

2005 能源工程焊接国际论坛



焊 接 论 坛

论文集

主办单位：中国机械工程学会
及其焊接分会

时 间：2005. 9. 21 ~ 23

Proceedings of International Forum
on Welding Technology in Energy
Engineering

Sponsors:

The Chinese Mechanical Engineering Society
Welding Institution of CMES

September 21 ~ 23, 2005

IFWT 2005



机械工业出版社
China Machine Press

能源工业是一个综合性、战略性产业，并与机械制造业的发展水平密切相关，其中焊接科学与技术在我国能源工业的建设中具有重要作用。本论文集以能源装备与工程建设中的焊接及相关技术为主题，汇集了当前国内外的材料、装备、加工工艺等多个技术领域在能源工业中的进展与成就，反映了先进制造技术对支柱产业的巨大推动作用。所汇编的 60 余篇论文对从事能源及相关产业的研究人员、工程技术人员均具有重要的参考价值。

在此特向为本论文集的征集和编辑工作付出辛勤劳动的各位专家和工作人员表示衷心的感谢，他们是：关桥、林尚扬、潘际銮、徐滨士、陈强、陈剑虹、丁培璿、单平、史耀武、王钺、吴林、吴祖乾、殷树言、宋天虎、宋永伦、田原、吴毅雄、徐锋、张彦敏、吴静。

图书在版编目（CIP）数据

能源工程焊接国际论坛论文集 / 中国机械工程学会，
中国机械工程学会焊接分会编. —北京：机械工业出版社，2005.9
ISBN 7-111-17383-X

I. 能… II. ①中…②中… III. 能源—工程—焊接—国际
学术会议—文集 IV. TG4-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2005）第 104360 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：于淑香 田文华 封面设计：高长刚

北京机工印刷厂印刷·机械工业出版社发行

2005 年 9 月第 1 版·第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/16·28 印张·680 千字

0 001—500 册

定价：150.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换
购书热线电话（010）68594821

前 言

能源工业是一个以多学科为基础的综合性、战略性产业，其发展水平已成为衡量一个国家科技与经济实力的重要标志之一。近年来，我国国民经济的迅速发展引发了对能源及其相关产业的高度需求，尤其对提高我国机械制造行业的技术水平与能力提出了紧迫的要求，在党和政府提出的“科学、和谐、可持续发展”的方针指引下，学术界、工业界及社会各界对能源的建设、利用、绿色及再生等各方面都给予极大的关注。在这一新形势下，中国机械工程学会及其焊接分会组织召开了以能源工程中的焊接为主题的国际论坛，回顾和总结焊接科学与技术在我国能源工业建设中的发展与贡献，同时将吸取国际同行在该领域的真知和经验，从这一特定的视角反映出集材料、装备、加工工艺等多领域的先进制造技术在能源工业中所承担的重任及其对未来的思考和开创。

本次论坛是对当前国内外在能源工程与建设中的最新成就与进展的一次检阅，论坛工作得到了上海电气（集团）总公司等的大力支持。借此机会，我谨代表中国机械工程学会向国内外各界专家、同仁，向长期奋战在能源工业第一线的共和国建设者们致以崇高的敬意！

中国机械工程学会副理事长兼秘书长

常天宏

Introduction

Inherently multidisciplinary, the energy industry is becoming more integrated and strategic than ever before. Its developing level can be taken as a leading indicator of a country's technical and scientific strength. Along with development comes increasing demands on energy resources, we are facing urgent need to develop energy industry and build up the resources that support the industry. Scholars, engineers and talent in a broad array of specialties act in accordance with the fundamental policy of "scientific, harmonious and sustainable developing" on our nation's energy industry, via projects in such areas as construction, utilization, non-pollution and regeneration. Building upon these inspiring developments and highly conscious of our country's need, the Chinese Mechanical Engineering Society (CMES) and its Welding Institution welcome you to this international forum, which will focus on the topic of Welding in Energy Industry. The forum will review the development of welding science and technology in China's energy industry, sum up general knowledge in this field and provide an opportunity for international professionals to exchange and discuss ideas and experiences. The forum will also explore the significance of recent innovation and reflect them against applications in material, apparatus, processing technologies.

