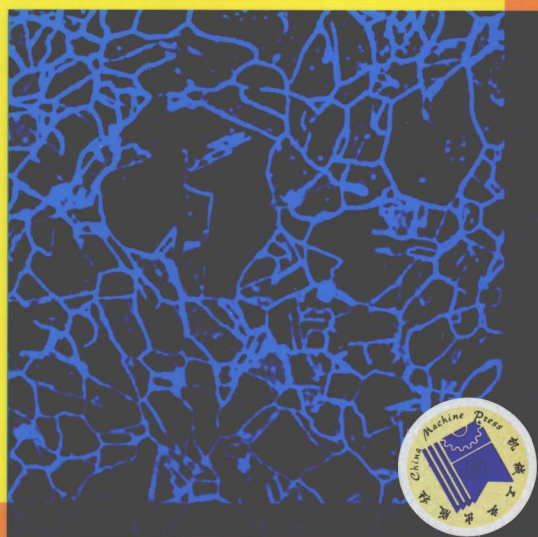
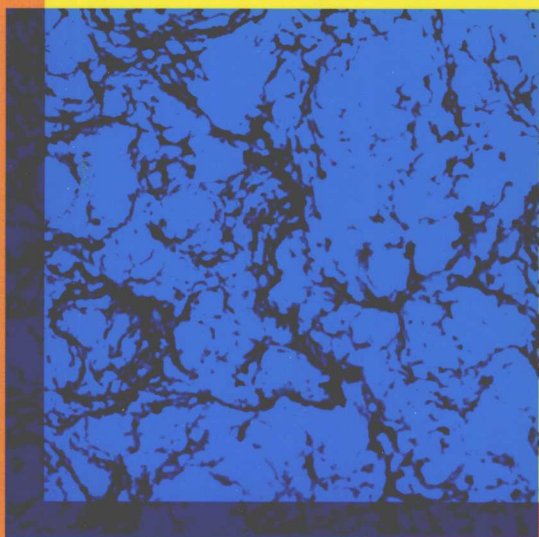
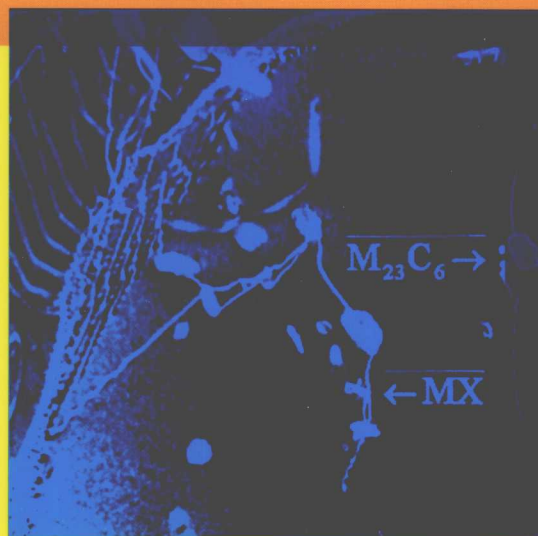
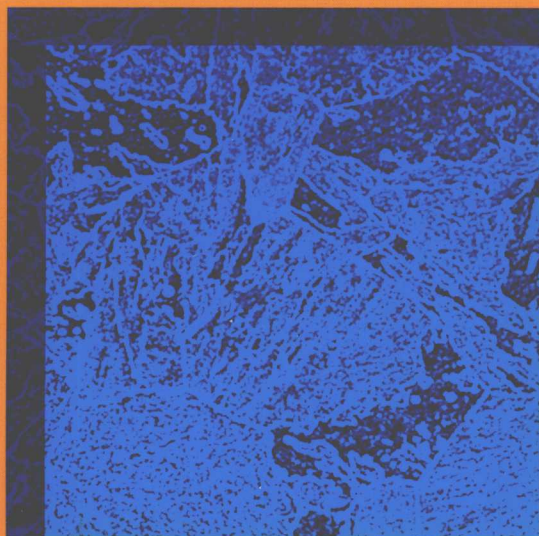


超临界 锅炉耐热钢研究

赵钦新 朱丽慧 著



超临界锅炉耐热钢研究

赵钦新 朱丽慧 著



机械工业出版社

近年来,日益严重的能源与环境问题已成为国际社会面临的两大主题。为节约能源、保护环境和实现可持续发展战略,应对全球气候变化,发展高效率的超临界、超超临界蒸汽参数、超大容量的蒸汽循环发电机组将是我国未来电力发展的根本出路。为此,必须研究开发和高蒸汽参数发电机组相适用的高温耐热材料。这项工作在国家有关部门的统一组织下,由冶金部门、发电设备制造部门和高等学校、科研院所组成“三结合”攻关队伍,在电力部门的积极配合下,从我国国情出发,针对我国发展超临界压力发电机组电站锅炉耐热钢系列 07Cr2MoW2VNbB、10Cr9Mo1VNbN 和 10Cr18Ni9NbCu3BN 等 3 种典型耐热钢的合金化原理、强化机理、蠕变及退化机理、高温疲劳性能、动态断裂韧度等方面进行了深入研究。这项研究历时 15 年,获得了丰硕研究成果。本书的两位作者全程参与了研究工作,在此基础上,系统整理编成本书。

本书对冶金部门钢铁研究所、钢铁厂的耐热钢研究人员,对发电设备制造行业从事电站锅炉设计、制造、材料、焊接工艺的技术人员,对电厂金属材料运行监督和管理的专业技术人员,具有重要的参考价值 and 业务指导作用。本书也可供国家质量技术监督部门的锅炉压力容器质量监督检验的工程技术人员和高等学校有关专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

超临界锅炉耐热钢研究/赵钦新,朱丽慧编著. —北京:机械工业出版社, 2009. 8

ISBN 978-7-111-27937-2

I. 超… II. ①赵…②朱… III. 超临界压力锅炉-耐热钢-研究
IV. TK229. 2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 133315 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑:崔世荣 版式设计:霍永明 责任校对:李秋荣

封面设计:姚毅 责任印制:乔宇

北京机工印刷厂印刷(兴文装订厂装订)

