

现代物理基础丛书

36

低温等离子体

——等离子体的产生、工艺、
问题及前景

[俄] B. M. 弗尔曼 И. M. 扎什京 编著

邱励俭 译



科学出版社

现代物理基础丛书 36

低温等离子体

——等离子体的产生、工艺、问题及前景

[俄] B. M. 弗尔曼 И. M. 扎什京 编著

邱励俭 译



YZLI 0890093344

科学出版社

北京

图字号: 01-2008-2541

内 容 简 介

俄罗斯科学院西伯利亚分院理论与应用力学研究所在朱可夫院士的领导下于1990~2000年陆续出版了一套《低温等离子体丛书》，这是低温等离子体方面的巨著。鉴于其重要性，译者翻译了第20卷，以期对我国等离子体领域的研讨与应用有帮助。本书是《低温等离子体丛书》的结尾卷，总结了20世纪低温等离子体的理论与应用，既提出了存在的问题，又对今后的研究进行了展望。

本书可供低温等离子体领域的科研人员，等离子体化工设备的设计者、工程师以及相关专业的本科生和研究生参考。

© Г.Ю. Даутов, А.Н. Тимошевский, Б.А. Урюкови др., 2004

© Российская академия наук, 2004

© Оформление. Сибирская издательская фирма “Наука” РАН. Серия “Низкотемпературная плазма”. Основана в 1990 г., 2004

© Разработка. М. Ф. Жуков, 1990

本专著翻译版根据与ITAM SB RAS的协议出版。

图书在版编目(CIP)数据

低温等离子体: 等离子体的产生、工艺、问题及前景/(俄罗斯)弗尔曼, (俄罗斯)扎什京编著; 邱励俭译. —北京: 科学出版社, 2011.6

(现代物理基础丛书: 36)

ISBN 978-7-03-031341-6

I. ①低… II. ①弗… ②扎… ③邱… III. ①低温物理学: 等离子体物理学—高等学校—教材 IV. ①O53

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第103684号

责任编辑: 胡 凯 刘凤娟 / 责任校对: 朱光兰

责任印制: 钱玉芬 / 封面设计: 陈 敬

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

源海印刷有限责任公司印刷

科学出版社编务公司排版制作

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2011年6月第一版 开本: B5(720×1000)

2011年6月第一次印刷 印张: 24 1/2

印数: 1—2 000 字数: 465 000

定价: 78.00元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

译者序

译者在为俄罗斯科学院西伯利亚分院理论与应用力学研究所电弧放电物理实验室主任奇马舍夫斯基(А.Н.Тимошевский)博士等做翻译时得到这本书。同时,也得到《低温等离子体丛书》其他卷,从中了解到该研究所从20世纪50年代就开始研究低温等离子体,主要是研究宇宙飞行器再入大气层的问题——壁的烧蚀问题,这项工作的奠基者就是朱可夫。在他的领导下,该所建立了电弧风洞(差不多与美国国家航空航天局(NASA)同时),从那时起,就开始了低温等离子体的研究,并逐渐成为苏联低温等离子体研究的中心。该所广泛研究了等离子体发生器、等离子体化学、新材料、等离子体涂层及其在环境保护领域的应用、新型燃烧方式、处理废物等,是世界公认的等离子体研究中心。《低温等离子体丛书》前18卷是1990~2000年在朱可夫院士领导下陆续出版的,其时间之长、工作量之大毋庸置疑,可以说这是低温等离子体方面的巨著。译者认为,它对中国低温等离子体研究人员很有帮助,因此翻译了这套丛书的第20卷,希望对我国低温等离子体的研究与应用有帮助。

为了方便读者了解这套丛书的内容,现列出已出版的各卷名称:

- 第1卷 电弧柱理论
- 第2卷 低温等离子体的控制问题及动力学研究的数学方法
- 第3卷 等离子体化学
- 第4卷 等离子体化学工艺
- 第5卷 电弧燃烧的稳定性
- 第6卷 高频及超高频等离子体发生器
- 第7卷 在磁场里强流弧放电
- 第8卷 等离子体冶金
- 第9卷 低温等离子体诊断
- 第10卷 近电极区域过程的理论与计算
- 第11卷 阴极过程的数学模拟
- 第12卷 超细粉末的等离子体化学合成及其在金属和合金改性中的应用
- 第13卷 等离子体断层扫描(等离子体CT)
- 第14卷 用等离子体化学合成超细粉末来增强金属材料、聚合材料和弹性材料的性能

