

我国煤燃烧研究发展现状与趋势

隋建才¹, 杜云贵¹, 徐明厚³, 刘 艺²

(1. 重庆大学资源与环境学院, 重庆 400044; 2. 中电投远达环保工程有限公司, 重庆 400603;

3. 华中科技大学煤燃烧国家重点实验室, 湖北武汉 430074)

摘要: 深入分析了国内外煤燃烧研究的现状和趋势, 指出煤燃烧过程中效率低、污染严重两大问题是制约我国经济、社会持续发展的关键因素, 并明确提出了近期我国该领域的研究方向及主要课题。认为: 近期积极开展煤的清洁燃烧、环境友好的多联产资源化利用、燃煤的 near-zero 排放技术、能源利用过程中的污染物生成、迁移及控制、新能源及低品位能源的高效清洁利用、热能转换系统监测、诊断和控制等方面的研究, 对于促进我国可持续发展, 具有十分重要的战略意义。

关键词: 煤燃烧; 污染; 发展趋势

中图分类号: TK223.23

文献标识码: A

引 言

我国是世界上最大的煤炭生产和消费国, 也是世界上为数不多的以煤炭为主要一次能源的国家之一。煤炭在我国能源消费结构中的比例一直很高, 1959 年是 94.7%, 1976 年为最低点 69.9%, 自 20 世纪 90 年代以来, 一直在 75%~76% 之间。当前, 煤炭为我国提供了 70% 以上的发电燃料, 60% 的化工原料和 80% 的民用燃料。根据预测, 到 2015 年, 煤炭还要占 62.6%, 即使到了

2050 年, 煤炭仍占 50% 以上^[1~2]。因此, 在相当长的一个时期内, 我国以煤为主的能源消费结构将难以改变。但是, 煤炭的利用效率不高和由燃烧造成的环境污染一直是制约我国可持续发展的最重要的因素之一。

煤炭资源是大自然赋予人类的财富, 它的总储量是有限的, 在不断使用中逐渐减少。所以如何合理高效利用煤是当今我们所面对的非常紧迫的问题, 如何提高燃煤机组效率成了解决这一问题的关键。同时, 随着我国电力行业改革的不断深入, 即厂网分开, 竞价上网, 要使发电企业在行业中立住足、立稳足, 就必须大力降低发电成本。而发电成本的主要构成因素就是发电煤耗, 所以降低火力发电厂的煤耗成了现代发电企业关注的问题。我国燃煤发电技术落后, 燃煤电站的热效率一般均在 31%~33%, 比发达国家低 3.5%~7%。2004 年上半年我国火电厂供电煤耗仍为 367 g/(kWh), 比工业发达国家 1993 年的平均水平还高出 40~70 g/(kWh)^[3]。中国现有 58 万台工业锅炉, 年耗煤近 10 亿 t^[2], 如果供电煤耗降低 10 g/(kWh), 每年

可节约近 2 000 万 t 煤。

燃煤所造成的污染是制约我国国民经济和社会持续发展的重要因素, 也已成为国际上, 特别是周边国家和地区对中国关注的热点, 如不采取有力的治理措施, 这种局面将会加速恶化。我国煤燃烧所释放的 SO₂ 占到全国总排放的 85%, CO₂ 占到 85%, NO_x 占到 60%, 粉尘占到了 70%^[4]。我国酸雨区域迅速扩大, 已超过国土面积的 40%, 造成难以估量的经济损失。此外, 重金属和可吸入颗粒物的排放亦日益严重, 对健康和生态环境造成极大危害, 已引起了人们足够的重视。据统计, 由于燃煤锅炉热效率偏低和煤质低劣, 燃煤过程中颗粒物排放量是电厂所用煤粉量的 1.2%~1.5%^[5], 是我国大气颗粒物污染的主要来源。

面对我国煤燃烧过程中效率低、污染严重两大难题, 积极开展提高煤炭资源的利用效率、减轻环境污染两方面研究, 对于提高人民生活的环境质量, 促进我国可持续发展, 均有十分重要的意义。为此, 本文将详细分析国内外煤燃烧研究现状和趋势, 进而指出了其今后的发展方向。

