

核能用合金管件的 冷加工成形与防氦渗透涂层技术

陶 杰 徐 江 李 鸣 刘红兵 著



原子能出版社

核能用合金管件的冷加工成形 与防氚渗透涂层技术

陶 杰 徐 江 著
李 鸣 刘红兵



156151

广西工学院鹿山学院图书馆



d156151

原子能出版社

图书在版编目(CIP)数据

核能用合金管件的冷加工成形与防氚渗透涂层技术/陶杰等著.

—北京:原子能出版社,2009.12

ISBN 978-7-5022-4704-1

I. 核… II. 陶… III. ① 原子能工业—合金—管件—冷成形—技术

② 原子能工业—氚—渗透作用—涂层—技术 IV. TL

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 175151 号

内 容 简 介

本书从金属塑性成形基本原理出发,论述了金属材料管件冷成形工艺和数值模拟方法,结合著者多年的研究实践,介绍了不锈钢、低活性马氏体钢管件冷成形过程中的关键技术、组织变化和尺寸控制,分析了影响产品质量的因素。同时,本书还阐明了防氚及氢同位素渗透玻璃质壁垒层的配方设计、制备方法以及双层辉光等离子渗制备防氚渗透涂层技术。

本书可供从事核电工程、核能材料、材料加工、机械、化工、轻工等行业的工程技术人员、科技人员和大专院校的师生参考。

核能用合金管件的冷加工成形与防氚渗透涂层技术

总 编 辑 杨树录

责任编辑 谭 俊

责任校对 冯莲凤

责任印制 丁怀兰 潘玉玲

印 刷 保定市中画美凯印刷有限公司

出版发行 原子能出版社(北京市海淀区阜成路 43 号 100048)

经 销 全国新华书店

开 本 787 mm×1092 mm 1/16

印 张 17 字 数 424 千字

版 次 2009 年 12 月第 1 版 2009 年 12 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5022-4704-1

定 价 58.00 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

致 谢

衷心感谢江苏省重大成果转化专项基金“核电用不锈钢和钛合金管配件冷挤压成形及产业化”(BA2006067)和国家自然科学基金“不锈钢表面制备 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiC}$ 防氙渗透陶瓷及其阻氙机理研究”(50571045)对本项研究工作的资助。

前 言

《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020 年)》明确提出将大力发展核电产业,并将大型压水堆及高温气冷堆等核电站项目列入国家 16 个重大科技专项。2007 年发布的《国务院关于加快振兴装备制造业的若干意见》将百万千瓦级核电机组作为重点支持和发展的新型能源装备之一。按照国家积极发展核电的方针,我国将进一步加大第二代核电项目的自主化力度和设备国产化率,实现自主设计、自主制造、自主建设和自主运营的战略目标。同时,我国已开始致力于研究国际先进的第三代核电技术。按照国家《核电中长期发展规划(2005—2020 年)》,到 2020 年,我国核电装机容量将达到 4000 万千瓦,设备全部国产化。

核电管道连接着反应堆中众多回路系统,对保证反应堆的正常稳定运行及安全停堆起着重要作用,是直接关系到核电安全的关键部件。由于奥氏体不锈钢具有抗蚀能力强、成形焊接性能好以及去污、残余吸附放射元素最低的优点,因此在具有放射性介质管系统中被优先选用。目前奥氏体不锈钢无缝管占核电无缝管市场份额的大部分,已被广泛地应用于各种堆型的核电设施。1 座 100 万千瓦的核电站需钢管 12 万米,其中 $\phi 10\text{ mm} \times 1\text{ mm} \sim \phi 950\text{ mm} \times 82\text{ mm}$ 的不锈钢和合金钢管约 1 万米。我国在核岛用管的制造方面比较薄弱。据估计,核电用钢管平均年需求量为 1.5 万~2 万吨,目前我国核级管道用管总量的 47% 依赖进口。国内还不能生产核电站的蒸汽发生器需求(核 1 级)的锻轧大直径厚壁主管道和 U 型镍基合金管。这“一大一小”的特种管材是核电用钢管生产技术水平的重要标志。

由南京航空航天大学 and 江苏华阳金属管件有限公司承担的江苏省重大成果转化专项基金“核电用不锈钢和钛合金管配件冷挤压成形及产业化”(BA2006067),经过多年的攻关和生产实践,建立了弯头、正/

