



核工业西南物理研究院科学技术丛书

核真空科学技术

VACUUM SCIENCE AND TECHNOLOGY
IN NUCLEAR ENGINEERING

朱毓坤 编著



原子能出版社

核工业西南物理研究院科学技术丛书

核真空科学技术

Vacuum Science and Technology in Nuclear Engineering

朱毓坤 编著

原子能出版社

图书在版编目(CIP)数据

核真空科学技术/朱毓坤编著. —北京:原子能出版社, 2010. 7
(核工业西南物理研究院科学技术丛书)
ISBN 978-7-5022-4952-6

I. ①核… II. ①朱… III. ①核技术:真空技术
IV. ①TL

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 106162 号

内 容 简 介

本书由三部分组成:一是核真空科学技术概论,二是核电站泄漏检测技术与辐照防护,三是核聚变真空科学技术。第一部分有 2 章,论述核能与核真空科学技术的内涵及其应用领域。第二部分有 6 章,阐述当代裂变能核电站的构成与泄漏检测技术,以及辐照防护技术等;第三部分有 12 章,论述核聚变装置的真空物理与技术,是本书的重点,它对将于 21 世纪中期运行的聚变能发电站的相关真空技术——真空室的电磁冲击振动与抗震支撑系统、真空室第一壁表面处理与维护、燃料气体注入和固体弹丸高速注入、聚变废气抽运与活性气体分离回收处理、准稳态真空参量时空分布的诊断测量、氦氛围下的泄漏检测,以及遥控处理等技术,作了全面系统地论述;对聚变真空技术的物理基础——等离子体、等离子体与真空室构体之间电磁相互作用,等离子体与器壁表面相互作用、表面物理、热力学及低温物理等,则作了简明的阐述。本书以工程技术实践为主,兼顾物理基础,以利于读者能独立地创新工作。

本书适合于核科学与工程、核电装置建造与运行、电子物理与技术,以及真空与低温技术等专业人员和管理人员的使用,也适合大学相关专业的本科生和研究生用作教材或参考书。对科学技术感兴趣的公众读者也可从阅读中得到借鉴和启迪。

核真空科学技术

出版发行 原子能出版社(北京市海淀区阜成路 43 号 100048)

责任编辑 付 真

技术编辑 丁怀兰

责任印制 潘玉玲

印 刷 保定市中华美凯印刷有限公司

经 销 全国新华书店

开 本 787 mm×1092 mm 1/16

印 张 22.125 字 数 552 千字 彩 页 8

版 次 2010 年 7 月第 1 版 2010 年 7 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5022-4952-6 定 价 88.00 元

网址:<http://www.aep.com.cn>

E-mail: atomep123@126.com

发行电话:010-68452845

版权所有 侵权必究



作者简介 ZUOZHEJIANJIE

朱毓坤 1935年12月出生于江苏省无锡市。1958年毕业于清华大学无线电工程系电真空技术专业，分配到北京原子能研究所核聚变与等离子体物理研究室工作。1965年起参加核工业西南物理研究院的创建及中国环流器一号（HL-1）托卡马克装置的建设。1984年任真空技术与表面物理研究室主任。1986年任研究员，中国“863”高技术能源领域聚变堆加料与排灰课题组组长。1989—1991年受聘为欧共体联合聚变研究所JET实验部的访问科学家，从事第一壁边界物理研究。1991—1996年任核工业西南物理研究院环流器专家组成员。1996年受聘为核工业总公司核材料元件无损检测中心工作委员。2004—2008年受聘为国防科技工业无损检测泄漏检测专业组成员。

1979年参与创建中国真空学会，任中国真空学会理事与《真空科学与技术》编委；1989—1997年任中国真空学会常务理事；1984—1993年任中国真空学会核真空技术专委会副主任委员；1993—1997年任中国真空学会质谱分析与检漏技术专委会副主任委员。

《核工业西南物理研究院科学技术丛书》

编审委员会

主 任 刘 永

副主任 童洪辉 段旭如

顾 问 李正武 (以下按姓氏笔画为序)

石秉仁 李晓东 朱毓坤 邱孝明 严建成 高庆弟

袁保山 秦运文 潘传红 董家齐

委 员 (按姓氏笔画为序)