2010 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 22.75 印张 · 563 千字

0 001—2 500 册

标准书号:ISBN 978-7-111-27937-2

定价:50.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010) 88361066

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售一部:(010) 68326294

销售二部:(010) 88379649

教材网:<http://www.cmpedu.com>

读者服务部:(010) 68993821

封面无防伪标均为盗版

序

1960年,我国生产出第一台50MW火电机组,蒸汽压力为9.8MPa,蒸汽温度为538℃。1960年以后,我国生产的火力发电机组的容量和压力不断提高,但主蒸汽温度参数却长期停留在538℃。直到2004年,我国才生产出第一台蒸汽温度出现飞跃的600MW的超临界火力发电机组,蒸汽压力为25.20MPa,蒸汽温度为566℃/566℃。从1960年到2004年,历经40多年的发展,蒸汽温度不能提高的主要原因之一是材料问题没有解决,直到国外开发的新材料使用成熟,并在国内进行性能复核评定合格之后,才开始引进并用于生产超临界压力发电机组。我国电力建设一直以燃煤火电机组为主,依靠自主研发、设计和生产,1974年投运的我国首台国产300MW机组,蒸汽参数为16.70MPa、538℃/538℃。1987年投运的第一台引进的300MW机组,蒸汽参数为18.28MPa、538℃/538℃。2004年之后我国以制造和投运600MW及以上的超临界压力发电机组为主。目前,我国已经投运的超临界压力发电机组在100台以上。与其他发电技术相比,超临界发电技术具有更高的竞争优势。因此,发展超临界和超超临界发电机组已成为我国应对气候变化、节能减排、应用洁净煤发电技术的必然选择。

1987年,上海锅炉厂率先引进T91耐热钢管,替代美国CE公司原设计采用TP304H钢在300MW机组上应用,并进行了大量的性能评价试验工作,为我国锅炉制造行业应用进口T91耐热钢管积累了丰富的经验。

推广T91/P91耐热钢管的紧迫性引起我国电站锅炉制造业的极大关注,如果能使T91/P91耐热钢管的供货立足于国内,将极大地促进我国发电设备制造业和电力工业的技术进步。1989~1990年,电站锅炉制造厂和钢管厂签署了试制10Cr9Mo1VNbN耐热钢管的协议和供货合同。1991年,经原机电部批准,“T91耐热钢管国产化研究课题”被列为“八五”国家重点科技攻关项目“材料和大型铸锻件国产化关键技术攻关”项目之子课题,这一工作在上海发电设备成套设计研究所的组织下,各电站锅炉制造厂大力协作,于1993年完成了试制10Cr9Mo1VNbN耐热钢管及其焊材的性能评定工作,并取得了阶段性的研究成果,并于1995年完成了技术成果鉴定。之后,国产化的10Cr9Mo1VNbN耐热钢号被纳入国家GB 5310—1995《高压锅炉用无缝钢管》标准[⊖]。从基本力学性能来看,国产化的10Cr9Mo1VNbN耐热钢管的常规力学性能能够达到进口T91耐热钢管的指标。但是,在高温持久试验复核时发现:国产化的10Cr9Mo1VNbN耐热钢管在其使用温度范围内存在蠕变脆性现象,持久塑性也远低于国外的同类进口钢种,这些问题只有从微观组织结构基础研究上去找答案,蠕变脆性特征的出现阻碍了

⊖ 即GB 5310—1995标准中的10Cr9Mo1VNb。——编者注

10Cr9Mo1VNbN 耐热钢管的国产化进程。

回顾我国电站锅炉耐热钢研发历史，可以看到，20世纪60年代初期，我国自行研制超高压火力发电机组时，也确定了不采用奥氏体不锈钢的研发方向，相继研发了12Cr1MoV、102和n11低合金耐热钢。20世纪80年代末期，在从美国引进亚临界蒸汽参数电站锅炉时，尽管争取到可以使用102钢，但因国内冶金条件所限，不得不将小口径厚壁102钢管转移到日本生产。因此，1991年，机械工业部审慎地研究了美国、欧洲和日本的超临界发电技术及其电站锅炉用钢体系，继欧洲之后，选择了日本的电站锅炉用钢体系。有鉴于此，1995年，我建议，由原机械工业部发电设备服务中心组织哈尔滨锅炉厂、上海锅炉厂、东方锅炉厂参与，委托西安交通大学材料科学与工程学院对国产化的10Cr9Mo1VNbN耐热钢管进行深化研究工作，同时考虑到未来超临界发电技术发展的要求，完善我国电站锅炉用钢体系，将07Cr2MoW2VNbB钢和10Cr18Ni9NbCu3BN钢也一起纳入深化研究中，这就是电站锅炉耐热钢深化研究的发起和组织过程。

本书的两位作者就是参与以上深化研究工作的两位博士研究生，两位作者在电站锅炉制造企业对上述钢的性能复核和评价试验数据分析研究的基础上，对07Cr2MoW2VNbB、10Cr9Mo1VNbN和10Cr18Ni9NbCu3BN等3种典型耐热钢的合金化原理、性能强化和退化机理、低周疲劳和冲击性能以及微观组织结构进行了深化研究。1998年两位作者在国产化的10Cr9Mo1VNbN钢试样断面上发现了硫化物、Ti和Al的碳化物及氮化物，首次提出了10Cr9Mo1VNbN钢的蠕变脆化机理，并据此提出了改善我国耐热钢综合力学性能的一系列研究成果，这些成果被广泛应用于钢厂对10Cr9Mo1VNbN钢的性能改进，从而加快了该钢的国产化进程。两位作者于1998年先后获得博士学位，顺利完成原机械工业部组织的上述3种钢的深化研究工作。之后，两位作者还在各自的工作岗位上继续进行着耐热材料的研究工作，并相继获得国家“十五”863计划、“十一五”科技支撑计划和地方政府及企业的资金支持。

耐热材料蠕变机理复杂，需要不断深化研究，同时还应强调耐热材料的装机长期运行验证。国外试验室研制成功的新型耐热材料在运行实践中相继发生失效问题，再一次提醒我们应该正视新型耐热材料长期运行持久强度降低的问题。因此，耐热材料研究工作不能仅停留在初期的研发应用阶段，必须在使用过程中加强分析研究，了解材料服役行为的变化，以提高发电设备在寿命周期内的可靠性。正因为如此，在国务院发布的装备制造业调整和振兴规划中，将耐高温、耐高压、耐腐蚀电站用钢管列为重点发展项目。

以上3个钢种的国产化和成功应用，为我国超超临界发电技术的广泛应用奠定了基础。我相信本书的出版，会对我国冶金工业、设备制造和运行部门的工程技术人员提供有益的参考和帮助，也是对发展洁净煤发电技术、实现节能减排目标所作出的一点贡献。

