



核工业用硼化物

郑学家 主 编



HEGONGYEYONG PENGHUAWU



化学工业出版社

核工业用硼化物

郑学家 主 编



HEGONGYEYONG PENGHUAWU



化学工业出版社

· 北京 ·

本书在简要介绍核反应堆分类、组成、安全性的基础上,详细介绍了硼化合物在核工业中的应用以及核工业用硼化合物的性质与制备等内容。

本书可供从事核工业的技术人员及从事硼化合物研究、应用、生产的技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

核工业用硼化合物/郑学家主编. —北京: 化学工业出版社, 2015.7

ISBN 978-7-122-23882-5

I. ①核… II. ①郑… III. ①硼化合物-研究 IV. ①O613.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 093821 号

责任编辑: 靳星瑞

装帧设计: 张 辉

责任校对: 蒋 宇

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 刷: 北京永鑫印刷有限责任公司

装 订: 三河市宇新装订厂

710mm×1000mm 1/16 印张 12¼ 字数 151 千字 2015 年 8 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 78.00 元

版权所有 违者必究

《核工业用硼化物》编委会

顾 问： 吴宗鑫 王零森 田杰谟

主 任： 宁延生

副主任： 邓敏智 刘燕飞 张国光 曹仲文
 杨玉梅 张秀娟

委 员： 宁延生 郑学家 邓敏智 刘燕飞
 张国光 曹仲文 杨玉梅 张秀娟
 曹栋兴 李庆和 王彦顺 董利民
 金英花 代文双 赵庆杰 宋明志
 杨 军 倪 坤 孟宪友 郑吉岩
 唐常良 于德江 张吉昌



前言

电力工业是国民经济的重要基础工业之一。传统的用煤和石油发电，已经受到资源量的限制，而且还会造成环境的污染。核能作为一种清洁能源，已经受到全世界的普遍重视。

目前，全球正在运行的核电站有 400 多个，发电量占全球的 16%。我国已有十多个核电站在运营，一些新的核电站也在筹建中。虽然受到日本福岛核事故的影响，但我国对核能的需求还将持续。

自日本福岛核事故之后，我们就有目的地收集了有关资料，欲整理成一本书，不仅是介绍核电站的基本情况，更是想通过这本书向广大读者推广一种核工业用材料——硼化物。这些硼化物作为核电站的中子屏蔽材料，在控制棒及冷却系统中都是必须用到的。硼化物在核工业的发展中有其独特的功能和作用。

参加本书编写的人员，都是从事过和正在从事核工业用硼化物的开发、研究、应用的人员，希望本书能给相关从业人员提供一些

参考和启发。本书由郑学家担任主编，邓敏智、张国光、普布次仁、孟庆潇、王文俊、董利民，代文双、金英花担任副主编，其他参编人员有李双奇、崔绍波、戚红艳、唐常良、赵庆杰、张继红、范旷生、郑吉岩、关玉姣。

在本书编写过程，参考了核电专家吴宗鑫和曹栋兴教授的论著，得到了中南大学王零森教授、清华大学田杰谟教授、内蒙古大学袁春华副教授、丹东恒星精细化工有限公司宋明志高工、东北大学赵庆杰、大连理工大学王雨薇的指导和帮助，得到了大连金玛董事局主席王延和先生、青海柴达木硼业化工有限公司董事长董乳嘉先生、丹东化工研究所有限责任公司总经理倪坤先生的鼎力支持，特向他们表示衷心感谢！