丁玄同 王世庆 王全明 王爱科 冯开明 李 强

刘德权 许增裕 陈庆川 陈燎原 张一鸣 张年满

杨青巍 饶 军 宣伟民

办公室

主 任 张一鸣

成 员 (按姓氏笔画为序)

丁亚清 肖成罄 张 利 曾丽萍

《核工业西南物理研究院科学技术丛书》

编辑工作委员会

主 任 侯惠群

副主任 杨树录

委 员 (按姓氏笔画为序)

丁怀兰 王艳丽 付 真 孙凤春 刘 朔 李 宁
杨树录 张关铭 张铎清 赵志军 侯惠群 谭 俊

编辑工作小组

组 长 杨树录

副组长 丁怀兰 赵志军

成 员 (按姓氏笔画为序)

丁怀兰 付 真 孙凤春 李 宁 杨树录 赵志军
谭 俊

总 序

核工业西南物理研究院是我国最早从事核聚变能源开发的大型专业研究院,作为中国聚变能研发的一支主力军,也是我国参与国际热核聚变实验堆(ITER)计划的重要技术支撑单位之一。在近 50 年的受控核聚变研究进程中,我院总共建成了 22 个受控核聚变等离子体实验研究装置,先后承担并完成国家“四五”重大科学工程项目“中国环流器一号(HL-1)装置研制”、“中国环流器新一号(HL-1M)装置研制”及“十五”“中国环流器二号 A(HL-2A)装置工程建设项目”,在探索受控核聚变的道路上取得了重要进展,实现了我国核聚变研究由原理探索到大规模装置实验的跨越发展,在具有偏滤器位形的大型托卡马克实验装置的建造、实验和运行及等离子体约束和输运、磁流体不稳定性、高能粒子物理及杂质控制等研究领域取得了一批创新性的科研成果,并在高约束模运行的研究和实验上进行了富有成效的探索。

随着国际热核聚变实验堆计划的启动和受控热核聚变研究的深入开展,越来越多的科技工作者关注和投入到这一高新前沿课题的研究之中。为了将我院专家在长期核聚变与等离子体科学及相关技术领域研究中所积累的经验 and 取得的成果加以总结,并提供给从事核聚变与等离子体科学及相关技术研究领域的科技工作者参考利用,以推动国内核聚变研究及相关领域学术水平的进一步提高,加快人才培养,加强学术交流,促进我国核聚变事业和相关科学技术的发展,决定组织出版《核工业西南物理研究院科学技术丛书》。值此中华人民共和国成立 60 周年之际,我院核真空专家朱毓坤研究员所著《核真空科学技术》将作为该套丛书的首本著作推出。此后,将陆续推出秦运文研究员所著《托卡马克实验的物理基础》和袁保山研究员等人所著《托卡马克装置工程基础》及其他专家的专著。谨以此套丛书献给近半个世纪以来在受控核聚变与等离子体科学与技术研究领域辛勤耕耘和不懈奋斗的科技工作者!

《核工业西南物理研究院科学技术丛书》编审委员会
2009 年 9 月 28 日

序

在宇宙和生命起源的研究领域中,真空科学是一门重要的基础学科;在地球人类生活和科研求索中,真空科学技术又是一门无处不在的应用科学技术。二十世纪中期以来,原子能和航天科学技术的发展有力地推动了真空科学技术的发展,而当代等离子体科学和核聚变研究更使真空科学技术有了迅猛的发展。核科技领域内的真空科学技术或称核真空技术,由于涉及核辐射或等离子体辐照而具有鲜明的特点。核辐射和电磁辐射等与真空器壁的相互作用效应是核真空工程装置固有的物理学特征,显示出器壁表面状态的探索分析与优化的重要性。核真空技术已成为一门有着广阔理论基础与应用性很强的新兴真空分支学科,但迄今尚未见到这方面的专著。

朱毓坤研究员长期致力于核真空技术研究工作,在技术实践和理论分析上均多有建树,取得了许多创新的,达到国际水平的科研成果。在总结自己五十年来研究成果的基础上,朱毓坤研究员立足中国,放眼世界,全面系统地总结了当代世界核真空科学技术的先进成果,编著出了这本以工程实践为主、兼顾理论基础的专著——《核真空科学技术》(Vacuum Science and Technology in Nuclear Engineering)。这确实是一件很有意义的事。

