

# 粒径及孔隙结构对石灰石脱除 CO<sub>2</sub> 能力的影响

刘洋<sup>1</sup>, 费华<sup>1</sup>, 蒋达华<sup>1</sup>, 杨勇平<sup>2</sup>

(1. 江西理工大学 建测学院省重点实验室 江西 赣州 341000; 2. 华北电力大学 能动学院 北京 102206)

**摘要:** 利用热重分析仪, 在不同煅烧及碳酸化反应温度条件下, 对比了不同粒径石灰石煅烧和碳酸化反应转化率。采用氮吸附实验, 比较了不同煅烧条件下, 不同样品的孔隙结构变化规律。实验表明: 样品粒径和孔隙结构特征共同影响碳酸化转化率; 微米级粒径的石灰石样品煅烧后具有较高比表面积, 因此转化率较高; 随着石灰石样品粒径增大, CaO 比表面积减少, 碳酸化转化率下降; 伴随着比表面积的减少, 样品平均孔径增大, 具有较大孔径的 CaO 一方面减少了孔隙堵塞情况的发生, 另一方面也能够容纳更多的 CaCO<sub>3</sub>, 这些因素导致了随着石灰石样品粒径增大, 碳酸化转化率反而提高, 继续增大石灰石粒径, 煅烧后的较大的孔径无法弥补比表面积下降所带来的不利影响, 碳酸化转化率降低。

**关键词:** 二氧化碳; 化学反应; 吸收; 气固反应; 孔隙结构

中图分类号: TK09

文献标识码: A

DOI: 10.16146/j.cnki.rndlge.2016.03.016

## 引言

煅烧后的石灰石与 CO<sub>2</sub> 的碳酸化反应可用于煤气化、分离烟气中 CO<sub>2</sub>、甲烷重整以及吸收增强水气变换等工艺过程中, 因此该反应受到国内外研究人员的广泛关注。CaO 与 CO<sub>2</sub> 反应生成的 CaCO<sub>3</sub> 的摩尔体积比 CaO 摩尔体积高得多, 碳酸化反应也成为研究气固反应的一种特殊反应类型。气固反应由于同时存在物理和化学过程而使得反应变得复杂。物理过程包括反应气体在 CaO 颗粒外侧扩散和在颗粒内部孔隙内扩散, 而扩散速率直接影响反应速率和固体吸收剂转化率。

目前, 国内外对于石灰石粒径对碳酸化反应影响的研究还不充分, 考虑到碳酸化反应与煅烧石灰石同 SO<sub>2</sub> 和 O<sub>2</sub> 的硫酸化反应均为有固体反应物生成的气固反应, 且生成物摩尔体积大于反应物摩尔体

积, 可以借鉴硫酸化反应的研究结果来分析碳酸化反应。在研究煅烧石灰石与 SO<sub>2</sub> 和 O<sub>2</sub> 反应时, 孔隙结构对于吸收剂脱硫能力具有明显的影响<sup>[1-9]</sup>。

通过调研石灰石的硫酸化反应发现, 随着石灰石粒径的增大, 样品转化率下降。文献[1]研究表明, SO<sub>2</sub> 的吸收能力依赖石灰石粒径, 当采用较大颗粒时硫酸化转化率下降, 用有效因子  $\eta$  来表示在颗粒内部孔隙中反应程度, 而有效因子是颗粒粒径、反应速率与扩散速率比值的函数; 文献[2]利用微粒模型模拟了3种粒径吸收剂硫酸化转化率, 随着粒径增大, 转化率逐渐下降; 文献[10~12]也得到了类似的结论。

研究石灰石粒径大小对碳酸化反应的影响与反应温度、CO<sub>2</sub> 浓度等因素有所不同, 这些因素仅在碳酸化反应过程发挥作用, 而改变石灰石粒径不仅对碳酸化反应有所影响, 也会影响煅烧反应后样品的孔隙结构, 而煅烧后的孔隙结构同样也会影响吸收剂的碳酸化反应过程。因此对于石灰石粒径大小这一影响因素, 必须从煅烧和碳酸化两个方面进行分析。

