

超超临界机组参数和热力系统的优化分析

沈邱农 程钧培

(上海发电设备成套设计研究所)

摘要: 本文概要叙述了国外超超临界技术的现状和发展趋势,研究各种因素对超超临界机组参数和热力系统选择的影响,对我国发展超超临界技术的可选方案和经济性作出了初步分析。

关键词: 超超临界 参数 热力系统 经济性

Abstract: This Work focuses on status and prospect of Ultra Supercritical Tech development abroad, studies effect of various factors on selection of Parameters and Thermal System for Ultra Supercritical Unit and carries out initial alternatives and economic analysis for its development in China.

1 超超临界技术的发展

二十世纪五十年代超超临界技术开发初期,由于蒸汽参

技术水平,很大程度上影响了超超临界机组的可靠性。其
24.1MPa、538/566℃的超临界水平。但是,由于全球性的节约能源和环境保护的原因,在此期间超超临界技术发展的研究一直在进行,首先重点解决的是高温高强度材料开发。八十年代欧洲以英国为中心进行了 COST501 项目,研制 600℃级的珠光体钢。1998 年开始,欧洲 16 个国家参加了 COST522 项目,启动了 650℃级超超临界机组珠光体材料的开发,计划到 2003 年结束。日本从 1981—2000 年在通产省的支持下实施了珠光体钢和奥氏体钢材料研究计划,第一阶段将汽轮机的进汽参数提高到 31.1MPa、593℃/593℃/593℃和 34.3MPa、649℃/593℃/593℃,发电端效率为 44.2%—44.9%。第二阶段将汽轮机进汽参数提高到 30MPa、630℃/630℃,发电机端效率达到 44.16%。

欧盟从 1998 年还启动了计划长达 17 年的 700℃级超超临界参数的开发项目“AD700 计划”(THERMIE PROGRKAM)。目标是开发先进蒸汽参数的超超临界火电机组,将供电效率提高到 55%(深海水冷却)或 52%(内陆电厂),并且使厂房结构更加紧凑,降低燃煤电厂的投资。“AD700 计划”的核心技术是通过镍基超级合金材料的开发和应用,使汽轮机的主蒸汽温度由目前的 600℃提高到 700℃。为了在将来的超超临界机组中减少使用价格昂贵的镍基超级合金,同时还确立相同温度等级奥氏体钢和铁素体钢的发展计划。“AD700 计划”的战略意义是使欧盟成员国燃煤火电机组的技术水平始终处于世界领先水平,因为欧盟各成员国拥有大量亚临界机组到 2010 年运行寿命接近 40 年,采用 700℃等级的超超临界机组替换老机组,可明显提高热效率。另外欧盟各成员国已批准了《联合国气候变化框架公约》京都议定书,大规模采用高效率的超超临界机组可以使 CO₂ 的减排满足“京都议定书”的要求。上述研究计划虽然还没有如期实现,但正在向目标前进,在超超临界机组参数选择、机组设计制造以及运行方面已经取得了阶段成果。

新材料的开发始终是超超临界技术发展的关键。国外超超临界技术的发展轨迹十分清楚,上世纪 50 年代已具有生产蒸汽参数达 600℃~650℃机组的材料,但材料技术不成熟,且价格昂贵,影响了超超临界机组的可靠性,因而不得不降低温度参数。直到 80 年代研究出适用于 600~650℃蒸汽参数的 9%—12% Cr 钢,成本远低于最初用的奥氏体钢和高温合金,且其物理性能与工艺性能都比奥氏体钢优越,给再度生产蒸汽参数为 600~650℃的机组创造了条件,90 年代起又开始制造超超临界参数机组。目前国外已形成 600℃等级的 9%—12% Cr 钢的材料标准系列,新型高温铁素体-马氏体 9%—12%Cr 材料已用于 31MPa、600℃/610℃参数的超超临

