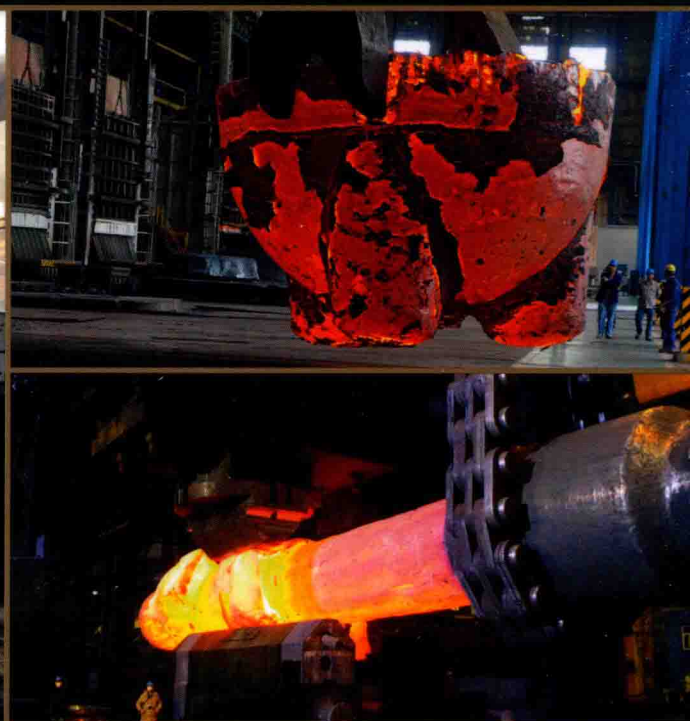
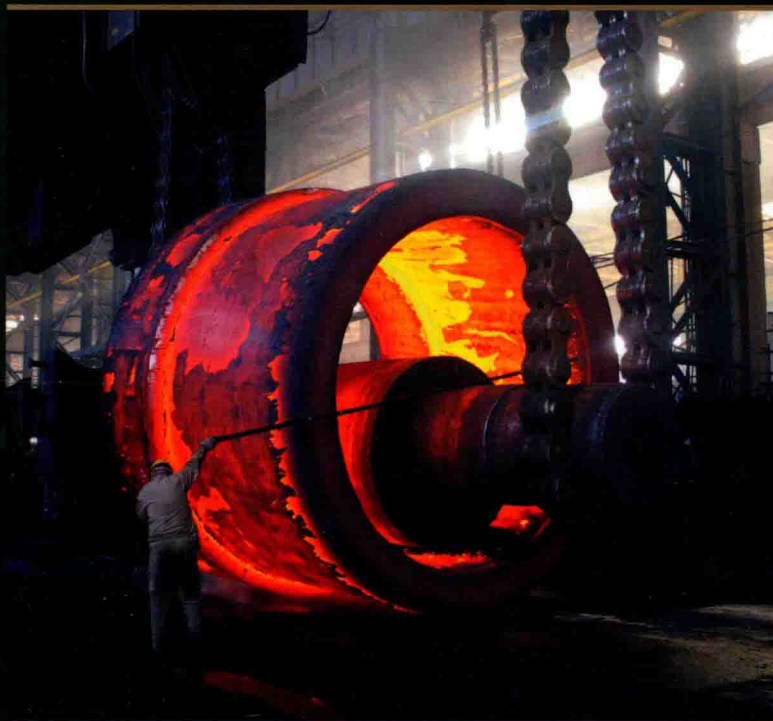




超大型核电锻件 绿色制造技术与实践

GREEN MANUFACTURING TECHNOLOGY AND PRACTICE
OF SUPER LARGE NUCLEAR POWER FORGINGS

王宝忠 等著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



国家电网公司
电力科技著作出版项目

GREEN MANUFACTURING TECHNOLOGY AND PRACTICE
OF SUPER LARGE NUCLEAR POWER FORGINGS

超大型核电锻件 绿色制造技术与实践

王宝忠 等著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本专著系统地回顾了我国核电锻件的自主研发历程,以解决世界性难题为目标,以具体产品实例为切入点,运用大量翔实的试验数据对超大型核电锻件从传统制造迈向绿色制造(胎模锻造、仿形锻造及近净成形锻造)过程中的理论创新、技术研发及工程实践进行了详细的阐述,并对其中的失败案例进行了深入剖析,揭示了工程应用领域技术创新的本质。针对核电装备的预期走向,对超大型核电锻件未来的发展趋势进行了展望。

本专著含有 2500 余幅图片和 200 多份表格等珍贵技术资料,客观真实地再现了超大型核电锻件 1:1 评定、解剖及制造的研发经历,是一代工程技术人员心血的结晶,对稳定和提高超大型核电锻件质量具有一定的参考价值,对未来新技术研发亦具有指导意义。