第 15 卷 基于等离子体喷涂理论和模型实验的合金水滴热物理碰撞机制

第 16 卷 等离子体无油点燃锅炉和煤粉火焰的稳定燃烧

第 17 卷 热等离子体电弧发生器

第 18 卷 材料加工中的高能量过程^①

第 20 卷是《低温等离子体丛书》的最后一卷，前 18 卷是在 1990~2000 年出版的，结尾卷本来计划总结 20 世纪低温等离子体的理论与应用：既提出存在的问题，又对今后的研究做出展望，可是这个工作由于 1998 年 12 月朱可夫的逝世而中断，他的学生及同事完成了最后一卷，并且决定今后再出版一套高温等离子体工艺过程方面的丛书。

邱励俭

2007 年 9 月

^① 《低温等离子体丛书》第 19 卷信息不详。——编辑注

前 言

《低温等离子体丛书》是由朱可夫(М. Ф. Жуков)院士提出并在他的直接领导下完成的,第20卷是其最后一卷。前18卷是在1990~2000年出版的,结尾卷本来计划总结20世纪低温等离子体领域取得的理论与应用方面的成果:既要提出存在的问题,又要对今后的研究方向做出展望。1998年12月朱可夫逝世,这项工作被迫中断。后来,他的学生及同事不仅完成了最后一卷的出版,而且决定出版一套高温等离子体工艺过程方面的丛书。

由于各种原因,第20卷的编写持续了几年,有人建议把这一卷作为朱可夫院士的悼念卷,以此来表彰他对低温等离子体学科发展所做的贡献。参与第20卷编写的有朱可夫的学生,也有他的同事,这些人对他的回忆都是很珍贵的,所以第20卷具有特殊的意义:除了回顾朱可夫取得的科学成就外,也囊括了他对这一领域未来的广泛兴趣。按照朱可夫的指示和建议,结尾卷既包括电弧等离子体理论与实验研究的总结,又包括低温等离子体在一些高温过程中非常有趣的工艺应用。第20卷分为三大部分:

第一部分有朱可夫传记,还有朱可夫自己写的一些文章,这些文章是关于新西伯利亚低温等离子体基地创建过程的,是为了纪念苏联科学院西伯利亚分院理论与应用力学研究所(ИТПМ СО РАН)成立40周年而撰写。第一部分还有一些朱可夫的学生和同事写的热情洋溢的文章以及他们对朱可夫的感谢。

第二部分主要总结低温等离子体发生器、电弧、流动气体理论和实验研究成果,这里不再重复前几卷已经得到的结果,只引出结论性数据,而这些数据是在最近几年取得的,指明了该领域的新方向(不仅包括俄罗斯,而且包括世界其他国家),既有解析解,也有数值模拟结果,这些内容既珍贵,又复杂(第3~6章、第10章)。在第二部分,总体上,实验研究是辅助的,只是为了说明在实际条件下的相应结果。但在复杂的电弧加热以及非寻常的气体如水蒸气、氢化物、氟化物里,实验研究是主要的(第7、8章)。第6章公布了一些有争议的观点,即电弧过程的复杂性,这也是朱可夫院士经常强调的。朱可夫学派的兴趣不仅仅局限于电弧等离子体,也关注另外一些类型的放电研究(第9~11章)。

事实上,低温等离子体的各种工艺过程在世界发达国家的工业中都已得到应用。第三部分主要集中在前几卷没有涉及或仅仅只有简单介绍的部分。第三部分的内容都是由相关领域的杰出专家撰写的,涉及范围很广,有生产新材料的研究

(第 12、16 章)、空气动力学方面的研究(第 13 章)、镀膜的研究(第 14、15 章)、等离子体化学工艺的研究(第 17、18 章)、能源领域的研究(第 19~21 章)、材料性能的增强研究(第 22、23 章)和阴极腐蚀的热机制研究(第 24 章)。

第 20 卷所引用的材料并不都和电弧放电有直接联系,参与的作者主要是朱可夫的学生和同事,他们的研究领域非常广泛,也是相应领域的领导者,他们把自己的工作写进来。所以第 20 卷和前几卷的传统写法不一样。我们在标题中仅仅写出 3 位主要作者,还有 50 多位学者参与编写,他们的工作在各章会提到。