陆燕芬

2009年9月21日

前 言

目前和未来蒸汽循环发电系统有两个明显的发展趋势，首先，延长现役发电机组的寿命，为增加延寿机组的灵活性和适应负荷的能力，要求替换使用的耐热材料具有足够的安全裕度；其次，为节约能源和保护环境，应对全球气候变化，需要发展高能效的超临界、超超临界蒸汽参数、超大容量的蒸汽循环发电机组。20世纪70年代以前，由于耐热材料的限制，世界范围内常规发电机组的蒸汽参数一直维持在16~24MPa、538~566℃。只有提高蒸汽参数，发电机组的效率才能得到有效的提高；而要实现更高蒸汽参数下机组的长周期安全可靠的运行，必须研究开发与高蒸汽参数发电机组相适用的高温耐热材料。

国外的 T23 (07Cr2MoW2VNbN)、T91/P91 (10Cr9Mo1VNbN) 和 Super304H (10Cr18Ni9Cu3NbN) 耐热钢优良的综合性能与广泛应用早已引起我国发电工程界的极大关注，我国发电设备制造业自1987年开始从国外进口 T91 耐热钢管，部分代替 TP304H 钢用于制造大容量电站锅炉的高温过热器和再热器，为我国锅炉制造业应用 T91 耐热钢管积累了丰富的经验，并且取得了明显的经济效益和社会效益。在引进吸收和消化国外 T91/P91 耐热钢管先进技术的同时，我国冶金行业也试图利用现有的资源和装备试制 10Cr9Mo1VNbN 耐热钢管。为此，经过国内相关钢铁企业、电站锅炉制造企业和有关科研院所的共同努力，花费数十万试验台时，历时5年时间基本上完成了国产化的 10Cr9Mo1VNbN 耐热钢管及其焊接材料的试制任务，达到了国外 T91/P91 耐热钢管国产化研究的预期目标，取得了丰硕的研究成果。这些研究成果表明：试制的 10Cr9Mo1VNbN 耐热钢管的理化性能基本上达到了 SA-213 T91 的技术条件。通过了 10Cr9Mo1VNbN 耐热钢管的国产化研究，为国产的 10Cr9Mo1VNbN 耐热钢管供应状态的热处理规范、焊接工艺和弯管工艺等方面积累了丰富的生产经验。但是，我们在试制研究过程中也发现，试制的 10Cr9Mo1VNbN 耐热钢管与国外的耐热钢管相比存在一定的蠕变脆化倾向。由于国内电站锅炉制造企业和钢管生产厂的主要任务是侧重于耐热钢管试制和生产，对 10Cr9Mo1VNbN 耐热钢的研究大多集中于常规化学成分、高温短时拉伸性能、冲击韧度、抗蒸汽氧化性能、持久强度等力学性能的复核和工艺性能评定上，没有精力和时间对试制的 10Cr9Mo1VNbN 耐热钢与国外同类钢种在微量元素、微观组织结构、强化机理和退化机理等方面进行深入细致的研究和对比分析，从而无法解释试制的 10Cr9Mo1VNbN 耐热钢试验材料发生蠕变脆化的根本原因。除此之外，对试制的 10Cr9Mo1VNbN 耐热钢的高温低周疲劳性能和断裂韧度也一直未进行过系统研究。因此，有必要对试制的 10Cr9Mo1VNbN 耐热钢作进一步的深化研究，以推进和完善电站锅炉耐热材料的国产化进程。

1990年初，原机电部的领导和专家高瞻远瞩，敏锐地认识到：超临界电站锅炉耐热材料应该发展系列钢种才能完成超临界发电技术的飞跃，既要兼顾当时亚临界和正在研发的超临界发电机组电站锅炉耐热钢的实际需要，又要考虑对未来发展的超超临界发电

机组的超前需求，因此，在系统布置对国产化的 10Cr9Mo1VNbN 耐热钢进行微观组织结构进行深化研究的同时，原机械工业部陆燕荪副部长提议将 07Cr2MoW2VNbB 和 10Cr18Ni9NbCu3BN 耐热钢也一起纳入深化研究当中，并指示要深入研究这些材料的微观组织的精细结构，用微观组织结构来解释宏观性能，以便总结经验指导生产；陆燕荪副部长还进一步指出：“电站锅炉钢基础和应用研究是一项长期而艰巨的系统工程，研制和完善超临界和超超临界发电机组用的耐热钢一直是发达国家动力工业和冶金工业长期以来持续的努力目标，也是我国摆脱国外耐热钢供应对我国电力制造业大国的“瓶颈”的唯一出路；耐热钢性能复核及深化研究必须走联合攻关、分工协作研究的道路，特别是基础研究，基础研究是可以超越竞争的，因为材料研究需要解决的问题很复杂，生产部门着重于试验、制造和推广应用，尽管生产部门也有很强的 R&D 力量，但生产部门主要解决 Know How 的问题，而机理性的基础研究，即 Know Why 的问题，则主要由大学或国家研究院所承担，从近 10 年来召开的耐热钢国际会议研究方向上可明显看出这种研究分工的格局，可以说国外耐热钢研制开发和应用的成功经验表明：正是大学或国家研究院的基础理论研究为电站耐热钢的机理研究和耐热材料试制和生产工作指明了研究方向。”

作者分别从 1994 年和 1995 年开始研究电站锅炉耐热材料，至今也有 15 年了，所做的研究只是推进我国电站锅炉耐热材料发展过程中的一小部分工作，为了更好地总结过去，启迪未来，特将研究成果辑录成册，希望能为我国电站锅炉耐热材料的发展尽一份力量，为从事电站锅炉耐热材料研究的同行提供一点参考和借鉴，本项研究成果对我国冶金部门研制开发新型耐热钢种，对发电设备的设计和制造，对电厂金属材料的运行监督，都具有重要的参考价值和指导意义。但限于作者水平，书中缺点和错误在所难免，敬请读者批评指正。

作者衷心感谢中国机械工业联合会发电设备服务中心、哈尔滨锅炉厂有限责任公司、上海锅炉厂有限公司、东方锅炉（集团）股份有限公司提供的原始研究经费资助；感谢“十五”国家高技术研究发展计划（863 计划）能源领域/洁净煤技术主题/“超超临界燃煤发电技术”重大专项之“超超临界发电机组技术选型研究”（2002AA526011）课题和“超超临界锅炉关键技术研究”（2002AA526012）课题的经费资助；感谢“十一五”国家科技支撑计划项目“生命线工程和特种设备安全保障关键技术与工程示范”项目之“电站锅炉长周期运行安全保障关键技术研究及工程示范”（2006BAK02B03）课题经费资助；感谢上海市科委重点科技攻关“重大装备用高性能结构材料及工艺技术研究”（075211017）课题经费资助；感谢宝山钢铁股份有限公司提供研究经费资助。