界机组，经过汽轮机各高温高压部件近十多年的应用，这种材料技术已经相当成熟。600℃ 温度等级的超超临界机组也已经大批量生产和投运，价格越来越具有竞争力。

由于世界发达国家用电量已趋于饱和，在新建机组中采用这种高效机组所占比例相当高。对世界近十年来大容量超超临界机组投运或订购情况的分析表明，由于 9~12%Cr 钢研制成功，各大发电设备制造商正在迅速发展温度参数为 600℃ 的机组。从总体情况分析，目前新建超超临界火电机组主要集中在日本和欧洲市场，汽轮机主蒸汽温度和再热蒸汽温度已普遍达到 600℃。根据对日本新建电厂的统计，1998 年以来所有新建超超临界机组均已采用 600℃ 等级的温度参数，现役机组实际年均运行小时达到 8300 小时左右，整体技术已相当成熟。对于主蒸汽压力，日本 1990 年以来投运机组进汽压力均为 25 MPa 左右。西门子 1998 年后相继有 25.8MPa~30MPa 的机组投运，但目前功率大于 700MW 的机组的进汽压力均不大于 26.5MPa，且均为一次再热。九十年代以来，国外尚没有超过 27 MPa 压力百万千瓦级汽轮发电机组设计和投运的报道。在机组容量方面，500MW~700MW 容量等级的机组占有相当比例，而对于百万千瓦级超超临界机组，原来由于发电机最大输出功率的限制，以前日本单轴机组功率不超过 700MW，1000MW 级机组均采用双轴形式。随着技术的发展，日本各制造厂单轴机组功率也开始突破 700MW，由东芝制造的第一台 1000MW 单轴机组已经在 2002 年 11 月投运。德国西门子公司自 90 年代后期也有多台 900MW~1025MW 单轴机组投运。表 1 列出国外近期投运的典型超超临界火电机组，从表中可以看出，超超临界机组正显现出 21 世纪火电技术具有代表性的发展潮流。

表 1 近期国外投运的典型超超临界火电机组

参数 MPa/°C/°C	功率 MW	制造商	电厂	投运年份
31/566/566/566	700	东芝	川越#2	1990
24.1/538/593	700	三菱	碧南#3	1993
24.1/566/593	600	日立	能代#2	1994
24.5/600/600	1000	三菱	三隅#1	1998
24.5/600/600	1000	日立	原町#2	1998
25/600/610	1050	东芝、GE	橘湾#1	2000
24.1/593/593	700	东芝	敦贺#2	2000
25/600/610	600	富士	玑子#1	2002
25/600/600	700	日立	占东厚真#4	2002
24.1/566/593	1000	东芝	碧南#4	2002
24.1/593/593	700	东芝	苓北#2	2003
24.5/600/600	1000	日立	常陆那珂#1	2003
24.5/600/600	600	三菱	広野#5	2004
24.5/595/595	900	三菱	舞鹤#1	2004
29/582/580/580	415	GEC-ALSTOM	丹麦 ELSAM	1998
28.5/580/580/580	414	GEC-ALSTOM	NORDIYLLANDVA	1998
25.8/541/578	915	KWU	BOXBERG BLOCK	1999
30/580/600	375	KWU	AVEDOERE, 2	1999
25.1/600/600	600	KWU	ISOGO	2002
26.5/576/600	1025	KWU	NIEDERAUSSEM	2002

25/575/595	750	KWU	BEXBACH, II	2002
------------	-----	-----	-------------	------

2 超超临界机组热力参数优化及其对热效率的影响

在发电热力循环中，蒸汽参数是决定机组的热效率的重要参数。燃煤火电机组的热力系统是按朗肯循环运行的，提高蒸汽的初参数（蒸汽压力和温度），采用再热系统和增加再热次数都能提高循环的热效率。在一定范围内，新蒸汽温度或再热蒸汽温度每提高 10℃，机组的热耗就可下降 0.25-0.3%。如果增加再热次数，例如采用二次再热，在同样蒸汽参数下热效率可高于一次再热。常规亚临界机组的典型参数为 16.7MPa/538/538℃，发电效率约为 38—39%。超临界机组的典型参数为 24.1MPa/538/566℃，对应的发电效率约为 41—42%。超超临界参数实际上是在超临界参数的基础上向更高压力和温度提高的过程。通常认为超超临界是指压力达到 30-35 MPa，温度达到 593—600℃或者更高的参数，并具有二次再热的热力循环。还有一种观点认为，温度 566℃事实上一直是超临界参数的准则，任何超临界新汽温度或再热汽温度超过这一数值时也被划为超超临界参数范畴，或者称为提高参数的超临界机组。在国外的技术资料上，Ultra Supercritical (USC) 通常用来代表这类参数的机组，中文译成超超临界，也可理解为优化的或高效的超临界机组。