斜三通等异形管件推弯及液压胀形的成形数值模拟方法,获得了液压胀形的轴向进给速度与内压的匹配关系,实现了管件内部内应力的合理分布,为不锈钢、低活性马氏体钢等材料的异形管件加工提供了有效的工艺指导。发明了一种专门用于冷挤压成形金属制品的新型润滑涂层配方及制备方法,能够满足挤压成形的润滑要求。由南京航空航天大学承担的国家自然科学基金“不锈钢表面制备 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiC}$ 防氩渗透陶瓷及其阻氩机理研究”(50571045),通过双层辉光离子渗金属技术在不锈钢表面制备了防氩渗透涂层以及利用涂覆的方法在 316L 不锈钢表面和钛及其合金表面制备玻璃质壁垒层。主要内容包括:1) 阻氢和氢同位素渗透玻璃质壁垒层的制备及性能研究;2) 双层辉光等离子渗技术制备 Al_2O_3 防氩渗透涂层;3) 316L 不锈钢表面 Cr_2O_3 涂层的制备及其性能研究;4) 防氩渗透涂层阻氩机理研究。

本书由南京航空航天大学陶杰教授、徐江教授和刘红兵博士以及江苏华阳金属管件有限公司李鸣工程师著。博士生郭训忠、黄镇东和硕士生高强、李转利、孙显俊、张立伍以及江苏华阳金属管件有限公司的丁月霞、胡立兵、任卫栋、陈小宝和罗先兵等参与了大量的研究和实验工作。南京航空航天大学机电学院高霖教授、徐九华教授和李泷果讲师、以及材料科学与技术学院汪涛教授、张平则副教授和骆心怡副教授以及安徽合力股份有限公司新技术研究所袁正对本项研究工作给予了积极帮助和有力支持,作者在此谨致诚挚的谢意。

由于作者水平有限,书中难免存在错误,敬请读者批评指正。

作者

2009 年 7 月于南京

目 录

第 1 章 核电用管件发展概况	(1)
1.1 世界核电的发展	(1)
1.2 核电在我国的发展	(2)
1.2.1 我国发展核电的基本方针	(4)
1.2.2 中国核电建设进入批量建设阶段	(4)
1.3 核能的未来发展	(5)
1.3.1 第三代反应堆	(6)
1.3.2 第四代反应堆	(7)
1.3.3 聚变堆	(13)
1.4 核能应用对金属管道与管件的要求	(14)
1.4.1 裂变堆材料	(14)
1.4.2 聚变堆材料	(15)
第 2 章 管件冷成形原理	(18)
2.1 金属塑性成形基础	(18)
2.2 管材弯曲加工	(19)
2.2.1 管材弯曲成形工艺分类	(19)
2.2.2 弯曲加工原理	(21)
2.2.3 弯管成形过程	(24)
2.2.4 影响管材弯曲成形的主要因素	(24)
2.2.5 管材弯曲主要参数计算设计	(25)
2.2.6 管材弯曲成形工艺研究现状	(29)
2.3 管材胀形加工	(31)
2.3.1 胀形方法分类	(31)
2.3.2 液压胀形三通管件的特点	(33)
2.3.3 胀形加工原理(自由胀形、轴向压缩胀形、复合胀形)	(34)
2.3.4 管材胀形成形过程	(38)
2.3.5 影响管材胀形成形的主要因素	(39)

2.3.6 胀形工艺的研究进展	(41)
第3章 管件冷成形数值模拟	(45)
3.1 有限元数值模拟技术	(45)
3.1.1 有限元数值模拟技术的提出和发展	(45)
3.1.2 塑性有限元的基本概念	(46)
3.1.3 弹塑性有限元和刚塑性有限元的基本理论	(46)
3.1.4 有限元的一般解题步骤	(47)
3.1.5 有限元软件简介	(52)
3.2 弯管冷成形数值模拟	(54)
3.2.1 弯管有限元模型	(54)
3.2.2 模具参数对弯管成形质量的影响	(56)
3.2.3 工艺参数对成形质量的影响	(58)
3.2.4 小结	(61)
3.3 三通管冷成形数值模拟	(62)
3.3.1 三通管有限元模型	(62)
3.3.2 成形力对三通管成形质量的影响	(65)
3.3.3 工艺参数对成形质量的影响	(71)
3.3.4 小结	(72)
第4章 核电用不锈钢管件冷成形加工	(75)
4.1 核电用不锈钢管坯铸/锻加工	(75)
4.2 冷轧加工	(76)
4.2.1 冷轧工艺原理	(77)
4.2.2 冷轧工艺实施	(77)
4.2.3 冷轧工艺关键控制技术	(78)
4.3 核电用不锈钢薄壁管件的冷成形	(78)
4.3.1 薄壁不锈钢三通管件的成形技术	(79)
4.3.2 不锈钢异径接头的成形	(80)
4.4 核能用不锈钢为基材的复合管件成形工艺	(81)
4.4.1 试验装置及工艺原理	(82)
4.4.2 有限元模型	(82)
4.4.3 有限元模拟结果	(83)
4.4.4 316L/Al 复合管实际成形	(86)
4.5 核电用不锈钢管件的其他加工工艺	(87)
4.5.1 超大型三通加工方法	(87)
4.5.2 弯管的无模成形方法	(88)

