

# 高温 CO<sub>2</sub> 吸附吸收剂的研究进展

黄煜煜, 李振山, 蔡宁生

(清华大学热能动力工程与热科学重点实验室 热能工程系, 北京 100084)

**摘要:** 化石燃料火电厂是 CO<sub>2</sub> 主要排放源, 直接脱除高温烟气中的 CO<sub>2</sub> 可以减少系统的能量损失, CO<sub>2</sub> 高温吸附剂和吸收剂的开发研究得到重视。本文主要对高温 CO<sub>2</sub> 吸附剂中的碳基吸附剂、沸石、类水滑石化合物及高温 CO<sub>2</sub> 吸收剂中的锂基吸收剂和钙基吸收剂等进行分析比较; 经过化学改性的类水滑石化合物在 140 °C 以上具有高温吸附剂中最高 CO<sub>2</sub> 吸附能力, 钙基吸收剂中的 PCC (沉淀碳酸钙) 和 CaO/Ca<sub>12</sub>Al<sub>14</sub>O<sub>33</sub> 在 600 °C 或更高温度下具有较高的吸收能力和循环反应活性。针对上述高温吸附/吸收剂目前存在的问题, 提出以研究高温吸附/吸收机理, 提高循环吸附/吸收 CO<sub>2</sub> 能力和改进其制备工艺作为今后研究的重点。

**关键词:** CO<sub>2</sub>; 高温; 吸附剂; 吸收剂

中图分类号: TK411  
文献标识码: A

## 1 前言

近年来, “温室效应”引起的气候变化已成为一个全球性环境问题, 愈来愈引起世界各国的关注。在各种温室气体中, CO<sub>2</sub> 以其较长的寿命年限 (50~200 年) 及超高的排放量 (6 000 百万吨/年) 而对“温室效应”的贡献最大<sup>[1]</sup>。我国目前是仅次于美国的

世界上第二大 CO<sub>2</sub> 排放国, 据预测, 我国的 CO<sub>2</sub> 排放总量很可能在 2020 年左右超过美国而成为 CO<sub>2</sub> 头号排放大国, 这样势必会给我国乃至全球带来更加严重的气候和生态上的负面效应, 因此必须采取有效措施控制 CO<sub>2</sub> 的排放, 减缓“温室效应”的加剧。

## 2 火电厂 CO<sub>2</sub> 的分离

化石燃料火电厂是 CO<sub>2</sub> 的主要排放源, 排放量约占 CO<sub>2</sub> 人为排放总量的三分之一, 控制和回收火电厂排放的 CO<sub>2</sub> 对于解决全球变暖和温室效应问题具有重大意义。世界各国对火电厂的 CO<sub>2</sub> 排放要求日趋严格, 即便是未签署京都议定书的美国, 其俄勒冈州也已规定新建的化石燃料火电厂的 CO<sub>2</sub> 净排放率必须控制在 0.675 lb/kWh 以下; 而德国的火力发电厂目前每排放一吨 CO<sub>2</sub> 收费 7.5~10 欧元, 此收费标准也已在电力批发中采用<sup>[2]</sup>。对火电厂 CO<sub>2</sub> 的减排可以通过控制火电生产中 CO<sub>2</sub> 的产生和对烟气中的 CO<sub>2</sub> 进行分离回收来实现。目前从火电厂烟气中分离回收 CO<sub>2</sub> 的技术有吸收分离法、吸附分离法、膜分离法和低温

分离法等, 其中吸收分离法与吸附分离法较为成熟, 应用比较广泛。但目前这两种技术均要求 100 °C 以下甚至更低的烟气温。如应用最广的 MEA (单乙醇胺) CO<sub>2</sub> 化学吸收法, 烟气在进入吸收塔前为了克服系统阻力, 需要压缩, 操作温度为 65 °C 左右, 这同时也是保证 MEA 正常吸收的温度<sup>[1]</sup>。吸附分离法中具有代表性的 PSA 变压吸附, 一般也是在室温下工作。由于火电厂烟气温度较高 (低温过热器出口烟气温度在 600 °C 以上, 经过省煤器, 空气预热器热交换后, 出口烟气温度也控制在 140 °C 左右), 对烟气中的 CO<sub>2</sub> 进行分离通常要经过降温等一系列处理, 给火电厂带来较为严重的能量损失, 相当于减少了 13%~37% 的净发电量<sup>[3]</sup>。因而为了避免分离之前的降温处理, 基于吸收分离法与吸附分离法的高温 CO<sub>2</sub> 分离技术及高温 CO<sub>2</sub> 吸附吸收剂的研究显得格外重要。