收稿日期: 2007-11-06; 修订日期: 2007-11-14

基金项目: 国家重点基础研究专项经费基金资助项目(2002CB211602); 国家自然科学基金资助项目(50325621); 国家科技支撑计划基金资助项目(2007BAC24B00)

作者简介: 隋建才(1975—), 男, 内蒙古赤峰人, 中电投远达环保工程有限公司博士。

1 国内外发展现状和趋势

1.1 煤的高效清洁利用

针对现有燃煤电站效率低下、污染严重的现状,美国科学家最早提出了零排放的煤炭先进发电技术的概念。这种全新的技术对煤炭的利用方式进行了创新,它以煤炭加氢气化为基础,使燃料100%气化,并将其中引入的所有碳全部产生纯的CO₂气流,然后进行处理,避免了与燃料燃烧过程相关的颗粒物和污染物的释放,从而实现煤炭的高效、清洁利用。以美国 Los Alamos 国家实验室为倡导者的近20家科研机构和公司组成零排放煤炭发电技术联合组织^[6],正在进行这方面的基础研究以及中试装置的方案设计等工作;国内在这方面还没有开展具体的研发工作。

为了减少燃煤污染物排放和提高效率,目前发展迅猛的洁净煤技术有超临界压力锅炉加烟气脱硫技术(PC-FGD)、循环流化床锅炉技术(CFBC)和增压流化床锅炉联合循环技术(PFBC)、整体式煤气化联合循环发电技术(IGCC)。尽管世界上已建成多座PFBC和IGCC示范机组,但由于系统复杂,技术难点多等因素,热效率一般为42%左右,容量还不能和常规发电机组相比,发电成本目前也是IGCC>PFBC>PC+FGD,而PC+FGD和CFBC在我国仍是优先发展的技术。

超临界参数锅炉诞生于20世纪50年代末60年代初,已发展了近半个世纪。蒸汽参数有十余种等级:压力范围为23.5~34.6 MPa,温度范围为538~649℃,热效率41%~47%,供电煤耗为290~329 g/(kWh),NO_x、

SO₂、CO₂ 排放量少,机组可用率和亚临界机组在同一水平,通常为90%~99%,负荷变化速度在40%~100%负荷之间为5%/min左右,调峰能力强,低负荷时也能保持较高热效率,其投资比同容量亚临界机组造价高约5%~20%。石洞口二电厂2×600 MW机组为我国最早引进的超临界机组,2004年发电煤耗297 g/(kWh),供电煤耗为307 g/(kWh),电厂热效率为41%,比全国平均供电煤耗367 g/(kWh)低60 g/(kWh),比同容量国产600 MW亚临界机组供电煤耗340 g/(kWh)低33 g/(kWh)^[7-9]。高效低污染燃煤发电系统和大容量超临界火电机组已被列入国家计委、科技部近期发布的《当前国家优先发展的高技术产业化重点领域指南(目录)》中,国家电力公司也把超临界机组作为火电建设的重点。

循环流化床技术是公认的清洁燃烧技术,与煤粉炉相比,具有热效率高、低NO_x、SO₂排放、燃料适应性广、灰渣活性好、脱硫脱硝成本低、负荷调节范围宽、投资少、适用热电和调峰机组等优势。目前世界上投运的最大CFBC锅炉容量为700 t/h,锅炉热效率90.5%,可用率达到电站常规煤粉锅炉水平。国内在这方面起步较晚但发展很快,目前投运的最大容量CFBC锅炉为内江高坝电厂从国外引进的410 t/h锅炉,自行设计的CFBC锅炉最大容量已达220 t/h^[9]。但循环流化床技术还不能说是一项非常成熟的技术,其还存在有待进一步研究解决的问题,如最佳的循环倍率、循环物料的高效分离、受热面和炉墙的防磨措施、N₂O的控制、辅机电耗高、大型化后的脱硫性能等。