4.5.3 弯管的激光成形方法	(89)
4.5.4 矩形方管的变曲率推弯方法	(89)
4.6 核电管件冷成形残余应力及热处理	(90)
4.7 核电用不锈钢管件酸洗处理	(90)
4.7.1 不锈钢氧化皮的特性	(90)
4.7.2 清除核电不锈钢表面氧化皮的方法	(91)
4.7.3 酸洗钝化方法及有害元素的控制	(91)
4.8 核电用不锈钢管件质量控制手段与措施	(92)
4.8.1 核电用不锈钢管材制备的控制与检测	(92)
4.8.2 核电用不锈钢管件质量检测	(92)
4.9 本章小结与展望	(94)
第5章 低活性马氏体钢管件冷成形技术	(98)
5.1 低活性马氏体钢的研究进展	(98)
5.1.1 国际研究综述	(98)
5.1.2 国内研究综述	(99)
5.2 CLAM 钢的力学性能特点	(100)
5.2.1 成分特点	(100)
5.2.2 组织结构与热处理工艺	(100)
5.2.3 机械性能	(101)
5.2.4 变形加工性能特点	(103)
5.3 CLAM 钢管件的冷成形加工关键技术与数值模拟	(103)
5.3.1 冷成形加工关键技术	(104)
5.3.2 数值模拟	(105)
5.3.3 弯头冷成形数值模拟	(105)
5.3.4 正三通冷成形数值模拟	(110)
5.3.5 斜三通冷成形数值模拟	(117)
5.4 CLAM 钢管件冷成形加工过程的组织变化与尺寸控制	(123)
5.4.1 冷成形加工过程的组织变化分析	(123)
5.4.2 弯头的尺寸控制技术	(123)
5.4.3 三通的尺寸控制技术	(124)
5.5 CLAM 钢管件的实际冷加工工艺	(125)
5.5.1 弯头冷成形工艺	(125)
5.5.2 正/斜三通冷成形工艺	(125)
5.5.3 CLAM 钢管件质量控制与检验	(126)
5.6 本章小结与展望	(127)

5.6.1	小结	(127)
5.6.2	研究展望	(128)
第6章	防氚及氢同位素渗透玻璃质壁垒层的制备技术	(130)
6.1	玻璃质壁垒层在防氚及氢同位素渗透技术中的应用及意义	(130)
6.1.1	现有壁垒层存在的问题	(131)
6.1.2	玻璃质陶瓷涂层	(131)
6.1.3	玻璃质陶瓷涂层的主要应用领域	(132)
6.1.4	玻璃质陶瓷涂层在阻止氢和氢同位素渗透领域的新应用	(132)
6.2	防氚及氢同位素渗透玻璃质壁垒层用玻璃熔块成分设计	(133)
6.2.1	设计原则	(133)
6.2.2	涂层成分设计的方法	(134)
6.3	防氚及氢同位素渗透玻璃质壁垒层的制备	(137)
6.3.1	原材料的选择	(137)
6.3.2	防氚及氢同位素渗透玻璃质壁垒层的制备工艺	(137)
6.4	影响防氚及氢同位素渗透玻璃质壁垒层制备质量的因素及改善方法	(140)
6.4.1	水溶性高分子化合物 M 及釉浆 pH 值对玻璃质壁垒层制备质量的影响	(140)
6.4.2	涂层与基体的润湿性对玻璃质壁垒层制备质量的影响	(143)
6.5	玻璃质壁垒层作为防氚及氢同位素渗透壁垒层的实际应用及性能评价	(147)
6.5.1	涂层的显微分析	(147)
6.5.2	涂层与基体的结合性能试验与分析	(151)
6.5.3	涂层阻氢性能评价及其阻氢机制探讨	(153)
6.5.4	搪瓷壁垒层阻氢机理的探讨	(159)
6.6	本章小结与展望	(160)
6.6.1	小结	(160)
6.6.2	玻璃质陶瓷壁垒层研究展望	(161)
第7章	双辉等离子表面冶金技术	(165)
7.1	双辉技术的形成	(165)
7.2	双辉等离子表面冶金技术原理	(165)
7.2.1	双辉的物理基础	(166)
7.2.2	双层辉光离子渗金属技术优缺点	(169)
7.3	双辉等离子渗金属技术的研究进展	(170)
7.3.1	单元渗	(170)
7.3.2	两元渗	(177)
7.3.3	双辉多元共渗技术	(179)
7.3.4	复合镀渗层	(185)