本书可供核电装备设计、制造、监管者以及将要从事核电装备的专业技术人员和管理人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

超大型核电锻件绿色制造技术与实践 / 王宝忠等著. —北京:中国电力出版社, 2017. 12
ISBN 978-7-5198-1102-0

I. ①超… II. ①王… III. ①核电厂-大型锻件-锻造-制造工艺 IV. ①TM623.4②TG316

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 213403 号

出版发行:中国电力出版社

地 址:北京市东城区北京站西街 19 号(邮政编码 100005)

网 址: <http://www.cepp.sgcc.com.cn>

责任编辑:周 娟 梁 瑶 杨淑玲 关 童

责任校对:郝军燕 太兴华

装帧设计:王红柳

责任印制:杨晓东

印 刷:北京盛通印刷股份有限公司

版 次:2017 年 12 月第 1 版

印 次:2017 年 12 月北京第 1 次印刷

开 本:787mm×1092mm 16 开本

印 张:45.75

字 数:1130 千字

定 价:268.00 元

版 权 专 有 侵 权 必 究

本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

序 一

作为中国核电装备引进、消化、吸收、创新的筹备者与见证人，很高兴应著者之邀为《超大型核电锻件绿色制造技术与实践》一书作序。

核电锻件对核电装备的发展起着至关重要的作用，中国核电装备的发展实践证明，没有核电锻件就无法掌握发展核电的主动权。十几年前，按照党和国家领导人的部署，在与美国、法国、俄罗斯等核电强国交流引进三代核电技术时，将核电锻件作为一个重要引进内容进行谈判。然而，正如吴邦国同志所说，“外方就是不同意转让核电锻件制造技术”，最后的谈判结果只是从美国西屋公司（WEC）引进了 AP1000 核电设计和制造技术。

为了推动核电锻件自主化，摆脱受制于人的被动局面，我曾多方奔走呼吁国家支持核电锻件的研发，得到了科技部的大力支持，在“十一五”科技支撑计划中追加了核电锻件的研制内容。国内的核电锻件供应商与科研院所联合攻关，经过三年多的努力基本解决了二代加核电锻件的供货问题。

在大型先进压水堆重大专项的资助下，由中国一重牵头，联合了中国二重、上海重型机器厂等国内知名企业及科研院所共同开展了超大型核电锻件的联合研制工作，以王宝忠为首的攻关团队不分昼夜潜心研究，耗费了大量的心血。经过多年的不懈努力，实现了三代核电核岛及常规岛锻件全部自主化，同时取得了制造技术国际领先的好成绩，可以说是难能可贵的。

《超大型核电锻件绿色制造技术与实践》用大量翔实的数据所列举的具有国际领先水平的制造技术彻底改变了人们对大型锻件“傻大黑粗”的印象。事实证明，只要用心去做产品，中国制造不仅能解决有无的问题，同样也能实现绿色制造。

然而，中国制造的产品最让人不放心的是质量的稳定性。产品质量之所以存在着“一好、二坏、三推倒、四重来”的怪现象，究其原因先进的制造技术不能很好地得以传承。《超大型核电锻件绿色制造技术与实践》既全面系统地介绍了研制过程中取得的成果，又总结了一些经验和教训，对稳定和提高超大型核电锻件的产品质量有着很好的指导与借鉴

作用。

党中央国务院提出了核电装备“走出去”的发展战略，习近平主席和李克强总理亲自做“推销员”，“一带一路”为我国核电装备描绘了美好的发展前景。衷心希望《超大型核电锻件绿色制造技术与实践》一书能成为核电装备设计、制造、监管者以及将要从事核电装备的学习者们的良师益友。

原机械工业部副部长

孙昌基

二〇一七年六月

序 二

审阅了《超大型核电锻件绿色制造技术与实践》一书送审稿后，非常震撼，很高兴应著者之邀为该书作序。

超大型锻件是重大装备的脊梁，其制造质量制约着产品的水平。由于超大型锻件体积庞大、形状复杂，制造难度相当大。传统的大型锻件固态成形过程基本是自由锻造，加工余量大，精度差，冶金质量差。著者们为了改变我国核电大型锻件基础薄弱、技术粗放、工艺落后的面貌，以实现绿色制造为目标，不断向“不可能”发起挑战。创造性地将超大型锻件的自由锻造提升为胎模锻造、仿形锻造及近净成形锻造，改写了超大型锻件只能是“傻大黑粗”的历史。

