

·学科进展与展望·

# 热力循环及总能系统学科发展战略思考

纪军<sup>1</sup> 刘涛<sup>1</sup> 金红光<sup>2\*</sup>

(1 国家自然科学基金委员会工程与材料科学部,北京 100085;

2 中国科学院工程热物理研究所,北京 100080)

**[摘要]** 热力循环与总能系统是本世纪能源与环境科学的主要议题之一,也是在国家中长期科技规划中位于优先领域的需要关注的重点。本文分析了该学科的地位和作用,指出了学科交叉的发展特点,提出了学科发展方向:能的梯级利用与热力循环创新、能量释放的新机理、中低温能源转换利用与正逆耦合循环、多能源综合互补系统、控制污染排放的新途径。本文提出的热力循环与总能系统发展战略旨在开辟节约能源、能源与环境协调发展的新方向。

**[关键词]** 总能系统,能量释放新机理,系统集成创新,学科发展战略

## 1 热力循环及总能系统的地位和作用

热力循环在热力学和动力机械发展史上占有重要位置,是热机发展的理论基础和能源动力系统的核心,也是热力学学科开拓发展的推动力与理论基础之一。历史证明,每一次新的热力循环及其动力机械的发展应用,都带动了能源利用的飞跃,有力推动了社会进步和生产力发展。11世纪的走马灯为热机最早的雏形;1798年著名的炮膛试验则是一个热功转换定量研究的范例;18世纪蒸汽机的出现,开始了人类现代文明的新纪元,带动了第一次工业革命与资本主义成长,也推动了工程热力学研究的全面展开;利用石油的往复式内燃机(Diesel、Otto循环)、汽轮机(Rankine循环)的发明和推广应用,带领人类进入石油时代,为机械化、电气化创造了条件;20世纪中叶,燃气轮机与喷气发动机(Brayton循环)的出现和发展,则为现代高速航空和宇航动力奠定了基础。

热力循环一直是工程热力学的主要研究内容,特别是新型热力循环与相应新工质的研究,已成为永恒的研究方向。人们孜孜不倦地从不同途径探索新的热力循环,但没有新概念的提出、新技术的运用、新材料或新工质的使用,就没有新热力循环的产生,也就更谈不上动力装置的更新换代和性能的大

幅度提升。一个新概念的提出或新技术的突破,常会萌发出新的热力循环构思,开发出新的动力装置与能源系统。

例如,燃气轮机采用注蒸汽手段形成的STIG循环(程氏循环),采用湿化技术提出的湿空气透平循环(HAT);汽轮机采用新工质(混合工质)得到的Kalina循环;还有一些新的循环则借助化工技术,如燃料重整的化学回热循环和带化学链燃烧反应的新型动力循环等。20世纪70—80年代,总能系统概念的提出<sup>[1]</sup>,促使热力循环研究思路发生质变,人们不再囿于单一循环的优劣,而更着重于把不同循环有机结合起来的各种高性能联合循环,并且把能源利用提高到系统高度来认识热机的发展应用,即在系统的高度上综合考虑能量转换过程中能的梯级利用,不同品位和形式的能的合理安排以及各系统构成的优化匹配,总体合理利用不同品位能,以获得最好的整体效果。如以燃气轮机为核心的总能系统,既能充分发挥燃气轮机的高温加热优势,又能避免简单循环排热温度高、排烟损失大的缺陷,显示出极好的总体性能,因而受到电力、石化、冶金等部门的关注,以联合循环、功热并供、三联供、多联产以及总能工厂等多种形式得到广泛的推广应用。在航空领域,内外函循环的提出,大大降低了航空发动机的油耗率,推动了高速民航的飞速发展;组合的变循环、

\* 1999年度国家杰出青年基金获得者。

本文于2007年8月10日收到。

变几何则使航空发动机能适应更广的应用范围等。

到目前为止,各种热力循环的改进原则上都遵循:一方面不断提高循环的最高温度与最低温度之比,改善部件性能;另一方面使实际循环尽量向理想卡诺循环的方向靠近。前述的联合循环等措施能够大幅度提高效率,如结合 Brayton 循环与 Rankine 循环的联合循环的最高实用效率已接近 60%。但常规联合循环的缺点是在两个循环之间还存在较大的平均传热温差,引起能的品位损失,降低了效率。近年来对此已有一些改进建议,如 Kalina 循环、HAT 循环以及 ABC 空气循环等,还有氢氧联合循环等,但上述循环都还局限于物理能转换利用的研究范畴。