## 3 国内外研究现状

### 3.1 高温 CO<sub>2</sub> 吸附剂

PSA (变压吸附法) 采用特殊的固体材料作为吸附剂, 通过加压吸附过程和减压脱附过程反复

进行实现 CO<sub>2</sub> 的分离回收,是目前国际上研究火电厂 CO<sub>2</sub> 分离方法之一。日本东北电力公司仙台火电厂 175 MW 燃煤锅炉,采用 PSA 法每小时处理烟气 1 700 m<sup>3</sup>,回收 CO<sub>2</sub> 400 kg/h,回收率为 90%,CO<sub>2</sub> 纯度为 99%<sup>[4]</sup>。美国的 Gaffney 和 Golden 等人研究出 PSA 法在高温 (100~500 °C) 下分离回收 CO<sub>2</sub> 的技术,并申请了专利<sup>[5]</sup>。目前高温 PSA CO<sub>2</sub> 分离回收法的首要问题即针对空气预热器出口 140 °C 或更高温度的烟气寻找合适的高温 CO<sub>2</sub> 吸附剂。碳基吸附剂、沸石、类水滑石化合物作为重要的工业吸附材料,近年来得到很多研究者的关注。

活性炭、碳分子筛等碳基吸附材料在工业过程中的液相、气相净化分离有着广泛的应用。Song 和 Yong 对各种碳基吸附剂在不同温度下的 CO<sub>2</sub> 吸附能力进行研究<sup>[6]</sup>,发现碳基吸附剂在低压和常温下具有较强的 CO<sub>2</sub> 吸附能力,但随着温度升高,吸附能力显著下降。虽然通过化学改性可以提高其吸附能力,但是吸附量在 28 °C 时为 2.25 mmol/g,而在 300 °C 下已降至 0.30 mmol/g。Burchell 在 CFCMS (碳纤维复合分子筛) 上进行类似实验<sup>[7]</sup>,发现在 100 °C 碳纤维复合分子筛的吸附能力也由 30 °C 时的 2.5 mmol/g 降至 0.75 mmol/g。

沸石类矿物具有内部孔道结构,且大小多在分子尺寸范围,能呈现良好的选择性吸附效应。经过活化处理后的沸石吸附能力大为提高,是工业上重要的吸附剂,用于各种气体的分离和净化。Ishibashi 等人以沸石为吸附剂<sup>[8]</sup>,利用 PSTA (变压变温吸附法) 在 1 000 m<sup>3</sup>/h 的示范电厂进行烟气脱除 CO<sub>2</sub> 实验,达到 90%

的脱除效率,CO<sub>2</sub> 回收浓度为 99%,连续运行 2 000 h 没有发现沸石吸附效率下降的现象,但是吸附温度需要控制在 50 °C。Khelifa 用 Ni<sup>2+</sup> 和 Cr<sup>3+</sup> 置换沸石中的 Ca<sup>2+</sup> 等离子进行改性<sup>[9]</sup>,在 30 °C 和 0.47 个大气压下达到 5.04 mmol/g 的吸收量。该吸附剂在不同温度,不同压力下对 CO<sub>2</sub> 吸附的实验结果如图 1 所示。沸石的吸附能力用每基本晶格所吸附的气体分子数  $n$  表示。