因为水平所限，本书中一定存在一些不足之处，敬请广大读者批评指正。

郑学家

2015 年 3 月于大连



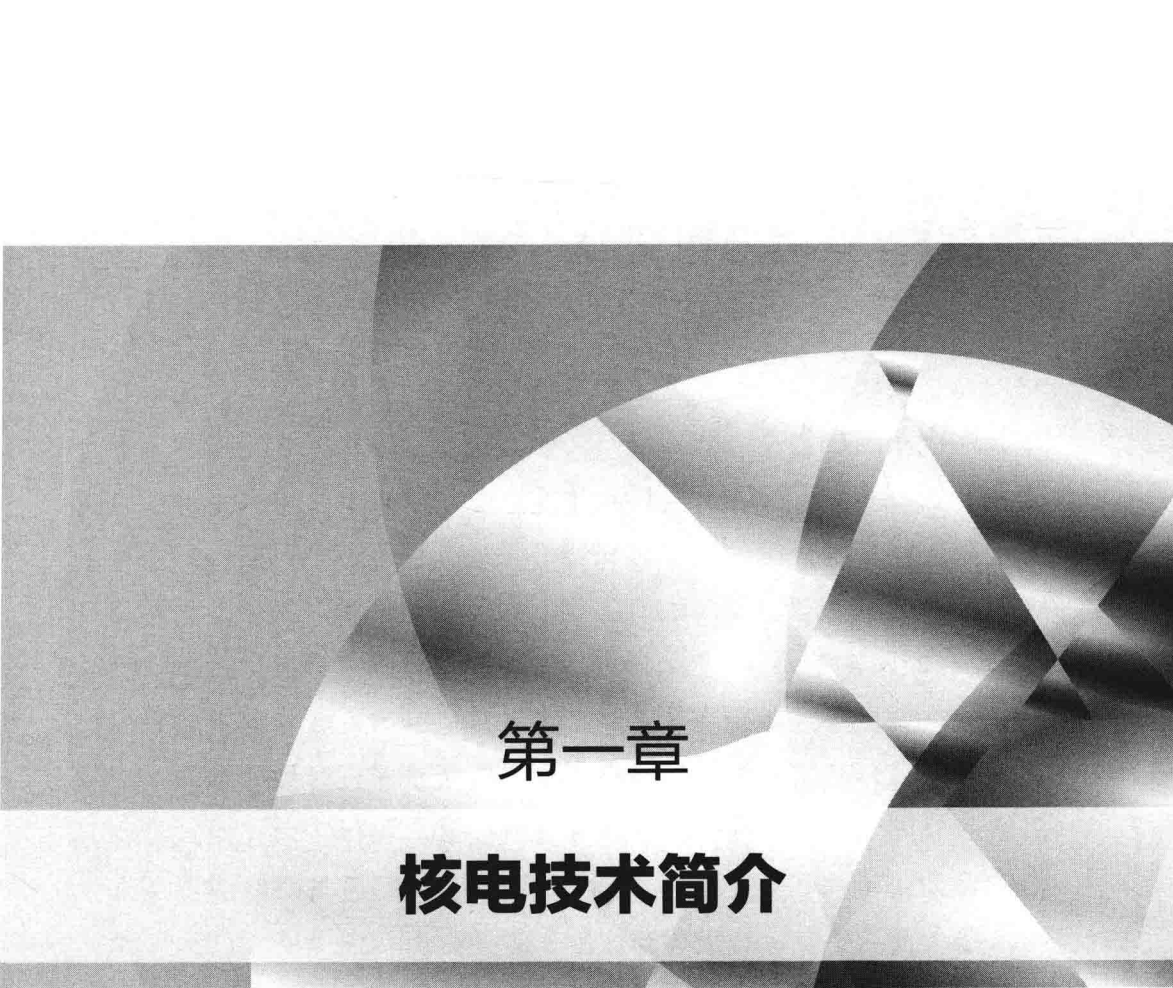
目 录

第一章 核电技术简介	1
第一节 世界核电站发展状况及趋势	3
第二节 核反应堆分类、基本组成	6
一、分类	6
二、核反应堆的基本组成	8
第三节 几种核反应堆简介	14
一、轻水反应堆	14
二、快中子增殖反应堆	24
三、先进核反应堆	37
第四节 核能的安全性	55
一、辐射伤害	56
二、核电站的风险	57
三、核电站的安全性	58

四、非能动安全性	59
五、重要的安全原则——多道屏障和纵深防御	62
六、其他的重要安全原则	63
七、安全设施	64
第五节 核工业用硼化物发展状况	66
第二章 硼及其同位素	67
第一节 硼	69
一、硼的性质	69
二、制备工艺	72
三、硼的应用	75
第二节 硼的同位素	76
一、硼的同位素简介	76
二、分馏分离	77
三、化学交换分离	84
四、扩散分离	85
五、热扩散分离	86
六、电解分离	87
七、电磁分离	88
八、分离方法进展	90
第三章 与核工业相关的含硼材料	91
第一节 硼-10 同位素系列化合物	93
一、硼-10 元素硼 (^{10}B)	93
二、硼-10 碳化硼 ($^{10}\text{B}_4\text{C}$)	93
三、硼-10 硼酸	93
四、硼-10 氧化硼	94
第二节 硼化钙	95

