超超临界电厂的运行经验和发展历程

王韶鹏[1,2],陈伟鹏[1]

(1. 内蒙古科技大学能源与环境学院,内蒙古 包头 014010;
2. 内蒙古包钢钢联股份有限公司动供总厂,内蒙古 包头 014010)

摘 要: 提高火力发电厂机组热效率的有效方法是提高蒸汽压力和温度参数。因此,在发展出超临界机组的前提下,发展超超临界机组是必然的。文章综述了国内外超超临界技术的发展历程和技术特点,同时对未来发展方向作了简要介绍。指出了发展超超临界机组应该关注经济问题、金属材料的发展,着重介绍了超超临界锅炉用新型铁素体和奥氏体钢种的发展情况和部分新钢种的高温性能。

关键词: 超超临界技术; 超超临界材料; 超超临界电厂
中图分类号: TM621 **文献标识码:** B **文章编号:** 1009-5438(2017)03-0091-05
DOI:10.13647/j.cnki.btgkj.2017.03.026

Operation Experience and Development History of Ultra-supercritical Power Plant

WANG Shao-peng[1,2], *CHEN Wei-peng*[1]

(1. *School of Energy and Environment, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou* 014010, *Nei Monggol, China*;
2. *Dynamic Supply Plant of Steel Union Co. Ltd. of Baotou Steel (Group) Corp.*, *Baotou* 014010, *Nei Monggol, China*)

Abstract: The effective way to improve the unit thermal efficiency of Thermal Power Plant is to increase the steam pressure and temperature parameters. Therefore, in the premise of the development of supercritical units, the development of ultra-supercritical units is inevitable. In the paper, it is summarized the development history and technical characteristics of ultra-supercritical technology both at home and abroad, and the brief introduction is given for the future development direction. It is pointed out that the development of ultra-supercritical units should pay attention to economic issues and the development of metal materials; the development situation of new ferritic and austenitic steels for ultra supercritical boilers and the high temperature performance of some new steel grades are emphatically introduced.

Key words: ultra-supercritical technology; ultra-supercritical material; Ultra-supercritical Power Plant

气候变化正在困扰着世界,有人预期到2030年全球CO_2排放量将达到40 Gt(比1990年的20 Gt)翻了一倍,而煤是CO_2的主要提供者(CO_2总排放量的43%是燃煤排出来的)。但是,解决办法不是简单的停止用煤就能奏效。全球的电能产量在未来的25年内将翻倍,当然相应地,在2004年生产6 917 TWH(大概占世界总电能的40%)的燃煤电厂预期在2030年将生产14 703 TWH(大概占世界

收稿日期: 2017-05-03
作者简介: 王韶鹏(1987-),男,山东省安丘市人,在读硕士,工程师,现从事热能研究工作。

中国知网 https://www.cnki.net

总电能的44%)的电能。所以更加有效地利用煤炭资源以减少燃料需求量,从而生产出低价的电能并且使其对环境的影响最小化是需要面临的挑战。尽管能满足这一要求的可利用的方法有很多种,但是本文将介绍一种目前世界上最有效、最可行、有发展潜力的技术——超超临界技术。该技术发展成熟,已经拥有被长期证明了的运行和维修超超临界电厂的专门知识。

1 定义以及与其他方案的比较

1.1 超超临界的定义

水的临界参数为: t_c = 374.15 ℃, P_c = 22.129 MPa。在临界点以及超临界状态时,将看不见蒸发现象,水在保持单相的情况下从液态直接变成汽态。2003年,我国"国家高技术研究发展计划"项目"超超临界燃煤发电技术"中,定义超超临界参数为蒸汽压力≥25 MPa,蒸汽温度≥580 ℃,所以将压力≥27 MPa的火力发电机组定义为超超临界机组。