7.3.5 复合镀渗层耐蚀性能	(190)
7.4 双辉等离子金属—非金属共渗技术研究现状	(190)
7.4.1 Ti-N 共渗工艺研究	(190)
7.4.2 氮化钛渗镀复合层的组织结构	(193)
7.5 基于双阴极放电低温沉积技术研究的初探	(195)
7.5.1 Al-Mg 合金层	(195)
7.5.2 Al-Cr-Fe 表面合金层	(198)
7.5.3 镁合金表面形成 Ni-Cr-Mo-Cu 合金层	(202)
第 8 章 双层辉光等离子渗技术制备 Al_2O_3 防氡渗透涂层	(208)
8.1 氧化铝涂层概述	(208)
8.2 试验设备、材料及方法	(208)
8.2.1 试验设备	(208)
8.2.2 试验材料	(209)
8.2.3 涂层制备方法	(209)
8.3 316L 不锈钢表面渗铝层的制备及性能表征	(210)
8.3.1 渗铝层的制备	(210)
8.3.2 渗铝层显微观察及能谱分析	(210)
8.3.3 渗铝层与 316L 不锈钢基体的界面结合	(211)
8.3.4 渗铝层相结构分析	(212)
8.3.5 工艺参数对渗铝层的影响	(213)
8.4 316L 不锈钢表面 Al_2O_3 涂层的制备及表征	(214)
8.4.1 显微组织	(214)
8.4.2 Al_2O_3 涂层与基体界面的结合	(217)
8.4.3 Al_2O_3 涂层相结构分析	(217)
8.4.4 氧化机理分析与讨论	(220)
8.5 Al_2O_3 涂层性能表征	(222)
8.5.1 划痕试验	(222)
8.5.2 抗热震性能测试	(225)
8.5.3 耐腐蚀性能表征	(226)
8.5.4 摩擦学性能表征	(227)
8.6 本章小结	(229)
第 9 章 双层辉光等离子渗技术制备 Cr_2O_3 防氡渗透涂层	(233)
9.1 概述	(233)
9.1.1 Cr_2O_3 涂层简介	(233)
9.1.2 渗铬、渗氧技术概述	(233)

9.2 双层辉光离子渗铬及渗氧工艺设计	(234)
9.2.1 实验材料及设备	(234)
9.2.2 工艺参数的选择	(234)
9.3 渗铬层组织结构与结合性能研究	(234)
9.3.1 渗铬层的形貌	(235)
9.3.2 渗铬层的铬浓度分布	(235)
9.3.3 渗铬层的物相分析	(237)
9.4 Cr_2O_3 涂层的制备及表征	(237)
9.4.1 Cr_2O_3 涂层的形貌	(238)
9.4.2 Cr_2O_3 涂层的铬氧浓度分布	(241)
9.4.3 Cr_2O_3 涂层的物相分析	(242)
9.4.4 Cr_2O_3 涂层表面微观结构分析	(243)
9.4.5 双层辉光离子渗氧机理研究	(243)
9.5 Cr_2O_3 涂层的性能研究	(244)
9.5.1 不同氧流量下 Cr_2O_3 涂层的电化学腐蚀性能研究	(244)
9.5.2 不同氧流量下 Cr_2O_3 涂层的抗热震性能研究	(246)
9.5.3 不同氧流量下 Cr_2O_3 涂层的划痕性能研究	(247)
9.5.4 不同氧流量下 Cr_2O_3 涂层的摩擦磨损性能研究	(247)
9.6 本章小结	(249)
第 10 章 防氙渗透涂层阻氙机理研究	(253)
10.1 氙同位素分子的扩散渗透模型	(253)
10.1.1 氙同位素分子在金属中的扩散渗透模型	(253)
10.1.2 氙同位素分子在防氙渗透涂层中的扩散渗透模型	(253)
10.1.3 防氙渗透涂层的阻氙机理模型	(254)
10.2 防氙渗透涂层的阻氙机理	(254)
10.2.1 不同材料体系防氙渗透涂层的阻氙机理	(254)
10.2.2 不同表面结构涂层的阻氙机理	(255)
10.2.3 不同表面质量涂层的阻氙机理	(256)
10.2.4 具有不同表面吸附系数和解析系数涂层的阻氙机理	(257)
10.2.5 复合涂层的阻氙机理	(257)
10.3 总结和展望	(258)