第三节 硼酸	99
第四章 碳化硼及其制品在核工业中的应用	107
第一节 碳化硼概述	109
第二节 碳化硼在核反应堆上的应用	111
一、核反应堆对碳化硼性能的要求	111
二、高温气冷堆中情况	113
三、碳化硼在快中子增殖堆中的应用	115
四、核反应堆用碳化硼材料展望	118
第三节 碳化硼材料的制备	118
一、碳化硼粉末的制备	119
二、碳化硼粉末的粒度对碳化硼芯块晶粒度、 气孔尺寸的影响	121
三、热压烧结工艺参数对碳化硼芯块致密度、 晶粒度及力学性能的影响	123
四、快堆用碳化硼材料	126
五、振动球磨酸洗工艺	132
第四节 中子屏蔽复合材料板材的应用	141
第五节 碳化硼材料在核反应堆中的应用前景	143
第五章 反应堆用硼化物控制材料	147
第一节 硼化物在核反应堆中的具体应用	149
一、核反应堆用硼化物材料	149
二、高温气冷堆	151
三、快中子增殖堆	153
第二节 硼硅酸玻璃、硼不锈钢及其他控制材料	154
一、硼硅酸玻璃	154
二、硼不锈钢	155

三、其他控制材料	155
第三节 几种反应堆控制材料示例	159
一、沸水堆的控制材料	159
二、压水堆的控制材料	161
三、其他反应堆的控制棒	161
附录一 中子活化分析法	163
附录二 铀矿资源储量、分布及加工	169
附录三 硼化工相关企业介绍	181
参考文献	184



第一章

核电技术简介

第一节 世界核电站发展状况及趋势

电力是国民经济中最重要基础工业之一。随着国民经济的发展,对于电力的需求量也迅速增长。据统计,全世界的电力需求量大约每十余年增加一倍。目前,世界上发电用的能源 80% 以上来自煤和石油等化石燃料。大量化石燃料放出的烟气排入空气中,严重污染了自然环境。以一个发电容量为 60 万千瓦的火力发电站为例,每天将要烧掉约 5000 多吨优质煤(或 3300 多吨重油),同时向大气排放出 200 多吨二氧化硫、烟灰等有害物质,造成空气的污染。同时,煤和石油是重要的化工原料,大量的消耗将影响化学工业的发展。为了解决电力问题,必须开发和利用新的能源。而现代人类所能利用的能源,不外乎是水力、化石燃料、核能以及太阳能、风力、潮汐能、地热能等。水力能源虽有一定的经济价值,但往往受到地理条件的限制,建造费用庞大,电力输送费用高。至于太阳能、潮汐能、风力及地热发电,目前虽然经过研究试验已开始应用,但要大规模地利用及开发却受到很多条件的限制。因此,核能是当前比较有现实意义的能源。

多年来,许多国家先后建造了核电站,核电作为新型的能源正在迅速地发展。特别自西方世界石油危机以来,核电更加快了发展步伐。

根据国际原子能机构 2011 年 1 月公布的数据,目前全球正在运行的核电机组共 442 个,核电发电量约占全球发电总量的 16%;正在建设的核电机组 65 个。

拥有核电机组最多的国家依次为:美国 104 个、法国 58 个、日本 54 个(世界核工业联合会公布的数字为 55 个)、俄罗斯 32

个，韩国 21 个、印度 20 个、英国 19 个、加拿大 18 个、德国 17 个、乌克兰 15 个、中国 13 个。

国际原子能机构预计，到 2030 年，全球运行核电站将可能在目前的基础上增加约 300 座。世界核能协会曾经预计，“到 2015 年，全世界可能平均每 5 天就会开工一个装机容量约 1000 兆瓦的核电站。”

日本核电站灾难引发全球对核电安全的担心，促进世界各国重新评估、审视各自的核电站安全和核能规划。《科学》杂志绘制了全球已营运和在建核电站的地图，报道部分国家对日本核电站事件的反应。

美国：美国是世界上最大的核能生产国，但最近 30 年里没有新建核电站。美国核能管理委员会要求对美国现有的 104 座核电站进行安全评估，其中部分核电站位于地震活跃区域。奥巴马政府已提议通过贷款担保刺激新核电站建设，扩大核能力，但反对的声音可能会越来越强。

巴西：巴西矿业和能源部部长表示，联邦政府将重新审查位于安格拉的两个核反应堆的安全，停止了第三个在建的核反应堆，直至安全评估结束；日本福岛核危机让有识之士再次呼吁巴西建立独立的核能管理机构。

阿根廷：日本核危机重新掀起阿根廷对老化核反应堆的争论，这个国家最老的核电厂建于 1974 年，另一个核电厂从 1981 年开始建造但至今尚未完工。

英国：政府要求其首席核检察官提交一份有关日本福岛事故对英国目前和未来核电站影响的报告。能源和气候变化大臣克里斯·休恩表示：“我们不要匆忙作出判断。重要的是我们要拥有可使用的事实。”英国目前的政策是：用私人基金建造未来的核电站。