1.2 各类高效发电方式的对比

现在,燃煤发电机组有三种主要的高效发电方式,分别为:增压流化床燃烧方式、整体煤气化联合燃烧方式和超超临界发电技术。

为了提高燃煤发电机组的循环效率,20世纪60年代增压流化床燃烧方式在欧洲已经开始发展,通过郎肯蒸汽循环和布雷顿燃气循环的融合,增压流化床燃烧方式能显著提高发电效率,事实上,发电效率有望达到45%以上。

同时,整体煤气化联合燃烧方式也一直是很有希望的高效发电技术,跟增压流化床燃烧方式相似,它也是将郎肯循环和布雷顿循环相结合来提高循环效率。在整体煤气化联合燃烧系统中,煤被气化成合成气,这种合成气主要由CO和H_2组成,并且这种合成气被用来发电。这样的话,60% ~70%的电是由燃气轮机产生的,代替了在增压流化床燃烧发电中的整体的20%。整体煤气化联合燃烧方式与增压流化床燃烧方式相比的主要优点在于H_2可以被很容易的分离出来,以至于有更多的可实现的高效使用H_2的方式,其中一种方式就是整体煤气化联合循环燃料电池[1]。

另一方面,超超临界技术提高了常规的燃煤发电机组的蒸汽参数,蒸汽参数越高,机组效率就越高。比如,运用超超临界技术,电厂效率都能超过42%,为提高效率的研究工作在全世界范围内正积极进行着

超超临界技术是目前三大技术里最成熟的技术,因此在超超临界技术发展相对发达的日本,USC(超超临界发电技术)所产生的电能占总能量的45.5%,非USC所产生的电能占总能量的54.5%,由此可以看到,日本发电的总量中,一半是由超超临界燃煤机组生产的(如图1所示)。

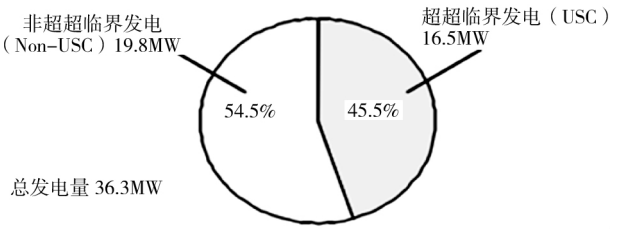


图1 在日本燃煤电厂的装机容量

2 超超临界技术的发展

2.1 超超临界技术的温度发展

超超临界发电技术的发展至今已有将近70年的历史。从20世纪50年代起,以英国、德国和日本为代表的国家,就开始了对超超临界发电技术的开发和研究。美国是世界上最早从事超超临界发电技术研究和应用的国家。1957年世界上第一台125 MW的超超临界机组在美国Philo电站建成投产,其蒸汽参数为31 MPa、621 ℃/566 ℃/566 ℃。

但是在日本和欧洲,超超临界的发展更占有主导地位。20世纪80年代,在日本的EPDC公司首先发展可应用于超超临界技术的先进材料(包括锅炉和汽轮机)。工程受到经济产业部的支持,并被当做重要项目来执行。对于超超临界技术,在1982年到2001年之间,EPDC公司一直起扮演着重要角色,如图2所示。

2.2 超超临界材料的发展

总体上,超超临界材料全是奥氏体和铁素体。项目被分成两个阶段(如表1所示),于是新材料便产生了。在第一阶段,铁素体钢材被发展来达到有两次中间再热的31.4 MPa/593 ℃/593 ℃/593 ℃的蒸汽参数,在第二阶段,奥氏体钢材被发展来达到34.3 MPa/649 ℃/593 ℃/593 ℃的蒸汽参数(带两次中间再热)。表2显示了第一阶段发展的一些材料,并且这些材料在经济上已经可用。第一阶段最

中国知网 https://www.cnki.net

大的成就是新材料已经被发展到可以承受 650 ℃的高温。但是，奥氏体材料相对更贵一些，而且考虑到它的力学性能和经济上的可行性，它被用于超超临界电厂还不太合适，它的热膨胀系数太大而导热系数太小。

