

· 学科进展与展望 ·

# 化石能源动力系统中 CO<sub>2</sub> 减排的研究进展与展望

## ——第 56 次双清论坛综述

徐建中<sup>1\*</sup> 谢克昌<sup>2\*\*</sup> 金红光<sup>1</sup> 韩巍<sup>1</sup> 刘涛<sup>3</sup> 纪军<sup>3</sup>

(1 中国科学院工程热物理研究所, 北京 100190; 2 中国工程院, 北京 100088;

3 国家自然科学基金委员会工程与材料科学部, 北京 100085)

**[摘要]** 能源动力系统中 CO<sub>2</sub> 减排是国际上的研究热点。国家自然科学基金委员会召开了以“化石能源动力系统中温室气体控制的革新与制高点”为主题的第 56 次双清论坛。围绕能源动力系统中减排 CO<sub>2</sub> 相关的燃烧、碳迁移、分离与埋存、系统集成等核心问题展开讨论,凝练了该领域未来 5 年需要深入研究的关键科学问题,包括燃烧革新与 CO<sub>2</sub> 回收、能量转换与碳迁移过程的耦合、CO<sub>2</sub> 运输和埋存中的工程热物理问题、能源动力系统与 CO<sub>2</sub> 控制集成等,并就前沿和交叉科学问题研究、组织实施重大研究计划等提出建议。

**[关键词]** 化石燃料,能源动力系统,CO<sub>2</sub>减排,双清论坛

温室气体 CO<sub>2</sub> 的减排已经成为能够对未来世界格局变化产生重大影响国际问题。由于我国的国情特点:资源构成以煤为主、能源利用效率低,以及能源消耗量大,使 CO<sub>2</sub> 减排问题对我国来说,既是挑战,也蕴藏着抢占国际低碳科技制高点的机遇。为此,国家自然科学基金委员会第 56 次“双清论坛”以“化石能源动力系统中温室气体控制的革新与制高点”为主题,于 2010 年 12 月 8—10 日在南通举行。

本次论坛主席由中国科学院院士徐建中和中国工程院院士谢克昌联合担任。本次论坛得到了能源利用、化工、冶金、地质等领域专家学者的积极响应,共有来自全国 32 所大学和科研院所的 70 余位专家参加。南通大学承办了这次论坛。徐建中院士首先从能源供需矛盾和能源结构两方面阐述了我国开展 CO<sub>2</sub> 减排研究的重要性,指出发展低碳经济和低碳技术是我国能源可持续发展的必然选择。进而,徐建中院士概述了 3 个低碳技术领域,节能与科学用能、发展可再生能源和 CO<sub>2</sub> 捕集与埋存技术(CCS)的研究进展;指出发展 CCS 技术是构建我国低碳社

会的重要保证,急需开展相关基础研究,逐步建立适合中国国情的 CO<sub>2</sub> 减排技术路线。岑可法院士针对在未来 30—40 年内,我国能源可持续发展无法改变以煤为主的现实,指出发展煤的分级综合利用技术、富氧燃烧技术、化学链燃烧技术是促进我国煤炭清洁利用,减少 CO<sub>2</sub> 排放的关键。岑可法院士还介绍了以上关键技术的研究进展和关键科学问题,最后指出煤裂解超临界纯氧发电多联产技术是最优前景的清洁煤技术之一。谢克昌院士指出本次论坛要紧紧围绕化石能源-动力系统-温室气体 CO<sub>2</sub> 控制这个主题,重视源头控制减排的作用,注重工程热物理问题与化工、地质学科领域的交叉融合,谢克昌院士和与会专家围绕凝练的科学问题进行了充分的讨论,并提出了未来的技术方向。

与会专家从不同角度围绕温室气体和 CO<sub>2</sub> 控制技术,对“能源动力系统与 CO<sub>2</sub> 分离的集成”、“捕集 CO<sub>2</sub> 的燃烧革新”、“能量转换与 CO<sub>2</sub> 分离的耦合”和“CO<sub>2</sub> 运输和埋存中的工程热物理问题”等 4 个中心议题作了 4 个主题报告,并开展了热烈讨论。