2.1 超超临界的热力学概念

火电厂工质用的是水，常规条件下对水进行加热，当水的温度达到给定压力下的饱和温度时，将产生相变，水开始从液态变成汽态，出现一个饱和水与饱和蒸汽两相共存的区域，这时尽管加热仍在进行，但汽水两相的温度不再上升，直至液态水全部蒸发完毕，干饱和汽才继续升温，成为过热蒸汽。但当温度超过临界温度 t_c 值时，水的液相就不存在，与临界温度相对应的饱和压力称为临界压力 P_c ，临界点的压力和温度是水的液相和汽相能够平衡共存的最大值，为固有物性常数。水的临界参数为： $t_c=374.15℃$ ， $P_c=22.129MPa$ 。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。一般将压力大于临界点 P_c 的范围称为超临界区，压力小于 P_c 的范围称为亚临界区。从物理意义上讲，水的物性只有超临界和亚临界之分，如前所述，超超临界和超临界只是人为的一种区分。

2.2 温度

热力循环分析表明，对于一定容量的机组，当蒸汽初压不变提高蒸汽初温，循环效率将会提高。同时，由于新蒸汽比容增大和低压缸排汽湿度减小，汽轮机的内效率也可提高，提高蒸汽的温度对提高机组热效率更有益。蒸汽初温的提高主要受材料的许用温度限制，当初温提高到一定程度，锅炉的过热器和再热器、汽轮机的高中压进汽部分的材料将需要采用热强度高的奥氏体合金钢。为此，日本的研究机构把主要精力放在了提高蒸汽温度方面，并在材料方面与日本钢铁工业合作研制出了配套的锅炉与汽轮机奥氏体耐热钢系列用材。

关于蒸汽温度参数的选用，由于美国、日本和欧洲 600℃ 等级新型高温材料的开发成功，超超临界汽轮机的主蒸汽和再热蒸汽温度已普遍提高到 580℃—593℃，在 2003~2004 年投运的一些机组蒸汽温度超过了 600℃。根据分析，在一定的范围内，主蒸汽温度或再热汽温每提高 10℃，机组的热耗就可下降 0.25%~0.3%。从理论上讲，超超临界机组蒸汽参数提高，热效率也随之提高，在主蒸汽压力不变的情况下，主蒸汽和再热蒸汽温度从 538℃/566℃ 提高到 593℃/593℃，机组热效率能够改善 2~2.5%。为了使超超临界机组降低制造成本，提高市场

竞争力,开发热强性高、工艺性好,价格低廉的高温材料是最关键的问题。

2.3 压力

当新蒸汽初温不变仅提高初压时,一定范围内可提高机组热效率。但单独提高初压过大,机组热效率反而会降低,其主要原因是初压提高时蒸汽比容减小,将使汽轮机超高压通流部分叶片高度减小,甚至需要采用部分进汽,这样将使叶片级的二次流损失和轴封漏汽损失都增大,将抵销一部分提高压力参数所带来的好处。同时,低压缸的排汽湿度将随初压的提高而增加,加大湿气损失,使汽轮机的热效率下降。另外初压过高又不采用二次再热,还将使低压缸末级叶片水蚀进入不可接受的程度。初温一定的情况下存在一个最佳初压,超过最佳初压后,机组的热耗率将趋于上升。根据分析,在相同的初温下,将主蒸汽压力从 24.1MPa 提高到 31MPa,超超临界机组热效率能够改善 1~1.5%。

关于超超临界机组蒸汽压力的选用,欧洲国家选取比较高,基本上在 26~30MPa 范围。日本选取比较低,除川越的两台机组选用了 31MPa 外,其它大部分机组为 24~25MPa。据分析日本制造商认为将压力参数提得过高,汽轮机的超高压部分的通流部分气动损失增加,另外还提高压力需要增大机组用材量,提高机组的制造成本,产品的市场竞争力减弱。所以,日本在 1993 年~2003 年投运的超超临界机组的主蒸汽压力均在 24~25MPa,也就是超临界机组的压力参数水平。