第 20 卷编者深深感谢朱可夫的所有同事、支持者、学生及朋友。

俄罗斯科学院通讯院士
弗尔曼(В. М. Фомин)

俄罗斯科学院西伯利亚分院理论与应用力学研究所技术科学博士
扎什京(И. М. Засынкин)

朱可夫传记^①

朱可夫(М. Ф. Жуков)于1917年6月出生在阿尔罗夫州(Орлов)。他的父亲是铁路车站工人。1931年朱可夫中学(七年制)毕业,进入莫斯科轴承工厂附属函授学校学习。在那里他掌握了车工、钳工、铣工的专长,在工厂附属函授学校毕业后被推荐到“工人系”,入学便读了二年级,于1935年完成学业。

学习期间,他对天文和火箭技术非常感兴趣。“工人系”的学生有机会重新选择职业或进入大学,但要通过竞争。此时对于年轻的朱可夫来说,有一些困难,尽管他已经熟悉了许多高等学校的课程,但没有足够的生活经历。

这时,一个意外的机会不期而至,他写了一封信给当时的空气动力研究院著名学者车沃尔可夫斯基(К.Э.Циолковский)。朱可夫没指望车沃尔可夫斯基会回信,但他很快便收到回信。车沃尔可夫斯基当时被任命为莫斯科大学(МГУ)数学力学系教授,这封信决定了朱可夫的命运。1935年,他通过考试成为莫斯科大学的学生。

大学毕业,通常国家对高等学校大学生的预分配就没有了,相伴而来的是卫国战争的开始。

1941年,意想不到的新生活开始了,朱可夫没有像通常那样被派往大学担任教学工作,而是被派到茹可夫斯基中央气动研究所1号实验室做研究工作。在战争的前几个月,他曾在那里参加了火箭系统部分环节的计算工作。1941~1942年,朱可夫工作、生活在新西伯利亚,中央气动研究所的部分研究人员也撤退到那里。1941年9月,他在阿布拉莫维奇教授和乔连科夫副博士的直接领导下进行了涡轮发动机部件的估算,以满足研制新一代飞机提出的要求,而且完成了一些具体的国防任务。在完成这些任务时,他已经是高级工程师。

1943年,他们撤回莫斯科,继续在莫斯科中央空气研究院(ЦАГИ)开展工作。然后(1946~1956年)在巴拉诺夫中央航空发动机研究所(Центральный Институт Авиационного Моторостроения ЦИАМ им.П.В.Баранова),朱可夫以高级研究员的身份主管研究部。在中央航空发动机研究所工作期间,他攻读莫斯科航空学院研究生(1946~1949年),并于1950年取得副博士学位。朱可夫在中央航空发动机研究所进行了高水平的研究,从1942年开始研究新型发动机(超声速压气机)的一些部

^① 材料选自:俄罗斯科学院西伯利亚分院理论与应用力学研究所. 人物、时代、事件. 新西伯利亚出版社, 2000. 82~85

件。在研究部的这一时期，朱可夫(和伊利舍夫等)进行了各种形式绕流的理论实验研究，包括新一代航空发动机透平压气机叶栅和超声速或跨声速流动。为进行0.7~1.5马赫数的实验，就要建立一种专门的风洞，当时在世界上还没有这样的风洞。后来才知道，相同的工作在美国国家航空航天局(NASA)、苏联莫斯科中央空气研究院和朱可夫的研究部分别独立进行(当时是严格保密的)，这项研究对发展超声速航空起了很大作用。有趣的是，在用不同结构解决跨声速气动风洞的“扩散”问题时，三个研究单位的最后研究结果完全一样：在“扩散”喷管断面速度场有高度的均匀性，喷管形状具有普遍性，可以用部分气体经过喷管旁边的气道调节喷管出口速度。1952年结束这个工作后，朱可夫等曾经出版一本论文集《在跨声速和超声速下叶栅的理论与实验研究》。

从1956年起，朱可夫的科学兴趣转向研究等离子体气体放电，同时设计了强电弧等离子体发生器。由于当时苏联顺利地发射了洲际火箭，所以他对军事航空的兴趣降低了，他的研究方向发生了巨大的转变。