这本书的鲜明特点是其具有系统性、专业性和开拓性,重视实践应用与开拓创新。本书重点为聚变真空科学技术,对可能于本世纪中期运行的聚变能发电站的相关真空科学技术——真空室的电磁冲击振动与结构力学分析、真空室第一壁表面处理与维护、燃料喷气注入与固体弹丸高速注入、高能中性束注入二级加热等离子体、聚变废

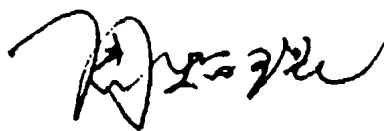
气抽运与活性气体分离回收处理、准稳态真空参量时空分布的诊断测量、氢氛围下的泄漏检测,以及遥控操作处理等技术,作了全面系统地阐述;对聚变真空科学技术的物理基础——等离子体科学、等离子体与真空室构体之间电磁感应效应,等离子体与器壁表面相互作用效应、表面物理、热力学及低温物理等,则作了简明的阐述。值得称道的是本书包含了作者五十年来在这一领域内研究成果的总结和升华,文体简明流畅,是核科学技术领域内首本很有特色的核真空科学技术专著。

相信这本书的出版将有力地推动核真空科学技术系统化、专业化和理论化,并在我国核电建设和国防建设中发挥出更大的作用。

核真空技术内涵丰富,待开拓的空间很大。我们期待能够看到更多像本书这样有开拓性的创新研究和创新著作。

我很荣幸地应邀为本书作序,并诚挚地向读者推荐这本新书。

中国科学院院士



2009年7月于北京 清华大学

前 言

现代社会是建立在对能源的巨大需求基础之上的。核电作为安全可靠与清洁高效的先进能源正在迅猛发展之中,以核裂变压水堆为主体的第一代核电站已遍及世界各地投入商业运行。核电与火电和水电一起已成为当代电力的三大支柱。作为第三代核电站的热核聚变堆电站的建造研究迄今也取得了很大进展。欧洲 JET 成功地于 1997 年 5—11 月进行了氘-氚(50%)聚变反应实验,创造了聚变反应输出功率为 16 兆瓦、释放总能量为 22 兆焦耳,以及聚变品质因子(聚变输出功率对维持定态聚变等离子体所需的输入功率之比)超过 0.6 的世界纪录,从而验证了在地球上实现核聚变发电的科学可行性。中国参与的国际热核聚变实验反应堆 ITER 已选址在法国开始建造,显示出了举世界各国联合之力,在地球上建成核聚变堆发电站造福人类的光明前景。遍及全世界的核裂变发电站的建造运行,以及国际合作下加速推进的核聚变发电站的建造研究,大大地推动了工业界高新技术的开发应用,特别是真空技术、低温技术、磁体技术、大功率脉冲电源技术、射频加热技术、遥控处理技术,以及装备制造技术等。

从 17 世纪意大利托利拆利获得一个大气压力差的毛细管真空空间,到 19 世纪美国爱迪生发明碳丝电灯泡,以气体分子运动论为理论基础的真空技术经历了漫长的成长经历,孕育了电真空器件的诞生。20 世纪早期电子技术的迅猛发展推动着真空技术的协同发展,形成了以电真空技术为龙头的真空科学技术的完整体系,气体放电电子学与气体分子运动论一起成为真空科学技术的理论基础。20 世纪中期以来,原子能科学技术和航天技术的发展又进一步推动真空技术有了长足的发展。在研制原子弹的曼哈顿规划的支持下,1943 年美国尼尔研制成世界上第一台氦质谱检漏仪,开创了密封性能检测的氦质谱检漏时代。此外,核燃料铀提炼和浓缩工艺采用的扩散法和离心分离法,使用大规模的机械真空抽气机组,推动了高性能机械真空泵和涡轮分子泵的开发与应用。1984 年中国真空学会曾成立核真空技术专委会,对应国际真空科学技术应用协会的等离子体科学与技术专委会。当代等离子体科学技术与核聚变研究又使真空科学技术有了迅猛的发展,核真空技术涉及核辐射/等离子体-器壁界面物理与第一壁制备与原位维修技术,活性气体的抽运、处理与回收技术,低温冷冻弹丸