本书由西安交通大学能源与动力工程学院热能工程系赵钦新博士、教授（编写第 1、4、6 章）和上海大学材料工程系朱丽慧博士、教授（编写第 2、3、5 章）共同编著，全书由赵钦新统稿。

本书由西安交通大学材料科学与工程学院金属强度国家重点实验室顾海澄教授和西安交通大学特聘教授陆燕荪主审，作者在此向两位导师表示真诚的谢意。

赵钦新 朱丽慧

2008 年 12 月于西安

目 录

序

前言

第 1 章 超临界发电技术及电站锅炉

耐热材料进展 1

1.1 我国电力需求及火力发电增长分析 1

1.1.1 我国电力工业发展的重大需求 1

1.1.2 煤电发展的机会与威胁 11

1.1.3 以煤电为主的电力构成 16

1.1.4 电力工业与环境保护 17

1.2 超临界发电技术及其进展 18

1.2.1 超临界发电技术 18

1.2.2 超临界锅炉技术应用 53

1.3 电站锅炉耐热材料进展 67

1.3.1 电站锅炉高温受压部件 67

1.3.2 超临界锅炉耐热材料进展 73

1.3.3 电站锅炉耐热钢的技术经济比较 79

1.3.4 我国火电发展及对耐热材料的要求 82

1.3.5 结论 84

参考文献 86

第 2 章 电站锅炉耐热钢的合金化

原理 89

2.1 锅炉耐热钢的强化机理 89

2.1.1 基体强化 89

2.1.2 沉淀强化 91

2.1.3 晶界强化 93

2.2 合金元素和杂质元素对锅炉耐热钢性能的影响 93

2.2.1 碳 (C) 93

2.2.2 铬 (Cr) 94

2.2.3 钼 (Mo) 95

2.2.4 钨 (W) 95

2.2.5 钒 (V) 96

2.2.6 铌 (Nb) 97

2.2.7 钛 (Ti) 97

2.2.8 稀土元素 (RE) 98

2.2.9 硼 (B) 99

2.2.10 锰 (Mn) 99

2.2.11 硅 (Si) 100

2.2.12 镍 (Ni) 101

2.2.13 铜 (Cu) 102

2.2.14 钴 (Co) 103

2.2.15 氮 (N) 103

2.2.16 铝 (Al) 104

2.2.17 硫 (S) 106

2.2.18 磷 (P) 106

2.2.19 氧 (O) 106

2.2.20 氢 (H) 106

2.2.21 砷 (As)、锑 (Sb)、锡 (Sn)、 铋 (Bi) 107

参考文献 107

第 3 章 07Cr2MoW2VNbB 贝氏体

耐热钢 111

3.1 T23 贝氏体耐热钢介绍 111

3.1.1 常规力学性能 111

3.1.2 高温性能 112

3.1.3 焊接性能 113

3.1.4 T23 钢在国内的应用情况 113

3.2 我国 07Cr2MoW2VNbB 贝氏体耐热钢 供应状态下的组织和强化机理 114

3.2.1 引言 114

3.2.2 试验材料 115

3.2.3 试验结果与分析 115

3.2.4 07Cr2MoW2VNbB 钢的强化 机理 120

3.2.5 本节小结 123

3.3 07Cr2MoW2VNbB 钢高温时效后的组织 演变及其对力学性能的影响 123

3.3.1 引言 123

3.3.2 试验方法 124

3.3.3 试验结果与分析 124

3.3.4 讨论 129

3.3.5 本节小结 133

3.4	07Cr2MoW2VNbB 钢高温持久后的组织演变及其对力学性能的影响	133	的因素	206
3.4.1	引言	133	4.3.8 Ti、Al 微量元素降低持久强度和持久塑性	212
3.4.2	试验方法	133	4.3.9 本节小结	215
3.4.3	试验结果与分析	134	4.4 10Cr9Mo1VNbN 钢焊接接头性能研究	216
3.4.4	讨论	149	4.4.1 焊接接头持久强度试验	217
3.4.5	本节小结	154	4.4.2 焊接接头的硬度试验和金相观察	220
3.5	T23 钢高温低周疲劳性能	154	4.4.3 焊接接头持久强度断裂试样的 SEM 观察	225
3.5.1	引言	154	4.4.4 软化区第 IV 类裂纹开裂造成焊接接头持久强度降低	227
3.5.2	试验方法	154	4.4.5 本节小结	228
3.5.3	试验结果与分析	155	4.5 10Cr9Mo1VNbN 钢低周疲劳性能研究	228
3.5.4	本节小结	161	4.5.1 试验材料与方法	229
	参考文献	161	4.5.2 疲劳特性分析	229
			4.5.3 蠕变和疲劳交互作用下的微观组织演变	231
			4.5.4 疲劳断口形貌观察与分析	234
			4.5.5 本节小结	235
第 4 章	10Cr9Mo1VNbN 铁素体耐热钢	164	4.6 10Cr9Mo1VNbN 钢蠕变寿命预测	237
4.1	国内外的铁素体耐热钢概况	164	4.6.1 空洞形核和生长机理	238
4.1.1	改进型 9Cr-1Mo 钢研发和应用背景	164	4.6.2 受约束蠕变孔洞生长模型	240
4.1.2	T91/P91 钢纳标及应用概况	165	4.6.3 蠕变孔洞非均匀成核修正模型	242
4.1.3	T91/P91 钢的性能特点	166	4.6.4 本节小结	244
4.1.4	我国 10Cr9Mo1VNbN 钢研究开发	173	参考文献	245
4.1.5	10Cr9Mo1VNbN 钢性能的深化研究	180	第 5 章	10Cr18Ni9NbCu3BN 奥氏体耐热钢
4.2	10Cr9Mo1VNbN 钢强化机理研究	181	5.1 Super 304H 奥氏体耐热钢介绍	249
4.2.1	材料和试验	182	5.1.1 常规力学性能	250
4.2.2	间隙和置换原子及其原子对相互作用形成的固溶强化	183	5.1.2 高温性能	251
4.2.3	析出和弥散强化	185	5.1.3 焊接性能	253
4.2.4	位错强化	190	5.1.4 弯管及弯后热处理	254
4.2.5	碳化物稳定下的亚结构强化	191	5.2 我国 10Cr18Ni9NbCu3BN 钢强化机理研究	254
4.2.6	本节小结	192	5.2.1 引言	254
4.3	10Cr9Mo1VNbN 钢退化机理研究	192	5.2.2 试验方法和材料	255
4.3.1	合金元素的再分配	193	5.2.3 试验结果与分析	255
4.3.2	碳化物粗化和间距增大	194	5.2.4 讨论	263
4.3.3	位错密度下降	197	5.2.5 本节小结	265
4.3.4	Nb, V (C, N) 的弥散质点分布不均匀	198		
4.3.5	碳化物粗化引起空洞形核机理	199		
4.3.6	空洞生长及微裂纹控制的蠕变断裂	202		
4.3.7	晶界弱化及促进空洞形核			

