

惯性约束核聚变

GUANXING YUESHU HEJUBIAN

王淦昌 袁之尚

安 徽 教 育 出 版 社

责任编辑:王宏金

封面设计:牛 昕

责任校对:陶欣然

惯性约束核聚变

王淦昌 袁之尚

安徽教育出版社出版发行

(合肥市金寨路 381 号)

新华书店经销 合肥南方激光照排部照排

安徽书刊印刷厂印刷

开本 850×1168 1/32 印张: 11.5 字数:290000

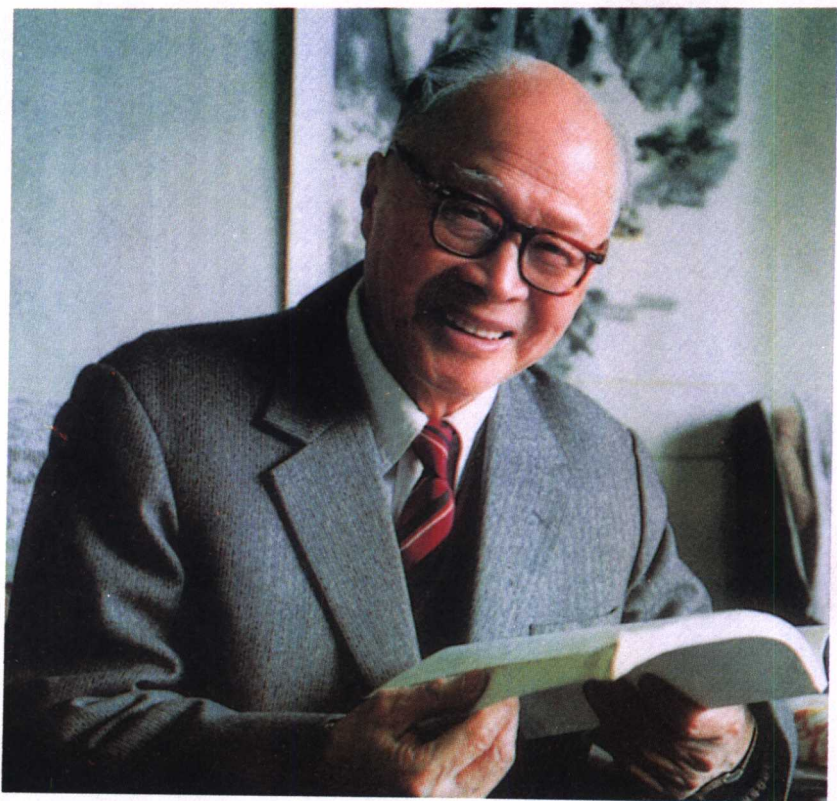
1996 年 12 月第 1 版 1996 年 12 月第 1 次印刷

印数:2000

ISBN 7-5336-1776-2/G·2312

定价:17.50 元

若发现印装质量影响阅读·请与承印厂联系调换



王淦昌 中国科学院院士，著名核物理学家。1907年生，江苏常熟人。1929年毕业于清华大学物理系。1933年获德国柏林大学博士学位。1934年回国后先后在山东大学、浙江大学任教。1941年，首先提出自然界存在中微子和发现中微子的方案，并写出著名论文《关于探测中微子的建议》。1959年，在苏联杜布纳联合研究所工作时，领导首次发现了反西格马负超子，首次证实了“任何粒子都存在其反粒子”。60年代，为研制我国第一颗原子弹、氢弹和地下核试验作出了突出贡献。1964年提出用激光照射氘氟而产生中子的设想，并于其后不久获得实验证明，为惯性约束聚变获取核能做出了开创性工作。现任中国核工业总公司科技顾问、研究员。