This will prove a timely opportunity to become familiar with the latest developments in the field and to build up a community of technical communication and partnership, both at home and abroad. On behalf of Chinese Mechanical Engineering Society, I would like to extend my appreciation to Shanghai Electric (Group) Company, which has strongly supported this forum. I also wish to express my great respect to those professionals and experts, locally, nationally and globally, who struggle every day to realizing the great goals of china's energy industry.



Tianhu Song
Vice President & General Secretary
CMES



能源工程焊接国际论坛日程表

Time Table

2005年9月21~23日 September 21~23, 2005

地点: 上海交通大学 新上苑600号

Venue: Shanghai Jiao Tong University

22日上午	开幕式	Opening Ceremony	
8:40~12:10	主持人	童天雄	陆 皓
	Chairmen	Tianxiong Tong	Hao Lu
8:40	中国机械工程学会 The Chinese Mechanical Engineering Society 能源工程与焊接技术 Energy Engineering and Welding Technology		
9:20	法马通公司 Framatome-anp, Areva Group, France 先进的焊接技术——窄间隙机械化电弧焊接 Narrow-Groove Mechanized Arc Welding-Advanced Welding Techniques		
10:00	上海电气(集团)总公司、上海焊接学会、上海焊接协会 Shanghai Electric (Group) Corp., Shanghai Welding Society, Shanghai Welding Association 上海发电设备焊接技术进展 Development of Welding Technology in Power Equipments in Shanghai		
10:50	阿尔斯通 Alstom 从世界上第二台超-超临界锅炉(Eddyston 1)的设计、制造和运行谈有关材料的选择及使用方面的经验与教训 Lessons From the Past: Materials-Related Issues in An Ultra-Supercritical Boiler at Eddystone Plant		



11:30	武汉大学 Wu Han University 火电站锅炉新型耐热钢的焊接性 The Weldability of Advanced Heat Resistant Steels for Power Fossil Boiler
22日下午 14:00~17:30	主持人 吴祖乾 周 刚 Chairmen Zuqian Wu Gang Zhou
14:00	英国焊接学会 TWI 在核电站维护中的先进连接技术 Advanced Joining Processes for Repair in Nuclear Power Plants
14:40	中科院沈阳金属研究所 Institute of Metal Research Chinese Academy of Science 中国热电力装置激光微弧火花无创伤修复技术的发展 Development of Laser & Micro-Arc Spark Dangerousless Repair Technology for the Heat-Energy Power Drive Devices in China
15:20	德国Pro-beam公司 Pro-beam Anlagen GmbH 能源工程中零件的电子束焊接 Electron Beam Welding of Components for Energy Engineering
16:10	上海梅达焊接设备有限公司 Shanghai Medar Welding Equipment Co., Ltd. 电阻焊接采用中频直流技术代替交流的节能技术 Energy Savings with the Use of MFDC Technology Verses AC in Resistance Welding Applications
16:50	宝山钢铁股份有限公司 Baoshan Iron & Steel Co., Ltd. 大型储罐用高强度钢板的开发和应用进展 Development and Application of the High Strength Steel for the Big Tank
18:30	上海电气(集团)总公司 Shanghai Electric (Group) Corp. 上海电气之夜——能源工程焊接国际论坛招待晚宴 Shanghai Electric Evening——Reception Banquet



23日上午	主持人	林尚扬	加布里埃尔·默尔
8:30~12:00	Chairmen	Shangyang Lin	Gabriel Merle
8:30	哈尔滨焊接研究所 Harbin Welding Institute 大型能源设备制造中的焊接技术 Welding Technology in the Manufacturing of Giant Power Equipments		
9:10	韩国科技教育大学 Korea University of Technology and Education 核燃料放射试验用密封管的微激光焊接技术的研究 A Study on the Micro-Laser Welding of Seal Tube for the Nuclear Fuel Irradiation Test		
9:50	上海交通大学 Shanghai Jiao Tong University 大型筒体结构焊接变形预测理论与应用 Theory and Application of Welding Deformation Prediction to Large Tubular Structure		
10:40	SMC国际超合金焊接材料有限公司 Special Metals Welding Products Co., Ltd. 在核电工业中镍基焊材的应用 Applications of Nickel Alloy Welding Consumables in Nuclear Power Industry		
11:20	中国石油天然气管道科学研究院 Research Institute of Pipeline of CNPC 长输管道安装焊接工艺选择综述 Welding Procedure Choose Summarize of Long-distance Transport Pipeline		
23日下午	主持人	关 桥	宋永伦
14:00~17:00	Chairmen	Qiao Guan	Yonglun Song
14:00	英国焊接学会 TWI 厚截面碳-锰钢的激光、激光与活性气体保护复合焊接技术 Laser and Hybrid Laser MAG Welding of Thick Section C-Mn Steel 动力工业中低真空电子束焊接 Reduced Pressure Electron Beam Welding in the Power Generation Industry		