超大型核电锻件绿色制造技术的研发是以企业为主体，联合高校、科研院所协同创新，是产学研结合的典范。实践再一次证明了理论研究是实践的基础，而实践又是理论验证、完善和创新的源泉。

研发团队在超大型锻件的绿色制造实践中，将冶金行业的长水口、挡墙、挡坝等引入机械行业超大型钢锭的铸锭，有效地避免钢液的二次氧化以及防止钢渣进入钢锭模；借鉴冶金行业的楔形轧制，实现了双端不对称同步压下变截面筒体类锻件的近净成形。通过集成创新，开发了锻压工程领域新工艺、新技术、新装备，取得了多项具有世界领先水平的技术突破。这一创新工作中所积累的宝贵实践经验和理论上取得的创新与突破，是我国锻造技术领域一笔非常宝贵的财富。

《超大型核电锻件绿色制造技术与实践》在系统论述研制成果的同时，还客观地介绍了一些不足与教训，同时对全面实现超大型锻件的转型升级、跨越发展的目标提出了展望。相信该书的问世必将对稳定和提高超大型核电锻件质量、促进超大型核电锻件技术进步产生推动作用。

《超大型核电锻件绿色制造技术与实践》一书是一代科技工作者和工程技术人员心血的结晶。著者们能站在国家的高度，将 2700 多份弥足珍贵的图表和大量的实验数据展现给读

者，深入浅出地介绍超大型核电锻件研发工作的经验和教训，对于传承技术、培养人才将起到非常重要的作用，精神可嘉，难能可贵。为此，我热忱地向读者推荐这本书，衷心希望《超大型核电锻件绿色制造技术与实践》一书能成为从事超大型锻件研发、制造工作者以及金属压力加工学习者的工作和学习指南。

中国工程院院士



二〇一七年十一月

前言

为了适应核电装备长寿期、大型化等发展需求，超大型核电锻件应运而生。长期以来，我国重主机而轻配套的发展思路，致使超大型锻件依赖进口供货，国产件能力与质量难以满足要求，已成为重大装备工业发展的瓶颈并受制于人。在第三代核电技术引进中，外方不同意转让大型锻件制造技术，大型锻件制造技术已成为我国发展重大装备工业的瓶颈之一。为了尽快实现超大型核电锻件的自主化并达到国际先进水平，由中国第一重型机械集团公司牵头，联合国内优势企业、高等院校及科研院所，承担了国家“十一五”科技支撑计划及大型先进压水堆核电重大专项等科研课题，开展了长达十年的超大型核电锻件研究与制造工作。

超大型核电锻件的绿色制造具体体现为锻件的胎模锻造、仿形锻造及近净成形锻造。超大型核电锻件的制造已很“难”，一体化超大型核电锻件的制造“更难”，而近净成形锻造的一体化超大型核电锻件绿色制造则是“难以想象”。科研团队秉承着核电锻件超大型化和绿色化的研制理念，不断向“不可能”发起挑战。在近乎“一穷二白”的基础上，攻坚克难、“屡败屡战”，经过不懈努力，取得了多项世界之最优的成绩。

目前，全球经济发展进入新常态，导致热加工产能严重过剩，60MN及以上液压机开工率平均不足30%。虽然超大型核电锻件“热火朝天”、供不应求的局面可能“一去不复返”了，但能源装备“清洁、绿色、高效”的发展趋势，对超大型核电锻件的需求是永恒的。国家核电装备“走出去”战略的实施，也必将为超大型核电锻件的发展提供更加广阔的空间。因此，我们将十几年来在超大型核电锻件研究与制造方面的经验、体会和教训编撰成册，对如何进行系统性基础研究、如何进行低成本工程化试制，以及怎样实现绿色化、产业化、批量化生产进行了阐述，对未来的发展趋势进行了展望。

本书共分8篇33章。第1篇从超大型核电锻件的重要性、主要特点、创新性研发以及国内外同类制造技术对比等方面进行了综述；第2篇对超大型核电锻件的坯料——超大型钢锭的研制进行了论述；第3~7篇分别重点对各种堆型的压力容器、蒸汽发生器、主管道等核电锻件以及常规岛锻件研制及应用实践和经验教训进行了详细阐述；第8篇对核电超大型锻件研制中具有代表性的问题与不足进行了列举，对未来发展进行了展望。

本书是工程实践经验的总结与提炼，含有直径 $\phi 4000\text{mm}$ 的600t级超大型钢锭和直径 $\phi 3000\text{mm}$ 的汽轮机整锻低压转子锻件解剖等大量珍贵技术资料，希望能成为核电装备的设计、制造、质量管理人员，特别是超大型锻件研究制造工作者的技术工作指南。此外，由于