由于化石能源的大量使用对地球环境造成了严重危害,人类的生存空间受到了极大威胁,可持续发展逐渐成为人类的共识。基于可持续发展的绿色能源战略背景,总能系统研究的总目标定位在如何解决能源利用与环境相容协调的难题上,即如何大幅度提高能源利用率的同时减少对环境的污染,相应的主要核心科学问题也不仅仅局限于传统的热力循环范畴,而是能源与环境、化工等领域的交叉,总能

系统的概念得到新的拓展,体现出循环经济的理念。

## 2 国内外的研究趋势与特点

21 世纪,世界能源科学技术研究正逐步取代 20 世纪传统热力循环研究,这将在能源和环境科技方面带来革命性的突破。

美国能源部启动了“21 世纪远景计划”(Vision 21),主要内容包括将煤转化为清洁的合成气后不但可以发电还可以分离产出氢能,并实现  $\text{CO}_2$  的分离回收(图 1);此外,美国能源部还启动了“美国洁净煤技术示范计划”(CCTP)和“先进透平动力系统计划”(ATS)<sup>[2]</sup>。美国洁净煤技术方面资助的重点是先进的发电系统及与发电有关的污染控制技术,前三轮主要针对减缓酸雨的技术,第四与第五轮主要考虑 2000 年以后的能源供应形势与需求,重视控制  $\text{CO}_2$  的排放。由于电力需求不断增加,而  $\text{CO}_2$  排放量又要控制在 1990 年水平,这就要求有更高的煤炭利用效率,更少的  $\text{SO}_x$ 、 $\text{NO}_x$ 、 $\text{CO}_2$  排放。预计到 2050 年,新型系统将有可能实现准零排放,燃煤发电效率将达到 60%,天然气发电效率将达到 75%。

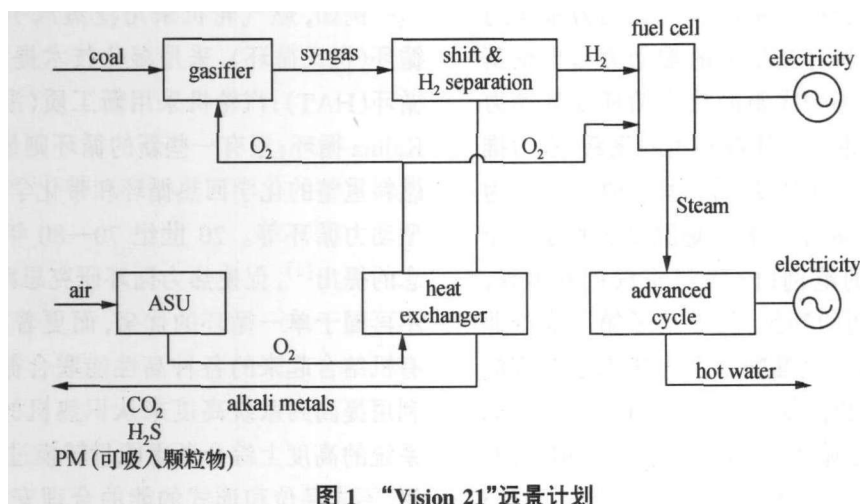


图 1 “Vision 21”远景计划

欧共体推出的“未来能源计划”的重点是促进欧洲能源利用新技术的开发,减少对石油的依赖,减轻煤炭利用造成的环境污染,加大生物质能源和其他可再生能源的利用程度(图 2)。目前在改善能源转换和利用状况的研究开发中,优先考虑如何减少污染排放及提高能源转换利用效率。正在研究开发的相关项目有整体煤气化联合循环发电,煤与生物质及工业、城市或农业废弃物联合气化(或燃烧),固体燃料气化和燃料电池联合循环,循环流化床燃烧技术等。