\* 中国科学院院士。

\*\* 中国工程院院士。

本文于 2011 年 7 月 21 日收到。

## 1 论坛的主要核心内容

与会专家围绕温室气体和 CO<sub>2</sub> 控制的 4 个核心科学问题展开讨论。这 4 个问题是:

(1) 燃烧过程中 CO<sub>2</sub> 的生成特性是什么? 如何通过燃烧过程革新实现 CO<sub>2</sub> 的源头控制? 低碳或碳中性燃料的燃烧技术革新。

(2) CO<sub>2</sub> 伴随能量转换过程的生成与迁移规律是什么? 如何利用这一现象降低 CO<sub>2</sub> 捕集能耗?

(3) CO<sub>2</sub> 运输和埋存的进展和有哪些急需解决的工程热物理问题? 这些问题的突破点如何?

(4) 能源动力系统与 CO<sub>2</sub> 捕集过程的耦合方式有哪些? 不同的耦合方法对 CO<sub>2</sub> 分离能耗的影响?

## 2 论坛凝练的关键科学问题

通过本次会议对形势和进展的分析表明, 国际 CO<sub>2</sub> 减排已成为全球性的共识, 各国政府都高度重视并积极进行技术和相关基础理论的研究。会议认为, 化石能源动力系统中 CO<sub>2</sub> 控制涉及多学科交叉, 其中诸多重大的科学问题有待解决。作为世界 CO<sub>2</sub> 排放大国, 我国应当及时抓住机遇, 组织全国优势力量, 针对化石能源动力系统中 CO<sub>2</sub> 控制的相关科学问题开展深入、系统的研究, 为我国温室气体和 CO<sub>2</sub> 控制技术提供理论支撑。与会专家还从原理、技术和系统等多个层面提出了建设性的意见和建议, 可以概括为以下 4 个方面。

### 2.1 燃烧革新与 CO<sub>2</sub> 回收

燃烧既是能源动力系统中不可逆损失最大的环节, 也是 CO<sub>2</sub> 的生成环节, 将新型能源转换原理与 CO<sub>2</sub> 富集过程有机结合, 是解决化石能源高效利用和实施环境保护的一个极富变革性的发展方向。重点讨论了有利于 CO<sub>2</sub> 分离的燃烧革新方法和途径, 新型燃烧反应材料和动力学特性。会议认为需要加强以下几个方面的研究:

(1) O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> 循环燃烧原理和新一代富氧燃烧理论: 富氧燃烧方式具有近乎完全的脱碳能力, 技术上可行。主要研究内容包括循环燃烧的化学反应动力学机理, 循环燃烧方式下煤的着火、燃烧、火焰传播特性, 高浓度 CO<sub>2</sub> 炉膛内的辐射及传热特性。

(2) 富氧燃烧中污染物的生成与系统脱除机理: 富氧燃烧易于实现 NO<sub>x</sub>、SO<sub>x</sub> 等多种污染物的协同控制, 在经济成本上有着相当优势。循环燃烧方式下污染物生成特性, 多种污染物联合脱除机制

及其协同控制, CO<sub>2</sub> 吸收剂的再生及其活性维持等研究内容成为研究热点。

(3) 化学链燃烧原理: 开展以煤为燃料的化学链燃烧研究, 符合我国以煤为主的能源结构实际, 需要开展化学链燃烧反应动力学研究、循环载体的多目标设计、高性能循环氧载体的性能和制备、碳酸化/煅烧循环分离 CO<sub>2</sub> 特性、化学链燃烧系统能量耦合与优化、循环载体化学链制氢系统集成研究等。

(4) 煤的化学能分级利用与多级联产原理: 煤的分级转化和多级联产技术是我国能源走向循环经济的重要出路, 也是有效的节能减排方式, 主要展开的研究内容包括, 煤完全气化的分级转化的多联产系统, 煤部分气化及燃烧多联产系统, 煤快速热解燃烧多联产系统和煤热转化过程中元素迁移规律等。