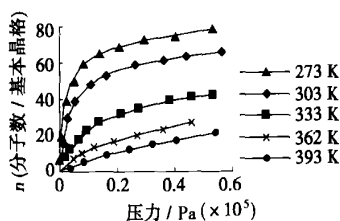


图 1 沸石在不同温度和压力下吸附能力的变化

可见随着温度升高,沸石的 CO<sub>2</sub> 吸附能力明显下降。

理想的水滑石 Mg<sub>6</sub>Al<sub>2</sub>(OH)<sub>16</sub>CO<sub>3</sub>·4H<sub>2</sub>O 是一种阴离子层状结构材料,当水滑石层上的 Mg<sup>2+</sup>、Al<sup>3+</sup> 被其它同价离子同晶取代后,其结构与水滑石相似,故称类水滑石化合物。类水滑石化合物是工业上重要的催化、吸附分离和离子交换材料,广泛应用于油漆、涂料、污水处理、医药和油田开发等领域。Yong 用类水滑石化合物在不同温度下进行吸附 CO<sub>2</sub> 的实验<sup>[10]</sup>,发现其 CO<sub>2</sub> 吸附能力在一个大气压,300 °C 时达到最大值,为 0.50 mmol/g;而在 20 °C 时仅为 0.15 mmol/g。Sircar 在类水滑石化合物中加入适量的 K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 进行化学改性<sup>[11]</sup>,在 400 °C,10<sup>6</sup> Pa 水蒸气和 0.3×10<sup>5</sup> Pa CO<sub>2</sub> 下,CO<sub>2</sub> 吸附量最高可达到 0.95 mmol/g。Nick D.Huston 对类水滑石化合物进行

结构改性,在一个大气压,200 °C 下的 CO<sub>2</sub> 吸附量为 0.896 mmol/g,其中物理吸附量和化学吸附量分别为 0.731 mmol/g 和 0.165 mmol/g,认为类水滑石化合物是目前最有潜力的 CO<sub>2</sub> 高温吸附材料<sup>[12]</sup>。但随吸附/解吸附循环次数增加,类水滑石化合物的吸附能力有所下降。Hufton 以类水滑石化合物作为 CO<sub>2</sub> 吸附剂进行制氢实验时发现<sup>[13]</sup>,400 °C 的干燥工况下,CO<sub>2</sub> 分压为 0.7×10<sup>5</sup> Pa 时,经过 30 次循环,吸附能力由最初的 0.53 mmol/g 降至 0.45 mmol/g,而同样温度下,当水蒸气分压为 10<sup>6</sup> Pa,CO<sub>2</sub> 分压为 0.3×10<sup>5</sup> Pa 时,经过 16 次循环,吸附量由最初的 0.83 mmol/g 降至 0.47 mmol/g。

可见,出于对工作温度和吸附能力的考虑,经过化学或结构改性的类水滑石化合物适合作为火电厂 PSA CO<sub>2</sub> 分离法的高温吸附剂,用于空气预热器出口烟气脱离 CO<sub>2</sub>。但是随着吸附/解吸附循环次数增加,其吸附能力有所下降,这是它作为工业用 CO<sub>2</sub> 吸附剂面临的首要问题。

### 3.2 高温 CO<sub>2</sub> 吸收剂

高温 CO<sub>2</sub> 吸收剂主要基于固体金属氧化物与 CO<sub>2</sub> 气体的化学反应实现分离。反应生成的金属碳酸盐在高温下重新分解为金属氧化物和 CO<sub>2</sub>,实现 CO<sub>2</sub> 的回收和吸收剂的再生。ZnO、CuO、MnO、PbO、Li<sub>2</sub>O 和 CaO 等金属氧化物都具有类似的反应特性,出于反应温度、再生温度和反应速度等方面的考虑,目前锂基吸收剂和钙基吸收剂是高温 CO<sub>2</sub> 吸收剂研究的重点。王银杰采用高温固相法制备的锆酸锂 (Li<sub>2</sub>ZrO<sub>3</sub>) 吸收剂在 20% CO<sub>2</sub> (80% 空气) 气氛下<sup>[14]</sup>,于 500 °C

下保持 3 h, 吸收量达到 25 (± 0.6)% (wt)。KATO 等人用锆酸锂制备的高温 CO<sub>2</sub> 吸收剂<sup>[15]</sup>, 吸收温度范围为 450 ~ 700 °C。针对锆酸锂吸收量较低, 反应速度较慢的缺点, 又以原硅酸锂 (Li<sub>4</sub>SiO<sub>4</sub>) 为材料制备出新型 CO<sub>2</sub> 吸收剂, 在常温 (25 °C) 下或者低 CO<sub>2</sub> 浓度 (2%) 下均能达到 25% (wt) 以上的吸收量, 而锆酸锂在这两种条件下基本不反应。在 500 °C, 20% CO<sub>2</sub> 的条件下, 原硅酸锂吸收剂吸收速度比锆酸锂吸收剂快将近 30 倍, 同时吸收能力也更强, 如图 2 所示<sup>[15]</sup>。

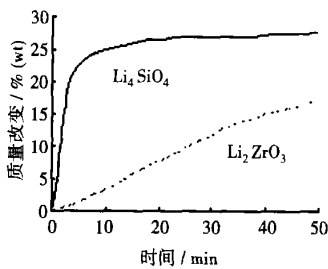


图 2 Li<sub>4</sub>SiO<sub>4</sub> 与 Li<sub>2</sub>ZrO<sub>3</sub> 在 500 °C, 20% CO<sub>2</sub> 下反应增重曲线