本研究利用热重分析仪对比了不同粒径石灰石煅烧后碳酸化反应的转化率的差别, 发现了石灰石粒径对碳酸化反应的影响与硫酸化反应影响的不同之处, 并分析了产生差异的原因。

## 1 实验

### 1.1 MFS 石灰石样品

实验采用 MFS(妙峰山)石灰石作为研究对象, 大块的石料在破碎机中破碎, 然后用标准筛筛分成

收稿日期: 2015-01-11; 修订日期: 2015-03-02

基金项目: 国家重点基础研究发展规划基金资助项目(2015CB251500); 中央高校基金资助项目(2014QN08); 江西省自然科学基金资助项目(20142BAB203029)

作者简介: 刘洋(1977-), 男, 辽宁沈阳人, 江西理工大学讲师。

通讯作者: 杨勇平(1968-), 男, 华北电力大学教授, 博士生导师。

7 种不同粒径的样品: 0 ~ 20、20 ~ 50、50 ~ 100、200 ~ 300、300 ~ 400、400 ~ 500 和 500 ~ 600 μm。天然石灰石几乎没有内部孔隙, 煅烧后则会出现大量孔隙。采用 X 射线荧光光谱仪( 型号为 Rigaku ZSX Primus II) 测量天然石灰石样品成分, 表 1 列出了样品成分质量百分组成。

### 1.2 TGA( 热重) 实验

使用 TA600 热重分析仪测量石灰石样品的煅烧和碳酸化反应转化率与反应时间关系。每次称重 10 mg 的石灰石样品, 并将样品平铺在氧化铝样品盘内。在常温下样品首先在 CO<sub>2</sub> 气氛中脱气, 之后在 CO<sub>2</sub> 保护下被加热到指定的反应温度。此时将 CO<sub>2</sub> 气路关闭, 通入 N<sub>2</sub>。当煅烧反应结束后, 热重分析仪将温度降到设定的碳酸化反应温度, CO<sub>2</sub> 与 N<sub>2</sub> 的混合气体通入反应炉内, 碳酸化反应持续 60 min。碳酸化反应过程中 N<sub>2</sub> 流量为 100 ml/min, CO<sub>2</sub> 流量为 13 ml/min。

TGA 实验过程中, 时间、质量和温度 3 组数据被连续监测。在碳酸化反应过程中, 样品与通入的 CO<sub>2</sub> 反应导致质量增加, 转化率计算公式表示为:

$$X = \frac{m_t - m_0}{m_0 g_p \left( \frac{M_{CaCO_3}}{M_{CaO}} - 1 \right)} \quad (1)$$

式中: X—任意时刻煅烧石灰石样品的碳酸化转化率; m<sub>0</sub>—样品煅烧后的原始质量, g; g<sub>p</sub>—样品纯度, %; m<sub>t</sub>—t 时刻样品的重量, g。

### 1.3 BET( 氮吸附) 实验

为准确测量煅烧样品的孔隙结构特征, 不同重量的石灰石样品进行了煅烧实验。对于内部表面积在 30 m<sup>2</sup>/g 及以上的样品, 100 mg 的样品重量能够满足利用氮吸附仪准确测试样品的孔隙结构的要求。石灰石样品在管式炉中煅烧, 吹扫的氮气流量是 1.2 L/min。石灰石被均匀的平铺在石英舟上, 当达到煅烧温度后, 石英舟被放入管式炉中。烟气分析仪用来测量管式炉出口气体中 CO<sub>2</sub> 体积百分含量, 当出口浓度为零时, 煅烧反应结束。之后, 将煅烧后样品迅速倒入测试试管以防止与空气中水蒸气反应生成 Ca(OH)<sub>2</sub>。煅烧后的样品使用氮吸附仪( Micromeritics TriStar II 3020) 测量孔隙表面积和孔径分布。

表 1 MFS 石灰石样品成分组成( Wt% )

Tab. 1 Composition of Miaofengshan-originated limestone samples( Wt% )

	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TFe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	MnO	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	LOI	Total
MFS	11.32	0.67	0.27	52.66	1.64	0.15	0.01	0.008	0.02	0.231	42.95	99.92