- 14:50 德国伯乐蒂森
Bohler Thyssen Welding
9-12%Cr马氏体耐热钢的焊接生产经验
Welding Technology for the 9-12% Cr Martensite Refractory Steel
- 15:40 上海锅炉厂有限公司-上海汽轮机厂有限公司
Shanghai Boiler Works Company Ltd. -Shanghai Turbine Company Ltd.
先进焊接技术在电站设备制造中的应用
Component Manufacturing for Power Station by Advanced Welding Technology
- 16:20 昆山华恒焊接设备技术有限公司
Kunshan Huaheng Welding Equipment & Technology Co., Ltd.
全位置自动管板焊系统在电建冷凝器制造中的应用
Application of the Orbital Welding System for Tube-Plate in the Manufacturing the
Condenser for the Electric Power Construction



目 录

编者按

前 言

能源工程焊接国际论坛日程表

· 论坛大会主讲论文 ·

- 能源工程与焊接技术 陆燕荪 (1)
- Narrow-Groove Mechanized Arc Welding-Advanced
Welding Techniques.....Gabriel Merle (7)
- 上海发电设备焊接技术进展.....上海电气(集团)总公司等 (13)
- Lessons From the Past: Materials-Related Issues in an Ultra-Supercritical
Boiler at Eddystone PlantJeff Henry, et al (30)
- 大型能源设备制造中的焊接技术.....杜 兵 (49)
- Advanced Joining Processes for Repair in Nuclear Power PlantsFred Delany, et al (54)
- Typical Application of Laser Cladding in Turbine EngineWang Maocai (70)
- Electron Beam Welding of Components for Energy EngineeringNicolas v. Wolff, et al (76)
- Energy Savings with the Use of MFDC Technology Verses AC
in Resistance Welding ApplicationsEugene Feng, et al (85)
- 大型储罐用高强度钢板的开发和应用进展.....张汉谦 (92)
- 火电锅炉新型耐热钢的焊接性.....章应霖 (99)
- A Study on the Micro-Laser Welding of Seal Tube for the Nuclear
Fuel Irradiation Test.....Jin-hyun Koh, et al (114)
- 大型筒体结构焊接变形预测理论与应用陆 皓等 (122)
- 在核电工业中镍基合金焊材的应用.....Mr.Sam Kiser (127)
- 长输管道安装焊接工艺选择综述薛振奎等 (136)
- Laser and Hybrid Laser MAG Welding of Thick Section C-Mn SteelShi Gongqi (150)
- Reduced Pressure Electron Beam Welding in the Power
Generation Industry.....Colin Ribton& Chris Punshon (164)
- 9-12%Cr 马氏体耐热钢的焊接生产经验.....牛明安等 (172)

· 论坛大会论文 ·

- 异种钢焊接性的研究现状和进展潘春旭 (185)
- WB36(15NiCuMoNb5)钢冷裂纹敏感性研究.....王 学等 (195)
- 锅炉制造和锅炉焊接技术的发展潘乾刚 (202)
- 超薄板的 MIG/MAG 焊——CMT 冷金属过渡技术.....杨修荣 (208)
- 锅筒环缝石棉衬垫法埋弧焊焊接工艺陈祥坤 戴丽杰 (213)



