

# 化学链燃烧技术的研究现状及进展

卢玲玲,王树众,姜峰,胡昕

(西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室,陕西 西安 710049)

**摘要:**介绍了化学链燃烧技术的基本概念,总结了现存的载氧剂及其制备方法,指出 NiO/NiAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 CoO-NiO/YSZ 是较为理想的金属载氧剂;介绍了 4 种化学链燃烧反应器模型,指出对能够长期稳定运行的反应器有待进一步研究;概括了化学链燃烧的耦合系统,通过模拟仿真得出其最高系统效率有望达到 55.9%;最后,指出化学链燃烧技术可以向固体燃料燃烧、制氢方向发展。

**关键词:**化学链燃烧;二氧化碳回收;载氧剂;现状

中图分类号:TQ038

文献标识码:A

文章编号:0253-4320(2007)08-0017-06

## Research status and advances in chemical-looping combustion

LU Ling-ling, WANG Shu-zhong, JIANG Feng, HU Xin

(State Key Laboratory of Multiphase Flow for Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** In this paper, the basic concept of chemical-looping combustion (CLC) is introduced, the existing oxygen carriers (OC) and its preparation methods are summarized with NiO/NiAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and CoO-NiO/YSZ, the most ideal metal oxygen carriers pointed out. In addition, four chemical-looping combustion reactors are presented and further studies on the reactors for the long time-operation should be carried out. Progress in other relevant systems is also mentioned, and the highest efficiency can reach 55.9% through simulation. CLC is also applied in the combustion of solid fuels and hydrogen production. Finally, some aspects of future research about CLC are put forward.

**Key words:** chemical-looping combustion; CO<sub>2</sub> capture; oxygen carriers; status

随着工业生产的发展和人们生活水平的提高,煤、石油、天然气等物质燃烧释放的二氧化碳越来越多,成为越来越严重的温室效应的主要原因之一。因此,减排 CO<sub>2</sub> 已成为当今世界研究的热点。从环境学的角度看,燃烧过程是环境污染物的生成源;从热力学能的品味观点来看,燃烧过程是热力系统中工质(载能体)做功能量损失最大的过程,因此,解决能源利用与环境污染问题的最大潜力在燃烧过程。在燃烧过程中生成高质量浓度的 CO<sub>2</sub> 或便于 CO<sub>2</sub> 分离的气相混合物(如 H<sub>2</sub>O + CO<sub>2</sub>),同时消除其他污染物的生成排放(如 NO<sub>x</sub>、SO<sub>x</sub> 等),是一条有效的途径,也得到了普遍认可。而化学链燃烧(Chemical-Looping Combustion, CLC)技术就是洁净、高效的新一代燃烧技术,它打破了传统的燃烧方式,是解决能源与环境问题的创新性突破口。

## 1 概念

化学链燃烧是通过燃料与空气不直接接触的无火焰化学反应来释放能量,打破了传统的火焰燃烧

概念,开拓了回收 CO<sub>2</sub> 的新途径,并且根除了燃料型、热力型 NO<sub>x</sub> 的产生。它的基本原理是将传统的燃料与空气直接接触反应的燃烧借助于载氧剂(Oxygen Carrier, OC)的作用分解为 2 个气-固反应:一方面利用载氧剂分离空气中的氧,另一方面载氧剂将分离的空气中的氧传递给燃料,进行燃料的无火焰燃烧。这样,燃料侧反应产物只有 CO<sub>2</sub> 和水蒸气,CO<sub>2</sub> 没有被 N<sub>2</sub> 稀释,可以通过冷凝水蒸气的方法直接对 CO<sub>2</sub> 进行回收利用,不需要额外的能量和常规的分装置,从而提高了系统效率。图 1 为化学链燃烧原理示意图。

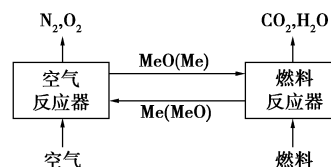


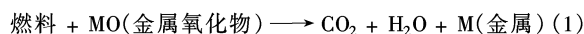
图 1 化学链燃烧原理示意图

化学链燃烧将传统燃烧反应分解为 2 个气-固化学反应:

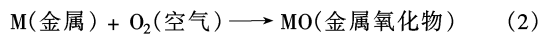
收稿日期:2007-04-05

作者简介:卢玲玲(1982-),女,硕士生,lulingling@stu.xjtu.edu.cn;王树众(1968-),男,博士后,教授,博士生导师,长期从事热能工程、环境工程、多相流动和传热领域的教学和科研工作,swang@mail.xjtu.edu.cn,029-82665157。

## 燃料侧反应



## 空气侧反应



由于化学链燃烧中燃料与空气不直接接触,空气侧反应不产生燃料型  $\text{NO}_x$ 。另外,由于无火焰的气-固反应温度远远低于常规的燃烧温度,因而可控制热力型  $\text{NO}_x$  的生成。因此,这种新颖的燃烧方式可以根除(而不是某种程度的减少)  $\text{NO}_x$  的生成。而且,不需要额外的能量和常规的分选装置来分离燃烧产物中的  $\text{CO}_2$ ,比采用尾气分离  $\text{CO}_2$  的燃气-蒸汽联合循环电站效率高,并且也解决了环境污染问题。化学链燃烧动力系统的概念性示意图见图 2<sup>[1]</sup>。该动力系统与分离  $\text{CO}_2$  的 1 200℃ 级的燃气-蒸汽联合循环系统相比,效率可高出 17 百分点,可称为新一代燃气轮机联合循环<sup>[1]</sup>。

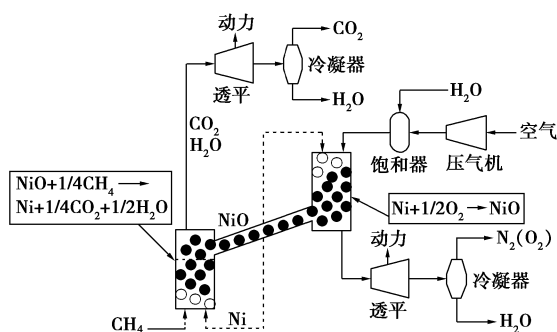


图 2 化学链燃烧动力系统的概念性示意图

## 2 研究现状与进展

1983 年,德国科学家 Richter 和 Knoche 等<sup>[2]</sup>首次在美国化学学会(ACS)年会上提出化学链燃烧这个概念,认为其具有比传统燃烧方式更高的能量利用效率,之后人们发现该燃烧方式具有  $\text{CO}_2$  的内分离性质,因此随着全球对  $\text{CO}_2$  的广泛关注,化学链燃烧技术在 20 世纪 90 年代开始迅速发展起来。对化学链燃烧技术的研究主要分为 3 个方面:载氧剂、反应器和化学链燃烧系统。

### 2.1 载氧剂

载氧剂在 2 个反应器之间循环使用,既要传递氧,又要传递热量,因此,研究适合于不同燃料的高性能载氧剂是化学链燃烧技术能够实施的先决条件,也是化学链燃烧技术的研究重点与热点。评价载氧剂性能的指标一般包括反应性、载氧能力、持续循环能力(寿命)、能承受的最高反应温度、机械强度(抗破碎、抗磨损能力等)、抗烧结和抗团聚能力、载

氧剂的颗粒尺度分布、内部孔隙结构、价格和环保性能等<sup>[3]</sup>。

国内外对于载氧剂的研究较多,研究载氧剂时使用了热重反应仪(TGA),固定床、双流化床反应器。在化学链燃烧技术提出前期,主要通过热重反应仪和固定床反应器研究各种载氧剂的反应性能,确定其作为载氧剂的可行性,找出最优的载氧剂;而目前对载氧剂的研究主要是在双流化床反应器中对载氧剂在实际运行情况下的状态进行研究,最终得到各方面性能都优良并且适合于工业应用的载氧剂。

对于载氧剂的类型,研究较多的是金属氧化物载氧剂,目前已被证实了的可用作载氧剂的活性金属氧化物主要包括 Ni、Fe、Co、Mn、Cu 和 Cd 的氧化物<sup>[4]</sup>。除了金属氧化物活性组分外,载氧剂中还要添加一些惰性载体,为载氧剂提供较高的比表面积和适合的孔结构,改进载氧剂的强度,提高载氧剂的热稳定性,并且还可以减少活性组分的用量。目前文献中报道较多的惰性载体主要有  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{TiO}_2$ 、 $\text{ZrO}_2$ 、 $\text{MgO}$ 、钇稳定氧化锆(YSZ)、海泡石、高岭土、膨润土和六价铝酸盐<sup>[3]</sup>,由不同比例的活性组分和惰性载体构成了各种不同的载氧剂。另外,考虑到各种金属的优缺点,一些研究人员将几种金属氧化物以一定的比例混合作为载氧剂的活性组分,以期得到综合性能更好的载氧剂。

