

PHYSICAL
MECHANICS
FRONTIER

物理力学前沿

—— 卷 II ——

周益春 等/编著



科学出版社

非外借

物理力学前沿·卷 II

周益春 等 编著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书分卷 I 和卷 II 两部,对我国物理力学的科学发展以及相关领域近十年做出的成绩进行了简要的介绍,由几十位物理力学领域的专家撰写。卷 I 包括绪论和三个主题:第一篇复杂流体物理力学,第二篇固体介质和表界面物理力学,第三篇高压物理力学。卷 II 包括两个主题:第四篇激光物理力学,第五篇空间环境效应物理力学。

本书可供物理力学等相关专业的本科生、研究生以及科研人员参考和使用。

图书在版编目(CIP)数据

物理力学前沿·卷 II/周益春等编著. —北京:科学出版社,2018.12

ISBN 978-7-03-058393-2

I. ①物… II. ①周… III. ①物理力学 IV. ①O369

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 171495 号

责任编辑:刘凤娟 孔晓慧 / 责任校对:彭珍珍

责任印制:张 伟 / 封面设计:陈玉凤

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京虎彩文化传播有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018 年 12 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2018 年 12 月第一次印刷 印张:31 1/2

字数:614 000

定价:199.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

《物理力学前沿》第一届编撰委员会

主 编：周益春

编 委 (按姓氏拼音排列)：

韩增尧 姜利祥 石安华 王红岩

许晓军 杨 丽 祝文军

序

“物理力学”是钱学森先生在 20 世纪 50 年代初基于国内重大工程需求提出的新兴学科，其核心思想是从物质的微观结构和运动规律出发，研究和揭示物质的宏观性质和运动规律。钱学森先生指出，在物质原子层次理论已经比较清楚和计算手段日趋强大的“今天”，物理力学在高温高压等极端环境下物质的性质、新型材料和微结构的设计、高温超导机制、薄膜技术及分子水平医学问题等诸多领域都具有巨大的应用潜力。后来在苟清泉等老一辈科学家带领下，经过几代科学家的努力，物理力学的研究方法和研究内容得到了极大的丰富和发展，目前已经成为以原子、分子微观物理机制为基础，研究介质的宏观力学性质，并服务于重大工程科学的力学学科的一个重要分支。数十年来，物理力学领域的研究工作者秉承钱学森先生的学术思想，在航空航天工程、激光武器、高温高压下材料的演化和失效、新型材料及其微纳器件的设计等领域取得了重要的突破，为国家重大工程做出了不可磨灭的贡献。

半个世纪以来，在物理力学领域的研究工作者和中国力学学会历届物理力学专业委员会的推动下，物理力学学科建设已日趋成熟和规范化，物理力学的研究队伍已经得到了较大的发展和壮大，同时对国内外的科技发展也已产生了深远的影响。钱学森先生曾说，对于物理力学学科的宣传，我们要采取“攻势”。一个学科的发展，除了要依靠本学科研究人员的努力外，也离不开外部的认可与支持。对学科方向的凝练和宣传，是物理力学专业委员会的重要职责之一。第七届物理力学专业委员会在周益春教授的带领下在这方面做了很多努力，包括组织各类学术会议、组织编写《大百科全书》物理力学相关的词条、扩充国家自然科学基金委员会的相关学科方向及其关键词等。这些工作在凝练物理力学的学科方向、稳定和壮大物理力学的研究队伍、提升物理力学学科的影响力等方面都发挥了重要作用。

该书就是在周益春教授及第七届物理力学专业委员会的倡议下，为进一步促进物理力学学科发展而发起并编纂的，里面包括了国内很多科研工作者的重要创新性成果，涉及了复杂流体物理力学、固体介质和表界面物理力学、高压物理力学、激光物理力学、空间环境效应物理力学等诸多方面，既有深入的理论研究，也有重大的工程应用研究。我认为这是一个很好的尝试。“物理力学前沿”丛书给物理力学领域的学者提供了一个很好的研讨和展示平台，对促进物理力学的发展将具有重要的意义。期望物理力学领域的科学家和年轻学者能树立信心，以此丛书的出版为契机，努力在物理力学学科砥砺前行，将钱学森先生的物理力学思想继承和