- 200MW 汽轮机焊接隔板检查与加固技术.....卢元军 (217)
- 水力发电设备检修机器人研究进展桂仲成等 (225)
- 电站汽轮机主汽门异材补焊工艺剖析孔 伟 孔繁荣 (231)
- 高速电弧喷涂 Fe-Al/WC 复合涂层在 450℃ 下的氧化行为孟凡军等 (236)
- X70 钢在役焊接热循环及焊缝组织性能研究.....韩 彬等 (241)
- 脉冲埋弧焊在提高电站锅炉模式水冷壁生产效率中的应用李 桓等 (247)
- 振动时效与振动焊接技术在能源装备制造中的应用陈立功等 (253)
- 小直径集箱埋弧焊曾会强 潘乾刚 (260)
- 珠光体-奥氏体异种钢焊接接头中碳迁移的“原位”观察.....黄文长等 (264)
- “*In situ*” Evaluation for Corrosion Process at Fusion Boundary of Stainless Steel Strip Overlay Joints in H₂S Containing Solution.....Pan Chunxu, et al (269)
- X80 管线钢焊接热影响区的组织和性能研究李午申等 (279)
- 药芯焊丝及其在能源工程建设中的应用栗卓新等 (286)
- X12CrNiSi1636 奥氏体耐热不锈钢焊接新工艺.....栾江峰等 (293)
- 热处理工艺对 SA213—T23 焊接接头性能的影响.....毛允娴 (300)
- SA213—TP304H 不锈钢焊接工艺优化试验研究.....常建伟等 (307)
- 省煤器制作的焊接方法贾 辉 (313)
- 多功能逆变电源的研制陈 炯 (317)
- 长输管道焊接设备的研制熊 健等 (323)
- 油气长输管线焊接技术的新发展史耀武 (330)
- 管道全位置自动焊机的专用电源及焊接工艺陈树君等 (339)
- 长输管道的根焊技术余淑荣等 (346)
- 压力钢管弧坑缺陷有限元分析徐尊平等 (350)
- HS610U—M 高强钢大型压力管道的焊接.....王建勋 蔡建刚 (355)
- 全位置自动管板焊系统在电建冷凝器制造中的应用陈国余 董文宁 (359)
- Welding Applications in Energy Related Projects.....Jeffrey Noruk, et al (363)
- Micro-focus X-ray Radiography for Evaluation of the Soundness of Nuclear Fuel Element WeldsWoong-Ki Kim, et al (371)
- 用汉诺威分析仪对熔化极气保焊过程实际电功率的测定Dietrich Rehfeldt, et al (377)
- 水下金属结构物干式高压焊接实验系统焦向东等 (384)
- 焊接工艺评定标准的探讨程国安 (389)
- 激光加工技术及发展现状余淑荣 樊 丁 (394)
- SA—335P91 集箱焊接工艺试验研究及应用.....曾会强等 (399)
- 显微硬度压痕法测量焊接微区残余应力陈 超等 (406)
- 5A06 铝合金多次搅拌摩擦焊接头组织及力学性能研究.....邓升斌等 (415)
- 航天燃料储箱的电子束焊接李仕民等 (421)
- 氧化物增加铝合金 A-TIG 焊熔深机理研究黄 勇等 (424)
- 浅谈特种焊接机器人的研究现状与进展薛 龙等 (428)
- 汽车用铝合金 5052 薄板焊接性研究.....乔及森等 (433)



能源工程与焊接技术

陆燕荪

(中国机械工程学会 北京 100823)

摘要: 本文通过对我国能源资源储量及特点的分析, 预测了国民经济增长与能源消费及结构的关系, 指出了洁净煤发电技术是符合中国国情的能源主体, 并进一步阐明焊接新技术在能源工程及其材料发展中的重要作用。

关键词: 能源 洁净煤发电 焊接技术

Abstract: This article forecasts the relationship between national economy increase and energy consuming and its structure by analyzing the energy storage capacity of our country, and it points out that the Cleaner Coal technology is the main part of energy in accord with the status of China. Furthermore, clarifies the important role of new welding technology to energy engineering and its materials' development.

Key words: Energy, Cleaner Coal Power, Welding Technology

1 中国能源形势

中国改革开放以来, 经济迅速发展, 能源形势发生了巨变, 从能源净出口国变为净进口国, 20 世纪 90 年代中期是转折点 (见表 1)。

表 1

项目	1990 年标准煤 / 万 t	1995 年标准煤 / 万 t
一次能源生产量	103922	129034
可供消费的能源总量	96138	129535
能源消费总量	98703	131176

1.1 资源现状

中国能源资源具有品种齐全、分布广泛、品质较好但人均较少的特点, 可以概括为富煤、贫油、少气。2002 年中国主要能源探明储量见表 2, 中国人均能源储量与世界的比较见表 3。