1.2 煤燃烧污染及控制

有关煤燃烧污染物形成机理和控制的研究,国内外自20世纪70年代出现石油危机时就已经开始,但至今已有的控制途径多是对单一污染物进行控制,如FGD、SCR、SNCR等。近年来,污染物综合控制的研究已日益受到重视,如脱硫除尘一体化技术、脱硫脱硝一体化等,并在美国等发达国家得到应用。然而,这些方法往往投资运行成本高,有些方法还会带来一些其它问题,因此,发展符合中国国情的低成本污染物综合控制方法势在必行。建立描述湍流多相燃烧过程的物理模型(兼顾计算的经济性和模型的精度),以准确地预报各种工业燃烧和转化装置的内部过程,是国内外学者长期不懈努力的方向。近20年来,对湍流多相燃烧过程的物理模型的研究,体现的是一条应用—改进—创新的轨迹,已经不再局限于应用已有的经典模型,而更多的是寻求对模型的建模方法、封闭模型和计算方法等各方面进行改进;其研究手段也在从工程方法向科学方法转换,即从经验的、唯象的方法向机理性的、基础的方法转化。各种精细的湍流模拟和实验方法,如直接模拟、大涡模拟、激光粒子图像速度场仪(PIV)测量等,近年来被大量的引入到探索多相湍流燃烧的机理和获得模型封闭所需要的基本参数中来。同时,很多新的模型和模化方法也涌现出来,如格子—Boltzmann方法、概率密度函数(PDF)方法等,这些模型和模拟方法较传统的计算流体力学方法和湍流模式有着本质上的区别,具有良好的发展前景。就所关注的物理问题来看,也逐渐深入到颗粒对流体反向耦合

作用、颗粒壁面边界条件、颗粒—颗粒碰撞及其对颗粒曳力、流体湍流变动的的影响、局部熄火及其对污染物生成的影响等。

长期以来,煤炭作为一种能源,主要是通过直接燃烧而被利用的。实际上,煤炭不仅是一种化石燃料,而且还是很重要的化工资源。为适应 21 世纪的能源与环境需求,美国能源部于 1998 年在已有技术的基础上提出了“Vision 21”煤基多联产计划,预计在 1999~2004 年投资 26.8 亿美元,通过集成现有的先进技术,并开发新型关键和支撑技术,实现以煤气化发电、车用燃料和化工产品合成为主要内容多联产,目标为合成油每桶低于 20 美元,并实现污染物的近零排放。欧洲 Shell 公司提出了 Syngas Park(合成气园)的煤气化发电、合成甲醇和生产化肥等的多联产概念;日本 NEDO 提出了以高温煤气化、燃料电池发电和合成车用燃料为主要内容的多联产计划^[10]。基于我国的能源结构和环境状况,为实现资源、环境与国民经济的协调发展,1997 年国务院批准了“中国洁净煤技术‘九五’计划和 2010 年发展计划”。洁净煤技术被列为《中国 21 世纪议程》中最优先发展的项目,包括增压流化床发电技术、煤气化联合循环发电技术、煤的气化、煤的液化、燃料电池和烟气净化等技术的开发,并于 1999 年部署了促进以上技术产业化的基础研究(973 项目),但以多种单元技术集成优化构成的煤基多联产系统尚未列入国家计划中^[11]。

多联产系统的发展经历了如下几个阶段:基于渣油的多联产(主要生产电、热,第一代)、早期煤基多联产(主要生产化工产品、

工艺用热和发电,第二代)、推广煤基多联产(主要生产合成燃料和电,第三代)、多燃料多联产(煤、生物质、天然气、废弃物等多种燃料,包括氢气发电、合成燃料、化学品和污染物接近零排放,第四代)^[12]。发达国家正在开发第三代多联产系统,对第四代的多联产系统研究仅处于概念验证和起步阶段,有可能在 20 年内实现第四代多联产系统^[13]。我国煤基多联产系统的发展尚处于第二代起步阶段,与发达国家相比有一代的差距。通过多年的积累,我国现有的单元技术部分具备了开发第三代多联产系统的基本条件,发展第三代煤多联产系统的时机已经到来,结合先进的燃气轮机发电技术、燃料电池技术等的研究与开发,进一步开展 CO₂ 处理技术的研究与开发,有望冲击第四代多联产系统,实现我国煤炭高效洁净利用技术的跨越式发展。

