏文集.北京:科学出版社,2004:11.
- [12] 陈立群.理论力学课程中的历史人物及其相关工作[J].力学与实践,2012,34(3):70-74.

- [13] 刘沛清, 赵芸可. 伯努利方程对流体力学理论建立的历史贡献[J]. 力学与实践, 2020, 42(2): 258-264.
- [14] 刘雪成. 克利福德代数与电动力学[J]. 自然杂志, 1989(3): 211-213.
- [15] dos Santos Oliveira, E. and Nackenhorst, U. (2024) Sparse Polynomial Chaos Expansion for High-Dimensional Non-linear Damage Mechanics. *Probabilistic Engineering Mechanics*, **75**, Article ID: 103556. <https://doi.org/10.1016/j.probengmech.2023.103556>
- [16] Lu, L., Jay, S. and Renee, R.Z. (2024) Mechanics of Hard-Magnetic Soft Materials: A Review. *Mechanics of Materials*, **189**, Article ID: 104874. <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2023.104874>
- [17] Li, X.N., Zuo, X.B., Li, L. and Liu, J.H. (2024) Multiscale Modeling and Simulation on Mechanical Behavior of Fiber Reinforced Concrete. *International Journal of Solids and Structures*, **286-287**, Article ID: 112569. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2023.112569>
- [18] Hille, H.C., Kumar, S. and De Lorenzis, L. (2023) Enhanced Floating Isogeometric Analysis. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, **417**, Article ID: 116346. <https://doi.org/10.1016/j.cma.2023.116346>
- [19] Francesco, C., Nathalie, A., Maria, S., et al. (2024) ISB Clinical Biomechanics Award Winner 2023: Medial Gastrocnemius Muscle and Achilles Tendon Interplay during Gait in Cerebral Palsy. *Clinical Biomechanics*, **111**, Article ID: 106158.
- [20] Zhang, C.L., He, Z.C., Li, Q.Q., et al. (2023) Cross-Section Optimization of Vehicle Body through Multi-Objective Intelligence Adaptive Optimization Algorithm. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, **66**, Article No. 38. <https://doi.org/10.1007/s00158-023-03499-8>
- [21] Oluwaseun, D. and Clinton, A. (2018) Sustainable Design and Construction in Africa: A System Dynamics Approach. CRC Press, London. <https://doi.org/10.1201/9781351212205>
- [22] Fu, X.W., Wang, J.F. and Ren, Y.R. (2022) Research on High-Temperature Resistant Resin Matrix Composites of Hypersonic Aircraft Structure. *Journal of Physics: Conference Series*, **2228**, Article ID: 012014. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2228/1/012014>
- [23] Kumar, A.K., Tuan, A.H., Duo, X., et al. (2023) 2D Materials in Flexible Electronics: Recent Advances and Future Prospectives. *Chemical Reviews*, **124**, 318-419.
- [24] Alarifi, I.M. (2023) PETG/Carbon Fiber Composites with Different Structures Produced by 3D Printing. *Polymer Testing*, **120**, Article ID: 107949. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2023.107949>
- [25] 董树林, 金宁, 李晶, 等. 离轴四反光学系统的多物理场耦合仿真[J]. 红外技术, 2023, 45(10): 1084-1089.
- [26] 戎贤, 刘静杰, 陈庞, 等. 纳米 SiO₂ 对海砂碱矿渣砂浆高温力学性能的影响[J]. 硅酸盐学报, 2024, 52(2): 652-660.
- [27] 李博闻. 不同类型篮球运动员 ACL 损伤危险因素随机生物力学模型分析[J]. 体育科技文献通报, 2023, 31(8): 243-247.
- [28] 张雯, 谢文强, 邵龙泉, 等. Cu 对 SLM 成形 CoCrMoW 合金的力学行为及抗菌性能的影响机制[J/OL]. 材料科学与工艺: 1-10. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1345.TB.20231123.0920.004.html>, 2023-12-15.
- [29] 刘莉, 王利行, 张正. 航空航天飞行器热端部件用高温材料极端环境力学性能测试标准分析及展望[J]. 居业, 2023(9): 185-189.
- [30] 明瑞典, 刘云飞, 王计真, 等. 数据/物理驱动的复合材料非线性力学响应代理模型[J/OL]. 计算力学学报: 1-8. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1373.O3.20230828.1816.016.html>, 2023-12-22.
- [31] 黄优, 潘宇, 肖滨, 等. 考虑温湿度作用的粒料基层沥青路面结构非线性力学行为[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2024, 44(1): 24-35.
- [32] 卿少帅, 陈新, 马伯涛. 节理尺寸对岩体非线性力学行为的影响研究[J]. 金属矿山, 2023(6): 1-12.
- [33] 钟轶峰, 矫立超, 周小平, 等. 智能材料电-磁-热-弹耦合性能的细观力学模型[J]. 复合材料学报, 2016, 33(8): 1725-1732. <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20151214.002>
- [34] 王跃方, 杨大智, 陈骝馥, 等. 含形状记忆合金智能材料系统的力学分析与设计研究[J]. 功能材料, 2000(6): 569-571+576.
- [35] 罗伟峰. 多场耦合下智能材料圆柱结构的力学行为研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 湖南大学, 2017.
- [36] 孟庆国, 詹世革. 如家温暖相互激发跨越宏微——记清华大学“微/纳米尺度力学与智能材料的力学”创新研究群体[J]. 中国科学基金, 2006, 20(1): 25-28.