5.3	10Cr18Ni9NbCu3BN 钢高温时效后的 组织演变对力学性能的影响	265	6.2.2	蒸汽温度为 600℃ 的超超临界电站 锅炉耐热材料选型	294
5.3.1	引言	265	6.2.3	蒸汽温度为 620℃ 的超超临界电站 锅炉耐热材料选型	299
5.3.2	试验方法	265	6.2.4	蒸汽温度为 650℃ 的超超临界电站 锅炉耐热材料选型	301
5.3.3	试验结果与分析	266	6.3	超超临界电站锅炉耐热材料研究 进展	302
5.3.4	讨论	272	6.3.1	超超临界电站锅炉耐热材料研究 概况	302
5.3.5	本节小结	274	6.3.2	“十五” 863 计划电站锅炉耐热 材料研究进展	306
5.4	10Cr18Ni9NbCu3BN 钢高温持久后的 组织演变对力学性能的影响	274	6.3.3	“十一五” 国家科技支撑计划项目 电站锅炉耐热材料研究进展	309
5.4.1	引言	274	6.3.4	我国电站锅炉耐热材料研究的 未来计划	314
5.4.2	试验方法	274	参考文献		348
5.4.3	试验结果与分析	275	附录		352
5.4.4	讨论	280	附录 A	GB 5310—2008 中钢的牌号与 国外相近钢的牌号对照表	352
5.4.5	本节小结	281	附录 B	著作者发表的和本项研究相关的 学术论文及成果	353
参考文献		281			
第 6 章	超超临界发电技术及耐热材料 展望	284			
6.1	超超临界发电技术进展	284			
6.1.1	超超临界发电机组的优越性	284			
6.1.2	超超临界发电机组的发展状况	286			
6.2	超超临界电站锅炉耐热材料选型	291			
6.2.1	超超临界电站锅炉候选耐热 材料	291			

第 1 章 超临界发电技术及电站锅炉耐热材料进展

1.1 我国电力需求及火力发电增长分析

1.1.1 我国电力工业发展的重大需求

1. 经济增长与电力需求分析

众所周知，任何国家或地区的经济发展总是建立在能源消耗的基础之上，并直接决定着电力需求的变化。一个国家或地区的经济高速发展，势必会对电力的发展提出更高的要求；反之，如果一个地区的经济发展停止不前，其电力工业的发展也会受到影响。目前，电力是最主要的二次能源，是在消耗一次能源的基础上产生的高品位能源，可以肯定地说，电力工业是国民经济发展的基础。自从第二次产业革命以来，社会生产进入电气时代，人们的生活方式也与电息息相关，电力作为二次能源在生产和生活中发挥着不可或缺的动力能源作用，电力能否得到合理有效的供给已经成为国民经济健康稳定发展的一个关键因素。

我国改革开放 30 多年的发展历程同样也证明：电力工业必须超前发展，才能保证我国国民经济持续、健康、快速地发展^[1]。改革开放以来，我国经济增长取得了巨大的成就。我国经济经历了波浪式前进的过程，从 1981 年左右开始，我国经济进入快速发展轨道，1984 年达到第一个高点，然后逐渐减速，于 1990 年达到最低点完成了第一个周期。1991 年进入另一个增长期，1992 年达到高点，然后逐渐减速，在 1999 年达到低点，完成了第二个周期。2002 年下半年我国经济明显回暖，经济增长进入一个新的时期。2003 年我国的国内生产总值突破 10 万亿元大关，2003 年我国人均 GDP 达到 1000 美元，2004 年我国人均 GDP 突破 10000 元人民币，这些在我国经济增长史上都是具有里程碑意义的。

为了更加明确地看出经济增长与电力发展之间的关系，我们可以观察历年来我国的经济增长率与社会用电量、发电量增长率之间的关系，见表 1-1^[2]。

表 1-1 我国 GDP 增长率与用电量、发电量增长率

年份	GDP 增长率 (%)	用电量增长率 (%)	发电量增长率 (%)
1995	10.9	9.28	7.78
1996	10	6.92	7.79
1997	9.3	4.44	5.05
1998	7.8	2.97	2.07
1999	7.6	6.57	6.52
2000	8.4	11.36	10.98
2001	8.3	9.03	8.43
2002	9.1	11.6	11.48
2003	10.0	15.29	15.17

(续)

年份	GDP 增长率 (%)	用电量增长率 (%)	发电量增长率 (%)
2004	10.1	15.05	14.9
2005	10.2	13.95	12.3
2006	10.7	14.14	14.1
2007	10.8	14.4	14.4

数据来源：文献 [2] 及公共媒体，经作者重新修订。

通常用电力消费弹性系数来反映经济增长率和用电增长率两者之间的相互关系。电力消费弹性系数是经济增长率和用电增长率之间的比率，它能够在较长的时间尺度上反映经济增长与电力需求的关系。用电力生产弹性系数来表示经济增长率和电力生产增长率之间的关系，电力生产弹性系数是经济增长率和电力生产增长率之间比率。无论是一个国家或地区，比较合理的情况是经济增长与电力增长满足并维持一定的关系。表 1-2 所示为我国 GDP 增长率和电力弹性系数变化情况^[2]。

表 1-2 我国 GDP 增长率和电力弹性系数

年份	GDP 增长率 (%)	电力消费弹性系数	电力生产弹性系数
2000	8.4	1.35	1.31
2001	8.3	1.09	1.02
2002	9.1	1.27	1.26
2003	10.0	1.53	1.52
2004	10.1	1.49	1.48
2005	10.2	1.37	1.21
2006	10.7	1.32	1.32
2007	10.8	1.33	1.33