1.3 热能转换安全问题

发电系统“产、供、销、用”同时完成的特点,决定了系统必须长期、连续、安全、经济地运行,因此保证系统的健康和完好是根本前提。国外最新进展集中在建立预知维修体系和发展先进检测手段上,国内则正在引进国外体系的基础上进行摸索实施。到目前为止,世界上只有少数机构在系统研究发电设备预知维修系统,其中涉及到的大量科学和技术问题尚需要深入研究。而国内发电行业的需求和呼声日益高涨,研究结果具有广阔的应用前景。在国内发电系统中,主要热力设备的健康状态、性能、寿命,以及诸如炉内燃烧过程的实时监测和评价技术缺乏,是监控技术进一步提高的“瓶颈”,影响了机组运行。

在燃烧监测方面,燃烧辐射成像将是三维燃烧可视化监测的有效途径。国内外在 20 世纪后 20 年开展了这方面的研究,但大多集中在二维火焰辐射图像的直接处理,限于理论研究的不足,很难深入到利用二维辐射图像重建三维燃烧温度分布的程度。

2 近期研究发展方向

2.1 化石燃料的高效清洁利用

迄今为止,人类文明的发展主要是依赖无节制地开发和利用煤、石油、天然气等自然燃料资源。传统的资源、能源消耗方式给人类带来沉痛的教训:奢侈的资源浪费、过低的能源利用率和严重的环境污染。我国目前处于以煤为主要一次能源的发展阶段。为实现环境与资源的协调发展,合理、高效、清洁地利用煤炭应该是我实现可持续发展的重要方向。目前循环流化床锅炉技术及超临界压力锅炉是我国优先发展的技术。循环流化床技术是公认的清洁燃烧技术,国内在这方面起步较晚,还存在有待进一步研究解决的问题,如最佳的循环倍率、循环物料的高效分离、受热面和炉墙的防磨措施、N₂O 的控制、辅机电耗高、密封、出力不足、床内煤的成灰特性、床内物料浓度分布、床下排灰特性、大型化后的脱硫性能等^[13~14]。而对于超临界机组,我国目前投入运行仅有 10 余台,电力部门已确定超临界机组为今后一个时期火电机组建设的重点之一,但目前我国该项技术主要是从国外引进,相应的研究在国内还很薄弱。

因此,我国目前应该加强以下研究:煤粉的高效清洁燃烧、循环流化床燃烧理论及技术、超临

界机组运行中的关键技术、多种不同品位煤的非线性配制及催化燃烧、代油燃料的高效燃烧机理和污染排放控制方法、浆体燃料的气化与综合利用、气体燃料微燃烧基础研究和气体燃料在新型渐变型多孔介质中高效高强度燃烧与污染物生成特性等。

2.2 环境友好的多联产资源化利用

环境友好的多联产资源化系统是将煤炭或油渣(主要是煤炭)作为资源,跨越了行业界限,寻求整体最优利用的一种高度灵活的资源、能源、环境一体化的能源利用系统。所谓多联产系统是指利用从单一的设备(气化炉)中产生的“合成气”(主要成分为 $\text{CO} + \text{H}_2$)来进行跨行业、跨部门的联合生产,以得到多种具有高附加值的化工产品、液体燃料(如甲醇、F-T合成燃料、城市煤气、氢气),以及供热制冷、产气发电、煤渣利用等^[15~17]。多联产系统能够从系统的高度出发,结合各种生产技术路线的优越性,使生产过程耦合到一起,彼此取长补短,从而达到能源的最高利用效率,最低的能耗,以及最少的污染物排放。以煤气化为核心的多联产系统在我国的发展尚处于第二代起步阶段,与发达国家相比有一代的差距。通过多年的积累,我国的煤多联产技术已取得了长足进步,但要实现我国煤炭高效洁净利用技术的跨越式发展,还必须进一步加强多联产综合利用的基础研究,以及煤气化的超洁净技术、煤液化技术、燃料电池发电系统等开发。