CaO 具有良好的 CO<sub>2</sub> 吸收能力, 在转化率达到 100% 的理想情况下吸收量可达到 78.6% (g-CO<sub>2</sub>/g-吸收剂)。出于原料来源、成本及制备工艺的考虑, CaO 被视为 CO<sub>2</sub> 高温吸收剂的首选材料, 一直受到关注。但是 CaO 颗粒与 CO<sub>2</sub> 反应时, 颗粒外层的 CaO 转化为 CaCO<sub>3</sub>, 其摩尔体积 (36.9 cm<sup>3</sup>/mol) 大于 CaO 摩尔体积 (16.9 cm<sup>3</sup>/mol), 因而易引起产物层微孔的堵塞, CO<sub>2</sub> 难以扩散到颗粒内部与 CaO 进一步反应, 导致 CaO 转化率下降。反应完全的吸收剂在 800 ~ 900 °C 下煅烧, CaCO<sub>3</sub> 分解为 CO<sub>2</sub> 和 CaO, 实现吸收剂的再生, 从而可以循环使用。但是在 800 ~ 900 °C 的煅

烧温度下 CaO 颗粒容易烧结, 引起表面积和孔隙率减少, 也会导致吸收剂的转化率下降, 影响其 CO<sub>2</sub> 吸收能力。Abanades 在流化床上以 CaO 作为吸收剂<sup>[16]</sup>, 对高温烟气进行 CO<sub>2</sub> 分离处理, 经过 11 次反应循环, CaO 的转化率由开始的 70% 下降到了 20%。针对钙基吸收剂的上述缺点, 很多研究者进行了广泛深入的实验研究。

Ueno 等人用 CaCO<sub>3</sub> 与 NaHCO<sub>3</sub> 在 200 °C 下反应<sup>[17]</sup>, 制备出钠-钙基 CO<sub>2</sub> 吸收剂, 在 800 °C 上熔融的 Na<sub>2</sub>Ca<sub>2</sub>(CO<sub>3</sub>)<sub>3</sub> 将 CaO 颗粒包裹, 避免了吸收剂颗粒的烧结, 经过 6 次反应循环, 吸收剂的活性没有明显下降。Barker 用直径 10 μm 的 CaO 微米颗粒进行 CO<sub>2</sub> 循环吸收实验<sup>[18]</sup>, 发现 CaO 的 CO<sub>2</sub> 吸收量从第一次的 59% (wt) 下降到第 25 次的 8% (wt), 认为是由于在 CaO 颗粒表面上生成了 22 nm 厚的 CaCO<sub>3</sub> 产物层, 并认为直径小于 22 nm 的

CaO 颗粒可以达到化学当量的理想转化率。在 100% 的 CO<sub>2</sub>, 577 °C 下, 用直径 10 nm 的 CaO 纳米颗粒进行了 30 次的循环反应, 发现 CaO 的转化率和吸收能力均没有下降, 分别保持为 93% 和 73% (wt), 证实了他的推断<sup>[9]</sup>。这也是迄今为止吸收能力和循环反应活性最强的钙基吸收剂, 但是密度只有约 0.1 g/ml, 为提高其实用性, 压缩至 1 g/ml, 经过 18 次循环反应后, CaO 转换率只有 47%, 吸收能力也降到 36.9% (wt)<sup>[19]</sup>。

Gupta 认为, 在氧化钙颗粒直径非纳米级时<sup>[20]</sup>, 颗粒本身的孔隙结构对转化率影响很大: 微孔结构 (孔径 < 2 nm), 在反应中容易导致颗粒孔隙的堵塞; 而中孔结构 (孔径范围 5 ~ 20 nm) 的 CaO 颗粒在反应过程中的孔隙堵塞几率要小得多, 从而提高了 CaO 颗粒的转化率。Iyer 对沉淀碳酸钙 (Precipitated Calcium Carbonate) 进行结构改性<sup>[21]</sup>, 制备的钙基吸收剂孔径 5 ~ 20 nm, 表面积为 49.2