第 1 章 核电用管件发展概况

1.1 世界核电的发展

人类对核能的认识利用始于战争。核能的战争用途在于通过原子弹的巨大威力损坏敌方人员和物资,达到制胜或结束战争的目的,目前人类对核能的利用主要用于核电,相对于其他能源,核能优势明显^[1,2]。

首先,相对于传统能源,核能是资源丰富、高效、环保、安全的能源。根据《2004 年 BP 世界能源统计》,截止到 2003 年底,全世界剩余石油探明可采储量为 1 565.8 亿吨,2003 年世界石油产量为 36.97 亿吨,即可供开采年限大约 42 年。煤炭剩余可采储量为 9 844.5 亿吨,可供 192 年。天然气剩余可采储量为 175.78 万亿立方米,可供 67 年。而从资源供应角度看,现有的铀矿资源在技术支持下可供人类使用 3 000 年,今后氦氘聚变能开发的资源使用年限在 100 亿年以上,人类再无能源之忧。

其次,核能不仅资源丰富,而且是高效能源。1 kg 铀-235 裂变产生的能量相当于 2 200 t 标准煤。与传统能源相比其发电成本优势明显。

第三,核电是各种能源中温室气体排放量最小的发电方式。随着世界能源消费量的增大,二氧化碳、氮氧化物、灰尘颗粒物等环境污染物的排放量逐年增大,化石能源对环境的污染和全球气候的影响将日趋严重。以中国的大亚湾核电站为例,与同等容量的燃煤电站相比,大亚湾核电站每年可减少排放二氧化碳 1 350 万吨、二氧化硫 10 万吨、氮氧化物 6 万吨、烟尘 1.8 万吨、灰渣 90 万吨。

第四,与传统能源发电相比,核电也是相对安全的。核电反应堆一般采用低浓度裂变物质作燃料,这些燃料分散布置在反应堆内,反应堆有各种安全控制手段,以实现受控的链式裂变反应。从理论上说,在任何情况下,核电反应堆都不会像原子弹那样发生核爆炸。

最后,与其他新型能源相比,核能技术成熟,经济高效,实现了标准化、批量化的建设和发展。21 世纪,面对化石能源的枯竭以及化石能源的利用产生温室效应、污染环境等困境,世界大部分国家都对发展能源的战略决策给予了极大的重视。各种形式的新能源逐渐被开发和利用,形成了目前以化石燃料为主和可再生能源、新能源并存的能源结构格局。新型能源主要有水能、风能、太阳能、生物质能、地热能、潮汐能、海洋热能等。水能是目前唯一大规模利用的可再生能源,但水电资源的开发取决于长远生态影响的评估和科学论证,国际上普遍认为大型水电工程建设需要斟酌环境破坏、生态系统损害的巨大代价;风能的推广利用受困于持续供应问题;太阳能的广泛利用受到原材料和技术的屏障;高成本、高价格制约了生物质能技术商业化和推广应用;地热能、潮汐能、海洋热能等成本、价格偏高,不具经济诱因,普及应用有困难,必须借由政府非经济手段(如奖励补助)来推广。因此,最近 20~30 年里,核能将是人类解决能

源与环境问题的最佳选择,其发展规模和速度取决于新型能源成本和技术的发展,也取决于各国政府对于资源与环境问题的博弈。

第二次世界大战后期,在芝加哥大学足球场西看台下的一个网球室里建造了一座人工核反应堆。费米和他的同事们将石墨块堆砌起来,用 10 t 金属铀和 40 t 氧化铀(都是天然铀)做成的棒插在 385 t 石墨砖块中,外面用 1.5 m 混凝土墙包围,形成了一个 10 m(长)×9 m(宽)×6 m(高)的庞然大物,里面还插着 10 根控制棒(包铜青铜棒)。1942 年 12 月 2 日,就在这个简陋的反应堆上,实现了世界上第一次受控自持链式反应。这次反应进行了 28 min,它的功率最高只达到 200 W,但是它的意义十分巨大。1951 年,美国建成了世界上第一个核发电装置。1954 年 6 月,苏联建成世界上第一座核电站,电功率 5 MW。

自 20 世纪 50 年代中期第一座商业核电站投产以来,核电发展已历经 50 年。根据国际原子能机构 2005 年 10 月发表的数据,全世界正在运行的核电机组共有 442 台,其中:压水堆占 60%,沸水堆占 21%,重水堆占 9%,石墨堆等其他堆型占 10%。这些核电机组已累计运行超过 1 万堆年。全世界核电总装机容量为 3.69 亿 kW,分布在 31 个国家和地区,核电年发电量占世界发电总量的 17%。核电发电量超过 20% 的国家和地区共 16 个,其中包括美、法、德、日等发达国家^[3,4]。

