

走向高效低耗和环保的现代化电站设备

■ 上海电气电站设备有限公司汽轮机厂高级工程师 吴天明



近年来，以迅猛态势席卷全国的雾霾让广大民众“谈霾色变”。“消除雾霾，重塑蓝天”已成为民生改善的当务之急。

雾霾是雾和霾的组词。雾霾主要由二氧化硫、氮氧化物和可吸入颗粒物这三项组成。它们与雾气结合在一起，让天空瞬间变得灰蒙蒙的。城市雾霾主要来源于火电厂、炼钢、化工制造和有色金属冶炼企业的排放，机动车尾气、烧煤供暖所产生的废气以及建筑工地和道路交通产生的扬尘等。在2012年全世界燃烧的70万亿t标准煤中，中国就烧了36万亿t，占了51%，排放出的废气可想而知。

强力治霾，减煤、脱硝、除尘及控车成为关键词，大气污染防治成为热议话题，也成为各级政府和相关制造企业环保工作的重中之重。

1. 燃煤发电机组

2014年9月12日，国家发改委、环境保护部和国家能源局联合发布《煤电节能减排升级与改造行动计划（2014～2020年）》，在行动目标中规定：

“全国新建燃煤发电机组平均供电标准煤耗低于300g/kW·h；100万千瓦级湿冷、空冷机组设计供电煤耗分别不高于282g/kW·h、299g/kW·h，60万千瓦级湿冷、空冷机组分别不高于285g/kW·h、302g/kW·h。”这是政府对燃煤发电机组具体的刚性指标。

该行动计划列举了燃煤电厂34项节能减排的技术，其中最主要的2项是提高蒸汽参数和二次再热技术。

（1）提高蒸汽参数。可以说，一部燃煤发电发展的历史就是不断提高蒸汽参数的历史。通常的燃煤电厂是通过产生高温高压的水蒸气来推动汽轮机发电。

在374.15℃、22.115MPa压力下，水蒸气的密度会增大到与液态水一样，这个条件便是水的“临界参数”，比这还高的参数便叫作“超临界”，如将温度升高到600℃，压力到25～28MPa，蒸汽就进入“超超临界”状态。从表1可见，随着进汽参数的逐步提高，机组功率也相应增大。同时蒸汽的温度和压力越高，发电效率就越高。一般来说，超临界机组的热效率比亚临界机组高2%～3%，超超临界机组的热效率比超临界机组又要高约4%。

热效率提高的直接效果就是煤耗的降低。上海外高桥第三电厂的百万超超临界机组2010年的供电煤耗降至279.39g/kW·h，成为世界上首个冲破煤耗280g/kW·h整数关口的机组。据测试，如果每度电节省1g煤，该厂全年2台机组就能省下近1.2万t标准煤。这意味着，与全国平均能耗（335g）相

表1 燃煤发电机组蒸汽参数表

主蒸汽压力类别	功率/MW	主蒸汽进汽压力/MPa	主蒸汽进汽温度/℃	再热蒸汽温度/℃
高压	50	9～9.5	535	
超高压	100	12～14	535～538	
亚临界	125、300、600	16.7	537	537
超临界	600	24.2	566	566
超超临界	600、1 000	25～28	600	600
高超超临界	1 000	31	600	620

比，外高桥第三电厂2010年节煤达到了67万t左右，折合人民币约6.7亿元；同时可减排二氧化碳48万t、二氧化硫0.36万t和烟尘2.85万t，达到了整体节能减排。

(2) 采用二次再热技术。在常规一次再热的基础上，汽轮机排汽二次进入锅炉进行再热。汽轮机增加超高压缸（VHP），超高压缸排汽为经过锅炉一次再热器加热后进入高压缸（HP），高压缸排汽经过锅炉二次再热器加热后进入中压缸（IP），这就是世界上最新的二次再热技术（见图1、图2）。

2015年9月25日，世界首台百万千瓦超超临界二次再热燃煤发电机组在江苏泰州电厂正式投入运营。2016年6月，山东莱芜电厂6号机百万超超临界二次再热机组完成各项性能考核试验，在机组发电效率、发电煤耗等指标均刷新了世界纪录（见表2），机组各项环保指标全面优于国家超低排放限额，成为世界上效率最高、能耗最低、指标最优且环保最好的燃煤机组。