袁之尚 1936年生,安徽肥东人,1963年毕业于北京大学技术物理系核物理专业。1964—1990年在中国原子能科学研究院工作。

在该院期间,他从事过情报调研、科研和科技期刊的编辑出版工作。曾任该院编辑出版室主任,兼《原子核物理》杂志(中、英文版)编辑部主任。在任期间,他独立主持创办了中国核物理学会会刊《Chinese Journal of Nuclear Physics》英文杂志,为中国核物理科学走向世界提供了一个舞台。1989年他所主管的《原子核物理》杂志,在核工业系统的期刊评比中获一等奖(核工业总公司科技进步二等奖),1991年又获核工业总公司科技进步二等奖。

1990年,他调往石油工业出版社工作。



1986年胡耀邦等领导人会见核工业十位专家(前排右二为王淦昌)

1987年5月28日祝贺王淦昌80寿辰学术报告会后留影(前排左起:周光召、伍绍祖、周培源、严济慈、王淦昌、赵忠尧、钱学森)





向中央提出发展高技术建议(1986年3月)的四位科学家(右起:王淦昌、杨嘉墀、王大珩、陈芳允)

1993年与国家“863”计划惯性约束核聚变主题专家组成员合影(前排左四为王淦昌)





1987年5月王淦昌(左二)与周光召(右二)、陈肇博(左一)会见袁家骝(左三)、吴健雄(左四)夫妇

1987年核工业部部长蒋心雄(左)与王淦昌会见李政道教授





1994年10月，中、日、美三国惯性约束聚变研讨会上有关科学家合影（前排中为王淦昌）

中国原子能科学研究院四任院长聚会：钱三强（右二）、王淦昌（左二）、戴传曾（右一）、孙祖训（左一）



前 言

核能可分为裂变能和聚变能。现今的核电站是裂变能受控释放的装置。为最终解决人类的能源问题，核物理学家们正在进行受控核聚变的研究。初期的聚变燃料将是氘(D)和氚(T)，而最终则要使用D、D存在于海水中，它们大约可供人类使用几十亿年，所以聚变能是取之不竭的。太阳能就是轻核聚变释放的能量。聚变能的另一个优点是其反应产物是非放射性的，因此对环境不构成潜在的污染。但是，要使两个带正电荷的原子核彼此接近到足够发生聚变，则必须给予它们足够的动能(上亿度的高温)，这比受控裂变要困难得多，所以受控聚变直至今日仍未能实现。

受控聚变有两种方法：

第一是“磁约束”。它是利用磁场将带电粒子约束住使之发生聚变反应。该方法起于本世纪40年代，90年代已达到进行科学可行性验证阶段。

第二即是“惯性约束”(ICF)。它是基于氢弹原理，即利用高能驱动器在极短时间内将聚变燃料小球(靶丸)加热压缩到高温、高密，使之在中心“点火”，实现受控聚变。

我国自本世纪 60 年代开始研究 ICF 以来,已经获得了数次重大突破,取得了令人鼓舞、世界瞩目的研究成果. ICF 研究已迅速发展成为当今世界最重要的前沿科学之一:其高技术密集型和多学科综合性的特点,将会对其他学科和技术产生巨大的推动作用. 它的研究也将对一个国家的科学技术产生深远的影响.

现在世界上许多大国对 ICF 研究都给予高度的重视,不惜投入巨大的人力、物力推进此项研究的进展. 我国的 ICF 研究工作也在不断地深入和扩大,在国际上也颇有声望.

我们多年来一直感受着 ICF 研究工作的脉搏,跟踪着它的前进步伐. 本书是我们首次对这一研究课题的成果、心得进行的系统整理,并从 ICF 基本概念和原理、基本方法和技术的角度系统地加以介绍,以帮助读者对此领域有较为全面的了解和认识,从中获得收益和启迪.

本书适于高等院校理工科学生、研究生、教师、从事 ICF 研究的科技人员,以及那些对 ICF 感兴趣的人员阅读. 我们希望通过本书能使更多的人士对 ICF 产生兴趣.

我们在书中引用了一些很有价值的文献,如果读者对一些问题有进一步深入了解的兴趣,可以据此去查阅.