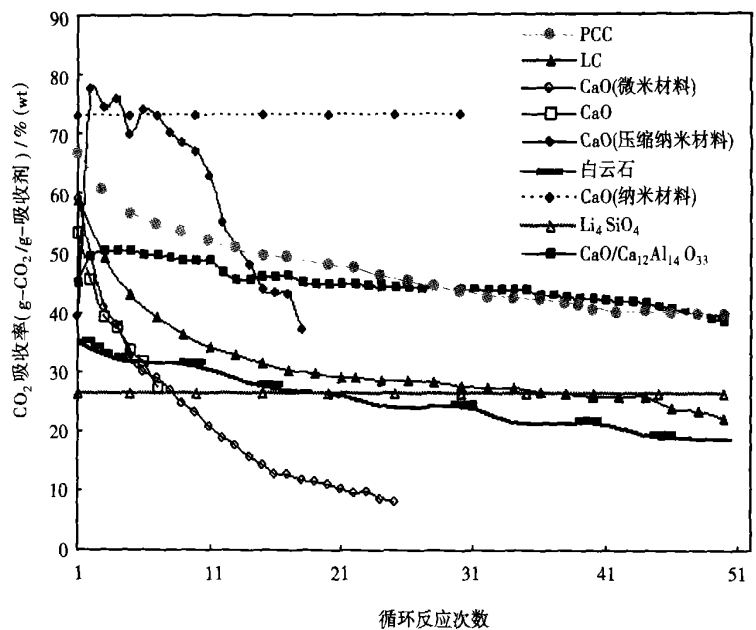


图 3 9 种 CO<sub>2</sub> 高温吸收剂性能比较曲线

$\text{m}^2/\text{g}$ , 孔隙量为  $0.17 \text{ cm}^3/\text{g}$ , 该钙基吸收剂在  $10\% \text{CO}_2$ ,  $700 \text{ }^\circ\text{C}$  高温下反应性能良好。文献[21]以不参与反应的  $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{33}$  作为载体和添加剂, 制备  $\text{CaO}/\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{33}$  吸收剂具有较高的孔隙率、表面积和抗烧结能力, 在  $20\% \text{CO}_2$ ,  $700 \text{ }^\circ\text{C}$  下经过 50 次循环吸收反应, 仍保持  $40\%(\text{wt})$  以上的吸收能力, 与其它钙基或非钙基高温  $\text{CO}_2$  吸收剂性能比较见图 3<sup>[20]</sup>。

图 3 中 PCC 为由经过结构改性的沉淀碳酸钙制得的钙基  $\text{CO}_2$  吸收剂; LC 为由重质碳酸钙, 即天然石灰石煅烧制成的钙基吸收剂;  $\text{CaO}$  (微米材料)、 $\text{CaO}$  (纳米材料)、 $\text{CaO}$  (压缩纳米材料) 和  $\text{Li}_4\text{SiO}_4$  分别是文献[15, 18~19] 中的  $\text{CO}_2$  吸收剂; 白云石主要成份为  $\text{CaCO}_3$  和  $\text{MgCO}_3$ , 在吸收增强式制氢实验中作为  $\text{CO}_2$  吸收剂原料;  $\text{CaO}/\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{33}$  为我们制备的  $\text{CO}_2$  高温吸收剂。在所列举的 9 种高温  $\text{CO}_2$  吸收剂中, LC、 $\text{CaO}$  (微米材料)、普通  $\text{CaO}$ 、白云石的  $\text{CO}_2$  吸收能力均在 10 次循环反应之后降至  $40\%(\text{wt})$  以下甚至更低, 且随着循环反应次数增加继续下降, 如用于烟气脱除  $\text{CO}_2$ , 将导致脱除效率降低和吸收剂的频繁更换; 纳米级的  $\text{CaO}$  吸收剂经压缩提高密度后,  $\text{CO}_2$  吸收能力从第六次循环反应开始急剧下降, 第十八次循环反应后降至  $36.9\%(\text{wt})$ ;  $\text{Li}_4\text{SiO}_4$  虽然一直保持稳定的循环反应活性, 但单位质量  $\text{CO}_2$  吸收能力仅为  $26\%(\text{wt})$ , 在实际应用时需要较多的吸收剂; PCC 与  $\text{CaO}/\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{33}$  吸收剂的吸收能力和循环反应活性较高, 经过 50 次反应循环后均能保持  $40\%(\text{wt})$  左右的吸收能力, 在  $500 \sim 800 \text{ }^\circ\text{C}$

温度范围内可正常工作(取决于  $\text{CO}_2$  的分压), 比较适合在火电厂的这一温度段, 如低温过热器出口, 用于烟气脱除  $\text{CO}_2$ 。