数据来源：文献 [2] 及公共媒体，经作者重新修订。

由表 1-2 可以看到：自 2000 年以来的 8 年中，我国电力消费弹性系数都大于 1。这说明 2000 年以来电力的发展不能够满足经济增长的需要。

不仅如此，世界经济增长和电力需求一直也维持着一定的比例关系，图 1-1 所示为世界范围内装机容量增长与 GDP 增长的平衡关系^[3]。

图 1-2 所示为世界各地在 1990~2002 年间的 GDP 年平均增长率以及 2002~2010 年间 GDP 的平均增长率^[3]。从中可以看出，在过去以及将来的近 20 年里，中国的经济增长一直保持着较高的速度，其次为印度、亚洲其他国家和地区以及中东和非洲地区。由此可以大致地做出判断：亚太地区由于其经济的快速发展将成为未来电力需求旺盛的地区。

在经济 (GDP) 增长的前提下，各个国家和地区的电力需求也必定有相应增长，对比图 1-2 和图 1-3，可以看出，GDP 增长率较高的地区普遍电力消费水平不高，这是和这些地区原先落后的经济状况分不开的。随着这些地区经济的发展，社会的进步，其电力需求必然会有很大的提高。图 1-3 具体说明了这些国家未来电力增长的潜力^[3]。其中，中国的增长尤为明显，据预测，中国电力装机容量占世界总装机容量的比值将从 2002 年的 10% 上升到 2010 年的 15%，是世界上电力增长最为迅速的地区。中东、非洲地区及独联体国家未来发展也

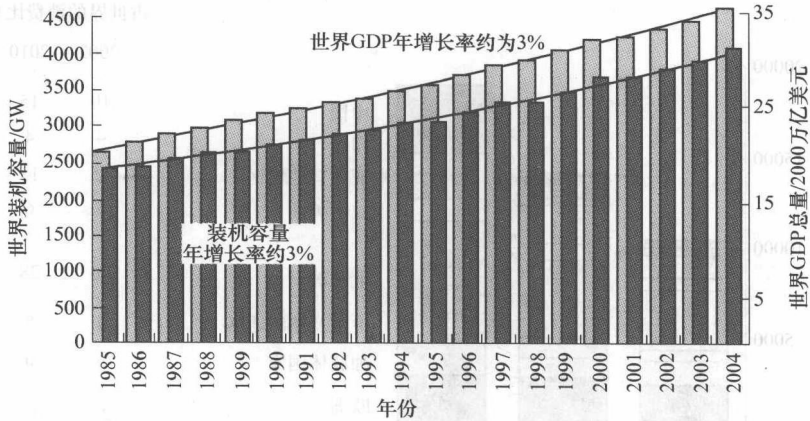


图 1-1 世界范围内装机容量增长与 GDP 增长的平衡关系
(资料来源:文献 [3]。图 1-2, 图 1-3 资料来源与此相同)

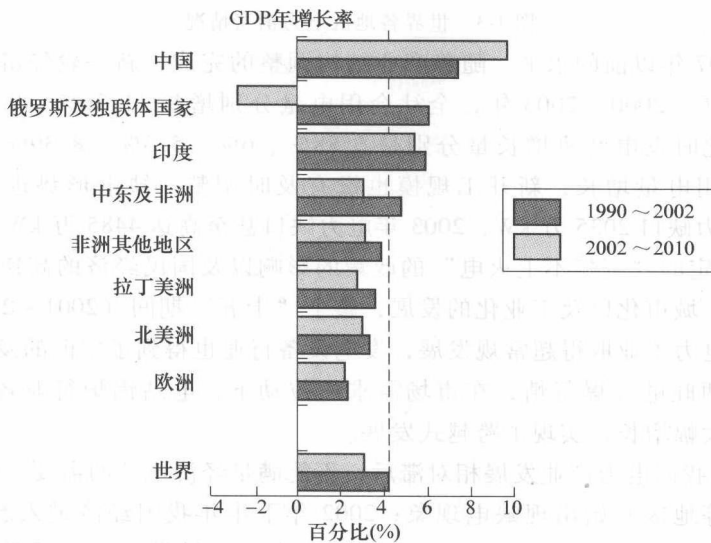


图 1-2 世界各地 GDP 平均增长率

很快。其他像北美洲和欧洲市场则发展平稳。

2. “十五”期间电力发展回顾

(1) “十五”以前电力发展回顾^[4] 从 1969 年开始,随着国内经济的恢复性发展,我国就开始缺电,经过近 20 年的电力、电源建设,尤其是 20 世纪 90 年代的快速建设,到 1998 年电力供需才出现首次平衡。

实际上,1997 年以前,国内电力投资建设的规模。平均每年都在 2000 万 kW 以上,然而到了 1998 年,由于主观判断的问题,预测电力需求不再增长,致使国家于 1998 年制定了“三年不上火电”的电力发展政策;当年开工规模陡然下降为 1021 万 kW,1999 年和 2000 年,更是进一步下跌,连续两年只有 600 万 kW。直到 2001 年,这个下跌势头才得以恢复。

从 2002 年起,由于电力紧张,全国各地都在大干快上地筹建新电厂,然而此时的用电

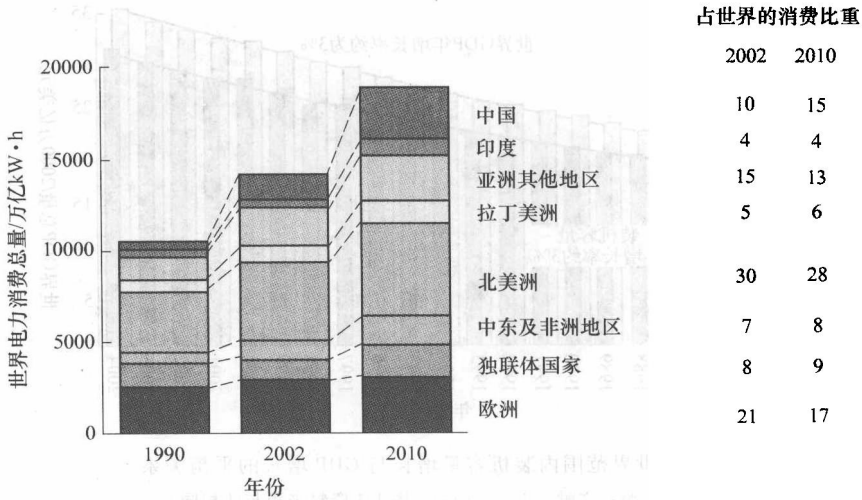


图 1-3 世界各地电力消费情况

需求已经不是 1997 年以前的水平。随着产业结构调整地完成，新一轮经济增长开始，带动用电需求加速增长，2000 ~ 2003 年，全社会用电量分别增长 11.36%、9.03%、11.6% 和 15.4%。但是，此时发电装机增长量分别是 6.88%、6%、5.3%、8.39%，不仅发电装机增长远远落后于用电量增长，新开工规模也没有及时调整。缺电形势进一步加剧，导致 2002 年出现了电力缺口 2035 万 kW，2003 年电力缺口甚至高达 4485 万 kW。