本书涉及的内容已突破了传统论述，亦可供高等院校及研究院所从事热加工理论学习的人员参考。

本专著采用大量工程实践的图表展示了超大型核电锻件绿色制造技术的先进性，为了保证试验数据的真实性及完整性，本专著少部分图表及描述采用了机械工业出版社出版的《超大型核电锻件绿色制造技术》相关内容。

本书由王宝忠执笔并统稿，刘颖、聂义宏、金嘉瑜、赵德利参与了部分章节的撰写；刘凯泉、曹志远、高建军曾参与了《超大型核电锻件绿色制造技术》专著部分章节的撰写。

在超大型核电锻件绿色制造技术研发工作中，得到了上海核工程研究设计院、清华大学、燕山大学、重庆大学、东北大学、太原科技大学、中国科学院金属研究所、钢铁研究总院和机械科学研究总院等单位的大力支持，在此一并表示感谢！

由于我们的水平有限，书中不妥及疏漏的地方，敬请读者批评指正。

著 者

二〇一七年十一月

目 录

序一
序二
前言

第1篇 绪 论

第1章 核电锻件概述	5
1.1 核电简介	5
1.2 发展核电的必要性	10
1.3 核电锻件自主化及核电装备 “走出去”	11
1.4 核电锻件的重要性	12
第2章 超大型核电锻件特性及 绿色制造	18
2.1 规格超大 形状复杂	18
2.2 技术要求高	20
2.3 大型化及一体化	20
2.3.1 RPV 锻件	21
2.3.2 SG 锻件	21
2.4 绿色制造	22
2.4.1 胎模锻造及仿形锻造	23
2.4.2 近净成形锻造	25
2.5 锻件制造资质	31
2.5.1 制造资格取证	31
2.5.2 锻件评定	32
2.5.3 核安全许可	33
2.6 制造过程控制	33
2.7 产品质量的可追溯性	35
2.7.1 母材见证件	35

2.7.2 焊接见证件	35
第3章 锻件制造设备与工装特点	36
3.1 制造设备的超大型化及 自动化	36
3.1.1 冶炼及铸锭设备	37
3.1.2 锻造设备	41
3.1.3 热处理设备	44
3.1.4 试样制备设备	49
3.2 工装的超大型化及复杂化	52
3.2.1 SG 水室封头管嘴翻边 装置	52
3.2.2 小型堆一体化顶盖模锻 工装	53
3.2.3 转子中心孔超声波探伤 装置	53
3.2.4 钢锭抬梁及吊钳	53
3.2.5 锻造起重机及翻钢机	56
3.2.6 坯料翻转机	57
3.2.7 回转装置	59
3.2.8 非对称锁紧式半球体夹紧 装置	60
3.2.9 双端不对称变截面筒体同步 变形装置	61
3.2.10 超大直径钢锭火焰切割机	63
第4章 核电锻件的评定、解剖检测及 验证	64
4.1 评定	64

4.1.1 一体化顶盖	64	条件的优化	108
4.1.2 一体化底封头	67	6.3 物理模拟及比例试验	109
4.1.3 泵壳	68	6.3.1 整体顶盖物理模拟	109
4.1.4 整锻低压转子	72	6.3.2 水室封头管嘴翻边比例 试验	109
4.2 解剖检测	78	6.3.3 水室封头近净成形比例 试验	110
4.2.1 RPV 接管段	78	6.3.4 主管道低熔点合金内支撑 弯曲比例试验	111
4.2.2 SG 管板	79	第7章 核电锻件制造的发展前景	113
4.2.3 SG 水室封头	80	7.1 产品质量稳定与提高	113
4.3 研制及验证	83	7.2 标准的自主化	114
4.3.1 600t 级钢锭的研制	83	7.3 锻件的绿色制造与极端制造	115
4.3.2 600t 级钢锭的验证	86		
4.3.3 RPV 接管段法兰全截面测温 及性能检测	87	第2篇 超大型钢锭研制及应用	
第5章 核电锻件制造技术对比	90	第1章 核电用钢化学成分设计与 优化	121
5.1 冶炼及铸锭	90	1.1 Mn-Mo-Ni 钢	121
5.1.1 低硅控铝钢的冶炼	91	1.2 不锈钢	122
5.1.2 超大型钢锭制造	93	1.3 Cr-Ni-Mo-V 钢	127
5.2 RPV 一体化锻件	94	1.3.1 电炉氧化及 LF 炉精炼原料 成分控制	127
5.2.1 顶盖	94	1.3.2 超纯转子钢冶炼及铸锭 要求	131
5.2.2 底封头	97	第2章 制造方法的创新	133
5.3 SG 锻件胎模锻造	98	2.1 低硅控铝钢的冶炼	133
5.3.1 管板	98	2.1.1 低硅的影响	134
5.3.2 水室封头	98	2.1.2 控制铝含量	136
5.4 近净成形锻造	100	2.2 保护浇注	137
5.4.1 接管段	100	2.3 二次补浇	138
5.4.2 锥形筒体	100	2.4 空心钢锭	140
5.4.3 主管道空心锻造	101	2.4.1 大气浇注	140
5.5 整锻低压转子的纯净性与 均匀性	103	2.4.2 真空浇注	143
5.5.1 纯净性	103	2.5 直桶型精炼钢包底吹氩 新工艺	146
5.5.2 均匀性	104	2.5.1 试验原理及方法	146
第6章 典型核电锻件成形过程的数值 模拟与比例试验	105	2.5.2 试验结果分析与讨论	150
6.1 成形工艺研究	105	2.5.3 结论	156
6.1.1 自由锻成形工艺	105	2.6 MP 工艺研究	156
6.1.2 数值模拟	107		
6.1.3 物理模拟	107		
6.1.4 比例试验	108		
6.2 数值模拟软件的选择及边界			