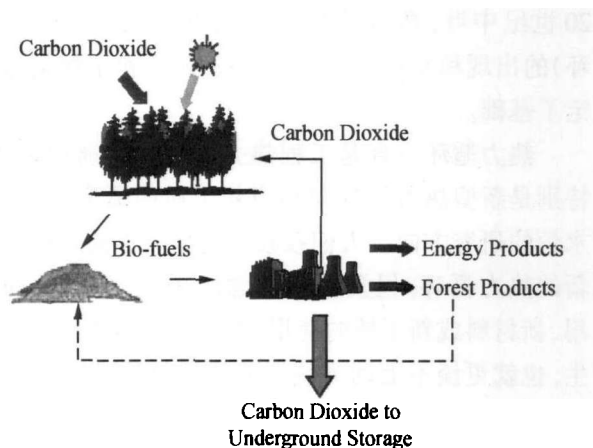


图 2 欧洲“未来能源计划”

日本新能源综合开发机构(NEDO)的“新日光计划”中,开展了新的能源释放方式的研究,为达到同时解决能源和环境问题的目标,不仅有研究新型高温空气燃烧方式(节能30%, $\text{NO}_x$ 降低50%)和具有 $\text{O}_2/\text{CO}_2$ 燃烧的动力循环等项目;还有发展氢能的世界能源网络项目(World Energy-Network),其中包括氢的制造(电解、太阳能热化学制氢)、氢的储运、氢能的转化和利用(燃料电池汽车及发电、氢氧联合循环)三个部分(图3);同时也开展了“煤气化联合循环动力系统”和“煤气化制氢”等项目,目的在于提高效率,降低废气排放,如超临界蒸汽循环、流化床燃烧及煤气化联合循环发电、煤气化燃料电池联合发电技术、烟道气的脱硫脱氮技术等。值得注意的是政府资助的大量研究经费正从煤的研究逐渐向全球温室效应方面的研究转移。

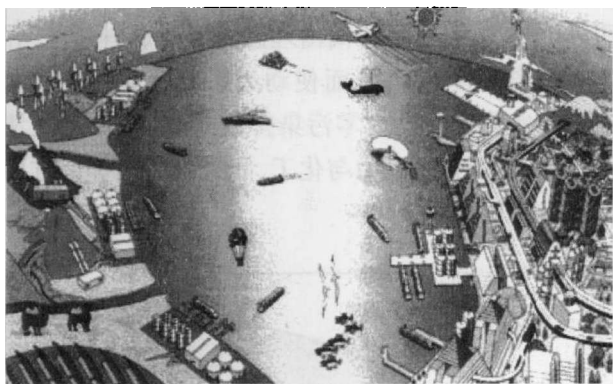


图3 日本“WE-NET”项目

由温室气体引起的全球变暖不仅是当前也是未来的能源和环境问题中最引人关注的热点及难点,而全球气候变暖会给人类生存和社会发展带来不利的、甚至是灾难性的后果,其中含碳化石燃料燃烧排放的 $\text{CO}_2$ 是主要的温室气体源。因此为控制温室气体排放、保护全球气候,于1992年6月在巴西里约热内卢召开了联合国环境与发展大会,会议签署了“气候变化框架公约”。公约的核心是节约能源、提高能源利用效率以达到控制和减少 $\text{CO}_2$ 的排放的目的,这将成为本世纪能源科学的主要议题之一。我国政府也签署了该公约,这对于能源结构以煤炭为主并且在相当长时期内不可能根本改变的中国将是一种严峻的挑战。

大力加强基础科学研究和学科交叉已成为共识。例如,“NBIC会聚技术”将纳米、生物、信息和认知等当前迅猛发展的四大科学技术领域进行有机结合与融合,已被认同为科学界重大交叉与可取得突破性进展的新兴发展领域。那么,与NBIC一样,从

基础科学的概念、方法、机理到能源网络、温室气体控制技术路线的应用,能源、环境、经济(3E)三大领域的相容与协调不仅将成为新兴领域和重大科学方向,同时也将涉及社会经济可持续发展的重大战略问题。而热力循环与总能系统学科的发展又与之密切相关,其特点主要有以下四点:(1)学科的交叉和综合已成为当代热力循环学科发展的一个基本趋势与特征,工程热物理的各分支学科之间,以及热力学与化学、物理学、生物学、数学、材料科学、计算机科学和信息科学等学科之间都在进行不断的交叉与综合;(2)随着经济与社会对能源科技的需求愈来愈迫切,热力循环与总能系统研究的发展被提升到了更高一层的系统层面,能源与社会、经济与环境等领域的渗透与综合成为该学科发展的另一个主要趋势;(3)对能源转化利用规律的探索还在不断深化:一方面不断拓宽或突破原有界限与假定,另一方面采用新理论、新方法和新手段;(4)当代能源技术发展在很大程度上引导着能源科学发展的趋势,而热力循环与总能系统是能源高新技术创新的源泉和先导,同时两者之间又紧密相联、相互促进。