受 1998 年制定的“三年不上火电”的政策的影响以及国民经济的高速发展和人民生活水平的不断提高，城市化以及工业化的发展，整个“十五”期间（2001 ~ 2005 年），电力供需紧张促使我国电力工业取得超常规发展，发电设备行业也得到了空前的发展机遇，出现了订单饱满、产销两旺的火爆行情，在市场需求的拉动下，电站锅炉行业各个层次（梯队）企业销售收入都大幅增长，实现了跨越式发展。

“十五”期间我国电力产业发展相对滞后，不能满足经济增长的需要。2001 年浙江、广东、河南和宁夏等地区开始出现缺电现象；2002 年下半年我国经济进入新一轮增长时期，电力短缺程度加重，特别是 2003 年和 2004 年的电力消费异常，出现了严重的电力短缺形势，2003 年我国出现拉闸限电的省份共计 22 个，2004 年增加到 24 个，2005 年紧缺形势虽有所缓解，但没有从根本上改变电力紧缺的局面。表 1-3 所示为“十五”期间我国每年新增装机情况。

表 1-3 “十五”期间我国每年新增装机情况

年 份	装机容量/MW	火电装机容量/MW	水电装机容量/MW	核电及其他/MW
2001	338610	253140	83370	2100
2002	356570	265550	86070	4950
2003	391400	289770	94900	6730
2004	440700	324900	108260	7540
2005	508410	384130	116520	7760

数据来源：文献 [2] 及公共媒体，经作者修改补充。

(2) 2003~2005年电源建设投资出现“井喷”行情 从2003年出现电力紧张的局面以后,国家加大对电源建设的投资力度,2003年全国发电设备产量猛增,达到3700万kW,比2002年增长74%。到2004年5月底,我国的总装机容量已经突破4亿kW,在建总装机容量1.6亿kW,其中2004年全国电力项目开工总装机容量4000万kW,新增发电容量将达到4100万kW。按照2004年的电力建设速度,国家计划经过2~3年的集中投产,到2006年电力需求达到基本平衡,之后,希望电源建设速度逐步放缓,但不会急剧衰退。基于这样的一种构想,如果按照每年装机增长6%的保守估计,每年新增装机3450万kW,接近2003年水平。根据“十五”期间的预测,预计到2007年底,我国装机容量将达到5.75亿kW,实际上,到2007年底,我国装机容量已经达到7.13亿kW,可见实际发展速度超出预测或者构想。

2004年,发电设备产量增幅连续11个月超过90%(1~2月增长99%,1~3月增长105%,1~4月增长95%,1~5月增长116%,1~6月增长100%,1~7月增长107%,1~8月增长107%,1~9月增长102%,1~10月增长103%,1~11月增长99%,1~12月增长90.87%)。受电力需求强劲拉动,2004年全年的发电设备产量达到7138万kW,同比增长90.87%,火爆行情为历年少有。在火电设备中:30万kW机组由2003年的34套增至62套;60万kW机组由2003年的12套增至28套。电站锅炉完成23.4万蒸吨,同比增长73%;电站汽轮机完成4081万kW,同比增长48%。其中:水轮发电机组完成1121万kW,同比增长83%;汽轮发电机组完成5953万kW,同比增长92%;受一次发电设备投资的巨大增长的影响,二次发电设备,如交流电动机、变压器、高压开关板、电焊机的增幅均保持在20%以上。

火电设备在2003~2004年经历了极度火爆的市场,订单大幅上升,产品供不应求,生产厂商开足马力也难以满足市场的需求。在此背景下,2005年~2006年电力设备行业异常火爆,企业手中拥有巨额订单,生产计划已经安排到2007年,按照当时的生产能力保证3年的高速增长完全没有问题。

回顾历史,我们看到,从建国初期的185万kW的装机容量,增加到1亿kW、2亿kW、3亿kW、4亿kW、5亿kW、6亿kW和7亿kW,分别用了38年、7年、5年、4年、2年、不到1年和1年的时间。改革开放以来,我国电力行业以世所罕见的速度书写了笑傲世界的电力发展的辉煌,并激情投入到中华民族的伟大复兴事业中。

3. 电力工业发展空间巨大

目前,我国电力供应总体上偏紧,电力消费仍继续保持高速增长。到2020年,为减缓目前国家电力供应的紧张局面,适应未来经济发展规模和人民生活水平提高的需要,电力工业必须获得稳步的发展。

中国作为世界上人口最多的发展中国家,长期以来城市化发展严重滞后于经济社会发展水平和工业化水平。2000年,中国城镇总数约为2万个左右,全国设有城市663个,城镇人口4.58亿,占全国总人口的36.22%,这不但与中等发达国家70%以上的城市化率水平相比相差甚远,与2000年世界平均城市化率水平50%相比,低了14%,与人均GDP水平相当国家的城市化水平的46%相比,也低10%。预计到2050年中国的城市化率将达到70%~80%,这意味着在未来50年的时间内,中国的城市化率将以每年0.8%左右的速度增长,将有约7.2~8.8亿人口从农村转移到城市。这些农村居民原先的生活用能主要依赖

非商品性的生物质能，例如薪柴和农作物秸秆等，入住城市以后，多转向商业性的二次能源和化石能源，如电力、煤炭和天然气。由此所带来的居住、就业、生活和消费方式等方面的深刻变化，不仅涉及社会经济问题，也更多地涉及资源和能源的利用问题，可以预见，未来电力消耗也将是城市化率增长以及工业化发展的必然要求。