#### 4 结束语

综上所述, 目前国内外对高温  $\text{CO}_2$  吸附吸收剂的研究侧重于它们在较高温度(对吸附剂一般为  $140 \text{ }^\circ\text{C}$  以上, 对吸收剂则为  $600 \text{ }^\circ\text{C}$  左右)下的性能表现, 如吸收量、循环反应活性和反应速度等。PSA 法是工业上比较成熟的吸附分离技术, 以碳基吸附剂、沸石和类水滑石化合物等作为吸附剂, 广泛应用于气体分离净化领域。实验结果表明, 类水滑石化合物适合作为该技术在  $140 \text{ }^\circ\text{C}$  以上的高温吸附剂, 但经历多次吸附/解吸附循环后, 如何保持较高的吸附能力, 还有待于进一步的研究。部分锂基、钙基金属氧化物可与  $\text{CO}_2$  反应, 在  $500 \sim 800 \text{ }^\circ\text{C}$  具有良好的  $\text{CO}_2$  吸收性能。以 PCC、 $\text{CaO}/\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{33}$  为代表的钙基吸收剂成本低廉, 反应性能较好, 适合在火电厂相应温度段对高温烟气脱除  $\text{CO}_2$ 。但是目前金属氧化物吸收剂吸收  $\text{CO}_2$  的气固反应机理仍存在很多争议, 高温煅烧再生导致的吸收剂烧结问题也未得到彻底的解决, 影响了吸收剂的转化率和循环反应活性。

为了更好地适应火电厂高温烟气脱除  $\text{CO}_2$  的实际要求, 以下几个方面是高温  $\text{CO}_2$  吸附吸收剂的研究重点: (1) 对高温吸附剂的吸附解吸附机理和高温吸收剂颗粒与  $\text{CO}_2$  的气固反应机理深入研究, 为实验和技术改进提供理论指导; (2) 针对某些  $\text{CO}_2$  吸

附吸收剂寻找合适的化学改性、结构改性方法, 如在类水滑石化合物中添加  $\text{K}_2\text{CO}_3$ , 在  $\text{CaO}$  中添加  $\text{Na}$  或  $\text{CaO}/\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{33}$  及改变沉淀碳酸钙的孔隙结构等, 以提高其吸附/吸收能力和循环反应活性; (3) 改进各种高温吸附吸收剂的制备工艺, 适应工业化生产的要求。

#### 参考文献:

- [1] UMBERTO DDSIDERI, ALBERTO PAOLUCCI. Performance modelling of a carbon dioxide removal system for power plants[J]. *Energy Conversion & Management* 1999, 40: 1899-1915.
- [2] 袁 晔, 郑汉根. 它山文石—国际煤电价格政策扫描[DB/CD]. [http://news.xinhuanet.com/focus/2004-12/08/content\\_2340805.htm](http://news.xinhuanet.com/focus/2004-12/08/content_2340805.htm), 2004-12-08.
- [3] HERZOG H, DRAKE E, ADAMS E.  $\text{CO}_2$  Capture, reuse, and storage technologies for mitigating global climate Change[R]. Washington: Department of Energy, 1997.
- [4] 赵立中. 关于火电厂  $\text{CO}_2$  回收、利用问题[J]. *华中电力*, 1997, 10(2): 52-54.
- [5] GAFFNEY T R, GOLDEN T C, MAYORGA S G. Carbon dioxide pressure swing adsorption process using modified alumina adsorbents[P]. US Patent, 5917136 1999-06-29.
- [6] YONG Z, MATA V, RODRIGUES A E. Adsorption of carbon dioxide on chemically modified high surface area carbon-based adsorbents at high temperatures[J]. *Adsorption*, 2001, 7(1): 41-50.
- [7] BURCHELL T D, JUDKINS R R, ROGERS M R *et al.* A novel process and material for the separation of carbon dioxide and hydrogen sulfide gas mixtures[J]. *Carbon*, 1997, 35(9): 1279-1294.
- [8] MICHIO ISHIBASHI, HIROMITSU OTA, NOBUO AKUTSU. Technology for removing carbon dioxide from power plant flue gas by the physical adsorption method[J]. *Energy Convers Mgmt*, 1996, 37(6-8): 929-933.
- [9] AMINE KHELIFA, LEILA BENCHEHIF