能的梯级利用是能源高效利用的基本原理,也是相关系统集成创新的核心。上世纪80年代吴仲华先生首次将热力系统集成原则概括为“温度对口、梯级利用”原理;2006年国务院发布了关于加快发展循环经济的若干意见,其中技术开发部分重点强调了能的梯级利用技术、废物综合利用技术、新能源和可再生能源开发利用技术;2007年国家中长期科技发展规划中有11个重点领域,能源列为第1领域,设有68个优先主题,节能位于第1主题,能源环境首次位于优先位置,并且明确指出了“能的综合梯级利用技术”。可见,科学用能与高效能源动力系统从能的梯级利用发展到了能的综合梯级利用。

国内从事热力循环研究的单位较多,包括能源动力、航空航天以及舰船等领域的研究热力循环的科研队伍,他们在国内外的学术界都很活跃,具备一定的科研实力,并有相应的成果产出:结合国情对各种燃煤联合循环做了全面分析研究,为相关的国家高技术发展项目的立项和设计提供有效的技术手段与理论支持;开拓了各种新型热力循环,如率先提出氢氧联合循环、核能联合循环以及带化学链燃烧反应的IGCLSA循环等;跟踪世界高科技发展,开展许多先进循环研究,并获得重大进展,如对STIG循环进行严格数学推导给出关键“尖端现象”的理论解释,得出可在低压比下获得最高效率的结论等。另

外,在国际上首先得到各种联合循环效率的最佳压比值以及其他简明性能指标;在国际上首先给出燃气轮机及其功热并供装置变工况的典型显式解析解,理论上总结其变工况特性等。

但总体而言,在热力循环研究方面国内外还存在比较大的差距。在与能源、环境密切相关的热力学、总能系统的基础研究方面,一些先进国家已经从过去的单元、设备、技术的研究走向循环、系统、技术路线的研究。为了明确国内外的差距与解决存在的问题,有必要分析基础科学研究资助课题的重点领域的相关情况,如是否符合国际发展动态、是否达到国际先进领域的要求等。

### 3 热力循环及总能系统学科发展建议

我国“十一五”期间热力循环与总能系统学科发展的战略目标的重点是<sup>[3,4]</sup>:(1) 继续加强基础学科的研究,注重学科交叉和领域渗透,争取在若干有相对优势的方向跻身于世界先进行列;(2) 基于节能优先的国策,注重能源发展和应用中的关键问题,以解决阻碍社会、经济发展的长期瓶颈问题,发展与开拓科学用能的途径与方法,使常规化石能源、特别是煤炭成为高效、洁净、稳定、廉价的能源;(3) 推动可再生能源发展及其关键过程的研究,以不断改善我国能源消费结构和加快能源结构多元化形成,建立可持续发展能源系统;(4) 加强能源转换的物理化学生物学基础研究,为煤炭洁净利用、石油战略储备、电能蓄存、生物质能开拓、温室气体控制等奠定科学基础。

主要的核心科学问题可归纳为三个:一是将能的梯级利用概念引入化学能及化学能向物理能转化的阶段,以实现化学能与物理能的综合梯级利用<sup>[5]</sup>;二是提出多功能综合新思路,试图解决独立系统无法解决的矛盾(提高热力性能与实现环保之间的矛盾),以实现不同用能系统的有机联合;三是寻求能源动力系统与环境相容协调,以实现更高层次的循环系统集成。

#### 3.1 能的综合梯级利用与热力循环创新

新一代系统研究的重点科学问题是将能的梯级利用概念引入化学能及化学能向物理能转化的阶段,实现化学能与物理能的综合梯级利用。为此,尝试热力循环创新,通过多层次不同品位能的梯级利用,达到提高效率的目的,首先把化工产品的生产过程与直接发电的非热力学循环结合起来,实现燃料化学能梯级利用;然后把高温加热的 Brayton 循环