另外,载氧剂的制备方法也是重要的研究内容。研究<sup>[5-6]</sup>表明,不同的惰性载体、金属氧化物、混合比例、制备工艺、烧结温度等均对载氧剂的性能有明显的影响。目前存在的载氧剂制备方法有机械混合法、冷冻成粒法、浸渍法、分散法、溶胶-凝胶法等。但总体而言,冷冻成粒法和浸渍法是制备载氧剂最常用的 2 种方法,一般来说,基于镍和铁的载氧剂通常使用冷冻成粒法,而基于铜的载氧剂则使用浸渍法<sup>[7]</sup>。

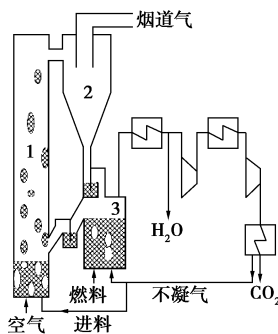
目前,国内外学者已经研究了上百种金属载氧剂,通过大量的研究<sup>[7-12]</sup>发现,  $\text{NiO}/\text{NiAl}_2\text{O}_4$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$  和  $\text{CoO}-\text{NiO}/\text{YSZ}$  等的反应活性较高,磨损率较低,综合性能优良,是较为理想的金属载氧剂。但是,即使对于成分相同的载氧剂,由于制备方法、烧结温度、颗粒尺寸、使用燃料和反应器不同,得出的结果也会有一定的差别。因此,找出性能最优的载氧剂仍是需要解决的问题。

使用金属载氧剂虽然可以实现化学链燃烧技术的工业应用,但在实际工业应用中,金属载氧剂在循环使用过程中必然会有少量的金属氧化物进入大气

环境,造成新的污染,危害自然环境和人类健康;而且使用金属载氧剂的成本也相对较高。因此,一些国内外学者正在积极寻求反应性能优良、价格低廉并且无二次污染的非金属载氧剂,目前提到的非金属载氧剂有  $\text{CaSO}_4$ 、 $\text{SrSO}_4$  和  $\text{BaSO}_4$ 。郑瑛等<sup>[13]</sup>对非金属氧化物  $\text{CaSO}_4$  作为载氧剂进行了可行性研究,证明了其在一定条件下与燃料气进行氧化-还原两步反应的可行性,这种非金属载氧剂由于其特有的优点而值得进一步研究。

## 2.2 反应器

2001年前,研究化学链燃烧技术的工作主要集中在系统分析和载氧剂的选取上,而对载氧剂的选取主要使用的是 TGA,所以仅有有限的资料提到了化学链燃烧反应器的设计。直到2001年, Lyngfelt 等<sup>[14-16]</sup>设计了一个用于化学链燃烧的反应器,此后,化学链燃烧反应器的设计才有了显著发展。2001年, Lyngfelt 等设计的用于化学链燃烧的反应器如图3所示。该反应器由2个相互联通的流化床组成:一个是高速提升管,一个是低速鼓泡流化床,故又称为双循环流化床。在该循环流化床反应器中,载氧剂在2个流化床之间循环,在空气反应器中载氧剂被空气氧化,然后经过旋风分离器被传递到燃料反应器,载氧剂在其中被还原,燃料则被氧化;被还原后的载氧剂通过回料阀重新被传送到空气反应器,而氧化后的气体(主要是  $\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$ )从燃料反应器排出,冷却分离后进行  $\text{CO}_2$  的压缩,使其压缩为液体后回收,而没有被压缩的气体(主要是未反应的燃气和燃气氧化过程中可能出现的副产品)重新循环通入燃料反应器中进行氧化。2个流化床之间的气体泄漏问题通过2个固体颗粒回料阀来解决,这样就实现了载氧剂的不断氧化还原和循环,也实现了化学链燃烧技术。