- DA, ZOUBIR DERRICHE. Adsorption of carbon dioxide by X zeolites exchanged with Ni<sup>2+</sup> and Cr<sup>3+</sup>: isotherms and isosteric heat [ J ]. **Journal of Colloid and Interface Science**, 2004, **278**: 9—17.
- [ 10 ] YONG Z, MATA V, RODRIGUES A E. Adsorption of carbon dioxide onto hydroxalite-like compounds (HTLs) at high temperatures [ J ]. **Ind Eng Chem Res** 2001, **40**: 204—209.
- [ 11 ] HUFTON J R, MAYORA S G, GAFFNEY T R, *et al.* Sorption enhanced reaction process (SERP) for the production of hydrogen [ J ]. **Proc USDOE Hydrogen Program Rev** 1996, **2**: 693—705.
- [ 12 ] HUTSON NICK D. Structural effects on the high temperature adsorption of CO<sub>2</sub> on a synthetic hydroxalite [ J ]. **Chem Mater**, 2004, **16**: 4135—4143.
- [ 13 ] HUFTON J, MAYORGA S, NATARAJ S, *et al.* Sorption-enhanced reaction process for the hydrogen production [ J ]. **Am Inst Chem Eng J**, 1999, **45**(2): 248—256.
- [ 14 ] 王银杰, 其 鲁, 王祥云. 高温下错酸锂吸收二氧化碳的研究 [ J ]. **无机化学学报**, 2003, **19**(5): 531—534.
- [ 15 ] KATO M, YOSHIKAWA S, NAKAGAWA K. Carbon dioxide absorption by lithium orthosilicate in a wide range of temperature and carbon dioxide concentrations [ J ]. **Journal of Materials Science Letters**, 2002, **21**: 485—487.
- [ 16 ] ABANADES J CARLOS. Capture of CO<sub>2</sub> from combustion gases in a fluidized bed of CaO [ J ]. **AIChE Journal** 2004, **50**(7): 1614—1622.
- [ 17 ] SHUNKICHI UENO, JAYASEELAN D DONI, JIHONG SHE, *et al.* Carbon dioxide absorption mechanisms of sodium added to calcium oxide at high temperatures [ J ]. **Ceramics International**, 2004, **30**: 1031—1034.
- [ 18 ] BARKER R. The reversibility of the reaction CaCO<sub>3</sub> = CaO + CO<sub>2</sub> [ J ]. **J Appl Chem Biotechnol** 1973, **23**: 733—742.
- [ 19 ] BARKER, R. The reactivity of calcium oxide towards carbon dioxide and its use for energy storage [ J ]. **J Appl Chem Biotechnol** 1974, **24**: 221—227.
- [ 20 ] MAHESH V IYER, HIMANSHU GUPTA, BARTEV B SAKADJIAN, *et al.* Multicyclic study on the simultaneous carbonation and sulfation of high-reactivity CaO [ J ]. **Ind Eng Chem Res**, 2002, **43**: 3939—3947.
- [ 21 ] LI Z S, CAI N S, HUANG Y Y, *et al.* Synthesis experimental studies and analysis of a new calcium-based carbon dioxide absorbent [ J ]. **Energy & Fuels**, 2005, **19**(4): 1447—1452.

新产品·新技术

## 金属纤维燃烧器

金属纤维燃烧器是一种全预混表面燃烧式燃气燃烧器。金属纤维燃烧器可以采用自然引射方式,也可以采用强制鼓风方式。根据空气/燃气混合器的安装位置,强制鼓风式金属纤维燃烧器又分为上游混合式和下游混合式两种,上游混合式是将空气/燃气混合器安装于风机的入口处,下游混合式是将空气/燃气混合器安装于风机的出口处。上游混合强制鼓风式金属纤维燃烧器外形紧凑,燃气压力适应性强(燃气零压亦可运行),要求风机密封性好,适用于中、小功率的场合。