的高速注入等离子体芯部的燃料添加技术,以及表面粒子通量的光谱学实时测量等先进技术;辐射物理、低温物理、表面物理、气体放电电子学和气体分子运动论等则是其理论基础。核真空技术已成为当代一门有着广阔理论基础与应用性很强的新兴真空分支学科,但迄今尚未见到这方面的专著。

2006年5月,中国真空学会同仁们建议作者编著《核真空技术》一书,系统地阐述真空科学技术在核科学技术领域的开发与应用。在核工业西南物理研究院的大力支持下,历经3年多时间,作者荣幸地得以把长期从事核真空科学技术工作的成果,包括于1989—1991年期间受邀参加欧洲JET托卡马克真空边界物理组的工作成果,以及相关的国内外科技进展等,编著成《核真空科学技术》(Vacuum Science and Technology in Nuclear Engineering)一书。本书以核电系统中涉及真空技术的装置为主要对象,系统地阐述有关核真空技术的科学理念、技术方法和工艺过程等;主要内容为当前裂变核电站的泄漏检测技术与聚变核电站建造研究中的真空科学技术,即核电系统中的核电真空物理与工艺学。作者编著《核真空科学技术》注意系统性、专业性和开拓性;以工程技术为主,同时兼顾物理基础;重视实践应用与开发创新,以利于读者能独立地创新工作,迎接真空技术在核科技发展中遇到新的挑战与机遇。本书设定的主体读者已具备微积分、气体分子运动论、热力学、材料力学、真空与低温技术,以及机械制造学等基础知识,对科学与技术感兴趣的公众读者也可从阅读中得到借鉴与启迪。

核真空技术正在快速发展之中,特别是核聚变电站建造与运行中的第一壁制备与遥控维修、聚变等离子体与器壁相互作用物理、偏滤器运行与杂质控制,以及大批量氙的处理工艺等,均有待进一步的发展与完善。由于作者有限的水平和有限的编著时间,《核真空科学技术》一书的遗漏和错误在所难免,盼望同行与读者们不吝指正。

2008年中国经受了汶川特大地震的考验。震后不到3个月,中国即完美地举办了第29届北京奥运会和第9届北京残奥会。坚强与超越,以及“自强不息,厚德载物”的精神,激励着作者完成《核真空科学技术》的编著。作者愿以此书庆贺从清华大学电真空技术专业毕业50周年和为核工业健康工作50周年。

核工业西南物理研究院 朱毓坤
2008年12月于成都

目 录

1 概 论	1
1.1 核能	3
1.2 核真空科学技术	6
1.2.1 加速器超高真空技术	6
1.2.2 聚变真空科学技术	7
2 核电站泄漏检测技术与辐照防护	11
2.1 核电站	13
2.1.1 核裂变能发电的机理	13
2.1.2 核电站的构成	14
2.1.3 核岛——由核能产出蒸汽热能的场所	15
2.1.4 常规岛——由蒸汽热能转化为电能的场所	15
2.1.5 核电站运行及功能描述	15
2.1.6 核电站设备泄漏检测的重要性	16
2.2 核燃料棒的泄漏检测技术	19
2.2.1 核燃料棒的密封要求	19
2.2.2 核燃料棒的充氦密封焊工序	19
2.2.3 核燃料棒的有效检漏时间 T_{eff}	20
2.2.4 核燃料棒的泄漏检测	21
1) 直接检漏法	21
2) 标准漏孔	22
3) 背压检漏法	25
2.3 蒸汽发生器的检漏工艺	31
2.3.1 蒸汽发生器检漏的技术关键	32
1) 抽除大量水汽和氢气的真空获得技术	33
2) 全吸收吸枪罩-氦质谱检漏系统	33
3) 测定蒸汽发生器一次、二次侧间总漏率的真空罩检漏法	36
2.3.2 秦山一期蒸汽发生器制造中的检漏实践	36