其中,法国核电工业起步于 20 世纪 50 年代,当时兴建的核电机组都是石墨气冷堆。60 年代开始采用压水堆核电机组。由于近几十年来核电发展思想明确,政策适当,投资充分,使得法国核电发展十分迅速。截至 2007 年底,法国共拥有 19 座核电站,58 台机组,从 CP0 系列、CP1 系列、CP2 系列、P4 系列、P'4 系列到目前改进型的 N4 系列,共计有 6 个系列的机组采用压水堆技术。其中,共有 34 台 90 万 kW 功率 CP1 和 CP2 型机组,20 台 130 万 kW P4 和 P'4 型机组,以及 4 台功率为 145 万 kW 的 N4 机组,总装机容量为 6304 万 kW。目前法国在役核电机组数量和总装机容量仅次于美国,列世界第二位,分别占到了全球总数的 14% 及全球总量的 17.6%。

20 世纪 60 年代,美国核电技术成功地进行了商品化。70 年代末,反应堆建造的数量逐渐下降,特别是受切尔诺贝利事故等核安全事故的影响,美国的核电发展处于停滞状态,自 1996 年以来,美国就没有新建核电站。进入 21 世纪以来,由于天然气价格快速上涨、现行运行的反应堆状态良好、核电的燃料价格相对稳定等原因,美国的核电发展又开始了新一轮的发展阶段。目前,美国运行中的反应堆共有 103 座,总净装机容量 97 924 MW;在建反应堆 1 台。其中,35% 的机组为沸水堆(BWR),65% 的机组为压水堆(PWR)。核电在美国能源结构中占据较高的战略地位,核电发电量占总发电量的比重基本维持在 20% 左右。

1.2 核电在我国的发展

我国是世界上少数几个拥有比较完整核工业体系的国家之一。经过 50 余年的发展,我国已经形成了完整的核工业体系,包括地质勘探、铀矿采冶、铀转化与同位素分离、元件制造和后处理等。为推进核能的和平利用,20 世纪 70 年代国务院做出了发展核电的决定,经过 30 多年的努力,我国核电从无到有,得到了很大的发展。自 1983 年确定压水堆核电技术路线以来,目前在压水堆核电站设计、设备制造、工程建设和运行管理等方面已经初步形成了一定的能力,为实现规模化发展奠定了基础。目前,我国已形成广东、浙江、江苏 3 个核电

基地。表 1.1 是我国已经建成和正在运行的核电机组；表 1.2 是我国正在建设和即将开工的核电机组^[5]。

表 1.1 正在运行的核电机组^[5]

机组名称	堆型	所在地	额定功率/万 kW	并网时间
秦山核电站	压水堆	浙江海盐	30	1991-12-15
大亚湾核电站 1 号机组	压水堆	广东深圳	90	1993-08-31
大亚湾核电站 2 号机组	压水堆	广东深圳	90	1994-02-07
秦山二期 1 号机组	压水堆	浙江海盐	60	2002-02-01
岭澳核电站 1 号机组	压水堆	广东深圳	98.4	2002-04-05
岭澳核电站 2 号机组	压水堆	广东深圳	98.4	2002-12-15
秦山三期 1 号机组	重水堆	浙江海盐	72.8	2002-11-10
秦山三期 2 号机组	重水堆	浙江海盐	72.8	2003-06-12
秦山二期 2 号机组	压水堆	浙江海盐	60	2004-03-11
田湾核电站 1 号机组	压水堆	江苏连云港	100	2006-05-12
田湾核电站 2 号机组	压水堆	江苏连云港	100	2006-05-14

表 1.2 在建和即将开工的核电机组^[5]

机组名称	所在地	额定功率/万 kW
岭澳核电站二期 1 号和 2 号机组	广东深圳	各 100
秦山二期 3 号和 4 号机组	浙江海盐	各 60
三门核电站 1 号和 2 号机组	浙江三门	各 100
宁德核电站 1 号和 2 号机组	福建宁德	各 100
阳江核电站 1 号和 2 号机组	广东阳江	各 100
海阳核电站 1 号和 2 号机组	山东海阳	各 100
红沿河核电站 1 号和 2 号机组	辽宁大连	各 100