2.3 零排放燃煤发电技术

LANL最先提出了一种零排放的煤制氢/发电技术(ZECA),其技术路线如下:将高温蒸汽和

煤反应生成 H_2 和 CO_2 ,其中 H_2 即被用作高温固体—氧化剂燃料电池的燃料用于产生电力, CO_2 则和 CaO 反应生成 CaCO_3 ,然后 CaCO_3 在高温煅烧为高纯度的 CO_2 ,而 CaO 则被过程回收利用。释放出来的 CO_2 则和 MgSiO_4 反应生成稳定的可储存的 MgCO_3 矿物^[18]。该技术投入生产运行之后,可使煤的利用效率达到70%,是目前的两倍。目前,该技术正在联合开发中,参加单位包括8个美国煤相关公司和LANL,还有加拿大的8个公司和机构。

同时,由于氢气燃烧生成水,无任何污染,是未来最理想的清洁能源,所以世界各国都以氢能的研究为长远的战备课题,我国应及时地抓住机遇大力发展这方面的研究。近期应开展煤气化加氢、二氧化碳碳化及重整过程等研究。

2.4 能源利用过程中的污染物生成、迁移及控制

有关 NO_x 和 SO_x 的生成机理,最近几年国内外学者做了大量的研究工作,深刻揭示了煤粉燃烧过程中它们的生成机理,但许多中间反应过程及化学反应动力学参数尚未十分清楚,而对 NO_x 和 SO_x 的控制国外已经有了相当成熟的技术,但由于投资及运行费用制约,国内目前很难普及应用,因此,研究其生成机理及适合中国国情的控制技术仍是目前研究的一个重点。根据2003年国家环保总局颁布的火电厂污染物排放最新标准,我国现有电厂的污染物排放都严重超标,所以近期应继续研究炉内添加剂、流化床燃烧脱硫技术及烟气脱硫技术,同时相应的研究各种低污染燃烧设备,要求能控制 NO_x 和 SO_x 的排放,达到国家最

新排放标准,并且不降低或少降低机组热效率。

气象观测资料显示,在过去的100年内地球表面温度平均上升 $0.3 \sim 0.6^\circ\text{C}$,海平面升高 $10 \sim 20\text{cm}$,全球最热的10个年份也都发生在20世纪90年代,气候变暖问题已引起世界各国的广泛重视^[19]。在所有的温室气体中 CO_2 因排放量大,在辐射强度中所占份额达55%以上。 CO_2 的大量排放显然是与化石燃料的广泛使用分不开的,2001年我国的排放量达到30亿t,占全球排放量的13%^[20],居世界第二位,因此, CO_2 污染应该也是近期的研究重点和治理对象。

据我国环境质量报告书和世界资源报告提供的数据,我国空气质量超标的城市中,68%都存在可吸入颗粒物的污染问题,而这些颗粒物绝大部分是燃煤产生。对燃煤产生的可吸入颗粒物控制的迫切性已引起了广泛的关注,但相关的研究还很少,因而相应的控制技术更加缺乏。 $\text{PM}_{2.5}$ 气溶胶颗粒是个非常复杂的运动着的气固多相体系,其特性的许多方面至今仍不清楚,也造成了 $\text{PM}_{2.5}$ 颗粒高效清除方法的缺乏。近几年,燃烧源可吸入颗粒物生成机理及控制方法是近些年来国际上普遍重视的课题。在我国,这方面工作刚刚起步,即2002年开始的“973”重点项目,因此,这一领域的研究工作仍需大力加强。