表 2 2002 年中国主要能源探明储量

种类	世界	中国	占世界 (%)
煤/亿 t	9844.53	1145.00	11.6
石油/t	1427	25	1.70
天然气/万亿 m ³	155.78	1.51	1.00



表 3 中国人均能源储量与世界的比较*

种类	世界人均	中国人均	中国/世界 (%)
煤/t	162.48	90.45	55.67
石油/t	23.25	2.59	11.14
天然气/m ³	24661.32	1079.90	4.38

注：摘自 2003 年 BP 公司能源统计数据。

中国煤储量占世界第三位，目前已探明的可供利用的储量约为 2700 亿 t。

1.2 供需现状

2003 年中国能源生产总量为 16.03 亿 t 标准煤，其中原煤占 74.2%，即 16.7 亿 t，原油为 1.7 亿 t，天然气为 350 亿 m³。

能源消费总量为 16.78 亿 t，其中煤占 67.1%，石油占 22.7%，天然气占 2.8%。一次能源平衡差额负增长持续扩大，总需求大于总供给。电煤供应紧张，导致煤价大幅上升，超常开采，安全事故不断出现。从 1993 年开始的石油净进口，2003 年增加到原油净进口 8299 万 t，成品油 2824 万 t。

2003 年发电量为 19106 亿 kW·h，其中火电占 82.88%，利用小时高达 5760h，全国还有 24 个省市严重缺电。

1.3 需求预测

能源消费与电力消费的增长速度与国民经济增长速度之间存在着比例关系，称为弹性系数，以 GDP 来计算。

1979~2003 年，GDP 的平均增长率为 9.4%，能源消费的平均增长率为 4.4%，电力消费的平均增长率为 8.34%。能源消费弹性系数为 0.47；电力消费弹性系数为 0.88。

2020 年前若 GDP 平均增长率为 7%，据此推算 2020 年预计的能源消费量为：

能源消费量 27.6 亿 t 标准煤；电力消费量 5.8 万亿 kW·h。

2002 年中国与世界能源消费结构见表 4。

表 4

种类	中国 (%)	世界 (%)
煤	65.6	24.47
石油	24.0	38.37
天然气	2.6	24.22
核能	/	6.56
水力及其他	7.8	6.38

预计 2020 年前，煤在我国一次能源消费结构中仍将占主体地位，天然气和核能将会增加。

2 煤是中国经济发展不可替代的能源

对能源的基本要求是：可以获得性、经济性和清洁性。随着洁净煤技术应用的商业化，结合中国国情，煤作为一次能源的主体地位是不可替代的。



国际能源机构预测,世界煤资源使用年限为 227 年,石油为 41 年,天然气为 64 年,煤的供应最可靠。从世界电力结构看,煤也是稳定的发电用一次能源,见表 5。

表 5

项目	1971	1997	2020
发电量/TWh	5224	13949	25881
煤 (%)	40 (82.3)	38 (81.6)	38 (66)
石油 (%)	21	9	6 (1.0)
天然气 (%)	13	15	30 (8)
核能 (%)	2	17	9 (6)
水力 (%)	23 (17.7)	18 (17.2)	15 (18)
其他 (%)	0	2	2 (1.0)
装机容量/GW		3221	5515
其中中国/GW		254.24	>1000
占世界装机容量 (%)		7.88	~18

注: ()内数字为中国的数字。

2.1 煤是可以清洁利用的能源

一般认为,煤是污染环境之源,煤燃烧后排放有害气体(SO_2 、 NO_x)和烟尘。2003 年,燃煤电厂排放 SO_2 为 800 万 t,其中脱硫处理的为 96 万 t,仅占总排量的 12%;排放烟尘 1.2 亿 t,经除尘处理的为 300 万 t,仅占 2.5%。烟道气净化装置国内已可批量生产,国家发改委对新批的电厂项目规定必须配备这种装置,但是有些电厂嫌“贵”未装。防治大气污染法规定:只要有排放,就要交费。今后随着严格的执法,情况会大有改善。