2.6.1	研究目标及研究内容	157
2.6.2	研究方案及研究过程	157
2.6.3	结论	161
第3章	优质耐火材料	162
3.1	水口砖	163
3.1.1	镁碳砖	163
3.1.2	复合砖	164
3.1.3	锆质砖	164
3.2	导流管	165
3.2.1	分体式	165
3.2.2	整体式	166
3.3	塞棒	167
3.3.1	分体式	167
3.3.2	整体式	167
3.4	长水口	169
3.4.1	试验研究	169
3.4.2	工程应用	174
第4章	中间包	178
4.1	传统中间包	179
4.1.1	数值模拟	179
4.1.2	温度场计算结果分析	181
4.2	新型中间包	185
4.2.1	包内钢液流动数值模拟 研究结果分析	185
4.2.2	工程应用	199
第5章	超大型钢锭的解剖	200
5.1	解剖方案	200
5.2	纯净性	201
5.3	致密性	202
5.4	制造技术对比	202
5.5	对传统观念的突破	203

第3篇 压力容器锻件
研制及应用

第1章	压水堆顶盖	213
1.1	分体式	213
1.2	整体式	214
1.2.1	产品研制	214
1.2.2	产品制造	225

1.3	一体化	236
1.3.1	产品研制	236
1.3.2	产品制造	249
1.4	制造方式对比	250
1.5	经验教训及预防措施	255
第2章	压水堆接管段	259
2.1	分体式	260
2.2	整体式	269
2.2.1	锻造	269
2.2.2	热处理	272
2.2.3	解剖检测	275
2.2.4	国内外制造方式对比	279
2.2.5	经验教训	280
2.3	半一体化	290
2.4	一体化	292
第3章	压水堆下封头	298
3.1	分体式	298
3.2	一体化	299
3.2.1	产品研制	299
3.2.2	产品制造	311
3.2.3	国内外制造方式对比	315
第4章	其他锻件	318
4.1	压水堆其他锻件	318
4.1.1	筒体	318
4.1.2	过渡段	318
4.1.3	接管	318
4.2	沸水堆锻件	323
4.2.1	下封头	323
4.2.2	法兰	323
4.2.3	筒体	324
4.3	小型堆一体化顶盖	325
4.3.1	工艺性分析	326
4.3.2	主要研究内容	326
4.3.3	满足设计要求及保证质量的 分析	326
4.3.4	制造工艺	326
4.4	高温气冷堆锻件	331

第4篇 蒸汽发生器锻件 研制及应用

第1章 压水堆上封头（椭球封头）

.....	341
1.1 分体式	341
1.2 整体式	343

第2章 压水堆锥形筒体与管板

2.1 锥形筒体	354
2.1.1 覆盖式锻造	354
2.1.2 仿形锻造	355
2.1.3 近净成形锻造	356
2.2 管板	363
2.2.1 锻造	363
2.2.2 热处理	367
2.2.3 评定与解剖	370
2.3 国内外制造方式对比	376
2.3.1 锥形筒体	376
2.3.2 管板	377

第3章 压水堆下封头（水室封头）

.....	378
3.1 分体式	379
3.2 整体式	382
3.3 胎模锻造	383
3.3.1 产品研制	384
3.3.2 产品制造	397
3.3.3 经验教训	403
3.4 管嘴翻边	417
3.4.1 产品研制	417
3.4.2 产品制造	419
3.5 国内外制造方式对比	422
3.5.1 带非向心管嘴整体水室 封头	422
3.5.2 带向心管嘴整体水室 封头	423