超超临界技术是提高蒸汽参数的结果。因此，动力设计的基础和运行与常规的燃煤发电机组也大不相同。发展可承受高蒸汽参数的新材料是超超临界技术研发中所面临的最大挑战。

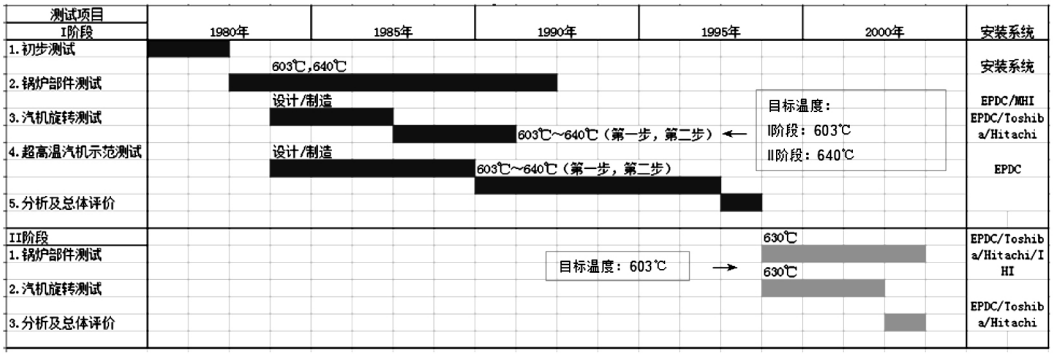


图 2　日本的超超临界蒸汽参数

表 1　铁素体与奥氏体对照表

设计值	传统材料	目标		
		1 阶段		2 阶段
		第一步	第二步	
材料的类型	铁素体	铁素体	奥氏体	铁素体
蒸汽压力/MPa	24.1	31.4	34.3	30.0
蒸汽温度/℃	538/566	593/593/593	649/593/593	630/630
设计总效率/%	42.1	44.2	44.9	44.2
效率的提高/%	基础量	5.0	6.5	4.8
总省煤量/t	基础量	96	134	95
年度万吨二氧化碳还原量/%	基础量	2.3	3.0	2.2

表 2　锅炉常用的耐高温材料

名称	类型	用途
Modified 9Cr1Mo	铁素体	锅炉炉顶
SUPER 304H	奥氏体	过热器管路
NF709	奥氏体	过热器管路
Modified 12Cr	铁素体	涡轮机

这就是为什么项目的第二阶段要发展新的更经济和可承受 30 MPa/630 ℃的蒸汽参数的铁素体钢，发展出各类的锅炉的候选钢材（如表 3 所示），并且试验了它们的强度，韧性，耐腐蚀，加工性能和焊接性能。在材料结构改变的条件下，对它们的可行性进行了测试。经过多年运行之后，通过把热力材料在实际的电厂中应用了两年，对它们的强度，耐腐蚀性也进行了测试。测试结果表明，所有的材料在低于第二阶段的目标参数下运行都是可行的。对于汽轮机而言，一种新的先进的 12# 铬钢已经被开发出来，这是对第一阶段中发展的 12# 铬材料的改进，通过添加了钴和铂，优化钨和镍的含量来实现的。这种改进的 12# 铬钢也被证明可以作为汽轮机的材料来承受 630 ℃的高温。

2.3　超超临界机组在先进国家的发展和建立

如图 3 所示，这些研发工作中的努力提高了日本燃煤电站的蒸汽参数，使日本在超超临界技术领

中国知网　https://www.cnki.net

域占有领袖地位。

表 3 锅炉的候选钢材

材料类型	合金类型
低温材料	WT 780C
	Templayoy HT780
中温材料	NF1H
	HCMV3
	Templayoy F－2W
高温材料(铁素体)	NF616
	HCM12A
	Templayoy F－12W
	Save 12
	NF12
高温材料(奥氏体)	SUPER 304H
	Templayoy AA－1
	NF709
	Save 25
高温管材(铁素体)	NF616
	HCM12A
	Templayoy F－12M
	NF12