煤也可以直接转化为清洁的液体和气体燃料;采用煤预加工技术,如洗选、压制型煤、水煤浆等,可有效地减少直接燃煤所造成的污染。

推广洁净煤技术发电,是煤的清洁利用的最主要途径,美国 90%的煤用于发电,中国电煤用量亦已达到 50%。

2.2 洁净煤技术发电

20 年来我国电能消费在能源总消费中的比重不断增加,1980 年仅占 4.81%,2003 年增加到 14.34%,略低于发达国家,美国为 14.5%,加拿大为 20%,这个指标标志着社会电气化的程度。

世界各国推行的洁净煤技术不外乎是循环流化床(CFB)、加压流化床(PFBC)及煤气化联合循环(IGCC)等。我国 CFB 目前最大容量为 300MW。中国动力工程学会曾组织论证,认为在中国目前可以经济推广的洁净煤技术是超临界机组+低 NO_x 燃烧器+烟道气净化装置。

减少 CO_2 排放也是世界关注的焦点,但只要采用化石燃料,就要排放 CO_2 ,因此只能靠提高燃料转化效率来减少排放。

提高发电机组参数可以提高效率,减少 CO_2 、 SO_2 的排放。上海石洞口二厂 600MW 超临界机组参数为 24.2MPa, 538 / 560℃,发电效率为 41.09%;而 600MW 超临界机组,参数提高到 25MPa、600 / 600℃,发电效率为 43.4%。可见温度参数越高,机组的效率就越



高,但提高温度则带来了材料及焊接方面的一系列问题。

中国已有国产化的 600MW 超临界机组投入运行,正在制造超超临界的百万千瓦机组。烟道气净化装置已有多家厂商制造,且造价降到 250 元/kW 的水平。浓淡煤粉分离的低 NO_x 燃烧器也已开始商业化应用。中国应用洁净煤发电的技术已完全成熟。

中国能源发展的方针是:“煤为主体,电为中心。”电源建设的方针是:“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,鼓励新能源发电。”

3 超临界机组的材料与焊接

从 60 年代第一台 50MW 高压机组投运后,机组的容量和压力不断提高,但温度在 40 年内始终维持在 540℃ (见图 1)。

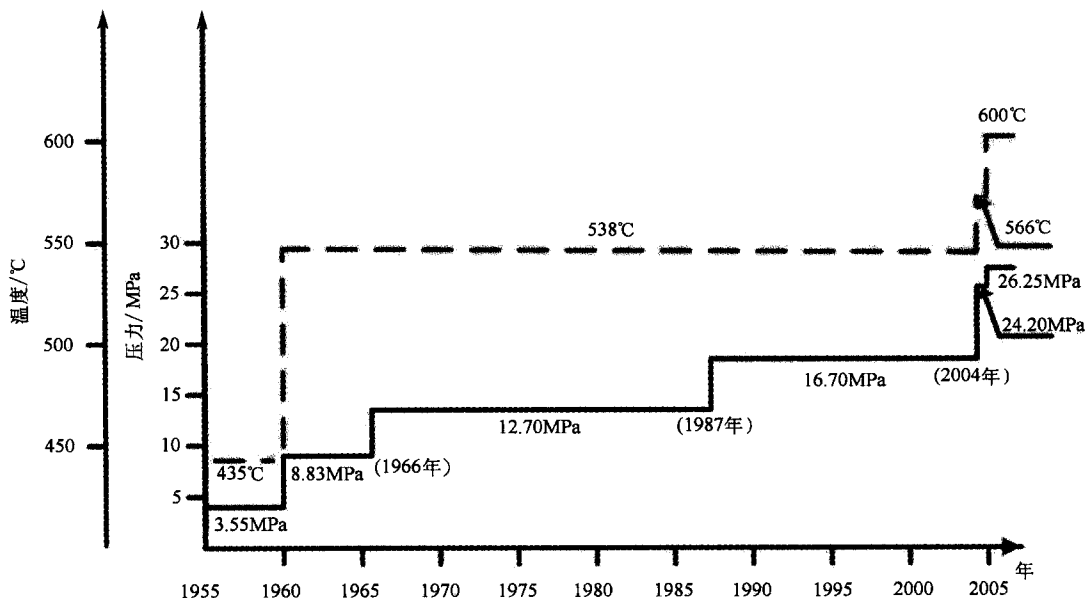


图 1 中国火电机组蒸汽参数变化历史

1996 年,国内对日本新开发的耐热钢组织了工艺评定与性能复核,我国采用 T91、T23 和超级 304 系列钢种,并实现了国产化,从而具备研发超临界机组的条件。