1) 蒸汽发生器的管子-管板焊缝(下简称管-板焊缝)的检漏程序	36
2) 蒸汽发生器的总漏率检测程序	37
2.3.3 核电站蒸汽发生器的在役检漏	38
1) 检漏方法	38
2) 在役氦检漏系统	38
2.3.4 压力容器氦质谱检漏技术的讨论	41
2.4 核岛化学管道系统的泄漏检测	42
2.4.1 大亚湾 RCV-RAZ 管道系统的氦气泄漏检测	42
1) 充氦检漏法的试验原理	42
2) 检漏准备	43
3) 用压缩空气气泡法进行预测试	43
4) 管道充氦-吸枪累积法检漏	43
5) RCV-RAZ 系统检验过程中的问题及解决方案	44
2.4.2 大亚湾核岛 TEG 废气处理系统的氦质谱检漏	44
1) 真空-氦罩法检漏基本原理	44
2) 真空-氦罩法检漏前的准备工作	45
3) 真空-氦罩法检漏过程	45
4) TEG 系统真空法氦气泄漏试验中的技术问题	46
2.4.3 大亚湾化学管道系统的泄漏检测结果	46
2.5 放射性同位素在检漏技术中的应用	48
2.5.1 放射性同位素检漏原理	48
2.5.2 通用的同位素检漏方法	48
2.5.3 核反应堆乏燃料棒的检漏	49
1) 乏燃料棒在热室内的检漏方法	49
2) 乏燃料棒的水下检测方法	50
2.6 核物理与辐射防护知识	52
2.6.1 核物理与辐射防护的基础知识	52
1) 原子结构与放射性	52
2) 射线与物质相互作用	55
3) 常用的辐射防护物理量	57
2.6.2 辐射对人体健康的影响	59
1) 辐射的生物效应	60
2) 辐射效应的危险度	61
3) 影响辐射生物效应的因素	61
4) 辐射对人体健康的影响	62

2.6.3 辐射防护的目的、原则和标准	63
1) 辐射防护的目的	63
2) 辐射防护三原则	63
3) 辐射防护标准和限值	64
2.6.4 核电站的辐射源	65
1) 反应堆	66
2) 污染源	66
2.6.5 辐射防护监测	67
1) 个人剂量监测	67
2) 工作场所辐射监测	68
2.6.6 控制辐射危险的技术方法	68
1) 外照射的控制	68
2) 内照射的控制	70
2.6.7 控制辐射危险的管理措施	72
1) 控制区划分和人员分类	72
2) 控制区内个人剂量计的佩戴	73
3) 个人辐照防护的规定	73

3 核聚变真空科学技术 75

3.1 等离子体	77
3.1.1 等离子体的基本物理参数与术语	78
1) 电中性	78
2) 等离子体温度 T	78
3) 德拜屏蔽长度 λ_D	78
4) 等离子体振荡频率 ω_p	79
5) 单粒子运动轨道	79
6) 等离子体比压值 β	80
7) 等离子体辐射	80
8) 等离子体鞘	80
3.1.2 低温等离子体	80
1) 气体放电的伏安特性	81
2) 低气压冷阴极辉光放电	87
3) 弧光放电热等离子体	89
3.1.3 核聚变高温等离子体	92
3.1.4 等离子体的研究方法	93

3.2 磁约束核聚变实验装置——托卡马克	95
3.2.1 几个典型的托卡马克	95
1) 中国环流器实验系列装置	95
2) 中国全超导托卡马克 EAST 装置	100
3) 欧洲联合环 JET	103
4) 国际热核聚变实验反应堆 ITER	109
3.2.2 托卡马克等离子体的杂质问题	110
1) 杂质来源——等离子体与器壁表面相互作用	110
2) 杂质对等离子体性能的影响	110
3) 等离子体杂质水平的度量	111
4) 减少等离子体杂质的技术措施	111
3.3 核聚变装置真空室	113
3.3.1 真空室主体结构	113
3.3.2 真空室在脉冲电力作用下的不稳定性振动	117
1) 真空室集中参数摆动振动模型	117
2) 半个真空室的大型有限元模型	117
3) 真空室集中参数侧向移动模型	118
3.3.3 真空室构体的动力学支撑	119
3.3.4 冲击振动核算的基本知识	119
3.4 真空室内的高热通量部件	122
3.4.1 孔栏	122
1) 石墨孔栏	122
2) 环带孔栏	123
3) 钨护块环带孔栏	124
3.4.2 偏滤器	125
1) JET 抽气偏滤器	126
2) 偏滤器低温泵和低温工艺装备	129
3.4.3 包层	130
3.5 包层的结构力学分析	133
3.5.1 BFEB 包层的稳态热应力分析与优化	133
1) 材料力学第三强度理论	133
2) BFEB 包层基元热应力分析的简约模型	134
3) 传热学理论	135
4) 热应力分析	135
5) 构件表面热负载系的配置优化	136