与 Rankine 循环联合起来,并寻求有效的中低温热能利用途径,以实现物理能高效率的转换利用。其重点与难点在于如何有效地减少化学能的损失,单纯的热转功的热力学循环动力系统对此是无能为力的,而比较有可能获得突破的解决途径有:(1) 热转功的热力循环与化工等其他生产过程有机结合。探讨化学能与热能的有机耦合和高效综合利用,即不仅注重温度对口的梯级利用,且有机结合化学能的梯级利用,实现化学能与物理能综合梯级利用,以及领域渗透的系统创新(图4);(2) 热力学循环与非热力学动力系统的有机结合。例如通过电化学反应把燃料化学能直接转化为电能的过程(燃料电池)和热转功热力学循环的有机结合,可以实现化学能与热能综合梯级利用等;(3) 多功能的能源转换利用系统。多功能的能源动力系统是指在完成发电供热等动力功能的同时,利用化石燃料生产甲醇、二甲醚等重要清洁燃料,还可分离出理想的清洁燃料氢气,并同时分离回收 CO<sub>2</sub>,从而使动力系统既能合理利用能源和实现低污染或零污染排放,又能提供高效清洁能源,协调兼顾动力与化工、能源与环境等诸方面问题的解决<sup>[6]</sup>。

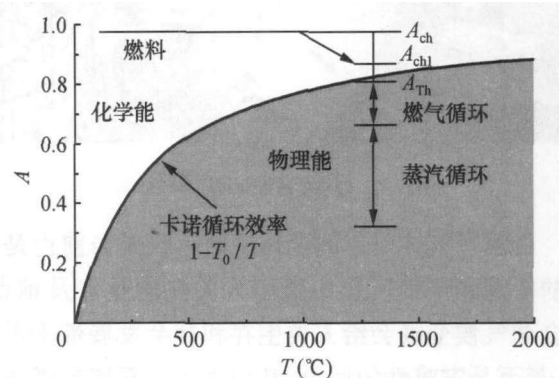


图4 化学能与物理能综合梯级利用概念图

#### 3.2 能量释放的新机理

传统的化石能源动力系统中,燃料化学能是借助燃烧技术以热的形式释放出来,再通过热力学循环实现热转功,输出有效功。对化石燃料燃烧的能量释放方式的研究,相应地可分为三个阶段,最初是只管燃烧,不管污染;第二个阶段主要是解决了燃料化学能高强度同时高效率释放的问题;近年来开始重视环保问题,对清洁燃烧及其他能源洁净利用措施的研究起到了巨大的推动作用。但传统的火焰燃烧方式不仅造成巨大的可用能品位损失,而且还是系统有害排放物的主要产生源。至今,减少燃烧过程品位损失的方法仅限于提高循环初温。而摒弃传统火焰燃烧方式,寻求新的燃料能量释放机理则是

更富创新意义的途径,它将成为同时解决能源效率低和环境污染严重两大问题的一个科技关键。目前,正在积极探索研究的新型能量释放机理主要包括无火焰燃烧、部分氧化、高温空气燃烧、新型化学链反应燃烧等。这些能量释放方法,都有可能通过降低化学能释放侧的品位来减少燃烧过程能的品位损失,同时有效控制有害物质的产生与排放。

### 3.3 中低温能源转换利用与正逆耦合循环

中低温工业余热和可再生能源(太阳能、地热能等)的转换利用过程中,热源的温度都比较低(100—400℃),因此中低温能源高效利用、低污染排放的热力循环受到特别重视。鉴于热力循环的固有特性,中低温热源热功转换效率很难提高,为克服这一缺陷需要解决的关键科学问题有:(1)中低温热源热能品位的提升(将较低温度的热能转变成较高温度的热能,从而提高了利用价值);(2)特殊工质(混合工质对,共沸工质对,非共沸工质对)的循环匹配特性;(3)循环系统的集成原理,提出新颖的正逆耦合循环系统等。