1—空气反应器(提升管);2—旋风分离器;3—燃料反应器

图3 双循环流化床反应器示意图

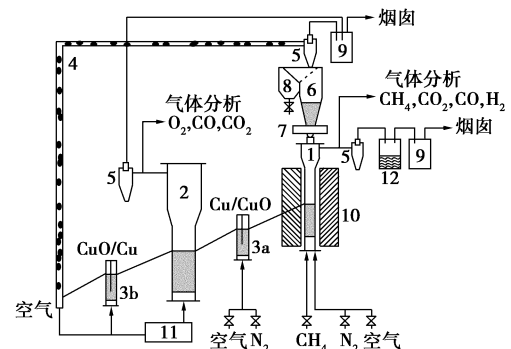
2004年, Lyngfelt 等<sup>[15]</sup>发表了在 10 kW 化学链

燃烧反应器原型中的试验结果,在该研究中使用基于  $\text{NiO}$  的载氧剂,并以天然气作为燃料,反应系统连续运行了 100 h,燃料的转化效率达 99.5%,并且试验过程中没有发现  $\text{CO}_2$  泄漏进入空气反应器,也就是说,在应用过程中  $\text{CO}_2$  可以完全被回收,另外在试验过程中,载氧剂的磨损率也很低,这表明了化学链燃烧技术用于工业应用的可行性。

该反应器的优点主要是能够使得气体和固体在提升管中有强烈的混合接触,并且提升管中的气流能够为载氧剂在2个流化床中的循环提供足够的推动力,保证2个流化床之间循环的载氧剂能够满足过程的需要。因而,该反应器模型得到了广泛的认可,不少学者也以此为基础对反应器进行了研究和改造,并且设计了几种不同形式的反应器。

目前,文献中提到的不同形式的反应器主要有以下几种:

(1)热功率为 10 kW 的化学链燃烧装置<sup>[17]</sup>(见图4)。此装置的优点主要是可以精确改变固体颗粒的循环流率,通过颗粒储存器和阀门实现了对流入燃料反应器中的颗粒流率的控制。



1—燃料反应器;2—空气反应器;3—密封回路;4—提升管;  
5—旋风分离器;6—颗粒储存器;7—颗粒阀门;8—转向颗粒阀门;  
9—过滤器;10—加热炉;11—空气预热器;12—冷凝器

图4 热功率为 10 kW 的化学链燃烧装置

(2)热功率 5 ~ 10 kW 的化学链燃烧系统<sup>[18]</sup>(设计方案见图5)。在此系统中采用了一个帽子形颗粒分离装置来分离从空气反应器出来的气流,该分离装置是基于沉降室原理设计的,目的是为了降低固体流的出口效应,从而可使回落到提升管的颗粒减少,固体流量增加,并且对于给定的固体流量可以减少压降损失。由于速度的降低,颗粒与壁面间的摩擦也会减小,这对于旋风分离器来说是一大优点。另外,由于分离器的压降损失减小,鼓风机的功率也相应减小。但是,这种设计的缺点就是颗粒的分离效果相对较差。对于这个缺点,可以设计较窄的载

氧剂颗粒的尺寸范围,减小载氧剂碎屑的含量。

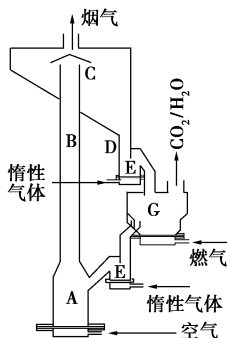
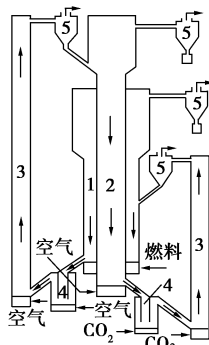


图 5 热功率为 5~10 kW 的化学链燃烧系统

(3) 化学链燃烧的循环流化床反应器<sup>[19]</sup> (见图 6)。在此反应器中,对载氧剂 NiO 和 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 进行了测试,其中还原区域和氧化区域都是鼓泡流化床区域,可以为载氧剂提供充足的氧化和还原时间。



1—还原区域;2—氧化区域;3—提升管;4—密封装置;