3.1 超临界参数锅炉用的耐热钢

锅炉耐热钢管的开发是制约提高火电机组温度参数的主要因素。

(1) 对锅炉钢管性能的要求 锅炉钢管是一种特殊钢材。它要求好的高温强度、抗腐蚀性能、冷弯性能和焊接性能。但这几种性能往往是相互矛盾的,如强度与焊接性。开发高性能级别的管材钢时,必须寻求可以接受的综合性能。

铁素体钢导热性好,热膨胀系数小,钢的热疲劳抗力比奥氏体钢好,在锅炉受热面和管道连接中属于同种钢焊接,接头可靠性高,因此近年来重点发展铁素体耐热钢。

铁素体耐热钢主要是(质量分数) 2%Cr 和 9%~12%Cr 两类,后者在烟气环境中有良好的抗腐蚀性能,在汽水环境中有良好的抗氧腐蚀性能。

(2) 改善铁素体耐热钢焊接性能的技术途径 为了改善铬钢的焊接性能,必须降低含



碳量,同时采用多元复合强化原理,在钢中添加钨、钼、铌、钒、钛等元素,以提高持久强度及长期处在高温条件下的组织的稳定性。

应用实例之一:

102 钢与 T23 (HCM2S) 都是 $w_{Cr}2\%$ 的多元复合强化铁素体钢,后者的含碳量(质量分数)从 $0.08\% \sim 0.15\%$ 降至 $0.04\% \sim 0.10\%$,改善了焊接性能,含碳量接近下限的小口径 T23 钢管采用氩气保护焊时不需预热和后热,热影响区的硬度低于 300HV。T23 与奥氏体钢焊接,采用镍基合金焊丝,不需焊前预热和焊后热处理。

同时, T23 中提高了钨的含量(质量分数),从 $0.30\% \sim 0.55\%$ 提高到 $1.45\% \sim 1.75\%$,也提高了含钼量的上限,从 0.65% 提高到 1.30% ,起到了固溶强化的作用; T23 中还添加了铌,提高了析出强化作用。因此 T23 的许用应力较 102 钢提高了 10%。目前 T23 已经国产化,得到广泛应用。

ASME 规范仍要求采用 T22 管子焊接时的预热和后热处理。当管子 $\phi < 101.6\text{mm}$ 、壁厚 $\delta < 15.8\text{mm}$ 时,如果预热到 150°C 进行焊接,可不进行后热处理。

应用实例之二:

新纳入标准的 T122/P122 (HCM12A) 是 12Cr 钢的新钢种,其合金元素与材料性能的关系如图 2 所示。

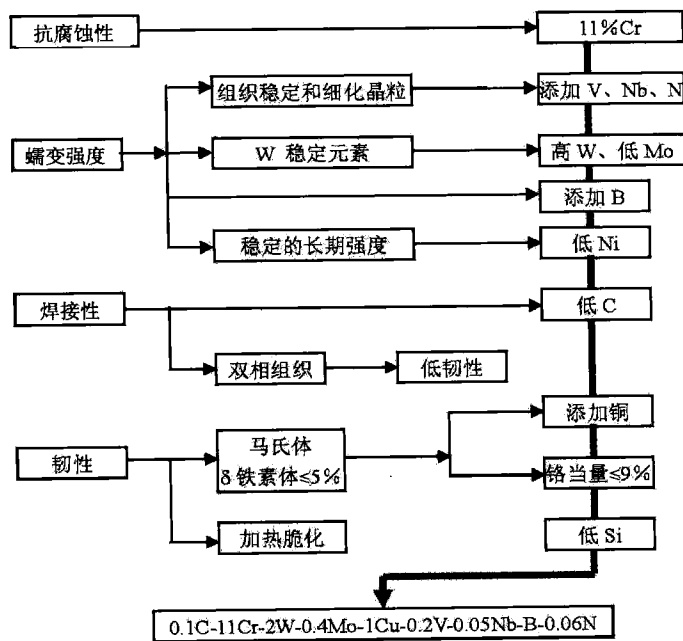


图 2 合金元素与材料性能的关系

当 $w_{Cr}=11\%$ 时可保证抗腐蚀性;为提高蠕变强度,添加 V、Nb、N 以细化晶粒,高 W、低 Mo+B、低 Ni 可以在长时间内稳定强度;降低含碳量以改善焊接性;添加 Cu,可以控制形成 δ 铁素体元素的影响,保证 Cr 含量 $\leq 9\%$,以改善韧性;这样得到了许用应力高于 9Cr-1Mo 钢 1.3 倍的 0.1C-11Cr-2W-0.4Mo-1Cu-0.2V-0.05Nb-B-0.06N 新钢种,可以代替奥氏体钢,在 650°C 下用作受热面管子,还可避免异种材料焊接带来的麻烦。