现代超超临界机组为适应调峰的需要,还要求锅炉和汽轮机能够滑压运行。当机组负荷低于 75%~80%时,超超临界锅炉锅内压力已处于亚临界状态。设计超超临界锅炉时,还需要同时考虑锅炉在亚临界压力状态下运行的可靠性。但从经济性考虑,超超临界机组应尽量带基本负荷运行,否则将影响其高效节能的优势发挥。

2.4 再热

为了提高大容量机组的经济性,通常采用中间再热的办法提高热力循环的平均吸热温度,降低热耗。采用中间再热,还可以减小低压缸末级的排汽湿度,提高汽轮机效率和延长末级叶片寿命。目前世界上投运的超超临界机组均采用中间再热。在材料性能允许的情况下,提高再热温度对经济性有利,通常再热温度与蒸汽初温选在同一水平,在中压缸进汽压力较低的情况下,为了减小排汽湿度,也有将再热蒸汽温度提高到高于主蒸汽温度的情况。

关于再热次数,采用二次再热循环能比一次再热更能提高机组的热效率。二次再热循环的收益将进一步提高,在相同的蒸汽参数下采用二次再热循环能够得到的热效率改善为 1.5~2.0%。但是同时要指出,超超临界机组采用二次再热能够得到热耗率改善,但同时必须评估由于锅炉受热面、蒸汽管道的增加以及汽轮机的设备复杂性和材料价格而引起的电厂造价的增加,热效率提高获得的收益将有相当长时间用于抵冲增加的造价。从前面所列投运的超超临界机组列表分析(表 1),世界上已运行的超超临界机组采用二次再热循环并不多。在蒸汽初参数和再热温度一定时,再热压力相对于热经济性也有一最佳值。对于二次再热循环超超临界机组,一次及二次再热压力最优化的结果通常是,一次再热蒸汽压力选为低于热力学最优值,而二次再热蒸汽压力一般选为略高于其最优值,以降低低压缸的进口蒸汽温度。

2.5 容量

超超临界机组的容量一般情况下应选得大些,其理由一是因为超高压部分蒸汽容积流量很小,如果机组容量选得不足够大,通流部分叶片高度过小,将引起气动损失增大,使提高

参数带来的热经济性不明显；二是单机容量增大，降低了按千瓦分摊的设备费用、土建费用以及其它辅助设施费用，可使电厂的比投资明显降低。但是单机容量的增加主要受到全转速末级叶片长度的限制，美国和日本在 1000MW 以上的大容量机组之所以大量使用双轴汽轮机，是因为其电网频率为 60Hz，在大容量和高转速的情况下，不得不采用双轴布置设计方案，即高压缸及再热中压缸部分采用全速设计，与一台全速发电机连接；低压缸部分采用半速设计，与另一台半速发电机连接，并与高中压全速轴系并列。双轴布置汽轮发电机组的造价比单轴布置高得多，而且要求较大面积的厂房和更复杂的电气系统。日本在用于 3000rpm 汽轮机的 1092mm 末级长叶片开发成功后，才开始着手进行 1000MW 单轴多缸汽轮机组的设计制造。因此超超临界机组的容量选择因根据汽轮机制造行业的设计制造能力水平合理选取。

超超临界机组容量的选择另一个因素源于 GE 和西屋公司超超临界技术的设计概念，其特点是以 700MW 容量作为汽轮机高中压合缸与分缸的分界线，容量超过 700MW 高中压采用分缸布置后，高压缸将改为双流结构，使高压缸叶片高度减小，热效率下降，制造成本产生向上的突跳。因此，日本投运的超临界和超超临界机组中，基本没有容量在 700MW ~900MW 之间的机组。

2.6 给水加热级数

为了在超超临界蒸汽参数下最大限度地获得热耗率的改善，给水加热器的布置和最终给水温度要进行最优化。在选用较高蒸汽参数的情况下，给水加热器的数量将增大，给水加热的级数可以增加至 10 级，从而获得较高的最佳最终给水温度。同时在超超临界循环中，还选用温度高于冷再热点的加热器（HARP），以进一步提高最终给水温度，使机组进一步获得收益。研究实例证明，在热力学最优化点对热耗率进行比较，采用 HARP 带来的改善大约可达 0.5%。同时采用 HARP 后，可以降低最佳再热器压力，而获得较高的最佳最终给水温度，这两个参数对锅炉的设计和造价将产生有利影响。