第4章 其他锻件

4.1 压水堆其他锻件	424
4.1.1 上部筒体	424
4.1.2 下部筒体	426

4.2 高温气冷堆锻件	428
-------------------	-----

第5篇 其他 Mn-Mo-Ni 钢锻件 研制及应用

第1章 稳压器及堆芯补给水箱

锻件	435
----------	-----

1.1 稳压器锻件	435
1.1.1 上封头	435
1.1.2 下封头	437
1.2 堆芯补给水箱锻件	449
1.2.1 筒体	449
1.2.2 上封头	451
1.2.3 下封头	452

第2章 主泵锻件

2.1 泵壳	454
2.1.1 自由锻造	454
2.1.2 仿形锻造	457
2.1.3 近净成形锻造	466
2.2 壳法兰锻件	472
2.2.1 强韧性提升方案	473
2.2.2 优化效果	474

第3章 核废料罐锻件

3.1 工艺性分析	478
3.2 满足设计要求和保证质量的 分析	478
3.3 制造工艺	479
3.4 性能结果	481

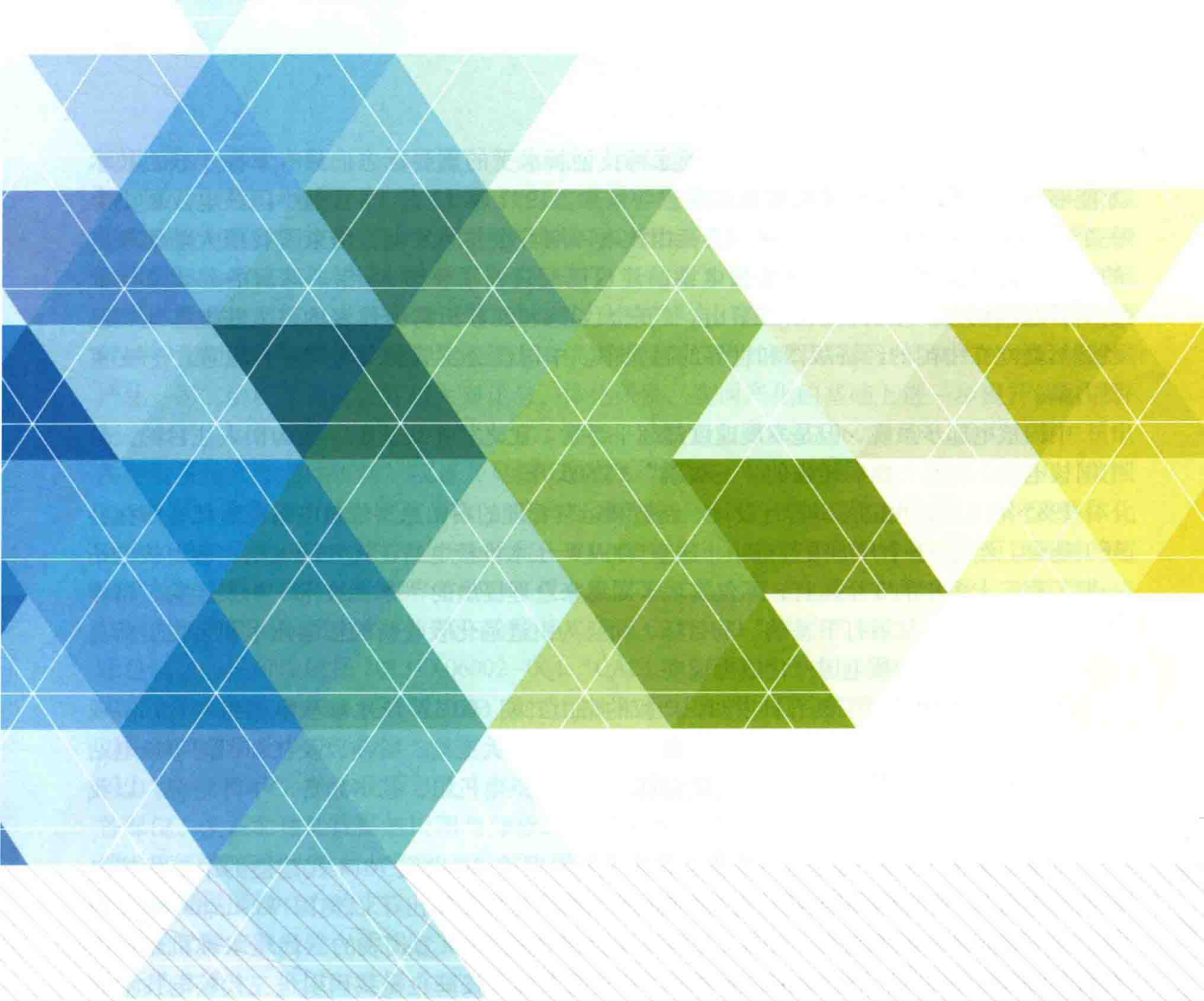
第6篇 不锈钢锻件研制及应用

第1章 基础研究

1.1 主管道用不锈钢材料介绍	486
1.2 材料特性及成分优化	486
1.2.1 321 不锈钢	486
1.2.2 316LN 不锈钢	501
1.3 冶炼及铸锭	505
1.3.1 双真空	506
1.3.2 ESR	506
1.4 晶粒度影响因素研究	506
1.5 晶粒细化及均匀化比例试验	520

1.6 不锈钢的防污染研究	526	2.2.3 FM 法的优化研究	596
第2章 主管道锻件管坯锻造	530	2.2.4 FM 法对水压机振动的影响 研究	613
2.1 实心锻件	530	2.2.5 JTS 锻造方法研究	615
2.2 空心锻件	532	2.2.6 材料热锻性能及晶粒演化 研究	616
2.3 近净成形锻件	533	2.3 热处理技术研究	620
2.4 国内外制造方式对比	542	2.3.1 锻后热处理工艺研究	621
第3章 主管道弯制、机加工及 热处理	545	2.3.2 性能热处理工艺研究	624
3.1 弯制方式	545	2.4 大型开合式热处理装备 研制	629
3.2 内部支撑	549	2.4.1 加热和淬火设备形式 研究	629
3.3 机械加工	552	2.4.2 开合式热处理炉研制	629
3.4 固溶热处理	553	2.4.3 开合式淬火设备研制	630
第4章 其他不锈钢锻件	560	2.4.4 大型开合式热处理装备 研制效果	632
4.1 CENTER	560	第3章 核电转子试制与评定	633
4.1.1 超大型不锈钢锻件的研究 内容	561	3.1 整锻低压转子试制	633
4.1.2 结论	570	3.1.1 冶炼及铸锭	633
4.2 堆内构件	571	3.1.2 锻造	634
4.2.1 堆芯支撑板	571	3.1.3 热处理	636
4.2.2 压紧弹簧	575	3.2 试制转子的性能检测	638