由于 ICF 涉及广泛的学科并在迅速进展,加之作者水平的限制,书中难免存在缺陷,甚至错误,望读者批评、指正.

作者

1995 年 9 月于北京

目 录

第一章 绪 论	1
1.1 新能源的开发	1
1.2 核能的利用	2
1.3 受控核聚变的研究.....	10
1.4 惯性约束核聚变(简称 ICF).....	19
1.5 本书的结构.....	22
第二章 ICF 的基本原理	24
2.1 热核反应物理.....	24
2.1.1 聚变释能.....	24
2.1.2 反应截面和反应率	25
2.1.3 功率密度.....	30
2.1.4 理想的聚变点火温度	30
2.2 劳逊判据.....	32
2.2.1 劳逊判据的导出	33
2.2.2 惯性约束核聚变的 ρR 判据	35
2.3 惯性约束核聚变的驱动器条件.....	37

2.4	靶丸的增益和燃烧率	39
2.4.1	靶丸增益	39
2.4.2	燃烧率	42
2.5	惯性约束核聚变的各种驱动手段	43
2.5.1	激光与粒子束	43
2.5.2	超高速碰撞	47
2.5.3	聚爆套筒	48
第三章	驱动束的能量沉积和输运	52
3.1	激光的能量沉积	52
3.1.1	电磁波在等离子体中的传播	53
3.1.2	激光与物质的相互作用	56
3.1.3	激光在等离子体中的逆韧致吸收	57
3.1.4	激光能量的反常吸收	61
3.2	离子束的能量沉积	71
3.2.1	离子射程条件	72
3.2.2	离子在物质中的经典阻止本领	72
3.2.3	离子的经典阻止理论举例	76
3.3	等离子体中的能量输运	80
3.3.1	电子热传导	81
3.3.2	超热电子输运	87
3.3.3	辐射输运	89
第四章	ICF 靶丸聚爆物理学	96
4.1	等离子体流体力学	97
4.2	冲击波的传播和等熵压缩	100
4.3	流体力学稳定性	106
4.4	流体力学效率	111
4.5	超热电子的预热	114
4.6	自加热和热核燃烧波的传播	117
4.7	直接驱动和间接驱动	125

第五章 ICF 驱动器(I)—高功率激光器	129
5.1 激光器的基本原理	130
5.1.1 激光物理学	130
5.1.2 光学谐振腔	147
5.2 ICF 应用的高功率激光器	153
5.2.1 CO ₂ 激光器	153
5.2.2 碘激光器	156
5.2.3 钕(Nd)玻璃激光器	158
5.2.4 自由电子激光器	164
5.2.5 HF 激光器	169
5.2.6 准分子激光器	170
5.3 KrF 激光器	172
5.3.1 引言	172
5.3.2 KrF 激光动力学	174
5.3.3 效率	178
5.3.4 脉冲的压缩	179
5.3.5 电子束泵浦 KrF 激光器	182
5.3.6 准分子(KrF)激光器的发展	188
第六章 ICF 驱动器(II)—粒子束	194
6.1 脉冲功率加速器	195
6.1.1 Marx 发生器	196
6.1.2 脉冲形成线	198
6.1.3 自磁绝缘传输线	199
6.1.4 二极管	200
6.2 轻离子束的产生	202
6.2.1 反射式三极管	202
6.2.2 磁绝缘二极管	205
6.2.3 箍缩式二极管	207
6.3 轻离子束的聚焦和传输	208