2000年，我国发电装机容量达3.19亿kW，发电量达13685亿kW·h，均居世界第二位，在低用电水平上实现了电力的供需平衡。我国的发电量、装机容量和GDP水平大体相当于美国1968年的水平，当时美国发电量为14360亿kW·h，装机容量为310GW，GDP为8637亿美元。若2020年装机容量目标实现后，将会超过美国2000年的水平。但由于我国人口多，按人均计算，仍然仅达到世界平均水平，与发达国家的差距更大。为了不断提高人民生活水平和质量，实现全面建设小康的社会发展目标，我国未来在能源可供的限度内，仍需继续提高电力作为终端能源的比重。2020年我国人口按14.4亿计，每个家庭用电量仍仅为美国现在的25%。从总体上看，我国的电气化水平仍然较低。2000年我国人均装机容量只有0.25kW，只及世界平均水平的40%左右，人均发电量只有979kW·h，不到世界平均水平的一半，仅相当于发达国家的10%~17%，电力消费在一次能源消费中的比例只有34.8%。我国仍然是发展中国家，随着国民经济的发展，我国电力工业会有巨大的发展空间。

4. “十一五”期间电力发展状况及预测^[4,5]

“十一五”期间，国家发展和改革委员会制定的电力发展总方针为“大力开发水电，优化发展煤电，积极推进核电建设，适度发展天然气发电，加快新能源发电”。

优化发展煤电——清洁煤发电技术，高效低排放。其目标体现在以下方面：加强电源结构调整，限制小火电发展。新建火电厂一般都要使用单机容量在30万kW及以上的高参数、高效率的机组；发展坑口电站，变输煤为输煤与输电并举，减轻运输压力；在港口、路口、负荷中心建设电厂，适应电网安全稳定运行的需要，提高供电的可靠性；支持鼓励发展热电联产；开发环保技术，促进脱硫等环保设备的国产化，开展洁净煤技术的试验和示范工程；适当发展燃气蒸汽联合循环电站，提高效率，减轻环境污染。

(1) 发电量及其构成 “十一五”期间，全国发电量增长迅速，全口径发电量从“十五”末期2005年的总发电量24747亿kW·h，猛增到2007年的32559亿kW·h。

在全国全口径发电构成中，火力发电一直是我国电力生产的主要贡献者。2003年我国总发电量为19052亿kW·h，其中火力发电15789亿kW·h，火电电量占总发电量的比例为83%；2006年全国发电量是28344亿kW·h，其中火力发电量23573亿kW·h，火力发电量占总发电量的比例也是83%；2007年全国发电量是32559亿kW·h，其中火力发电量26980亿kW·h，火力发电量占全国发电量的比例没有改变，仍是83%。综合以上三年的数据分析，再追溯到20世纪80年代和90年代，可以明显地看出，火力发电量在我国的电力结构中的比例一直在80%以上，也就是说，我国全社会的用电量主要靠火力发电企业提供。

从2007年电力生产情况看，全国全口径发电量达到32559亿kW·h。其中，火电发电量26980亿kW·h，约占全部发电量82.86%；水电发电量4867亿kW·h，约占全部发电量14.95%；核电发电量626亿kW·h，约占全部发电量1.92%。

(2) 装机容量及其构成 装机容量与发电量必须保持一个适当的比例，过去25年间这个比例的平均水平为2.19。当装机容量与发电量的比例小于这个平均水平时，往往是电力

紧缺的时期，如2003年、2004年的比例是2.05和2.01。而当装机容量与发电量的比例大于这个平均水平时，则会出现电力过剩，如1998年的比例为2.40。

对“十一五”的电力生产预测，假定年底装机容量与发电量保持2.2:1左右的比例。预计到2010年中国装机容量约8.4亿kW。表1-4所示为“十五”末期按照2000~2005年的装机容量与发电量发展比例进行的“十一五”电力装机预测数据。图1-4也同时示出了2006~2010年的“十一五”电力装机预测数据的变化趋势。表1-4的最后三行示出了2006~2008年的电力装机容量、不同发电方式构成比例和发电量的实际数据。

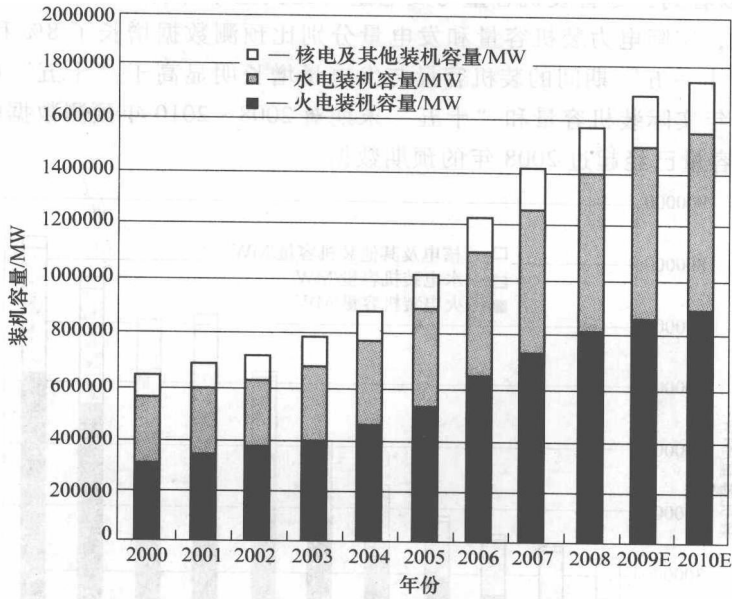


图 1-4 2006~2010年“十一五”电力装机预测数据变化趋势
(2006E、2007E、2008E、2009E、2010E为预测)

表 1-4 “十一五”电力装机预测

年份	装机容量 /MW	火电装机容量 /MW	水电装机容量 /MW	核电及其他 /MW	发电量 / $\times 10^4$ (MW·h)	装机容量 /发电量
2000	319320	237540	79680	2100	136850	2.33
2001	338610	253140	83370	2100	148390	2.28
2002	356570	265550	86070	4950	165420	2.15
2003	391400	289770	94900	6730	190520	2.05
2004	440700	324900	108260	7540	218700	2.01
2005	508410	384130	116520	7760	247470	2.05
2006E	576000	417810	137940	14400	261820	2.20
2007E	642000	470580	155420	16000	291820	2.20
2008E	708000	518960	171340	17700	321820	2.20
2009E	849530	649320	180189	20021	386150	2.20
2010E	879530	675320	181746	22463.1	399787	2.20
2006	622000	483326.1	129926.5	8747.4	283440	2.19