6) 构件几何尺寸优化	138
7) 热应力分析讨论	139
3.5.2 BFEB 包层气氦冷却竖屏的稳态结构力学分析	139
1) 材料力学第 4 强度理论	140
2) 气氦冷却竖屏的静态应力分析	141
3.5.3 气氦冷却竖屏中氦压应力与热应力的组合效应	143
1) 拱形冷屏管道基元模型	143
2) 回弯形冷屏管道基元模型	146
3) 结果与讨论	147
3.6 聚变装置真空室第一壁	149
3.6.1 等离子体与第一壁表面相互作用	149
3.6.2 第一壁基体材料	151
3.6.3 高镍钢的真空烘烤出气性能	152
3.6.4 等离子体-高镍钢器壁边界物理实验	156
1) HL-1 环流器欧姆放电的等离子体边界层	157
2) 等离子体边界层中的氦粒子流-硅收集探针阵列实验	158
3) 等离子体边界层杂质流-硅收集探针实验	159
4) 氦等离子体辐照下高镍钢 GH39 器壁的放气性能	159
5) HL-1 装置原位钛升华涂敷器壁处理	163
3.6.5 第一壁表层护块材料	164
3.6.6 氘束轰击石墨化学腐蚀	164
1) 氘束轰击石墨化学腐蚀实验的配置	164
2) 氘束轰击石墨化学腐蚀实验结果	165
3) 氘束轰击石墨释放氘甲烷的机理-多步骤表面化学合成反应	167
3.7 第一壁表面处理技术	170
3.7.1 预处理工艺-超声清洗和电抛光	170
3.7.2 真空烘烤	171
3.7.3 放电清洗技术	171
1) 脉冲放电清洗	172
2) 直流辉光放电清洗	173
3) 射频辅助下的直流辉光放电清洗	176
3.7.4 第一壁表面涂敷技术	177
1) 真空室壁原位升华钛吸气技术	177
2) 真空室壁原位等离子体化学沉积技术	177
3.7.5 JET 真空室的铍第一壁	182

1) 全碳第一壁在辅助加热状态下的“碳杂质迸发”	182
2) 真空室全碳壁向铍第一壁的转化历程	183
3) 铍蒸发器	183
4) JET 初期的铍蒸发运行	185
5) 壁抽气(Wall Pumping)	186
6) 器壁的氢存留(Hydrogen Retention)	187
3.7.6 JET 铍第一壁下初步的 D-T 聚变反应实验	188
1) 实验安排	188
2) 初步 D-T 聚变反应实验的结果	189
3.8 真空抽运与活性气体处理系统	192
3.8.1 真空室大环的真空抽运系统	192
3.8.2 聚变实验装置抽运系统实例	193
1) HL-2A 真空室主抽气系统	193
2) 全超导托卡马克 EAST 抽运系统	194
3.8.3 活性气体氚的处理工艺	196
1) 氢同位素等气体的一些热力学性质	196
2) 低温的获得方法介绍	197
3.8.4 JET 活性气体处理系统 AGHS	197
1) 机械前级真空系统	199
2) 低温的前级真空系统	199
3) 杂质处理回路系统	204
4) 中间储存系统	207
5) 氢同位素分离系统	207
6) 排气除氚系统	212
7) 分析实验室	212
8) AGHS 采用的通用元器件	212
3.8.5 ITER 主真空抽运系统的设计	214
1) ITER 主真空抽运系统的设计要求	214
2) 高真空抽气系统	215
3) 偏滤器低温泵	217
4) 大环粗抽系统	217
5) 偏滤器低温泵的运行模式	218
3.9 核聚变装置加料系统	220
3.9.1 喷气注入法	220
1) 压电晶体送气阀	220