3 我国超超临界机组可选方案及经济性分析

我国已能自主设计与制造亚临界 600MW 机组，并掌握超临界 600MW 和 900MW 机组的部分设计和制造技术，积累了超临界 600MW 的运行经验。为确保超超临界机组的运行可靠性，在研制我国超超临界火电机组时，可借鉴国外经验，现阶段选用已有充分的运行业绩、设计制造技术成熟而且继承性强的超超临界技术，以使机组的安全可靠性可得到充分保证。蒸汽参数可采用 25~28MPa、600℃、一次再热的 600MW 级和 1000MW 级超超临界机组。在形成批量生产能力，并确保机组的运行可靠性的基础上，逐步提高机组的参数。下一阶段再研制参数为 30~35MPa、600℃或更高温度、二次再热的大容量超超临界机组。

3.1 可选方案

600MW 容量等级超超临界机组根据不同的功率（流量）和背压，有两缸两排汽和三缸四排汽两种机型适用于我国不同地区。

二缸二排汽 600MW 机组由一个高中压合缸和一个双流低压缸组成，其最大特点在于由于采用了大排汽面积的低压缸，使整个机组和目前亚临界 300MW 机组一样，只有二个汽缸。机组结构紧凑，机组总长比目前三缸四排汽和四缸四排汽 600MW 机组短，可大幅降低厂房造价。机组热效率比亚临界机组高约 4.5%，比超临界机组（24.2MPa/538℃/566℃）高约 2.5%。在 4.0kPa ~ 6kPa 背压范围内，可采用不同排汽面积的长叶片，对我国的中、南部地区可用钢制

的 1218mm 长叶片, 对北方低背压地区可用 1280mm 或更长的钛合金叶片。这种机型研制的主要困难是技术难度较大, 不仅要解决超超临界机组高温高压段部件的设计制造问题, 同时还要解决低压段 1200mm 以上长叶片开发和超纯净转子的制造。

三缸四排汽 600MW 机组由一个高中压合缸和二个双流低压缸组成。机组背压为 4.4kPa~5.39kPa 时, 末级叶片可选用 1050mm 长叶片, 机组的热效率与二缸二排汽 600MW 机组基本相同。其特点是低压缸可通用现有亚临界和超临界机组 600MW 机组的低压缸, 有较强的技术继承性, 可使用现有成熟的末级长叶片, 解决超纯净转子研制即可。

1000MW 容量等级超超临界机组可由一个高压双流缸、一个中压双流缸和两个双流低压缸组成单轴四缸四排汽机组, 在参数为 25.0MPa、600℃/600℃的情况下, 机组热效率可达到 43.1%。机组总体尺寸与亚临界四缸 600MW 机组基本相近。国内有关制造厂通过技术引进或联合设计制造的合作方式, 在机组通流部分、总体特性(轴系、差胀、推力等)、辅助系统和 DEH 控制系统设计技术方面已经得到许可转让技术, 能够保证机组具有较高的设计制造质量, 可大大缩短研制周期。低压缸选用 1218mm 末级钢制叶片, 排汽面积为 11.3 m², 两个低压缸正好适用于 20℃ 冷却水温的 1000MW 机组, 是技术、经济和可靠性综合俱佳的选择。

3.2 经济性分析 Economic Analysis

超超临界机组由于采用更高的蒸汽参数, 能够明显提高电厂的热效率, 降低污染排放。但又由于压力提高将增加钢材用量, 温度提高将需要采用价格较高的高温热强度好的材料, 采用二次再热增加了由锅炉、汽轮机和管道等组成的汽水系统复杂性, 机组造价将比常规亚临界机组提高。影响机组造价的因素较多, 但无疑与采用的温度、压力参数的高低有直接关系。表2为国外技术资料的一个分析举例, 虽然不代表普遍情况只能作为参考, 但从表3中可以分析, 随着机组参数的提高和增加再热次数, 电厂机岛的比投资增加, 超临界机组比亚临界机组提高~5%, 超超临界机组又比常规超临界机组提高~5%。但是整个电厂的比投资超临界和超超临界机组都只比亚临界提高1%, 说明在同样的机组出力情况下, 由于机组的热效率提高, 功率密度增加, 电厂其它系统的投资可以减少, 因而电厂总的比投资增加幅度不大。

表3为我国电力生产各类火电机组经济性的比较, 是在各类典型火电厂工程经济性基础上列出的。从表中可以看出, 600MW超超临界机组与相同功率的超临界机组相比, 电厂比投资高出~1%左右, 但由于热效率的提高, 供电标准煤耗低出~3.8%, 含税电价低出0.7%。与大型燃气轮机联合循环机组和IGCC联合循环机组相比, 除环保性能方面存在差距以外, 其上网电价具有明显的竞争优势。

The specific investment of Supercritical Generation Unit is 5% higher than that of Sub-Critical Unit.