截止2014年末，全国发电装机容量达13.601 9kW，居世界第一。我国大陆总人口13亿人，我国人均发电装机已经历史性地达到1kW。其中，煤电8.3kW，占61%，仍占绝对优势地位。因此，中国的电站设备制造行业并不满足上述指标，仍在不断创新，不断优化机组参数。目前，先进的700℃超超临界发电技术已正在紧锣密鼓地研发中，使燃煤机组朝着大容量、高参数、排放少、煤耗低的发展方向阔步前进。

2. 燃气发电机组

天然气是产生于油气田的一种无色无臭的可燃气体。其主要组分是甲烷（CH₄），大约占80%~99%，因此燃烧充分。天然气作为一种清洁能源，既可减少煤和石油的用量，又能减少二氧化硫和粉尘排放量近100%，减少二氧化碳排放量60%和氮氧化物排放量50%，并有助于减少酸雨形成，舒缓地球温室效应，因而大大改善环境污染问题。

燃气发电机组由于效率高、排放少、可调峰的优点，建造燃气发电机组将成为我国中东部大型城市发电的主导机组，特别是北京、上海等特大型城市今后基本不上燃煤发电机组，改上燃气发电机组，如北京西三环的郑常庄、东部的京桥和高安屯、西五环的西北热电、北六环的未来城

以及西北部的上庄燃机电厂；上海除石洞口3台F级燃机外，临港电厂上了4台F级燃机（见图3），接下来，闵行、奉贤及崇明等燃机电厂也在规划中。

燃气发电机组的工作原理：压气机压缩后的高压空气和燃料在燃烧室内燃烧，将化学能转变成热能，高温高压燃气带动燃气透平旋转，从而带动发电机，将机械能转化为电能（见图4）。由于它以空气为工作介质而不是水蒸气，从而省去了锅炉、冷凝器、给水处理等设备，目前燃气轮机装置单循环效率已经达到了40%。

燃气-蒸汽联合循环是废热回收的一种有效措施。燃机的排气温度为500~600℃，直接废气排空将造成巨大的能源浪费，单机热效率只有36%~40%。采用联

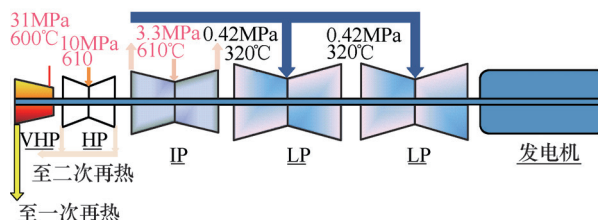


图1 江苏泰州电厂百万超超二次再热机组各汽缸的蒸汽参数

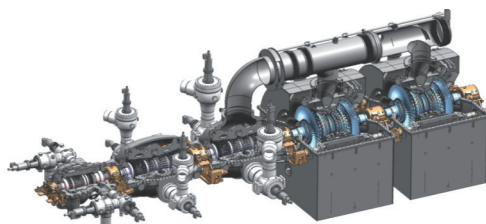


图2 百万超超二次再热机组各汽缸结构图

表2 常规百万超超临界一次再热与二次再热机组指标比较表

指标	常规1 000MW 超超临界机组	泰州电厂二期 1 000MW超超二次再热	莱芜电厂6号机 1 000MW超超二次再热
蒸汽参数/℃	25MPa/600/600	31MPa/600/610/610	25MPa/600/620/620
发电效率 (%)	45.82	47.92	48.12
发电煤耗/g·(kW·h) ⁻¹	270	256.28	255.29