针对目前某一污染控制设备只能脱除一种污染物的现象,应加强多种污染物同时脱除的理论及控制技术研究。同时也要加大有利于循环经济的资源化污染物控制技术开发与推广。

2.5 新能源及低品位能源的高

效清洁利用

生物质能一向不为人们重视,似乎只是一些秸秆树枝的问题。长期以来国家对生物质能的研究重视少、投入少,其必然的结果是浪费大、利用少。例如我国每年有 1.5 亿 t(约合 7 千万 t 标煤)以上的作物秸秆在田间地头直接烧掉,不但浪费了宝贵的资源,而且污染了环境。生物质能通过生物或化学的方法气化或液化可以转化成现代高质量能源,既提高了热效率又无化石能源使用的弊端,是社会可持续发展的重要方面,因此发达国家竞相投入巨资开展研究,并通过多种方式实施补贴使其在价格上与化石能源具有竞争力。在我国,这方面工作尚属起步阶段,有必要加强这一领域的研究工作。因此,近期应积极开展生物质的定向气化研究,发展新型气化技术,开展生物质的快速热裂解直接液化、生物质间接液化及生物质的低压低酸水解研究等工作。同时,还要努力探索生物质燃料或生物质/煤混合燃料的高效燃烧、生物质中的碱金属和其它相关物质在热解燃烧中的迁徙转化过程、灰渣沉积熔融机理及生物质燃烧或混烧设备中的受热面粘污、腐蚀,床层熔融、聚团等问题。

城市废弃物已成为困扰城市发展、破坏生态平衡、危害人民身体健康的一个十分主要的环境问题。随着城市的扩大、人口的增加、人们生活水平的提高,生活垃圾产量日益增加,1998 年我国产量已达 1.4 亿 t,而且每年还以 8%~10% 的速度递增,但生活垃圾处理率不足 60%,而真正无害化处理率更低。随着垃圾填埋作为单一处置方式暴露出越来越多的问题,以及城市废弃物结构逐

年产生的变化:无机物大量减少,有机物、可燃物大量增加,低位热值逐年提高等^[21]。过去常规的处理方法、技术和设备都不能满足目前社会的需要,以焚烧技术为代表的垃圾处理技术正在中国悄然兴起。但是,废弃物燃烧、热解、气化(包括气化熔融)特性目前并不是完全清楚,而且废弃物在燃烧过程中会释放出 HCl、SO₂ 及二恶英等有害气体^[22]。

因此,我国应该加强生物质气化、液化制取清洁燃料、生物质高效燃烧、基于环境友好的废弃物资源化利用,以及废弃物的燃烧、裂解、气化特性等研究,以实现我国低品位能源的高效利用,同时实现无害化处理。

2.6 热能转换系统监测、诊断和控制

该领域近期应主要开展以下研究:

(1) 发电设备预知维修及其支持系统。主要包括:发电系统预知维修体系、高温设备损伤与寿命的定量评价、发电系统监测诊断及设备状态评价的研究。

(2) 高温燃烧工业过程实时可视化监测与优化控制。主要包括:高温辐射传递过程的分析及其逆问题求解方法;工业火焰和燃烧过程的辐射图像检测分析及辐射特性、温度分布的同时可视化重建的有效算法及其实现;不同燃料及型式的工业燃烧对象燃烧实时可视化监测信息分析、燃烧异常工况诊断识别,以及以提高燃烧安全性、经济性、降低燃烧污染物排放为目标的燃烧优化控制策略研究。

3 煤燃烧国家重点实验室在该领域研究进展

近年来,华中科技大学煤燃

烧国家重点实验室在煤燃烧过程中矿物质的物理化学变化行为、湍流反应流体力学介观模型的新进展、流化床的气动力特性与传热规律描述、燃烧污染排放机理与防治规律、热力及燃烧过程的诊断控制与模拟仿真、先进的高效低污染燃烧技术等方面开展了卓有成效的工作,实现了在基础理论研究和应用技术开发向高水平的跨越。

目前主要在研项目有:燃烧源可吸入颗粒物形成与控制、燃煤电站超细颗粒物团聚促进技术、煤燃烧过程中矿物组合演化及地化特征分异的研究、西部煤中矿物质及特有污染组分在燃烧与转化过程中的迁移、演化行为、能源利用过程中多种污染物的排放控制与协同脱除、燃煤烟气多种污染物高效联合脱除及产物资源化利用新技术、典型西部燃煤电站锅炉煤灰中痕量重金属浸溶特性研究。

4 结 论

我国是世界上最大的煤炭生产和消费国,煤炭的利用效率不高以及燃烧造成的环境污染,一直是制约我国可持续发展的最重要的因素之一。面对燃煤利用过程中效率低、污染严重两大难题,我国应积极开展煤的清洁燃烧、环境友好的多联产资源化利用、燃煤的近零排放技术、能源利用过程中的污染物生成、迁移及控制、新能源及低品位能源的高效清洁利用、热能转换系统监测、诊断和控制等方面的研究,这对于我国提高煤炭资源的利用效率、减轻环境污染、提高人民生活的环境质量、促进社会可持续发展,均有十分重要的战略意义。

参考文献:

[1] 中国能源综合发展战略与政策研究课题组. 国家战略的基本构想[N]. 人民网, 2003. 11.