4.3 快堆支撑环	577	3.2.1 化学成分分析	639
4.3.1 冶炼及铸锭	578	3.2.2 力学性能分析	640
4.3.2 锻造	578	3.2.3 组织、晶粒度、夹杂物 分析	641
4.3.3 热处理	578	3.2.4 长心棒拉伸试验	642
第7篇 常规岛锻件研制及应用		3.2.5 无损检测	643
第1章 常规岛转子简介	583	3.3 试制转子解剖	643
1.1 常规岛汽轮发电机组	583	3.3.1 解剖方案	643
1.2 核电转子的发展历程	583	3.3.2 解剖	644
1.3 核电转子工况及要求	585	3.3.3 各种解剖数据分析	647
1.3.1 转子工况	585	3.3.4 解剖分析结论	651
1.3.2 核电转子材料	585	第4章 产品制造	652
1.3.3 核电转子要求	585	4.1 汽轮机整锻低压转子	652
第2章 核电转子制造技术及装备 研究	586	4.1.1 冶炼及铸锭	653
2.1 核电转子国外研究进展	586	4.1.2 锻造	655
2.2 锻造技术研究	587	4.1.3 热处理	663
2.2.1 墩粗研究	588		
2.2.2 拔长方法选择	592		

4.2 汽轮机焊接转子	665	优化	692
4.2.1 轮盘	665	1.6.1 超大型钢锭的凝固模拟 ...	692
4.2.2 轴头	667	1.6.2 锻件成形模拟中成形力 偏差	692
4.3 汽轮机低压转子整锻与分锻的 对比	670	1.7 取样位置的代表性有待探讨 ...	693
4.4 发电机转子	672	1.7.1 RPV 封头	694
4.4.1 冶炼及铸锭	672	1.7.2 SG 管板	695
4.4.2 锻造	672	第2章 设想与展望	698
4.4.3 热处理	673	2.1 材料的挖潜与研发	698
4.4.4 产品主要技术指标	674	2.1.1 原有材料的挖潜	698
第8篇 存在的问题与 未来发展设想		2.1.2 新材料的研发	698
第1章 问题与不足	685	2.2 制造工艺的创新	699
1.1 锻件质量不稳定	685	2.2.1 钢锭/制坯	699
1.2 现有标准的不适应性	685	2.2.2 成形	701
1.2.1 M310SG 水室封头	685	2.2.3 晶粒与应力	703
1.2.2 M310SG 管板	685	2.3 设备与工装能力进一步加大 ...	705
1.3 热处理余量的不合理性	688	2.3.1 200~1000MN 液压机	705
1.4 特殊性能试验的不完整性	690	2.3.2 1200MN 锻挤压机	706
1.4.1 辐照环境下性能试验	690	2.3.3 超大直径锻件测量装置 ...	708
1.4.2 冷却剂环境下性能试验 ...	690	2.4 团队建设	708
1.5 材料的潜力有待挖掘	690	2.4.1 学习型团队	708
1.6 模拟软件边界条件需要不断 优化		2.4.2 综合型人才	709
		参考文献	710
		索引	715