金属纤维燃烧器有如下特点:(1)污染物排放低。金属纤维燃烧器的氮氧化物、一氧化碳和不完全燃烧物的排放浓度低。由于全预混燃烧的过量空气系数小,同时燃烧释放的热量通过辐射与对流方式迅速带走,降低了火焰温度,所以相对于其它燃烧器,金属纤维燃烧器具有更低的NO<sub>x</sub>水平。全预混和多孔介质的表面燃烧方式保证了低过量空气系数下的完全燃烧,一氧化碳的不完全燃烧物的排放浓度低。(2)节能。金属纤维燃烧器的全预混燃烧方式燃烧完全,燃烧器效率高;因为金属纤维燃烧器的过量空气系数较低,在应用中,同样的排烟温度下,金属纤维燃烧器的排烟损失小。(3)外形适应性强。根据使用场合的要求,金属纤维燃烧器可以做成各种形状,如:方形、圆形、圆柱形、圆锥形、球形、环形(向内辐射型)。(4)安全性高。金属纤维介质孔隙的细密性决定了金属纤维燃烧器的回火倾向性极低。另外,金属纤维的抗腐蚀性强,抗热冲击性能高,抗机械冲击性能强,热惰性低。(5)两种燃烧方式,应用范围广。因为金属纤维燃烧器有着相当大的燃烧强度调节范围(100~10 000 kW/m<sup>2</sup>)。在此范围内,金属纤维燃烧器有两种燃烧方式:热辐射方式和蓝焰方式。

(朱 彤 供稿)

高温 CO<sub>2</sub> 吸附/吸收剂的研究进展 = **Recent Advances in the Research of High-temperature CO<sub>2</sub> Adsorbents and Absorbents** [刊, 汉] / HUANG Yu-yu, LI Zhen-shan, CAI Ning-sheng (Key Laboratory for Thermal-energy Power Engineering and Thermal Sciences under the Tsinghua University, Beijing, China, Post Code: 100084) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2005, 20(6). — 557 ~ 561

Fossil fuel-fired thermal power plants are a major source of CO<sub>2</sub> emissions. The direct removal of the latter from high-temperature flue gases can contribute to a decrease in system energy losses. Hence, increasing attention has been directed to the research and development of high-temperature CO<sub>2</sub> adsorbents and absorbents. Analyzed and compared were the carbon-based adsorbents, zeolites and hydrotalcite-like compounds in high-temperature CO<sub>2</sub> adsorbents as well as lithium-based absorbents and calcium-based absorbents in high-temperature CO<sub>2</sub> absorbents. Chemically modified hydrotalcite-like compounds at a temperature in excess of 140 °C possess the highest CO<sub>2</sub> adsorbing capacity among high-temperature adsorbents. At a temperature of 600 °C or higher the precipitated calcium carbonate and CaO/Ca<sub>12</sub>Al<sub>14</sub>O<sub>33</sub> in calcium-based absorbents have a relatively high absorbing ability and cyclic reaction activity. In consideration of the existing problems regarding the above-mentioned high-temperature adsorbents and absorbents the authors have proposed as focuses of research the following items: high-temperature adsorption/absorption mechanism, the enhancement of the ability of cyclic adsorption/absorption of CO<sub>2</sub> and the improvement of related preparation technology. **Key words:** carbon dioxide, high temperature, adsorbent, absorbent

基于 Kohonen 神经网络的燃气轮机故障诊断 = **Kohonen Neural Network-based Gas Turbine Fault Diagnosis** [刊, 汉] / TIAN Zhi-guang, MENG Xian-yao (Automation Research Institute under the Dalian Maritime University, Dalian, China, Post Code: 116026), DONG Zhen-dong (Design Institute of Jinan Iron & Steel Co., Jinan, China, Post Code: 250002) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2005, 20(6). — 562 ~ 564

With respect to eight kinds of thermodynamic parameters-based gas turbine typical and common faults studied are the Kohonen neural network-based methods used for diagnosing gas turbine faults on the basis of diagnostic working principles and specific features of the Kohonen neural network. It has been found that the model of Kohonen network has the following merits: self-learning function, rapid operating speed and strong pattern-recognition ability. The Kohonen network is a relatively good neural network with characteristic features suitable for diagnosing various gas turbine faults. **Key words:** gas turbine, Kohonen neural network, fault diagnosis

联合循环中蒸汽系统建模的通用性和精细性 = **Versatility and Precision of the Steam System Modeling of Combined Cycle Systems** [刊, 汉] / SHAO Yan-jun, LIN Ru-mou, JIN Hong-guang (Institute of Engineering Thermophysics under the Chinese Academy of Sciences, Beijing, China, Post Code: 100080), YANG Yong-ping (Department of Power Engineering, North China University of Electric Power, Beijing, China, Post Code: 102206) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2005, 20(6). — 565 ~ 570

Theoretical modeling is the foundation for the characteristics research of combined cycle systems, while the versatility and precision of models constitute a central issue of modeling. The approaches for enhancing the versatility and precision of models were studied during the modeling of a steam system in a combined cycle. First, a new approach and method was