图3 上海临港燃机电厂夜景

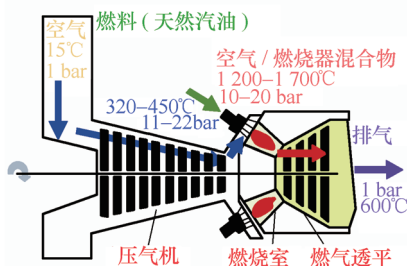


图4 燃气轮机工作原理图

合循环,利用余热加热蒸汽,再驱动汽轮机做功,可充分提高机组的整体热效率(见图5),最新产品热效率可达60%。

燃气轮机根据透平进气温度和压比分为E级、F级和H级(见表3),机组效率和功率也随之增加。世界上最先进的H级燃气轮机的联合循环效率可达60%,功率可达570MW。

此外,燃气发电机组还具有单位投资少(500~600美元/kW),调峰性能好、启停快捷,

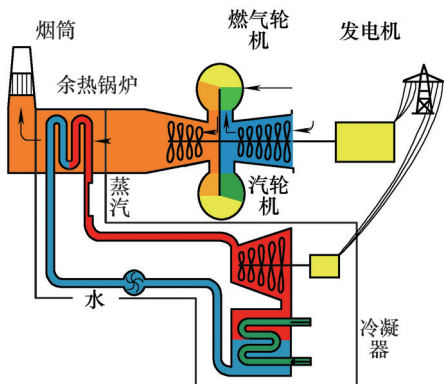


图5 燃气-蒸汽联合循环基本原理

占地少(约为燃煤电厂的30%~40%),耗水量少(约为燃煤电厂的1/3),建厂周期短(石洞口15个月建成3台机组),自动化程度高等特点。

截至到2013年年底,我国天然气发电装机达4 309万kW,仅占总装机容量的3.45%;发电量达1 143kWh,仅占总发电量的2.19%。与发达国家相比,我国天然气发电装机比重仍非常低。据了解美国、日本和欧盟的燃气机组已分别占到全部装机的23.28%、27.42%、23.47%。到2020年,我国天然气发电装机规模将达1亿kW,而即便如此,也仅占总装机容量的4.71%。任重而道远,还需我们继续努力!

3. 核电机组

核电厂用的燃料是铀。用铀制成的核燃料在“反应堆”内发生裂变而产生大量热能,再用冷却剂(水或气体)将热能带出,在蒸汽发生器内产生蒸汽,蒸汽推动汽轮机带着发电机一起旋转,电就源源不断地产生出来(见图6),并通过电网送到四面八方。

核电是一种清洁低碳能源,

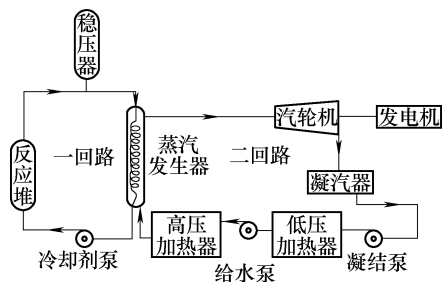


图6 核电机组工作原理

燃料成本低,二氧化碳零排放,经济性好,持续供应能力强,代表着能源优质化方向。目前世界上已有30多个国家或地区建有核电站。根据国际原子能机构(IAEA)统计,截至2013年12月,共有436台核电机组在运行,总装机容量约3.7亿kW。核电站主要分布在北美的美国、加拿大;欧洲的法国、英国、俄罗斯、德国和东亚的日本、韩国等一些工业化国家。核电约占全球总发电量的15%,其中法国高达74.8%,韩国为30.4%,美国为19%。

中国大陆核电发展主要经历了核电起步、适度发展、积极发展和安全高效发展阶段。20世纪70年代初,我国大陆核电开始起步。1984年第一座自主设计和建造的核电站——浙江秦山核电站

表3 燃气轮机E级、F级和H级各项参数比较表

燃气轮机型号	E级	F级	H级
电网频率/Hz	50	50	50
透平进气温度/°C	1080	1240	1400
压比	11.7	18.2	19.2
排气流量/(kg·s ⁻¹)	526	688	820
排气温度/°C	539	580	625
燃气轮机功率/MW	168	287	375
燃气轮机效率/(%)	34.5	39.5	40
联合循环出力1s/MW	251	423	570
联合循环效率1s/(%)	52.3	58.6	60

破土动工，至1991年12月15日成功并网（见图6）。2000年召开的党的十五届五中全会提出了“适度发展核电”的方针。我国相继建成了秦山二期核电站、广东岭澳一期核电站、秦山三期核电站等，使我国核电设计、建造、运行和管理水平得到了很大提高，为我国核电加快发展奠定了良好的基础。进入新世纪，中国核电迈入批量化、规模化的快速发展阶段。2010年10月，党的十七届五中全会确定我国“在确保安全的基础上高效发展核电”的方针。我国核电也由此进入了安全高效、稳步发展的新阶段。