(5) 低碳燃料设计理论及内燃机低碳燃烧理论: 内燃机在动力机械中保有量居首位, 世界 2/3 石油消耗在内燃机, 研究内燃机 CO<sub>2</sub> 减排具有重要意义, 主要研究内容为宽馏分燃料设计和燃料理化特性评价, 化石燃料与生物质混合燃料设计与全生命碳中性燃料设计, 低碳燃料燃烧机理与动力学、火焰传播、失火机理与控制、爆震机理与控制, 高压稀薄燃烧理论与技术, 汽油及其混合燃料压燃燃烧理论, 高温高压条件下燃烧动力学等。

通过以上研究预期可取得如下成果: 丰富与发展 O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> 循环燃烧理论, 形成规模化的 CO<sub>2</sub> 捕集技术和方法; 丰富与发展化学链燃烧理论, 开发高性能、低成本循环氧载体的制备技术, 掌握循环载体化学链制氢方法; 掌握基于煤的完全及部分气化的分级利用多联产新技术。

### 2.2 能量转换与碳迁移过程的耦合

化学能的转化与释放以及热能、冷能的传递与利用等能量转换过程中伴随着 CO<sub>2</sub> 的迁移、相变和分离, 能量转换与 CO<sub>2</sub> 分离过程的耦合具有降低 CO<sub>2</sub> 捕集能耗的潜力, 是能源动力系统温室气体控制研究领域的新兴热点之一。重点讨论了降低 CO<sub>2</sub> 分离过程能耗的方法和途径, 化学反应过程的能量转换与 CO<sub>2</sub> 迁移特性。与会者认为需要加强以下几个方面的研究:

(1) CO<sub>2</sub> 分离体系中能量转换机理; CO<sub>2</sub> 吸附/吸收分离中的非平衡热力学理论和动力学特性, 吸附剂再生过程中的能量转换过程及低能耗再生技术研究, 燃料化学能与热能综合梯级利用及 CO<sub>2</sub> 的低能耗分离, 吸附和吸收分离过程中的热质传递机理, 空分装置与动力系统 CO<sub>2</sub> 分离集成的能量传递与

CO<sub>2</sub>分离耦合规律、系统匹配及动态特性,空气分离过程的跨尺度、多尺度动态模拟研究,开发低成本的氧气分离技术。

(2) 高温膜的传导特性与CO<sub>2</sub>分离耦合特性:高温下气体在多孔介质中的传递机理,分子水平上膜结构优化分析并开发高渗透性、高选择性的酸性气体分离膜材料、膜及其组件,采用跨尺度模型对高温膜进行组件、装置及过程进行优化,开发膜分离与吸附、吸收分离过程集成的新型分离技术,研究CO<sub>2</sub>及其他污染物捕获系统的集成和优化技术。

(3) 燃料化学能转换利用与CO<sub>2</sub>分离一体化集成:探索燃料气化、重整等能源转换系统中CO<sub>2</sub>的形成、迁移与能量转换的耦合集成机理,研究化学能转换与CO<sub>2</sub>一体化耦合系统的优化、规模和节能机制等。

通过能源转换与碳迁移过程的耦合研究,预期可以揭示多层次、多过程、多尺度的能量释放机理与CO<sub>2</sub>的形成、反应、迁移、转化特性的复杂耦合关联性;揭示出能源转化与CO<sub>2</sub>捕获的协调机制;提出能源环境相协调的系统集成创新;构建能量转化与CO<sub>2</sub>控制一体化的全新理论体系。

### 2.3 CO<sub>2</sub>运输和埋存中的工程热物理问题

CO<sub>2</sub>与埋存环境之间会发生热物理过程和物理化学变化,对于CO<sub>2</sub>埋存的安全性具有重要影响。重点讨论了CO<sub>2</sub>与存储环境之间的质量传递、化学平衡和相平衡关系。会议认为需要加强以下几个方面的研究:

(1) CO<sub>2</sub>封存场储层的热特性研究:封存场地储层的热特性描述与评价,多相、多组分相互作用下CO<sub>2</sub>封存量评价,温度对CO<sub>2</sub>注入能力及对注入过程的影响机制等。

(2) 地质封存中CO<sub>2</sub>相关基础物性研究:CO<sub>2</sub>咸水溶液密度变化机制与机理,CO<sub>2</sub>在咸水中的扩散、溶解特性评价等。

(3) 多尺度、多相条件下CO<sub>2</sub>地质封存的传热即运移特性:温度梯度对CO<sub>2</sub>咸水溶液传热特性及其运移特性的影响机理,CO<sub>2</sub>溶液浮升力、重力、毛细力共同作用下的运移机理及热力学影响,CO<sub>2</sub>溶液运移通道、渗漏途径的选择特性。

(4) CO<sub>2</sub>封存过程中水-岩相互作用机理:多尺度、多相、多组分热力学平衡特性,CO<sub>2</sub>溶解平衡及溶解机理,化学反应平衡特性及CO<sub>2</sub>-水-岩相互作用机制。

(5) CO<sub>2</sub>长期封存安全性评价:咸水层与巨量

CO<sub>2</sub>长时间相互作用分析,温度变化对CO<sub>2</sub>长期封存稳定性影响机理,盆地尺度下热场对封存场地适应性研究。

针对我国CO<sub>2</sub>地质封存的巨大潜力,掌握CO<sub>2</sub>地质封存的基本规律,解决目前CO<sub>2</sub>地质封存中选址、封存量评价、溶解运移关键机理、安全性评价等存在的科学问题,完善符合我国特点的大规模CO<sub>2</sub>地质封存的基础理论,提出适合我国国情的温室气体长期埋存技术体系,为形成我国温室气体高效减排技术提供坚实的理论基础。

### 2.4 能源动力系统与CO<sub>2</sub>控制集成

能源动力系统与CO<sub>2</sub>控制的有机整合具有降低CO<sub>2</sub>分离能耗和减少分离过程不可逆损失的潜力,是大幅降低传统单纯分离CO<sub>2</sub>时额外能耗代价的主要研究方向之一。重点讨论了CO<sub>2</sub>分离过程与热力循环的可能耦合关系和方法,耦合过程的CO<sub>2</sub>富集性能对CO<sub>2</sub>分离能耗的影响及其机制等。与会者认为需要加强以下几个方面的研究:

(1) 能源动力系统中CO<sub>2</sub>分离过程的热集成机理:CO<sub>2</sub>分离过程能耗机制与节能潜力,低温余热驱动的CO<sub>2</sub>低能耗再生机理,多相体系的CO<sub>2</sub>分离机制与方法,能源动力系统中CO<sub>2</sub>捕集能耗机制与能耗时空分布规律,热力循环热能的梯级利用与CO<sub>2</sub>生成、分离过程不可逆性减少的耦合机制。

(2) 能源动力系统中CO<sub>2</sub>捕集能耗最小化原理:研究燃料化学能释放、CO<sub>2</sub>捕集与热功循环的相互作用机制,探索燃料转化链中伴随化学能转化/释放过程的碳组分生成、转化、迁移规律及其能流、元素流的变化,揭示吉布斯自由能驱动CO<sub>2</sub>分离的相容性机理。

(3) 燃料转化与CO<sub>2</sub>分离一体化控制方法:探索燃料化学能梯级利用过程中的碳组分富集现象、建立化学能梯级利用的同时碳组分定向富集方法,研究高碳与无碳能源之间的能的品位互补与碳组分演化特性及多燃料输入与多产品输出的协调机制,煤气碳氢资源分质集成对能源动力系统的影响规律,高品质冶金煤气碳氢分质利用与碳组份定向富集原理。