正逆耦合循环的应用表现在三个方面。首先,利用正循环中的中低温余热驱动吸收式逆循环制冷,组成冷热电联供分布式能源系统。其次,将余热产生的冷用于混合工质动力系统的冷凝过程,提高系统的热效率。再者,正循环中的中低温余热驱动吸收式逆循环制冷,用来冷凝部分 CO<sub>2</sub> 工质。这种正逆耦合循环与液化 CO<sub>2</sub> 过程结合,可以减少压缩耗功,实现冷能利用与 CO<sub>2</sub> 分离一体化。

### 3.4 多能源综合互补系统

鉴于化石能源资源的有限性及其利用过程产生污染的严重性,开拓新的洁净能源资源,特别是非碳能源转换利用的总能系统,如氢能利用系统、可再生能源(太阳能、风能、海洋能等)转换利用系统,是实现可持续发展的重要途径之一。太阳能几乎是用之不竭的清洁能源,利用太阳能发电或制氢是开拓新能源资源和保护地球环境的一个重要研究方向。生物质能资源也极为丰富,总体上大部分可实现 CO<sub>2</sub> 零排放。因此,与环境相协调的可再生能源总能系统也是可持续发展的一个重要研究方向。但多数可再生能源动力系统是不稳定、不连续的,随时间、地域以及气候等影响因素的变化而变化,需开拓可再生能源与化石能源或水能相结合的多能源综合利用系统。例如,燃料电池与太阳能联合发电系统,微型燃气轮机与风力发电联合系统等。但多功能综合系统有着更为典型的复杂的系统特征,其复杂性与非

线性更为突出,其全工况动态特性更为重要。

### 3.5 热力循环与温室气体控制

迄今为止,人类文明发展主要依赖于煤、石油、天然气等化石燃料资源以及水、土地、生物质等自然资源的开发和利用。很长一段时期内,发达国家都是采用简单的手段,如图5资源、能源、环境一体化新模式(如燃烧),将这些资源转换成能源,然后再将能源以热和功的形式加以利用;对能源利用过程排放的污染物,先是放任自流,后是在流程尾部处理,总体上都是“先污染后治理”的做法。这种模式给人类带来了沉痛教训,奢侈的资源浪费、过低的能源利用率和不可容忍的环境污染。显然,应该创新性地开拓既能够提高能源利用效率,同时又能够解决环境生态问题的新型能源与环境系统,摒弃传统的“链式串联”模式,创造一个资源、能源与环境有机结合的一体化新模式(图5),同时可以解决控制温室气体排放的关键科技难题<sup>[7]</sup>。

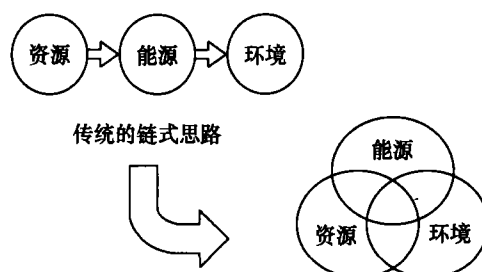


图5 资源、能源、环境一体化新模式

当前,控制温室气体排放的主要对策之一为调整能源结构,尽量采用低碳和无碳燃料(天然气、可再生能源、核能等);另一对策是依靠能源科学技术的发展,在提高能源转换效率的同时开拓 CO<sub>2</sub> 的分离、储存和利用技术。不同于控制其他环境污染物的排放技术(如脱硫、脱硝),分离 CO<sub>2</sub> 的技术难点在于 CO<sub>2</sub> 的化学性质稳定,系统排气中的 CO<sub>2</sub> 常常被空气中的氮气稀释,浓度变得很低,故需要处理的量很大(是其他污染物的几百倍),何况排气中还存在着一些影响分离效果的复杂成分,更增加了 CO<sub>2</sub> 分离的难度。关键问题在于分离过程将伴随着大量、甚至无法承受的能耗,这不仅意味着额外增加了单位发电量的 CO<sub>2</sub> 排放量,而且大幅度地降低了能源系统的效率。换言之,目前的技术虽然能够分离 CO<sub>2</sub>,但从能源效率与经济性来看,几乎是不可持续的。

热力学与化学环境学的交叉领域强调同时关注燃料化学能的释放与污染物的控制,所产生的新的关键科学问题将揭示能源转换系统中 CO<sub>2</sub> 的形成、反应、迁移、转化机理,并发现能源转化与温室气体