5—旋风分离器

图 6 用于化学链燃烧的循环流化床反应器

此外,Abad 及 Johansson 等<sup>[4,20]</sup>在一个 300 W 的反应器中以合成气和天然气为燃料,对基于 Ni、Mn 和 Fe 的载氧剂进行了研究。Ryu 等<sup>[21]</sup>设计并建造了一个 50 kW 的化学链燃烧反应器,此反应器与 Lyngfelt 等人设计的 10 kW 的反应器相似,只是在前一装置中,固体颗粒是通过一个溢流槽从燃料反应器返回到空气反应器的,即燃料反应器中的床层高度是固定不变的;而后一装置中,固体颗粒是从燃料反应器的底部返回到空气反应器的,即燃料反应器中的床层高度是通过一个阀门控制的。Adánez 等<sup>[22]</sup>发表了关于燃料反应器运行的最优模型。Johansson 等<sup>[23]</sup>分析了 2 个反应器之间的漏气现象。Kronberger 等利用冷模型确定了化学链燃烧系统的临界设计参数。Wolf<sup>[24]</sup>分析了热功率为 800 MW 的增压的化学链燃烧反应器的可行性。

总之,目前已经有 2 组 10 kW 的化学链燃烧装

置能够成功满足该技术的连续运行,这说明化学链燃烧技术实现工业化应用的可行性,而接下来过程发展中要解决的问题就是反应装置的最优化设计、系统的长时间连续运行以及具体的工程设计和成本问题。对于载氧剂在连续运行反应器中的长时间运行的化学性能和机械稳定性也要进一步确定。

### 2.3 化学链燃烧系统

目前,国内外已经有许多学者开展了化学链燃烧系统设计与分析方面的研究,其中关于系统分析方面的研究主要有 3 个方向。第一,研究与不同的能源系统耦合的可行性,拓展化学链燃烧的应用范围。例如,中国科学院金红光等<sup>[1]</sup>利用化学链燃烧技术开拓出了第三代能源环境动力系统,该系统在高温段应用化学链燃烧技术,在中、低温段采用高效的空气湿化方法,从而把工程热力学和环境学 2 个学科有机地结合起来,提出高效、低污染、新颖的化学链燃烧与空气湿化燃气轮机联合循环(CLSA),使热力系统的研究从热力循环的复合化走向学科领域的复合化。另外,他还提出并探索了低温太阳热能与清洁合成燃料甲醇-三氧化二铁化学链燃烧相结合的控制 CO<sub>2</sub> 分离的新能源动力系统,利用图像 ■ 的分析方法,指出了甲醇化学链燃烧能量释放过程燃烧 ■ 损失减小和低温太阳热能品味提升的机理<sup>[25]</sup>。国外的 GE-EER 公司将化学链燃烧与传统的天然气、柴油、煤或生物质水蒸气重整制氢结合起来,从而有效地解决重整过程热量来源问题<sup>[26]</sup>。第二,研究化学链燃烧本身的能量转换效率以及提高整体系统效率的途径。第三,对化学链燃烧系统进行能量分析。如 Anheden 等采用 Grassmann 图(格拉斯曼图)对化学链燃烧系统进行分析,并采用 Aspen Plus 对其进行仿真。O. Bolland 等对 GT-CLC 系统的分析表明,不可逆损失的减少将使化学链燃烧系统的最优效率达到 55.9%。Wolf 等则利用 Aspen Plus 软件进行了化学链燃烧系统的过程模拟和化学平衡计算,认为 NGCC-CLC 系统有望达到 52%~53% 的热效率,氢/电/热三联产的扩展使化学链燃烧系统有望达到 50% 的热效率。

值得提出的是,在上面提到的系统分析中,由于缺少化学链燃烧系统长期连续运行数据,所以在系统建模中引入了适当的假设,这样对计算结果就会造成一定程度的误差。但是,通过对系统的热力学特性进行分析,可以了解系统整体效率的提高及一些参数对系统效率的影响,为以后化学链燃烧系统的应用奠定基础。

### 3 化学链燃烧技术的进一步应用

化学链燃烧技术具有  $\text{CO}_2$  的内分离性质,能够提高气体燃料的燃烧效率,减少环境污染,并且可与其他系统进行联合而形成新的能源环境动力系统,从而提高系统效率。它还可以应用于其他方面,如固体、液体燃料的化学链燃烧和利用化学链燃烧技术制氢。