[2] 岑可法. 中国能源与环境可持续发展的若干问题[J]. 中国废钢铁, 2006(2): 4-13.

[3] 吴东垠, 马玉峰, 李中树. 洁净煤技术应用的现状[J]. 电站辅机, 2007(2): 32-34.

[4] XU MINGHOU, YAN RONG, ZHENG CHUGUANG, et al. Status of trace elements emission in a coal combustion process: a review[J]. Fuel Processing Technology, 2004, 85(2/3): 215-237.

[5] TAO S, MA Y. The environmental monitoring in thermal power plant in China//Proceedings of International Conference on Environmental Protection of Electric Power [C]. Nanjing: Southeast University Press, 1996. 65-73.

[6] WILLIAMS A, POURKASHANIAN M, JONES J M. Combustion of pulverized coal and biomass[J]. Progress in Energy and Combustion, 2001, 27: 587-610.

[7] 黄毅诚. 努力提高我国的综合能源利用效率[J]. 中国电力, 1999, 32(2): 1-5.

[8] <http://www.hpi.com.cn/big5/management/subsidiaries/FData.jsp?infold=35>.

[9] 王晓晖, 董 秦, 田正斌. 循环流化床锅炉的现状与发展[J]. 能源研究与信息, 2006(3): 12-14.

[10] YAY RONG, ZHU HAIJING, ZHENG CHUGUANG, et al. Emissions of organic hazardous air pollutants during Chinese coal combustion[J]. Energy, 2002, 27(5): 485-503.

[11] 姚 强. 洁净煤燃烧技术的现状与未来[J]. 太原科技, 2004(4): 15-16.

[12] GAO LIN, JIN HONGGUANG, LIU ZELONG, et al. Exergy analysis of coal-based polygeneration system for power and chemical production[J]. Energy, 2004, 29(12-15): 2359-2371.

[13] MARKUS BROSTRÖM M, HÅKAN KASSMAN, ANNA HEIGESSON, et al. Sulfation of corrosive alkali chlorides by ammonium sulfate in a biomass fired CFB boiler[J]. Fuel Processing Technology, 2007, 88(11/12): 1171-1177.

[14] MANON VAN DE VELDEN, JAN BAEYENS, BILL DOUGAN, et al. Investigation of operational parameters for an industrial CFB combustor of coal, biomass and sludge [J]. China Particology, 2007, 5(4): 247-254.

[15] 董 跃. 洁净能源的开发与可持续发展[J]. 洁净能源, 2005(6): 90-92.

[16] LI CHUN ZHU. Some recent advances in the understanding of the pyrolysis and gasification behaviour of victorian brown coal[J]. Fuel, 2007, 86(12/13): 1664-1683.

[17] CAI RUIXIAN, GOU CHENHUA. A proposed scheme for coal fired combined cycle and its concise performance[J]. Applied Thermal Engineering, 2006, 27(8/9): 1338-1344.

[18] SOHAIR ABOU ELELA I, HESHAM ABDEL HALEEM. Application of cleaner production technology in chemical industry: a near zero emission[J]. Journal of Cleaner Production, 2005, 15(18): 1852-1858.

[19] SHUICHI ASHINA, TOSHIHIKO NAKATA. Energy-efficiency strategy for CO₂ emissions in a residential sector in Japan [J]. Applied Energy, 2007, 85(2/3): 101-114.

[20] 徐 俊, 张军营. 二氧化碳储存技术的研究现状[J]. 煤炭转化, 2005, 28(3): 80-86.

[21] 国家环境保护总局污染控制司. 城市固体废物管理与处理处置技术[M]. 第一版. 北京: 中国石化出版社, 2000.

[22] 李志伟. 城市废弃物的 CFB 焚烧和气化特性试验[D]. 北京: 中国科学院图书馆, 2004.