1954~1956年，朱可夫在航空工业科学院讲授气体动力学，所在教研室的名称是发动机理论、结构和计算教研室。当时，为了给学生备课，他写过几本参考书。同时，他在全苏机械制造函授学院授课，讲授理论力学。在理论与应用力学研究所研究生部和茹可夫斯基军事航空学院军事研究班里，朱可夫对储备高质量的人才给予了很大关注。

1959年1月，朱可夫接受了赫利斯坦诺维奇(С.А. Христиановича)院士的邀请，根据苏联科学院主席团的调令，他离开了中央航空发动机研究所，被任命为苏联科学院西伯利亚分院理论与应用力学研究所(Институт Теоритической и Прикладной Механики, ИТПМ)等离子体动力学研究室主任。从那时起，他开始了西伯利亚科学中心的科学和组织活动，并着手建立电弧放电实验室。

从那时起，朱可夫几十年的科学活动都和气体等离子体放电及其稳定性、邻近电极过程研究有关，包括高效电弧发生器的设计及其在低温等离子体过程中的应用。

电弧放电实验室的建立为今后建立宏大的等离子体部奠定了基础，等离子体部里的高水平博士、副博士就是在研究所中成长的。为了深刻地理解发生在电弧发生器里的等离子体复杂现象(在电极表面和其他过程中的现象)，等离子体部培养了很多交叉学科如冶金、气体动力学、热物理、化学等学科方面的专家。

1959年3月，根据苏联科学院西伯利亚分院主席团的任命，朱可夫担任苏联科学院西伯利亚分院理论与应用力学研究所副所长，主管科学工作。开始的两年，他不得不花费大量精力去建设该研究所行政大楼和气动力学大楼、压气机和储气站。1961年负责这项工作的副总工程师被撤换，他接手了副总工程师的工作。

1962年,朱可夫完成了博士论文答辩。1965年,赫利斯坦诺维奇院士回到莫斯科,在这个过渡时期(1965年5月至1966年8月),实际上是朱可夫在领导该研究所。

1966年8月,斯特鲁曼斯基(В.В. Струминский)院士被任命为理论与应用力学研究所所长。朱可夫担任副所长,同时他还领导等离子体动力学部。1968年,朱可夫当选为苏联科学院通信院士。

1970年,根据苏联国家科学技术委员会(ГКНТ СССР)关于调整科学力量的决议,苏联科学院西伯利亚分院主席团(СО АН СССР)决定将等离子体动力学部全体成员与研究方向合并到苏联科学院西伯利亚分院热物理研究所(Институт Теплофизики СО АН СССР)。1996年,根据俄罗斯科学院西伯利亚分院主席团176号决议(发布于1996年7月15日),将等离子体动力学部重新搬回理论与应用力学研究所,在这里已经形成了整个的研究基础,因为那时国家遭受严重的财政危机,电能开始涨价,在热物理研究所不可能完成实验基地的建设,通过研究所和实验室的共同努力,原有的课题才得以被保留,并有被扩大的可能。

1970年底,根据那维宾也法院士(М.А.Лаврентьев)的倡议,在新西伯利亚城建立了一个设计局“Энергохиммаш”(现在叫新西伯利亚化工机械局),里面有专门的能源化学机械设计部门,专门设计与等离子体技术有关的工艺过程,从最开始,朱可夫就是设计局的科学领导(顾问)。

朱可夫1975~1990年成为苏联科学院西伯利亚分院主席团成员,1975~1980年兼任苏联科学院西伯利亚分院主席团秘书长。

由于在卫国战争期间的忘我工作、多年来富有成效的科学活动以及在培养高素质科技干部工作中的巨大贡献,朱可夫被授予卫国战争劳动奖章,劳动红旗勋章,十月革命勋章,人民友谊勋章,卫国战争胜利30周年、40周年、50周年奖章(对应1975年、1985年、1995年)，“劳动能手”奖章。

1981年,朱可夫因组织保加利亚科学院和苏联科学院在科学技术上的合作而被保加利亚科学院授予奖状。

1982年,由于在气体放电等离子体过程中卓有成效的研究以及在建立高效的低温等离子体发生器方面的贡献,朱可夫和同事乌留科夫(Б.А.Урюков)以及许多部门的学者都被授予苏联国家奖。由于“高温下的热交换”,朱可夫与卢卡索夫(В.П.Лукашов)获得苏联科学院奖与捷克斯洛伐克科学院国家奖。