#### 3.1 化学链燃烧技术制氢

化学链燃烧技术可以用来制氢<sup>[27]</sup>,该技术可分为2步:①化学链重整(CLR);②利用化学链燃烧技术进行水汽重整。化学链重整技术与化学链燃烧技术相似,不同的是化学链重整技术是利用固体载氧剂和水蒸气进行部分氧化从而产生  $\text{H}_2$ 、 $\text{CO}$ 、 $\text{H}_2\text{O}$  和  $\text{CO}_2$ ,而不是进行燃料的燃烧,其产物的实际组成由空气比率,也就是由载氧剂传递到燃料反应器的氧与完全氧化所需要的氧的量的比值决定,它们可以作为化学工业的原料,还可以在一个低温转换器中完全转化为  $\text{CO}_2$  和  $\text{H}_2$ 。而具有  $\text{CO}_2$  回收功能的化学链燃烧水汽重整技术则与传统的水汽重整相似,只是由化学链燃烧反应器代替了重整炉并且燃料变成了分离  $\text{H}_2$  后的乏气。上述2种概念的共同之处就是都考虑了  $\text{CO}_2$  的分离回收。研究发现,考虑  $\text{CO}_2$  的回收和压缩,这2种技术都可以达到80%的效率,但是要使得化学链重整技术达到80%的效率,必须在增压系统下进行,而增压的流化床燃烧技术还有待科学家的进一步研究。

#### 3.2 固体燃料的化学链燃烧

目前对化学链燃烧技术的研究多采用的是气体燃料,包括甲烷、一氧化碳和氢气、合成气、煤气化产物等。显然,气体燃料与固体载氧体之间的高反应性不仅可以实现化学链燃烧技术,而且还可以提高系统的能量转换效率,对于韩国、日本、欧盟、美国这种以较低含碳量的石油和天然气为主要能源的国家和地区而言,供给气体燃料的化学链燃烧系统具有较大的优势,但是对于以煤这种高含碳量燃料为主要能源的国家,比如中国而言,则需要寻求实现固体燃料利用的化学链燃烧方式。

目前,美国能源部(U.S. Department of Energy)和美国自然科学基金委(National Science Foundation of USA)都对直接供给固体燃料的化学链燃烧系统进行了资助,其中美国俄亥俄州立大学(Ohio State University)L.S.Fan 课题组进行了蔡与铁基载氧剂反应的可行性研究,证明了燃用固体燃料利用化学链燃

烧系统产氢是完全可行的;而美国西肯塔基大学(Western Kentucky University)的燃烧科学与环境技术学院也初步提出了煤基化学链燃烧系统的研究思路<sup>[27-29]</sup>。

实现固体燃料利用的化学链燃烧技术有2种方案,一种方案需要引入一个单独的气化过程,此时或者氧气或者是氧气+蒸汽用于气化固体燃料,使其成为气体燃料,这些气体燃料再与载氧剂发生还原反应,但是由于气化难度很大,并且需要高耗能的空气分离器,所以大大限制了这种方案的发展。而另外一种方案是固体燃料直接引入燃料反应器,利用再循环的二氧化碳或蒸汽使燃料反应器内固体燃料流化,同时作为气化装置和氧化装置:作为气化装置时,焦炭与蒸汽或二氧化碳反应;作为氧化装置时,气体燃料被载氧剂氧化,而载氧剂则被还原。

### 4 结语

化学链燃烧技术基于化学能梯级利用<sup>[30]</sup>,具有比传统燃烧方式更高的能源利用效率,并且在二氧化碳减排方面、氮氧化物零排放方面具有的优越性更符合时代的需求。但是化学链燃烧技术还尚未成熟,制备与合成高效、经济、环境友好的载氧剂仍然是尚未解决的问题,寻找具有较高循环反应活性、循环稳定性和较高机械强度,并且具有环境友好及价格低廉的载氧剂仍然是未来化学链燃烧研究的一个重要方向。而化学链燃烧反应器及载氧剂在反应器中的流动、传热、化学反应、污染物排放、气固分离以及磨损等问题也都需要进一步研究。但是,化学链燃烧技术是一种变革性技术,具有良好的发展前景,随着工业发展与科技进步,它一定会迅速发展为一项成熟的燃烧技术。