截止至2015年6月底，中国投入商业运行的核电机组共25台，总装机容量为2 357万kW，占总装机容量的1.73%。2011年日本福岛核事故的阴影正在淡去，我国在2015年正式重启沿海核电项目审批，在建核电机组达到了26台，在全球各核电国中，核电机组在建数量位居第一。根据中国的核电发展目标，到2020年，中国的核电装机容量将从当前的2 357万kW增加到5 800万kW。

我国当前建设的核电站除秦山第三核电站采用重水堆外，其余核电站均采用压水堆。压水堆由（核）蒸汽供应系统（核岛或一回路）和汽轮发电机系统

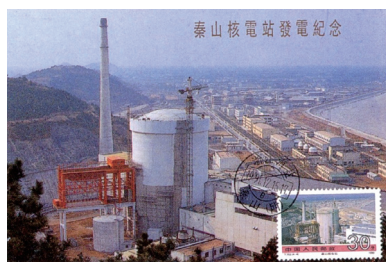


图6 秦山核电站一期发电纪念极限明信片

（常规岛或二回路）组成（见图7），结构紧凑，经济性好，安全性也好，在蒸汽发生器中产生的推动汽轮机转动的蒸汽不带放射性。安全壳高约60m，内部直径约40m，厚约1m。而日本福岛第一、第二核电站共10台机组均为沸水堆，安全性差，其蒸汽带有放射性。

从核电安全标准上，国务院讨论并通过《核电安全规划》和《核电中长期发展规划》要求，“按照全球最高安全要求新建核电项目。新建核电机组必须符合三代安全标准。”我国具有自主知识产权的三代核电技术目前有华龙一号和CAP1400。其中中核和中广核合作开发的“华龙一号”将落地福清和防城港二期。“华龙一号”成熟性、安全性和经济性可满足三代核电技术要求，设计技术、设备制造和运行维护技术等领域的核心技术具有自主知识产权，是目前国内可以自主出口的核电机型。

自2014年以来，中国核电加快“出海”脚步。国家能源局原局长张国宝曾这样形容：“出口一个核电站，相当于出口100万辆桑塔纳轿车。”中国的核电出口正成为继高铁之后的又一大名

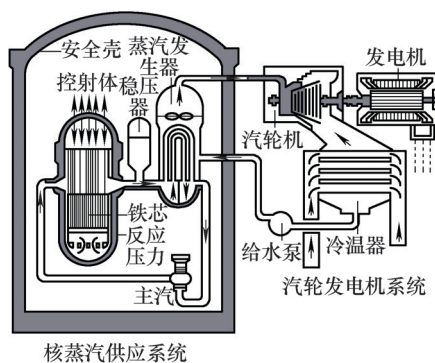


图7 压水堆核电机组结构图

片。中国核电主管部门与核电企业先后与法国、阿根廷、意大利及西班牙等国签署了合作文件，特别是巴基斯坦卡拉奇核电项目2号、3号机组和英国布拉德韦尔核电站将使用“华龙一号”技术，这意味着“华龙一号”将正式走向国门。

4. 可再生能源发电机组

按照国务院《能源发展战略行动计划（2014-2020年）》要求，加快发展可再生能源。到2020年，非化石能源占一次能源消费比重达到15%。其中力争常规水电装机达到3.5亿kW左右；风电装机达到2亿kW，风电与煤电上网电价相当；太阳能光伏装机达到1亿kW左右，光伏发电与电网销售电价相当；地热能利用规模达到5 000万t标准煤。同时要提高可再生能源利用水平，加强电源与电网统筹规划，科学安排调峰、调频、储能配套能力，切实解决弃风、弃水及弃光问题。

环境保护部于7月17日向媒体发布了2016年上半年全国空气和地表水环境质量状况，338个地级及以上城市空气质量总体呈改善趋势，重点区域大气颗粒物浓度持续下降，78个城市空气质量达标，同比提高6.5个百分点；平均优良天数比例为76.7%，同比提高4.0个百分点。可以说，城市空气质量总体呈改善趋势与电站设备制造业近几年研发的高效、低耗和环保的现代化电站设备密不可分。我们要为祖国的天更蓝，水更清，空气更清新而继续加倍努力。MW

（收稿日期：20160721）