控制的协调机制。从长远考虑,生产过程中系统控制 CO<sub>2</sub> 排放应朝着 CO<sub>2</sub> 分离过程和热功转换与生产过程等有机整合的方向发展,提出全新的分离技术与理念,如清洁能源生产和 CO<sub>2</sub> 分离一体化、燃烧和分离一体化、深冷过程与分离一体化以及燃烧过程革新等,寻求从根本上改变传统的分离理念。

总之,热力循环及总能系统的发展需要以能的综合梯级利用为核心,以关键过程(技术)的突破与系统集成创新为重点,以梯级利用、清洁生产、资源再循环结合为主线,关注能源、化工、环境(CO<sub>2</sub>)等领域渗透,开拓 CCHP(冷热联合动力)、能量释放新方法、多联产、多功能等重要方向,寻求理论与原理的突破、关键过程的实验验证、系统集成创新,为实现节能减排的国家中长期目标提供科学依据。

## CONSIDERATION OF STRATEGIC DEVELOPMENT OF THERMAL CYCLES AND INTEGRATED ENERGY SYSTEMS

Ji Jun<sup>1</sup> Liu Tao<sup>1</sup> Jin Hongguang<sup>2</sup>

(1 Department of Engineering and Materials, National Natural Science Foundation of China, Beijing 100085;

2 Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

**Abstract** Research on thermal cycles and integrated energy systems is one of the important subjects for energy and environmental science, which is also emphasized in the National Mid-to-Long Term Plan for S&T. Based on the identification of the role of thermal cycles and integrated energy systems, this report points out new tendency for sustainable development, including cascade utilization of energy, new approaches of energy release, mid-and low-temperature energy utilization, multi-energy integration system, principles of greenhouse gas control technologies. The key pointed out here aims to opening up the promising prospects for thermal cycles and integrated energy systems to utilize energy effectively and resolve energy and environmental problems simultaneously.

**Key words** Integrated energy system, New mechanism of energy release, Principle of system synthesis, Scientific strategy

·资料·信息·

## 奥运科技环境保护和食品安全领域的项目成果交流研讨会召开

为使国家自然科学基金所资助的科技奥运项目能更好地服务于奥运会,国家自然科学基金委员会与第二十九届奥林匹克运动会科学技术委员会于近期联合召开了“奥运科技环境保护和食品安全等领域的项目成果交流研讨会”。

本次会议以与科技奥运紧密相关的环境保护和食品安全为主题,侧重于大气与室内空气污染治理、节能、污水处理及饮水安全、食品安全、噪声、环保材料等研究领域,国家自然科学基金委员会7个科学部均有与之相关的研究项目,大会共收到研究报告42篇。

## 参考文献

- [1] 吴仲华. 能的梯级利用与燃气轮机总能系统. 北京: 机械工业出版社, 1988.
- [2] Panel on Energy Research and Development. Report to the President on Federal Energy Research and Development for the Challenges of the Twenty-first Century. President's Committee of Advisors on Science and Technology. 1997.
- [3] 国家基础研究“十五”计划和2015年远景规划: 能源科学(科学发展与优先领域)调研报告. 2001年.
- [4] 国家自然科学基金委员会工程与材料科学部. 工程热物理与能源利用. 北京: 科学出版社, 2006.
- [5] 金红光, 洪慧, 王宝群等. 化学能与物理能综合梯级利用原理. 中国科学 E 辑, 2005, 35(3): 299—313.
- [6] 蔡睿贤, 金红光, 林汝谋. 能源动力系统与环境协调的探索. 21世纪100个交叉科学难题. 北京: 科学出版社, 2005, 366—371.
- [7] 金红光. 温室气体控制一体化原理. 21世纪100个交叉科学难题. 北京: 科学出版社, 2005, 173—179.

会议采取大会报告和交流研讨的方式,组织了15个大会报告,编辑了会议论文集的交流材料;这些项目均是长期以来尤其是2001年以来国家自然科学基金资助的、与科技奥运相关的研究项目,承担项目遍及全国,其负责人有国内著名大学、科研机构的科学家,经过几年的努力,研究项目已取得阶段性科研成果和初现实效,有的已在直接为科技奥运服务。

(计划局刘卫 供稿)