(4) 燃料转化与CO<sub>2</sub>分离一体化控制系统集成:CO<sub>2</sub>减排技术与系统整体配置、能量利用集成优化理论,CO<sub>2</sub>分离和CO<sub>2</sub>转化利用两种模式对系统能源利用率的影响机理研究,超低能耗控制CO<sub>2</sub>的化工动力多联产系统集成研究,建立带碳捕捉功能的能源动力系统的单目标向多目标转化的系统性能

优化方法与平台和评价指标。

过以上内容的研究可取得的预期成果包括:创建燃料源头节能与 CO<sub>2</sub> 捕集一体化系统集成原理与方法,形成能源动力系统 CO<sub>2</sub> 低能耗控制相容理论;提出燃料源头、定向富集、高碳无碳等新型 CO<sub>2</sub> 捕集动力系统,以解决大规模、低能耗与低成本的 CO<sub>2</sub> 捕集难题;明确适合我国能源特点的低碳技术路线,发展化石燃料发电与工业的革新性 CCS 低碳技术,提供理论支撑。

### 3 若干建议

本次论坛通过对国内外温室气体控制方面科学技术发展现状和趋势的研讨,凝练出未来 5 年需要迫切研究的关键科学问题,并提出加强能源动力系统中温室气体控制的科学技术研究的建议如下:

(1) 温室气体 CO<sub>2</sub> 的减排已经成为一个能够对未来世界格局变化产生影响的重大国际问题。化石

能源动力系统是最大的 CO<sub>2</sub> 集中排放源,减排潜力巨大。是我国应对国际压力需求,也是我国实施可持续发展战略、建设生态文明建设的重要组成部分。

(2) 我国化石能源动力系统中 CO<sub>2</sub> 减排相关的基础研究薄弱,相关知识储备严重不足。CO<sub>2</sub> 减排相关的基础理论研究涉及能源、化工、材料等多个学术领域的前沿科学问题,不但有领域内的学科交叉,还有领域之间的交叉,需要鼓励学科交叉,长期开展基础研究,对科学问题的认识不断深入,循序渐进。

(3) 建议国家科研领导部门有效组织实施 CO<sub>2</sub> 减排相关的前瞻性科研项目,形成科研导向,为我国捕获、封存和减排 CO<sub>2</sub> 提供理论基础和技术途径。

(4) 建议国家自然科学基金委员会尽快启动重大研究计划,大力支持 CO<sub>2</sub> 减排相关的前瞻性基础研究,尤其是交叉学科的基础研究。

## THE PROGRESS AND REVIEW OF CO<sub>2</sub> MITIGATION TECHNOLOGIES IN ENERGY POWER SYSTEMS BASED ON FOSSIL FUELS FOR THE 56TH SHUANGQING FORUM OF NSFC

Xu Jianzhong<sup>1</sup> Xie Kechang<sup>2</sup> Jin Hongguang<sup>1</sup> Han Wei<sup>1</sup> Liu Tao<sup>3</sup> Ji Jun<sup>3</sup>

(1 Institute of Engineering Thermophysics, CAS, Beijing 100190; 2 Chinese Academy of Engineering, Beijing 100088;

3 Department of Engineering and Materials Sciences, National Natural Science Foundation of China, Beijing 100085)

**Abstract** CO<sub>2</sub> mitigation in energy power systems has become a research hotspot in the world. The 56<sup>th</sup> Shuangqing Forum of National Natural Science Foundation of China (NSFC) was held, which is entitled green house gas control technologies in energy power systems based on fossil fuels. Several key issues of CO<sub>2</sub> mitigation in energy power systems were discussed deeply, such as combustion, CO<sub>2</sub> reforming, carbon transfer, CO<sub>2</sub> capture and storage, and system integration. The scientists proposed some key scientific issues that should be investigated in the next five years, including combustion innovation and CO<sub>2</sub> capture, coupling of energy conversion and carbon transfer, engineering thermophysics problems in CO<sub>2</sub> transportation and storage, and integration of energy power system and CO<sub>2</sub> capture processes. At last some concrete suggestions for a multi-interdisciplinary study and major research plan were proposed.

**Key words** fossil fuels, energy power systems, CO<sub>2</sub> mitigation, Shuangqing Forum