发扬光大。我相信物理力学学科将在我国的工程科学领域做出更重要的贡献！
为此，我乐于作序并向读者推荐该书。

赵伊君

2018 年 5 月 20 日

目 录

物理力学前沿·卷 II

序

第四篇 激光物理力学

第 12 章 高能光泵浦气体激光器研究进展	407
12.1 半导体泵浦碱金属蒸气激光器	409
12.1.1 DPAL 基本原理	409
12.1.2 DPAL 的发展历程	412
12.1.3 类 DPAL 激光器	415
12.1.4 DPAL 与物理力学	418
12.2 半导体泵浦纳米气体激光器	422
12.2.1 半导体纳米气体激光器概念的诞生和原理	422
12.2.2 半导体纳米气体激光器的模型分析	424
12.2.3 半导体纳米气体激光器的底层需求	425
12.3 总结	428
参考文献	428
第 13 章 化学激光中的物理力学问题	433
13.1 化学激光反应动力学研究	434
13.1.1 化学反应速率	435
13.1.2 分子反应碰撞理论	437
13.2 气体动力学研究	441
13.2.1 喷管流场的多组分非黏性模型	442
13.2.2 多组分气体输运系数	445
13.3 气动光学研究	447
13.3.1 腔内非均匀介质光束传输特性	447

13.3.2 高能激光通道热效应与有效传输效率问题研究	450
参考文献	458
第 14 章 高功率光纤激光研究进展	459
14.1 常规光纤激光器	459
14.2 高功率窄线宽光纤激光器	461
14.3 特殊波长光纤激光器	465
14.3.1 短波长光纤激光器	466
14.3.2 长波长光纤激光器	467
14.4 拉曼光纤激光器	469
14.4.1 常规拉曼光纤激光器	470
14.4.2 随机分布式反馈拉曼激光器	471
14.4.3 拉曼光纤放大器	473
14.4.4 混合增益光纤激光器	474
14.4.5 新动向	477
14.5 超快光纤激光器	478
14.5.1 空间结构	479
14.5.2 全光纤结构	482
14.6 2 μm 光纤激光器	484
14.6.1 高功率连续光纤光源	485
14.6.2 高功率脉冲光纤光源	491
14.6.3 高功率超荧光光纤光源	493
参考文献	494
第 15 章 我国近期激光惯性约束聚变物理实验与诊断技术研究进展	513
15.1 美国激光 ICF 点火实验及诊断主要进展简介	515
15.2 近期国内激光 ICF 实验研究进展	518
15.2.1 神光 II 物理实验	519
15.2.2 神光 III 原型物理实验	527
15.2.3 神光 III 主机黑腔内爆综合验证实验	534
15.3 国内 ICF 诊断技术主要进展	537
15.3.1 ICF 精密诊断特点及组成	537
15.3.2 近期发展有特色的诊断技术	538
15.4 总结	542
参考文献	543
第 16 章 激光干涉测量技术研究进展	545
16.1 激光干涉测速技术	545

16.1.1 激光速度干涉测量技术	546
16.1.2 全光纤位移干涉测量技术	548
16.1.3 双源混频测速技术	550
16.2 频域干涉测量技术	552
16.2.1 全光纤静态频域干涉测试技术	553
16.2.2 全光纤动态频域干涉测试技术	554
16.3 基于频域维度的全空间电磁波干涉测量研究设想	556
参考文献	556
第 17 章 光电探测系统与激光的相互作用机理	558
17.1 激光在光学系统内的传播	558
17.1.1 光学系统中的表面散射	558
17.1.2 光学系统中的衍射	562
17.2 激光对光电探测器的干扰	563
17.2.1 激光饱和干扰的一般规律	563
17.2.2 激光干扰中的一些特殊现象	565
17.3 激光对光电探测系统的损伤	574
17.3.1 激光对探测器的损伤	574
17.3.2 激光对光学组件的损伤	585
参考文献	594
第 18 章 连续波激光与材料/结构的能量耦合研究	596
18.1 激光能量耦合的概念	597
18.2 激光能量耦合系数的反演	598
18.3 反射率的测量	601
18.3.1 积分球测量中的不确定度分析	602
18.3.2 材料表面状态的问题	603
18.3.3 热辐射的影响及其处理	607
18.3.4 共轭反射计	609
18.4 激光辐照金属的高升温率能量耦合特性演化	610
18.4.1 热氧化	611
18.4.2 三层膜模型	613
18.4.3 反射率变化的微观结构分析	614
18.4.4 “状态冻结”法激光热氧化“历程还原”研究	615
18.4.5 多层氧化膜模型的再研究	620
18.5 复合材料/结构的激光能量耦合	623
18.5.1 涂覆层	623