6.3.1	离子束传输和聚焦的基本限制	208
6.3.2	轻离子束的聚焦实验	213
6.3.3	轻离子束的传输	217
6.4	轻离子束脉冲功率加速器的现状	222
6.5	重离子束聚变	225
6.5.1	重离子加速器的组成	226
6.5.2	束流物理学方面的考虑	229
6.5.3	重离子束的传输和聚焦	229
第七章 靶丸的设计与生产		233
7.1	ICF 靶丸设计的制约因素	234
7.1.1	多层壳结构	234
7.1.2	燃料的装载和 ρR 值	236
7.1.3	中心火花塞(点火器)	236
7.1.4	驱动器脉冲形状和冲击波序列	237
7.1.5	聚爆速度和驱动器能量沉积	237
7.1.6	瑞利-泰勒不稳定性限制	238
7.1.7	防止燃料的预热	239
7.2	某些特殊靶的设计	239
7.2.1	玻璃微球靶(爆炸推进器靶)	240
7.2.2	高增益聚变靶丸	242
7.2.3	黑洞靶(空腔靶)	244
7.3	靶丸生产的某些技术	246
7.3.1	聚变燃料容器	247
7.3.2	涂层工艺	250
7.3.3	燃料的填充	255
7.3.4	冷冻靶	257
7.3.5	微加工技术	259
7.4	靶丸特性的检测技术	261
第八章 ICF 的诊断和测量		265

8.1	聚爆诊断的一般要求	265
8.2	光学诊断	267
8.2.1	能量测量	267
8.2.2	能谱测量	268
8.2.3	光谱的时、空分辨测量	269
8.2.4	探针测量技术	270
8.3	X射线的诊断	271
8.3.1	X射线能量的测量	272
8.3.2	X射线连续谱的测量	272
8.3.3	X射线成像	279
8.4	粒子发射的诊断	281
8.4.1	$\rho\Delta R$ 和 ρR 值的测量	281
8.4.2	温度的测量	284
8.4.3	中子产额的测量	286
8.4.4	聚变粒子成像	288
8.4.5	带电粒子测量	288
第九章	ICF 反应堆的设计	292
9.1	堆设计的一般考虑	292
9.1.1	ICF 堆设计的若干方面	292
9.1.2	ICF 堆的能量流程	294
9.1.3	反应产额	297
9.1.4	第一壁的负载	297
9.1.5	氟的处理和增殖	299
9.2	反应堆堆腔的设计	300
9.2.1	干壁堆	300
9.2.2	磁防护壁堆	302
9.2.3	湿壁堆	303
9.2.4	充气腔堆	305
9.3	ICF 堆设计举例	306

9.4	ICF 堆工程的几个阶段	308
9.5	ICF 堆的辅助系统	310
9.6	裂变-聚变混合堆	313
第十章	我国的惯性约束核聚变研究	320
10.1	引言	320
10.2	激光核聚变建议的提出	322
10.2.1	原理和估计	322
10.2.2	实验设想	327
10.3	我国高功率激光器的建立	330
10.4	我国 ICF 的实验研究	332
10.4.1	黑洞靶物理实验	332
10.4.2	激光直接驱动靶丸的实验研究	337
10.5	我国 ICF 诊断技术的发展	338
10.5.1	建立了各种诊断设备	338
10.5.2	提高测量数据的准确性和可靠性	340
10.6	中国原子能科学研究所的 ICF 研究工作	342
10.7	我国 ICF 研究的现状	344
第十一章	ICF 研究的回顾与展望	347
11.1	历史的回顾	347
11.2	ICF 研究的现状	351
11.3	ICF 研究的展望	354

●第一章

绪 论

1.1 新能源的开发

自从世界历史进入工业化社会以来,能源的消费在加速上升,原始的薪炭能源很快就易位于新的能源——煤炭.到本世纪初,石油又逐渐取代了煤变成了主要能源.煤和石油被人们统称为化石燃料.人类正是依靠化石燃料,在短短的一二个世纪内创造出远远超过过去人类几千年所创造的空前灿烂的文化.

现在,一个新的技术革命的浪潮席卷全球,可以预料,它必将大大地推动社会生产力向前发展.与此同时,能源结构也势必发生革命性的变化.

据统计,近几十年来,由于世界经济突飞猛进地发展,人口剧增,导致世界能源消耗量急剧上升.本世纪初,全世界的能源需求量约 50 年增加 1 倍,而到了本世纪中叶,就变成 30 年增加 1 倍.目前由于化石燃料仍是主要的能源,全世界的化石燃料消耗量,以