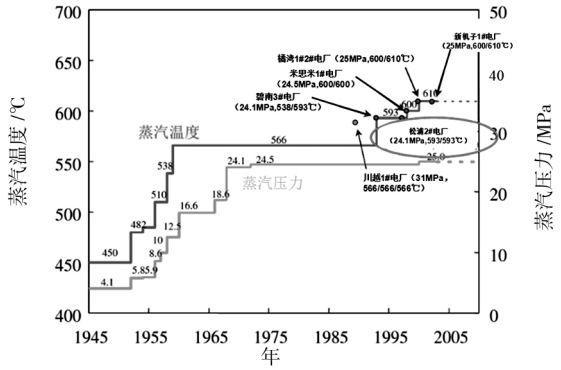


图 3 日本历史上燃煤电厂的水蒸气参数

当然，在过去的 15 年中，20 多座超超临界燃煤电站在日本建成，除了它的效率高这一优点之外，它还采用了先进的烟气处理系统，来自新矶子的一号机组的烟气与自然循环燃煤电厂的烟气等量，这个电厂被认为是世界上最环境友好的燃煤电厂之一，新矶子的二号机组，现在正在建设，将会更清洁，如图 4 所示。

3 超超临界电站运行

作为超超临界机组的拥有者，并且运行了这些电厂 10 余年，EPDC 是世界上运行超超临界电厂的最有经验的运行者。

人们一直认为超超临界机组前 10 年的运行可行性与常规的电厂相比比较低，但是，EPDC 已经成功的驳回了这些错误的观念。并没有经历较严重的有关超超临界技术的难题，所有超超临界机组的可行性指数已经超过了 85% [3]。

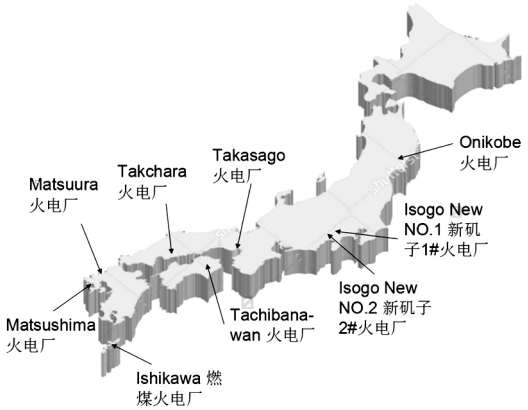


图 4 日本超超临界火电厂的分布图

4 超超临界技术的前途

超超临界锅炉技术的前途是光明的。研发工作一直在继续着，最近燃料价格的增长和持续高涨的对清洁能源的呼吁加速了世界范围的研发工作。在欧洲，在欧盟委员会的支持下，研究者们将他们的目标蒸汽温度定为 700 ℃，在 1998 年开始启动这个项目，被称作 AD700 工程。这项工程现在已经在进行第三阶段。这一阶段的主要部分是 COMTES700 工程，这是一个装在德国燃煤电厂的元件测试设备[3]。

在美国，一个更具雄心的目标已经被确定，35 MPa和 732 ℃。包括电力研究机构和锅炉生产商在内的一个财团正在积极投身到先进材料的研究中。这个项目收到了来自能源部和俄亥俄州的煤炭开发办公室的资助。

在中国，虽然我国对特殊钢的研究和投入较少，对新型钢种的研发处于半停滞状态，但是在国内已经初步形成一个以上海、哈尔滨和东方三大制造厂商为主体，具有相当大规模，同时具有一定实力的大型发电设备制造基地，可以生产出较高温度的超超临界机组。