(编辑 伟)

理论研究

余热锅炉管内工质流动的稳定性

《ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power》2006年10月号报道了两种不同类型自然循环余热锅炉—双锅筒蒸汽发生器和具有水平管束的余热锅炉流动稳定性理论分析的结果。

研究表明了锅炉的几何条件对蒸汽发生器流动稳定性的影响; 对于双锅筒锅炉, 分析了稳态的不稳定性, 即反向的流动。

也介绍了对于具有水平管束的余热锅炉研究的初步结果。在这种情况下, 分析了密度波形振荡动态流的不稳定性。

(吉桂明 供稿)

我国煤燃烧研究发展现状与趋势—**Status Quo of the Study on the Development of Coal Combustion in China and its Development Trend**[刊, 汉]/SUI Jian-cai, DU Yun-gui (College of Resources and Environment, Chongqing University, Chongqing, China, Post Code: 400044), LIU Yi (China Power Investment Corporation Yuanda Environment Protection Engineering Co. Ltd., Chongqing, China, Post Code: 400060), XU Ming-hou (National Key Laboratory on Coal Combustion, HuaZhong University of Science and Technology, Wuhan, China, Post Code: 430074)// Journal of Engineering for Thermal Energy &Power. — 2008, 23(2). — 111 ~ 116

First, the authors have made an in-depth analysis of the status quo of the study on coal combustion both at home and abroad and its development trend. It is noted that the two major problems, namely, a low efficiency and heavy pollution during coal combustion, are the key factors limiting the sustainable economic and social development of China with the near-term research direction and main tasks of China in this field being pinpointed. Moreover, the authors also hold that to actively conduct a wide spectrum of research covering a variety of topics is of the utmost strategic significance for China. They include: the development of clean combustion of coal, environment-friendly multiple cogeneration-based resource utilization, coal combustion near-zero emission technology, the generation, migration and control of pollutants during energy source utilization, the efficient and clean utilization of new and low-grade energy sources, as well as research concerning monitoring, diagnosis and control of thermal-energy transformation systems, etc. **Key words:** coal combustion, pollution, development trend

蒸汽轮机末级静叶沟槽除湿方法的数值模拟—**A Numerical Simulation of the Moisture-removal Method for the Last-stage Stationary-blade Groove of Steam Turbines**[刊, 汉]/ XU Liang, YAN Pei-gang, HUANG Hong-yan, et al (College of Energy Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy &Power. — 2008, 23(2). — 117 ~ 121

With “rear-upward” moisture-removal grooves being provided on the middle-rear portion of stationary-blade cascade-pressure surfaces in the last stage of a steam turbine and through a full three-dimensional numerical simulation of two-phase flows, explored and investigated was the moisture-removal mechanism of the grooves in question. The numerical calculation results show that the moisture-removal grooves thus designed can create a negative pressure gradient inside the grooves along the blade height. It is precisely such a pressure distribution that enables the liquid in the grooves to secure an ability to move upward and facilitate an accumulation of the liquid water at the end wall of the blades, thereby discharging it from the cascade flow passages. The calculation results also show that the moisture-removal grooves exercise almost no influence on the distribution of aerodynamic parameters (pressure and dryness, etc.) along the steam flow passages. **Key words:** moisture-removal groove, stationary blade, wet steam, two-phase flow

基于支持向量回归的大容量机组主蒸汽流量建模—**A Modeling of the Main Steam Flow Rate of a High-power Steam Turbine Based on a Support Vector Regression**[刊, 汉]/ ZHOU Jian-xin, WANG Lei, WU Hai-ji, et al (College of Energy Source and Environment, Southeast University, Nanjing, China, Post Code: 210096) // Journal of Engineering for Thermal Energy &Power. — 2008, 23(2). — 122 ~ 126

A theory for the calculation of the main steam flow rate of a high power steam turbine unit was analyzed, and the disadvantage of routine calculation models based on the pressure after the regulating stage, pinpointed. On this basis, introduced were a vector-supported regression calculation model and its parameter selection. The model in question was used for a modeling calculation of the main steam flow rate of a 300 MW steam turbine unit, and simultaneously put in contrast with