1995年,由于朱可夫出色的科学研究工作,吉尔吉斯斯坦授予他荣誉奖状。

15年中,朱可夫一直担任苏联科学院西伯利亚分院《科学通报》主编、*Beitrag Plasmafysik* 杂志编委、苏联科学院杂志《建立新材料的科学基础》学术委员会主席。他参与撰写了230篇文章、12本专著,并拥有很多专利,还是20卷《低温等离子体丛书》的主要倡导者和主编,1990~1996年,这套丛书出版了16卷。

1992年,朱可夫被选为火箭与航空科学院院士、工程科学院荣誉成员。1995年,他成为国际能源科学院成员。

朱可夫具有一种锲而不舍的精神,他对培养高水平的科研人员非常关心,不论是在等离子体动力学部还是在其他单位——那些做了类似题目的单位(包括苏联加盟共和国的研究所)都是如此。

由于朱可夫及其学生的努力,俄罗斯科学院西伯利亚分院科学城创立的低温等离子体物理学派在俄罗斯和国际上得到承认,在乌克兰的基辅(Киев)、阿尔马塔(Алма-Ате)、比什凯克(Бишкеке)和圣彼得堡(Санкт-Петербурге)等很多城市都有低温等离子体学派。朱可夫花了很大的精力组织全苏联以及国际等离子体的讨论会和学术会议。1976~1995年,在近20年里,他领导了区域性西伯利亚计划,这是具有国家意义的科学研究和应用纲领长期规划,也是“新材料与工艺”的重要部分。这个部分包括两个重要的任务:在设计的方法、工艺上允许实现封闭循环经济(生态的)、环节少(节省能源)、过程快(节省金属)、自动化简单(省劳力)、新材料的机械设计;最大限度地促进高等学校人才的培养,包括出版专著、教科书、直接参加教学过程(演讲)。

对自己严格要求,对同事的意见高度尊重,专注科技进展,深切关心战友的命运。这就是朱可夫在西伯利亚科技社会中令人高度尊敬的实质。

目 录

译者序
前言
朱可夫传记

第一部分 关于朱可夫院士

第 1 章 人物、时代、事件.....	3
第 2 章 学生、同事及朋友对朱可夫的怀念.....	11

第二部分 低温等离子体发生器

第 3 章 等离子体发生器中紊流流动的一些理论问题	25
3.1 电弧紊流流动的层流化	25
3.2 自稳电弧长度的等离子体发生器理论	29
第 4 章 电弧等离子体发生器中阴极表面自稳定的数学模型	33
引言	33
4.1 数学模型	34
4.2 计算结果	37
结论	41
第 5 章 电弧等离子体阳极特性的数值分析	42
引言	42
5.1 模型	43
5.2 计算方法	45
5.3 阳极等离子体的计算特性	50
结论	55
第 6 章 在电弧放电阴极上的电流与传热	56
引言	56
6.1 热发射阴极在“反常发射”的工况下得到的一些基本实验规律	58
6.2 由金属向等离子体发射的电子、平衡的发射电流密度与电子的逸出功	61
6.3 在阴极上的最终电流密度	63

6.4 在热发射阴极上的能量平衡、近阴极的电位降	67
结论	70
第 7 章 水蒸气等离子体的电弧产生	71
7.1 水蒸气等离子体的“奇特性”	71
7.2 水蒸气等离子体电弧发生器的主要系统方案分析	74
7.3 水蒸气旋涡等离子体发生器的工作特性	77
7.4 气旋等离子体发生器的稳定工作条件	78
7.5 蒸汽旋涡等离子体发生器的动力特性总结	86
7.6 蒸汽等离子体的实际应用	94
结论	100
第 8 章 用于 CF_4 的不同类型等离子体发生器的热性能和动力性能	102
8.1 直线等离子体发生器的研究	102
8.2 V 形等离子体发生器的研究	106
第 9 章 高频放电等离子体物理的研究及其实际应用	109
9.1 高频放电等离子体物理	109
9.2 高频放电等离子体诊断及发生在等离子体中的过程	115
9.3 高频放电在实际中的应用	118
第 10 章 模拟氩硅烷高频等离子体的化学成分	120
结论	123
第 11 章 带超声速气流的辉光放电等离子体发生器	124