18.5.2 树脂基玻璃纤维增强复合材料体吸收、面吸收的耦合机制转化	625
18.5.3 蜂窝夹层复合结构的激光能量耦合	626
18.5.4 碳纤维增强的树脂基复合材料	628
18.6 展望	630
参考文献	631

第五篇 空间环境效应物理力学

第 19 章 空间环境及其效应概述	637
19.1 引言	637
19.1.1 地球空间环境	637
19.1.2 太阳活动对地球空间环境的影响	638
19.1.3 空间环境效应	641
19.2 空间粒子辐射环境及其效应	642
19.2.1 概述	642
19.2.2 辐射物理基础	644
19.2.3 空间粒子辐射环境	646
19.2.4 空间粒子辐射环境效应	649
19.3 等离子体环境及其效应	652
19.3.1 概述	652
19.3.2 物理学基础	654
19.3.3 等离子体环境	655
19.3.4 等离子体环境效应	659
19.4 真空紫外环境及其效应	662
19.4.1 概述	662
19.4.2 物理学基础	662
19.4.3 真空紫外环境	664
19.4.4 真空紫外环境效应	666
19.5 中性大气环境及其效应	667
19.5.1 概述	667
19.5.2 物理学基础	667
19.5.3 中性大气环境	669
19.5.4 中性大气环境效应	672

19.6 微流星体/空间碎片环境及其效应	677
19.6.1 概述	677
19.6.2 物理学基础	677
19.6.3 微流星体/空间碎片环境	677
19.6.4 微流星体/空间碎片环境效应	679
参考文献	680
第 20 章 空间载荷部件物理力学应用及进展	683
20.1 空间载荷部件中的力学研究进展	683
20.1.1 有效载荷存在的物理力学问题概述	683
20.1.2 机械连接结构对空间载荷部件的主要影响	685
20.1.3 网状天线结构中的力学问题	686
20.2 微波无源部件物理力学应用	689
20.2.1 微波部件的力学微观接触	689
20.2.2 微观接触对微波部件的接触阻抗的影响分析	700
20.2.3 微波部件电连接接触非线性诱发的无源互调问题研究	705
20.2.4 小结	720
20.3 物理力学在网状天线无源互调分析中的应用	720
20.3.1 金属丝网接触结力学建模及性能分析	720
20.3.2 网状天线预张力对无源互调的影响规律	743
20.3.3 小结	765
20.4 总结	765
参考文献	765
第 21 章 空间环境下流体力学与传热传质	769
21.1 影响流体力学与传热传质的空间环境	769
21.1.1 空间重力环境	769
21.1.2 特殊大气压	770
21.2 空间不同重力环境下的两相流体力学及传热传质	771
21.2.1 不同重力场的影响分析	771
21.2.2 两相传热系统的空间应用	776
21.2.3 小结	786
21.3 空间蒸发/升华传热传质过程重力无关特征参数分析	786
21.3.1 空间蒸发/升华技术应用背景	786
21.3.2 水升华器工作过程描述	787
21.3.3 基于重力影响的无量纲准则数	788
21.3.4 重力条件对水升华器工作过程影响分析	788

21.3.5 重力条件对水升华器特征参数选取的影响	792
21.3.6 小结	796
21.4 火星表面气体夹层隔热效果评估	796
21.4.1 研究对象描述	796
21.4.2 仿真结果	796
21.4.3 实验验证	798
21.4.4 小结	799
21.5 总结	799
参考文献	800
第 22 章 空间碎片超高速撞击效应及防护技术	803
22.1 空间碎片环境模型	810
22.1.1 引言	810
22.1.2 微流星体环境模型	811
22.1.3 空间碎片环境模型	817
22.2 防护结构与撞击极限方程	822
22.2.1 引言	822
22.2.2 防护结构构型	823
22.2.3 防护材料	825
22.2.4 撞击极限方程	831
22.2.5 撞击极限方程建模方法	835
22.2.6 超高速撞击风险评估	835
22.3 超高速撞击地面实验	836
22.3.1 引言	836
22.3.2 超高速撞击实验设备	837
22.3.3 超高速撞击实验方法	843
22.3.4 超高速撞击实验数据处理	844
22.4 超高速撞击数值仿真	845
22.4.1 引言	845
22.4.2 超高速撞击数值仿真算法	846
22.4.3 超高速撞击材料模型	851
22.4.4 超高速撞击数值仿真软件	857
22.4.5 典型防护结构超高速撞击数值仿真	858
参考文献	862
第 23 章 等离子体诱发航天器表面带电的作用机理	865
23.1 地球空间等离子体环境分析	865