我国核电自运行以来始终保持着良好的运行状况，运行业绩逐年提高。我国在核电技术的研究开发、工程设计、设备制造、工程建设、运营管理等方面，形成了一支具有丰富实践经验的技术与管理人才队伍，能够自主设计、建造和运行 30 万 kW 和 60 万 kW 压水堆核电机组，也具备了以我为主、适当引进国外技术、建设百万千瓦级压水堆核电机组的能力。

其中，秦山一期核电厂是我国首座自行设计、建造、调试、运行的国产 30 万 kW 核电厂。在 2003 年世界核营运协会(WANO)评比中，在 257 台压水堆中，其性能指标排列在第 92 位；机组能力因子已达到 89.15%，非计划自动停堆次数为零。

大亚湾核电站是我国第一次引进建设的百万千瓦级大型商用核电站，安全稳定运行 10 年，在 2003 年 WANO 的 8 项关键指标评比中，有一项位居世界先进水平，其余超过世界中间水平；在 1999—2003 年与法国 53 台同类核电机组评比中，4 次共夺得 6 项第一；1 号和 2 号机组能力因子分别达到 90.13% 和 84.79%，非计划自动停堆次数均为零。

岭澳核电站已在大亚湾核电站引进国外技术的基础上,实现了 52 项改进,并实现了国产化率为核岛 11%,常规岛 23%,辅助系统 50%。2002 年国际原子能机构评审团评审后认为,“岭澳核电站大部分指标可与新的 IAEA 国际安全标准相媲美,岭澳核电站将成为全球核工业界极有价值的参照”。2003 年岭澳一期机组能力因子 1 号和 2 号机组分别为 80.86% 和 90.44%。在 2003 年 WANO 评比中,5 项超过中值水平,2 项达到先进水平。

秦山二核 2003 年 1 号机组能力因子为 81.2%,秦山三核(重水堆)1 号和 2 号机组能力因子分别为 90.39% 和 87.67%。我国已开始致力于研究国际先进的第三代技术核电机组,该工程已纳入 2006 年起的国家第十一个五年计划。第三代压水堆核电技术的安全性相当高,能有效防止和预防类似切尔诺贝利核电站那样的爆炸泄漏严重事故。

1.2.1 我国发展核电的基本方针

在核电发展方面,贯彻“积极推进核电建设”的电力发展基本方针,统一核电发展技术路线,注重核电的安全性和经济性,坚持以我为主,中外合作,以市场换技术,引进国外先进技术,国内统一组织消化吸收,并再创新,实现先进压水堆核电站工程设计、设备制造、工程建设和运营管理的自主化。形成批量化建设中国品牌先进核电站的综合能力,提高核电所占比重,实现核电技术的跨越式发展,迎头赶上世界核电先进水平。

1.2.2 中国核电建设进入批量建设阶段

2002 年,党中央明确提出“科学发展观”的指导思想,提出实现能源、环境可持续发展的目标要求;2005 年 10 月 11 日,党的十六届五中全会在“十一五”国民经济发展规划的建议中,提出了我国积极发展核电的方针;2006 年 3 月 22 日,国务院常务会议原则通过了《核电中长期发展规划(2005—2020 年)》。规划到 2020 年我国大陆核电装机容量将达 4 000 万 kW,在建容量 1 800 万 kW。其中“十五”末和“十一五”期间开工的约有 16~18 套机组,分布在浙江、广东、辽宁、山东、福建等省,现正在建设的广东岭澳二期和浙江秦山二期扩建,将于“十一五”期内建成投产。其余机组将于“十二五”期间陆续投产。这些机组的厂址均在沿海地带。“十二五”期间除了继续在沿海地带建设核电站外,将开始在湖北、湖南、江西等省的内陆厂址建设核电站。截至目前,我国共新核准核电项目 8 个、共 24 台核电机组,总装机容量为 2 540 万 kW,已开工建设的新核电机组数达 14 台,占全世界在建核电机组的 30% 左右。我国的核电建设正进入批量化、规模化发展的新阶段。在各地方的投资计划中,能源建设继续成为投资重点,而核电是重中之重,图 1.1 为中国大陆核电厂分布图^[6,7]。

据了解,岭澳核电站扩建工程采用具有自主品牌的中国改进型压水堆核电技术路线 CPR1000,装机容量 2×100 万 kW。目前工程已从土建施工全面转向设备安装阶段。预计两台机组于 2010 年至 2011 年建成投入商业运行。

秦山二期扩建工程建设规模为 2×65 万 kW 压水堆核电机组,工程于 2006 年开工建设。目前两台机组的工程建设按照计划进展顺利,将分别于 2010 年 12 月和 2011 年建成投产,扩建工程设备本地化率将达到 70% 以上。