第三部分 等离子体工艺过程

第 12 章 富勒烯与低温等离子体	139
12.1 什么叫富勒烯? 不长的历史	139
12.2 为什么富勒烯会引起这么大的兴趣	140
12.3 如何得到富勒烯	143
12.4 在电弧放电中富勒烯的形成	145
12.5 实验研究的结果	147
12.6 什么是含有富勒烯的炭灰	152
12.7 富勒烯生长过程的理论研究	158
第 13 章 利用等离子体发生器来研究超声速气流的控制	161
13.1 模型	162
13.2 等离子体发生器	164

13.3	实验结果	166
13.4	模型的跨声速绕流	168
13.5	实验方法	173
13.6	实验结果	175
13.7	测量结果的比较	178
13.8	实验结果与数值计算结果的比较	180
第 14 章	等离子体表面镀膜的成就	184
14.1	传统等离子体喷涂	184
14.2	空气等离子体喷涂	185
14.3	内部等离子体喷涂	186
14.4	超声速等离子体喷涂	187
14.5	多弧等离子体喷涂	188
	结论	189
第 15 章	基于等离子体喷涂理论和模型实验的合金水滴热物理碰撞机制	190
	引言	190
15.1	模拟物理的设备	192
15.2	形成金属氧化物“中间层”的理论基础	196
15.3	在金属基片上形成 YSZ “中间层”	200
	结论	208
第 16 章	合成与利用氮化硼领域中的新高潮	210
16.1	关于氮化硼的总论和在低压下合成立方氮化硼的相关问题	210
16.2	实验研究在立方氮化硼亚稳态合成基础上得到涂层	215
16.3	由硼混合物悬浮蒸气制成的氮化物膜化学涂层和碳氢化硼膜化学 涂层	223
16.4	用 $B_3N_3H_6$ 热解氮化硼得到的气体涂层	225
16.5	俄罗斯学者在六方氮化硼工作中的重要贡献	226
16.6	作为合成硼化铝的材料是六方氮化硼	228
16.7	研究含硼体系的反应剂相互作用机制的结果	230
	结论	231
第 17 章	加工碳氢化合物原料的等离子体化学工艺、有毒废物的无害化和 利用	232
	引言	232
17.1	加工含碳原料的等离子体化学过程的计算	233

17.2	由碳氢化合物原料得到乙炔	233
17.3	由煤生产乙炔	239
17.4	加工与利用化学生产过程中的废料	241
17.5	有毒的有机废物无害化	246
	结论	247
第 18 章	对固体废物的等离子体热加工	249
	引言	249
18.1	对火焰垃圾焚化工厂中形成的炉灰进行等离子体重熔	249
18.2	处理医用废物	253
18.3	用等离子体汽化处理环氧树脂废物	256
	结论	260
第 19 章	在燃烧煤粉的汽化过程中利用等离子体动力工艺改善生态及经济指标	261
	引言	261
19.1	等离子体动力工艺的基本原则和用它改善燃料的性能	262
19.2	煤粉热电站所用等离子体燃料系统的实际方案	266
19.3	综合的等离子体汽化器是提高煤的活性和锅炉的生态指标的重要手段	275
19.4	等离子体汽化和综合加工动力煤	278
	结论	279
第 20 章	煤的等离子体热化学准备工艺中分子动力学及热力学计算	281
	引言	281
20.1	等离子体燃烧煤粉火炬稳定的计算	281
20.2	两级等离子体-煤喷嘴的计算	284
20.3	等离子体燃烧时的能耗和两级喷嘴中空气流量再分配的关系	289
20.4	煤的热化学准备过程的热力学特性计算	293
20.5	在煤热化学准备燃烧时计算等离子体发生器的比能耗与功率	295
	结论	300
第 21 章	将等离子体燃烧系统应用于水煤燃料的燃烧	301
	引言	301
21.1	点燃与燃烧水煤燃料的过程特性	301
21.2	在燃烧水煤时利用等离子体点燃系统	303
21.3	水煤的反应能力与燃烧稳定性	306

结论	307
第 22 章 借助等离子体化学产生纳米材料涂层的铸型和砂芯来提高铸件的品质	308
第 23 章 研究强脉冲高频场和金属及合金的相互作用	312
23.1 过程的模拟	313
23.2 过程的实验研究	321
第 24 章 等离子体发生器中圆柱阴极腐蚀的热机制	326
参考文献	335
结束语	369
《现代物理基础丛书》已出版书目	371

第一部分 关于朱可夫院士