23.1.1 地球空间	865
23.1.2 表面带电现象	866
23.1.3 地球同步轨道	867
23.1.4 低地球轨道	868
23.2 航天器表面带电物理过程	869
23.2.1 物理过程	869
23.2.2 电流平衡方程	874
23.3 典型算例	881
23.3.1 航天器表面带电仿真分析	881
23.3.2 航天器太阳电池阵电流收集分析	886
23.3.3 利用模型分析不同空间环境下静电放电可能性	888
23.4 总结	889
参考文献	890

物理力学前沿·卷 I

序

第 0 章 绪论	1
----------------	---

第一篇 复杂流体物理力学

第 1 章 高超声速非平衡流计算模拟研究进展	19
第 2 章 以胶体模型体系研究奥斯特瓦尔德分步律的普适性	124

第二篇 固体介质和表界面物理力学

第 3 章 多尺度物理力学	141
第 4 章 界面基本力学问题的第一性原理计算研究	175
第 5 章 物理力学在铁电薄膜及其存储器当中的工程应用	236

第三篇 高压物理力学

第 6 章	基于同步辐射的 X 射线成像技术在静高压研究中的应用	283
第 7 章	磁驱动准等熵平面压缩和超高速飞片发射实验技术原理、装置 及应用	299
第 8 章	爆轰加载材料和结构动力学行为精密物理机制辨识和建模	322
第 9 章	极端条件下液体结构和物性的实验研究进展	336
第 10 章	金属材料在准等熵加载和冲击加载下的强度	357
第 11 章	延性金属动态拉伸断裂的损伤演化研究	387

第四篇 激光物理力学

第 12 章 高能光泵浦气体激光器研究进展

王红岩 杨子宁 华卫红 张超凡 许晓军

(国防科技大学前沿交叉学科学院)

气固融合光泵浦气体激光器是高能激光器的最新发展方向,它融合了气流化学激光和全固态激光各自的优势,有望在满足高能、高光束质量、高效率的基础上实现高效散热,彻底解决高能激光器的散热这一核心问题。高能光泵浦气体激光器最典型的代表是半导体泵浦碱金属蒸气激光器,本章详细介绍了其原理和国内外发展,特别是我们在碱金属蒸气激光器物理机制方面所做的大量工作,以及亟待利用物理力学思想解决的若干核心关键问题;在此基础上,简要介绍了自碱金属蒸气激光器概念衍生出的碱金属惰性气体准分子激光器、半导体泵浦亚稳态惰性气体激光器;随后介绍了最新的气固融合激光器——半导体纳米气体激光器,指出了物理力学在发展该激光器中不可替代的作用。

当前,全固态激光器 (ASSL) 正是高能激光的研究热点,自 2014 年美国海军 LaWS 光纤战术激光武器在彭斯舰服役之后,1 美元战争的概念开始为大众熟知,预示了一场新的军事变革即将诞生;与此同时,波音公司、洛克希德·马丁公司、莱茵金属公司等防务集团也纷纷推出装载在战车、无人机系统的 100kW 左右的 ASSL,甚至机动式的千瓦级单兵装备,说过去的十年是 ASSL 的黄金十年丝毫不为过。ASSL 的发展,得益于 20 世纪 90 年代起半导体激光的飞速发展,给固体介质提供了优质泵源;也得益于板条、薄片、光纤等大比表面积换热激光介质的不断发展;激光加工等工业需求的蓬勃发展又为 ASSL 的发展建立了宽广的产业基础。然而,在 ASSL 飞速发展的背景下,其单路输出功率却始终停留在 10kW 级,100kW 级的功率水平需要多路合束,至于更高的乃至兆瓦级的 ASSL,目前尚没有明确的技术路线。究其原因,是高能激光需要解决高效散热这一核心问题^[1],固体激光介质只能通过传导散热,且热导率都偏低,因而只能做成薄片、光纤等大比表面积结构,相应地也就导致了有限的模体积和其他技术障碍:对薄片激光来说,是复杂的泵浦结构和自发辐射 (ASE) 等^[2];对光纤激光器来说,则主要是各种非线性效应、模式不稳定性、光纤光暗化、光纤放电等^[3]。

与 ASSL 相比,气体介质具有均匀性好、无内应力,且可流动散热的显著优点。因此自 20 世纪 60 年代末以来,气体激光曾占据高能激光器核心地位达 40 年之久,