T122 钢对冷裂纹的敏感性低于 P91, 焊后经 740℃ 后热处理, 在 0℃ 时有满意的冲击韧度。

3.2 提高焊接接头的可靠性

锅炉的承压部件、过热器、再热器、省煤器、水冷壁（通常称四管）是在高温高压、腐蚀性强的条件下工作的，因此对材质和焊接接头的可靠性提出了苛刻的要求。

分析发电设备运行可靠性数据，四管爆破造成机组非计划停运次数和停运小时的百分比都在 50%~60%，成为发电设备故障的最主要部件。

为保证四管在运行过程中的可靠性，重要的措施就是采用焊接新技术，并对焊接接头进行 100% 的无损探伤。如：蛇形管排采用先焊后弯的工艺，在直管状态下采用 TIG 封底、MIG 填充和盖面，对接头进行自动旋转探伤，发现缺陷后及时刨切重焊，以保证接头绝对不泄漏。

对异种钢焊接接头，可采用预先插焊短管，在工地进行的是同种钢的焊接。

近年来，各锅炉制造厂普遍采用了这些新工艺，减少了运行早期的故障率。2003 年新投产的火电机组，第一年的等效可用系数达到了 90.35%。

3.3 汽轮机低压转子改为焊接结构

汽轮机低压转子原为整体铸件，铸成后再车深槽。由于窄间隙深坡口气体保护焊工艺的开发，使转子可以由叶轮盘焊成，焊缝全部进行超声波探伤，欧洲采用焊接转子运转多年，很安全。机组容量越大，焊接转子的优势就越明显。

4 结束语

能源工程决不只限于超临界火力发电机组的问题，只不过是在用煤作为发电的主体能源时，超超临界机组问题就很突出。在水电、核电领域，先进的设备同样与材料、焊接技术有着密切的关系。



Narrow-Groove Mechanized Arc Welding -Advanced Welding Techniques

Gabriel Merle

FRAMATOME-ANP, AREVA Group, France

摘要: 法国法马通公司是一个制造核电站部件的重要企业, 主要产品有压水和沸水反应堆, 高温反应堆, 聚变反应堆和快中子增值反应堆。本文分别介绍了提高生产效率的三种先进焊接技术: (1) 窄间隙 GTAW; (2) 双金属窄间隙焊接; (3) 窄间隙 GMAW。

关键词: 窄间隙 电弧焊接 核反应堆

Abstract: Welding is considered by F-ANP as a key technology to design, manufacturing and maintenance of nuclear power plants. The ways to improve the productivity for welding operations in F-ANP are the followings:

- (1) to extend the use of NG-GTAW (Narrow-Groove Gas Tungsten Arc Welding);
- (2) to make bi-metallic welds without buttering (with use of NG-GTAW);
- (3) to develop and qualify NG-GMAW (Narrow-Groove Gas Metal Arc Welding) including horizontal welding position.

Key words: Narrow-groove, Arc welding, Nuclear power reactor

0 Introduction

FRAMATOME-ANP (F-ANP), AREVA Group, is one of the major companies involved in design, manufacturing and maintenance of nuclear power plants. This is for :

- PWR, BWR (Pressurized & Boiling Water Reactors)
- HTR (High Temperature Reactors), Generation IV reactors
- Fusion Reactors (ITER)
- Fast Breeder Reactors

Welding is considered by F-ANP as a key technology. The Welding Department of the F-ANP Technical Center is in charge of the developments for welding applications in the Group. Heavy components are manufactured by F-ANP in its workshops located in France (Fig.1) .

The main structure of the International Thermonuclear Experimental Reactor is shown in Fig.2. This research reactor will be installed in Cadarache in France.