#### 参考文献

- [1] 金红光. 新颖化学链燃烧与空气湿化燃气轮机循环[J]. 工程热物理学报, 2000(2): 138 - 141.
- [2] Richter H J, Knoche K F. Reversibility of combustion process, efficiency and costing, second law analysis of processes[C]//Gaggioli R A. Washington DC: ACS Symposium Series 235, 1983: 71 - 85.
- [3] 何方, 王华, 戴永年, 等. 循环热载体无烟燃烧技术的试验研究[J]. 中国工程科学, 2004, 6(7): 65 - 69.
- [4] Abad A, Mattisson T, Lyngfelt A, et al. Chemical-looping combustion in a 300 W continuously operating reactor system using a manganese-based oxygen carrier[J]. Fuel, 2006, 85: 1174 - 1185.
- [5] Adánez J, Diego L, García-Labiano F, et al. Selection of oxygen carriers for chemical-looping combustion[J]. Energy and Fuels, 2004, 18(2): 371 - 377.
- [6] Ishida M, Jin H, Okamoto T. A fundamental study of a new kind of

- medium material for chemical-looping combustion[J]. *Energy and Fuels*, 1996, 10(4): 958 - 963.
- [7] Jin H, Okamoto T, Ishida M. Development of a novel chemical-looping combustion: Synthesis of a solid looping material of NiO/NiAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>[J]. *Ind Eng Chem Res*, 1999, 38(1): 126 - 132.
- [8] Jin H, Ishida M. Reactivity study on a novel hydrogen fueled chemical-looping combustion [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2001, 26(8): 889 - 894.
- [9] Mattisson T, Johansson M, Lyngfelt A. Multicycle reduction and oxidation of different types of iron oxide particles application to chemical-looping combustion[J]. *Energy and Fuels*, 2004, 18(3): 628 - 637.
- [10] Jin H, Okamoto T, Ishida M. Development of a novel chemical-looping combustion: Synthesis of a looping material with a double metal oxide of CoO-NiO[J]. *Energy and Fuels*, 1998, 12(6): 1272 - 1277.
- [11] Jin H, Ishida M. A new type of coal gas fueled chemical-looping combustion[J]. *Fuel*, 2004, 83(17/18): 2411 - 2417.
- [12] Jin H, Ishida M. Reactivity study on natural gas fueled chemical-looping combustion by a fixed-bed reactor[J]. *Ind Eng Chem Res*, 2002, 41(16): 4004 - 4007.
- [13] 郑瑛, 王保文, 宋侃, 等. 化学链燃烧技术中新型氧载体的特性研究[C]//中国工程热物理学会燃烧学第十一届年会论文集. 北京: 中国工程热物理学会, 2005: 48 - 51.
- [14] Lyngfelt A, Leckner B, Mattisson T. A fluidized-bed combustion process with inherent CO<sub>2</sub> separation: Application of chemical-looping combustion[J]. *Chem Eng Science*, 2001, 56(10): 3101 - 3113.
- [15] Lyngfelt A, Thunman H. Chemical-looping combustion: Design, construction and 100 h of operational experience of a 10 kW prototype[M]//Thomas D. The CO<sub>2</sub> capture and storage project(CCP) for carbon dioxide storage in deep geologic formations for climate change mitigation volume-capture and separation of carbon dioxide from combustion sources. London: Elsevier Science, 2004.
- [16] Lyngfelt A, Kronberger B, Adanez J, *et al.* Development of oxygen carrier particles for chemical-looping combustion. Design and operation of a 10 kW chemical-looping combustor[C]//The 7th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies. Canada: Vancouver Convention centre, 2004: 1 - 3.
- [17] de Diego L F, Garcia-Labiano F, Gayan P, *et al.* Operation of a 10 kW chemical-looping combustor during 200 h with CuO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> oxygen carrier[EB/OL]. Doi: 10.1016/j.fuel.2006.10.004.
- [18] Kronberger B, Lyngfelt A, Löffler G, *et al.* Design and fluid dynamic analysis of a bench-scale combustion system with CO<sub>2</sub> separation: Chemical-looping combustion[J]. *Ind Eng Chem Res*, 2005, 44: 546 - 556.
- [19] Son S R, Kim S D. Chemical-looping combustion with NiO and Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> in a thermobalance and circulating fluidized bed reactor with double loops [J]. *Ind Eng Chem Res*, 2006, 45: 2689 - 2696.
- [20] Johansson E, Mattisson T, Lyngfelt A, *et al.* A 300 W laboratory reactor system for chemical-looping combustion with particle circulation[J]. *Fuel*, 2006, 85: 1428 - 1438.
- [21] Ryu H J, Jin G T, Yi C K. Demonstration of inherent CO<sub>2</sub> separation and no NO<sub>x</sub> emission in a 50 kW chemical-looping combustor: Continuous reduction and oxidation experiment[C]//Proceedings of the 7th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies. Holand: Elsevier, 2004.
- [22] Adánez J, García-Labiano F, de Diego L F, *et al.* Optimizing the fuel reactor for chemical-looping combustion[C]//Proceedings of FBC2003, 17th International Fluidized Bed Combustion Conference. New York: ASME, 2003: 63.
- [23] Johansson E, Kronberger B, Löffler G, *et al.* A two compartment fluidized bed for CO<sub>2</sub> capture by chemical looping combustion[J]. *Chemical Engineering & Technology*, 2004, 27(12): 1318 - 1326.
- [24] Wolf J. CO<sub>2</sub> mitigation in advanced power cycles-chemical looping combustion and steam-based gasification[D]. Stockholm: KTH-Royal Institute of Technology Department of Chemical Engineering and Technology Energy Processes, Sweden Universities service US AB, 2004.
- [25] 洪慧, 金红光, 杨思. 低温太阳能与化学链燃烧相结合控制 CO<sub>2</sub> 分离动力系统[J]. *工程热物理学报*, 2006(5): 729 - 732.
- [26] 李振山, 韩海锦, 蔡宁生. 化学链燃烧的研究现状及进展[J]. *动力工程*, 2006(4): 538 - 543.
- [27] Mattisson T, Zafar Q, Johansson M, *et al.* Chemical-looping combustion as a new CO<sub>2</sub> management technology[C]//First regional symposium on carbon management. Dhahran, Saudi-Arabia, CPL, 2006.
- [28] Cao Yan, Pan Weiping. Investigation of chemical looping combustion by solid fuels: 1. Process analysis [J]. *Energy & Fuels*, 2006, 20(5): 1836 - 1844.
- [29] Cao Yan, Casenas B, Pan Weiping. Investigation of chemical looping combustion by solid fuels: 2. Redox reaction kinetics and product characterization with coal, biomass, and solid waste as solid fuels and CuO as an oxygen carrier[J]. *Energy & Fuels*, 2006, 20(5): 1845 - 1854.
- [30] 金红光, 洪慧, 王宝群, 等. 化学能与物理能综合梯级利用原理 [J]. *中国科学(E)*, 2005, 35(3): 299 - 313. ■