表 2 超临界机组与亚临界机组电厂比投资比较

部套 \ 比投资 (\$/kw)	亚临界 16.6MPa/538/538℃ 比投资 (%)	超临界 24.0MPa/538/566℃ 比投资 (%)	超超临界 31.1MPa/593/593/593℃ 比投资 (%)
锅炉(含钢结构)	142.94(100%)	153.09(107.1)	163.52(114.4)
锅炉岛管道	27.81(100%)	31.03(111.6)	31.81(114.4)
给水系统	28.06(100%)	28.62(102.0)	29.18(104.0)
汽轮机—发电机	79.20(100%)	82.37(104.0)	83.95(106.0)
汽轮机岛管道	16.25(100%)	15.44(95.0)	15.43(95.0)

小计	294.26(100%)	310.38 (105.5)	323.91 (110.1)
电厂其它投资	509.17(100%)	500.69 (98.3)	487.17 (95.7)
总计	803.43(100%)	811.07 (101.0)	811.08 (101.0)

表 3 各类火电机组经济性比较

项目名称	容量 (MW)	比投资 (元/千瓦)	年均供电煤耗 (Kg/kwh)	环保性能			厂用电率 %	含税电价 元/kkWh
				PM	SO2	NOx		
亚临界 300MWCFB	2×300	5413	341	200	154	250	7.0	335.2
超临界 600MW+FGD	2×600	5493	324	100	154	500	6.0	337.5
超临界 600MW+FGD +SNCR	2×600	5542	325	100	154	300	6.2	339.7
超超临界 600MW+FGD	2×600	5548	312	100	154	500	6.0	334.9
超超临界 600MW+FGD +SNCR	2×600	5605	313	100	154	300	6.2	337.5
GTCC 350MW	2×350	3879	235 (折算)	10	10	50	3.0	430.5
IGCC 485MW	1×485	7325	330	10	10	50	15.0	402.6

4 结论

超超临界火电机组经过几十年的发展，已经是成熟先进的发电技术，在经济发达国家中已大量投入商业运行，并且正进一步向更高参数方向发展。由于其显著的节能和减少环境污染的效果，将成为 21 世纪很具有竞争力的燃煤火电机组。为迅速扭转我国火电机组煤耗长期居高不下的局面，优化火电结构，缩小与国外先进水平的差距，发展国产大容量超超临界火电机组十分必要。我国有条件立足于较高的起点，把近期目标定在当前国际水平，充分利用当今世界最新的科技成果，尽快跨入发展超超临界机组的发展阶段。

超超临界机组参数的选择受到许多因素的影响，但材料是最关键的因素。目前国外 600℃ 等级的 9% -12% Cr 钢的材料技术已经相当成熟。主蒸汽和再热蒸汽温度为 600℃ 等级的超超临界机组也已经大批量生产和投运，价格越来越具有竞争力。在引进技术或自主开发我国超超临界机组时，应充分重视技术的成熟性、可靠性，目前宜先完成 600℃ 温度参数等级的超超临界机组的研制，形成批量生产能力，并进一步完善。对更高温度参数的超超临界技术应开展储备性研究。

与亚临界机组相比，在同样的机组出力情况下，由于超超临界机组的热效率提高，功率密度增加，电厂其它系统的投资可以减少，因而电厂总的比投资增加幅度不大。但在节能、环保和运行经济性方面具有竞争优势。

参考资料

- 1、吕维业等 《火电结构优化和技术升级研究》 研究报告 2002.5
- 2、沈邱农等 《超超临界汽轮机的技术特点》 《动力工程》 2001.4
- 3、沈邱农、柳惠龄等 《超超临界火电机组技术选型研究》 研究报告 2003.9
- 4、沈邱农等 《超超临界火电机组技术开发的分析与研究》 研究报告 2004.2