从这些研究中可以很清楚地看到，不论是对锅

中国知网 https://www.cnki.net

炉还是汽轮机开发一种高级的镍合金来达到 700 ℃的蒸汽温度是非常有必要的[4]。

5　超超临界机组在中国的现状

虽然在中国，超超临界技术的起步较晚，技术不是特别成熟，但是在发展和建立超超临界机组的道路上，中国也一直不停的做着努力。经过了半个多世纪的努力，中国超超临界火力发电业经历了从无到有，从小到大，由弱变强的历程。从 20 世纪 80 年代以来，通过对 300 MW、600 MW 亚临界火力发电机组的技术攻关，以及对国外先进技术的引进和吸收，同时中国对相关制造产业的技术改造，目前中国已形成了具有自主制造设计超超临界机组的水平，同时其装备水平已达到世界先进水平。

中国企业通过与世界先进厂商的合作，引进国际上已有的先进技术，并加以修正和运用，实现了超超临界技术的国产化应用。

(1) 1992 年，中国首台 600 MW 超临界机组，运行参数: 24.2 MPa/538 ℃/566 ℃，在华能石洞口二厂投入商业运行使用。

(2) 2004 年，中国国产化的首台 600 MW 超临界机组在华能沁北电厂投入商业运行使用。

(3) 2007 年 8 月，中国首台 600 MW 超超临界机组在华能营口电厂投入商业运行使用。

(4) 2006 年 11 月，中国首台 1 000 MW 超超临界机组在华能玉环电厂投入商业运行使用。

(5) 2006 年 12 月，华电邹县电厂 1 000 MW 超超临界机组投入商业运行使用。

(6) 2008 年 5 月，国电泰州电厂 1 000 MW 超超临界机组投入商业运行使用。

(7) 2015. 年 9 月，浙能集团台州第二发电厂 1 000 MW超超临界机组通过了 168 h 满负荷试运行。

截止 2015 年 9 月，中国共先后在江苏、浙江、广东 、河南、安徽、上海、山东、新疆等 15 各省市，共拥有超超临界机组 82 台投入了商业运行使用，超临界机组更是近千余台，目前超超临界机组已经一步步的代替超临界机组，成为中国电网的主力机组。随着超超临界机组的大量投运，中国大型火力发电机组 600 MW 及以上耗煤量由 1998 年的 395 g/(kW·h) 降到 2015 年的 315.6 g/(kW·h)，产生了极大的社会效益。

6　结束语

最近几十年在超超临界机组方面的技术改进是惊人的。目前从国际市场采购先进成熟的材料是发展中国超超临界技术最现实的途径，在众多工程师和研究者的努力下，研究出来更多的新材料可使电厂的效率提高。根据中国国内的现实情况，为了进一步实现超超临界机组的设备制造国产化，要在充分利用国际现已有成熟先进的技术基础上，通过对国外技术的引进和改良，对原有的技术进行分析、消化和吸收，逐步形成具有我国特色的、具有自主知识产权的超超临界发电制造技术。现在，政府部门和电厂的工程师们在“气候变化”和“煤炭需求增长”之间斗争。解决办法很明显，尽可能使所用的煤产生的温室气体排放量最低。尽管有别的选择，超超临界机组仍是最成熟的技术，在过去它是燃煤电厂效率改进的最高的。通过进一步的研发工作，超超临界技术是现在最实际的、最可行的方法之一。

参　考　文　献

[1] T. Otsuka. Improving Thermal Efficiency of Coal Fired Power Station [J]. The Thermal and Nuclear Power, 2006, 57(601): 11 - 15.

[2] K. E. Habiger. Chapter 21 Fludized Bed Combustion [M]. An International Thomson Publishing Company, USA: 1996.

[3] 冯义军. 超超临界发电技术进入新阶段 [N]. 中国电力报, 2017 - 03 - 27(005).

[4] 徐俊，刘启明，白英民，等. 1 000 MW 超超临界燃煤机组二次再热技术现状及市场前景分析 [J]. 东方电气评论, 2015, (03): 85 - 88.

中国知网　https://www.cnki.net