法国：法国 75% 的电能来自核能，这个比例占世界各国之首；政府已承诺对目前的 58 个核反应堆进行安全审查，但政府明确表示：核能将继续是法国有 40 年历史的能源独立政策的基石，并拒绝对核能进行公民投票的要求。

德国：德国最近通过一项法律，延迟核电站的计划退役时间，如今，默克尔总理下令暂缓三个月执行这项法律；几个根据这项法律已暂缓退役的核反应堆目前被关闭。在这三个月暂缓时间里，政府将对现有的 17 个核反应堆进行重新评估，有望根据新发现对新法律进行修订。

印度：总理下令对印度 20 个正在运营的核反应堆进行安全评估。印度原子能委员会主席在接受《科学》采访时说，印度目前没有关闭核电站的计划。印度目前有 5 个在建核电站，目标是让核能在 2050 年前占整个电力供应的 25%。

比利时：比利时有 7 个核反应堆，所生产电能占整个国家电力的 50%。比利时政府在 2003 年作出决定，让这 7 个核反应堆逐渐退役，第一批最老核反应堆计划于 2015 年前关闭，这个时间最近又向后推了 10 年，环境组织希望福岛灾难能让关闭计划按原计划进行。

瑞士：这个国家 40% 的电力来自其 5 座核反应堆。福岛核灾难后，政府推迟了对 3 个新核反应堆的可行性评估，各党派人士表示支持逐步让核电退役，但没有明确的时间表。

意大利：受苏联切尔诺贝利核灾难的影响，意大利在 1987 年举行公民投票，结果使这个国家在 1987 年和 1990 年间关闭了它的 4 个核电站。现政府决定从 2013 年开始至少建 4 个核反应堆，但今年春天的公民投票可能会阻止这些计划。

俄罗斯：俄罗斯目前有 32 座运营核电站、11 个在建核电站。目前，总理普京下令对俄罗斯核电厂进行安全检查、重新评估国家

的核能计划。

韩国：韩国目前有 21 个运营核电厂，5 个在建核电厂，未来的核能发展计划还在制定之中；总统已下令对全国核反应堆进行安全评审，并制定应急方案；政府知识经济部长表示，现在不是评估国家核能政策的时候。

至 2010 年底，全球已经有 60 多个国家提出了发展核电的计划，中国也早已发布了核电发展长期规划，全球核电发展得到了重视。

中国现有 13 个运营核反应堆，27 个在建项目，50 个筹建项目。日本核灾难后，中国政府宣布暂停新核电项目的评估和审批。政府将对所有核设施进行全国审查、起草核安全规则，调整未来 15 年核能发展规划。中国对核能的需求将会持续。

第二节 核反应堆分类、基本组成

一、分类

1. 压水堆核电站

以压水堆为热源的核电站，它主要由核岛和常规岛组成，压水堆核电站核岛中的四大部件是蒸汽发生器、稳压器、主泵和堆芯。在核岛中的系统设备主要在压水堆本体，一回路系统，以及为支持一回路系统正常运行和保证反应堆安全而设置的辅助系统。常规岛主要包括汽轮机组及二回路等系统，其形式与常规火电厂类似。

2. 沸水堆核电站（发生事故的日本福岛第一核电站）

以沸水堆为热源的核电站。沸水堆是以沸腾轻水为慢化剂和冷却剂、并在反应堆压力容器内直接产生饱和蒸汽的动力堆。沸水堆与压水堆同属轻水堆，都具有结构紧凑、安全可靠、建行费用低和负荷跟随能力强等优点，它们都需使用低富集铀做燃料。沸水堆核电站系统有：主系统（包括反应堆）；蒸汽-给水系统；反应堆辅助系统等。

3. 重水堆核电站（如中国秦山Ⅲ核电站）

以重水堆为热源的核电站。重水堆是以重水做慢化剂的反应堆，可以直接利用天然铀作为核燃料。重水堆可用轻水或重水做冷却剂，重水堆分压力容器式和压力管式两类。

重水堆核电站是发展较早的核电站。有各种类别，但已实现工业规模推广的只有加拿大发展起来的坎杜型压力管式重水堆核电站。

4. 快堆核电站

快堆核电站（如日本茨城县东海村常阳和福井县敦贺市文殊反应炉）是由快中子引起链式裂变反应所释放出来的热能转换为电能的核电站，快堆在运行中既消耗裂变材料，又生产新裂变材料，而且所产可多于所耗，能实现核裂变材料的增殖。

5. 石墨气冷堆

以气体（二氧化碳或氦气）作为冷却剂的反应堆，这种堆经历了三个发展阶段，有天然铀石墨气冷堆、改进型气冷堆和高温气冷堆三种堆型。天然铀石墨气冷堆实际上是天然铀做燃料，石墨做慢