辽宁红沿河核电工程是“十一五”期间首个批准开工建设的核电项目。4 台百万千瓦级核电机组计划于 2012 年至 2014 年建成投入商业运行。

福建宁德核电站位于福建省宁德市辖区内,规划建设 6 台百万千瓦级压水堆核电机组,首

台机组计划于 2012 年投产。

此外,广东阳江、福建福清、浙江方家山等项目也获得核准,并在年内开始第一台机组建设。在国家核能开发科研经费和专项资金的支持下,我国核能领域技术研发工作不断进展,一些关键技术取得突破,基础能力持续提升。

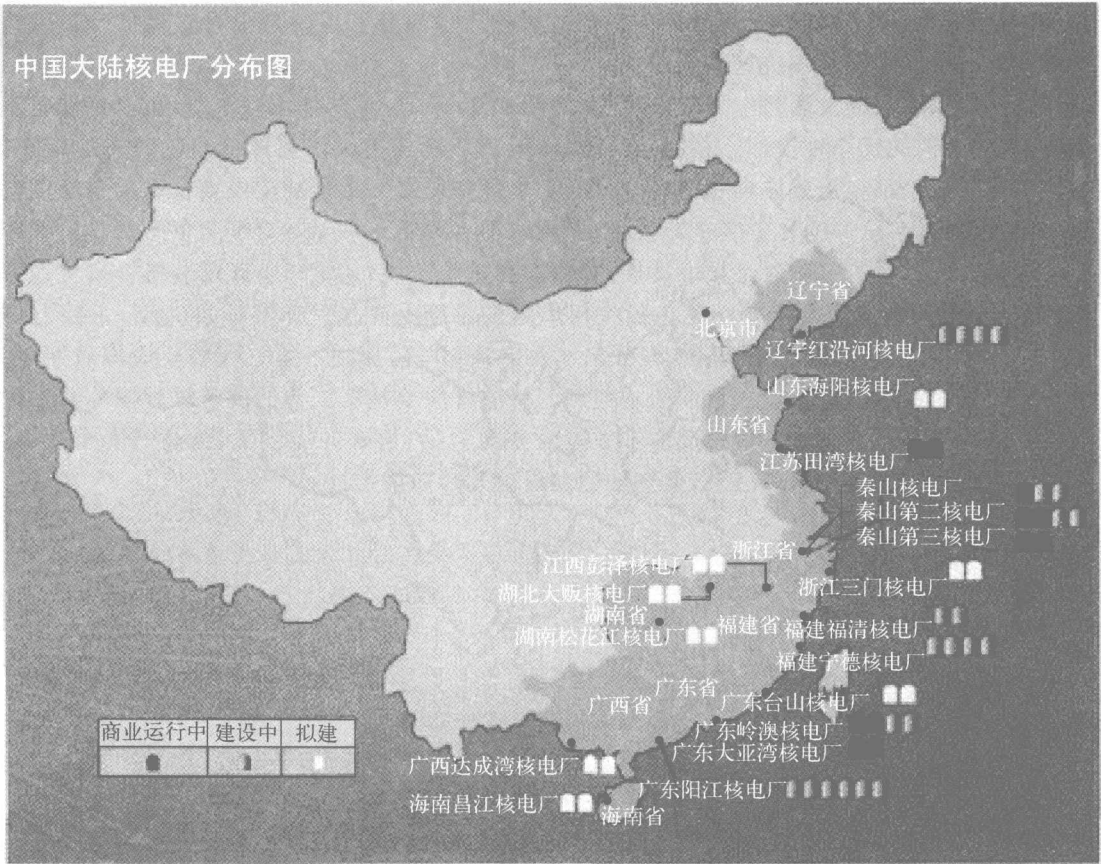


图 1.1 中国大陆核电厂分布图^[6]

1.3 核能的未来发展

世界上核能的进一步发展,面临着三个需要解决的关键问题。

一是要研究与发展更先进的核反应堆。所谓更先进的反应堆,就是更安全、更经济的反应堆,因此,核反应堆的未来发展方向,就是进一步提高反应堆的安全性及经济性。

二是逐步解决高放废物的最终处置问题。反应堆用的核燃料产生的高放废物,放射性强,毒性大,寿命长,目前的处理办法是通过核燃料后处理把有用的核燃料钚、铀分离提纯出来,再把剩余的高放废液大大减容后,转变成玻璃状态的固体深埋在与生物圈隔离的地下。目前科学家正致力于开发一种先进的最终处理办法,叫分离-嬗变法,即首先通过化学分离的方法将钚、铀、次要锕系元素变成短半衰期的核素或稳定的核素,由于元素变了,毒性也就不存在了,