### 基金会现场总线在中国发展 10 周年

2007 年是基金会现场总线技术进入中国的第 10 年,也是国际现场总线基金会在中国的分支机构——中国市场委员会成立的 10 周年。在此期间,基金会现场总线获得了巨大发展,已成功地为中国工业自动化做出了卓越的贡献。

现场总线基金会是一个国际性的非盈利组织,致力于开放的、可互操作的国际现场总线协议。现场总线基金会中国市场委员会是由在中国开展业务的国际公司组成,致力于共同推进基金会现场总线在中国的发展和广泛应用。

基金会现场总线是一种全数字的双向通讯系统,它将现场设备连接到一个单一的网络上,实现了数据的有效传递和处理。采用基金会现场总线可以改进过程控制设备的运行效率和提高收益,主要表现在:减少停机次数、提高生

产灵活性、降低过程可变性、提高资产利用率、减少维护成本、使生产过程更安全和符合规范要求。基金会现场总线技术正为中国的工业自动化带来深刻的变革。

到目前为止,全球有 355 家公司加入到现场总线基金会。现场总线基金会已成功测试和注册了 400 多种可互操作的现场总线设备和 20 种主机系统。此外在全球已销售了 850 000 多台现场总线设备和 10 000 套系统。

根据国际著名咨询公司 ARC 的报告显示,2006 年过程现场总线市场达到了 8.317 亿美元,而基金会技术覆盖了 2/3 的过程现场总线市场份额。据分析,亚太地区将成为现场总线发展的引擎,在未来 10 年估计年均增长率将达到 32%。(魏华)