第1篇 绪 论

当今社会，核电技术已成为一个国家科技创新水平的重要标志。只有掌握了核心技术才能够真正“亮剑”，也才能够赢得尊重与未来。1991年12月15日是中国核电发展史上一个应该被永远铭记的日子，这一天秦山核电一期首次并网发电，结束了我国大陆无核电的历史。此时距离世界首座试验核电站的建成已经过去了整整38年。落后的起步直接催生出奋起的动力。今天，以浙江秦山、广东大亚湾和江苏田湾为代表的三大核电基地，已经赫然矗立在中国的经济版图和世界的目光中。中国已经发展壮大为世界核电业中一支重要力量。

中国核电起步虽晚，但是发展速度却超乎寻常。比之“中国速度”更为引人注目的，是中国核电从无到有、由弱转强的“三级跳”式的跃升。

1985年3月，我国首座自行设计、制造和运营管理的秦山原型堆核电站在浙江省海盐县开工建设。经过81个月的艰苦奋斗，这座300MW压水堆核电站正式并网发电。秦山核电站一期工程三十多年的安全运行，不仅实现了周恩来总理提出的“掌握技术、积累经验、培养人才，为中国核电发展打下基础”的目标，而且为引进消化吸收新的核电技术和自主创新奠定了坚实的基础，使核电国产化成为现实。

2005年，我国建成了具有自主知识产权的秦山二期600MW压水堆核电机组两台，实现了中国核电站由原型堆向大型商用堆的重大跨越。广东大亚湾、岭澳以及江苏田湾等核电站的相继建成，表明我国已经能够自主建设百万千瓦级核电机组，基本具备“中外结合，以我为主，发展核电”的能力。

目前，世界上处于商业运行的核电机组大部分是在20世纪70年代建造的第二代核电堆型，随着这一代核电机组设计寿期的临近，国际上又开发出了以美国Westinghouse（西屋）公司的AP1000和法国AREVA（阿海珐）集团的EPR为代表的三代压水堆机组，以践行“安全为生命线”的核电发展理念。安全性大幅度提高也是我国引进三代核电技术的重要原因。三代核电技术的引进消化与吸收，促进了我国核电技术的自主创新，进一步提升了我国核电建设的能力与管理水平，形成了以CAP1400与华龙一号为代表的中国核电自主品牌。

然而，与中国核电发展速度极不协调的是我国核电锻件制造技术与能力的严重落后，彼时民用大型核电锻件几乎全部依赖进口，而世界上具备核电锻件生产技术和能力的企业又屈指可数，进口核电锻件不仅价格不菲、供货周期长，而且某些成品锻件的进口还要受到诸多限制，由此导致国内已开工建设的核电项目严重拖期。这种事态迫使国家下定决心务必要尽快实现核电锻件的国产化！素有“国宝”之称的共和国工业长子中国第一重型机械集团公司（以下简称中国一重）当之无愧地承担起了核电锻件国产化的重任。

虽然早在20世纪60年代，中国一重就已经开始研制军用核电锻件，且民用核电锻件所用材料与之相近，但民用核电锻件的特点是规格更大、形状更复杂、技术要求相对更高。为此，自2007年始中国一重联合国内优势企业及科研院所组成研发团队，承担了国家“十一五”科技支撑计划（2007BAF02B01）及大型先进压水堆核电重大专项（2008ZX06004-011、2013ZX06002-004、2014ZX06002-001）等项目的研制任务。为了卓有成效地改变我国核电锻件基础苍白、技术落后、工艺传统、装备陈旧的现状，更为了积累数据以期为中国核电自主品牌的设计与创新提供支撑，研发团队秉承机理研究与技术创新优先、工艺革新与装备改造并举、数值模拟与工程实践并重的研创理念，发扬敢为人先、艰苦奋斗的优良传统，以舍