注: LOI—煅烧质量损失; Total—全部质量。

## 2 实验结果分析

为选择煅烧条件下合适的气体流量, 煅烧反应在 850 °C 下进行。N<sub>2</sub> 流量分别为 150、200 和 250 ml/min, 对比粒径范围为 0 ~ 20 和 500 ~ 600 μm 的 MFS 石灰石在不同 N<sub>2</sub> 流量条件下煅烧转化率。实验结果显示, 与粒径大小及气体流量无关, 转化率经历一个初始较慢的反应过程, 在煅烧转化率达到 10% 后, 转化率与反应时间近似成正比。对于 2 种不同的粒径, 200 和 250 ml/min 2 种 N<sub>2</sub> 流量条件下主反应阶段的斜率几乎相同。而 150 ml/min 流量条件下的转化率斜率明显低于较高流量条件下的斜率。这表明当煅烧气体流量高于 200 ml/min 时, 气体外扩散的影响变得并不明显。因此选择 200 ml/

min N<sub>2</sub> 流量作为煅烧反应气体流量。

### 2.1 粒径大小对煅烧反应的影响

一般认为当石灰石粒径变化后, 在煅烧过程中热量传递及吸收过程发生了变化。图 1( a) 显示了妙峰山石灰石在 850 °C 时, 样品粒径对煅烧反应的影响。随着粒径的增大, 在主反应区煅烧速率逐渐下降, 所需要的整个煅烧时间因此而延长。图 1( b) 显示了不同粒径的样品煅烧过程中煅烧气氛与颗粒之间温度差值。对于粒径在 0 ~ 20 μm 范围内的石灰石, 气体与颗粒的最大温差为 4.98 °C。当石灰石粒径增大后, 气流温度与样品颗粒之间温差减小。在煅烧反应过程中, 不同粒径的最大温差小于 0.7 °C。因此在实验条件下, 在煅烧过程中由于粒径变化所导致的热量传递阻力差异并不明显。

文献[1]指出, 石灰石的热分解过程存在 3 个

控制步骤:(1) 热量从颗粒表面通过 CaO 产物层向反应界面传导;(2) 反应产生的 CO<sub>2</sub> 通过产物层向外扩散;(3) 化学反应。煅烧反应条件直接影响煅烧过程控制因素。

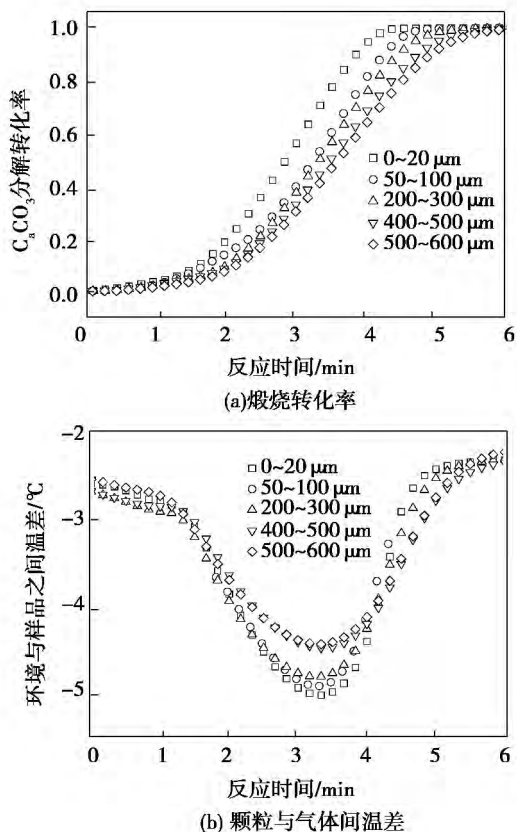


图 1 粒径大小对煅烧反应的影响  
Fig. 1 Effect of the particle size on the calcination reaction

本研究实验表明,在不同粒径条件下,热量传递阻力以及 CO<sub>2</sub> 从颗粒表面扩散到主气流的阻力的差异并不明显。根据未反应核模型,煅烧反应可以看做是一个反应界面从颗粒外侧向内部逐渐深入的过程。粒径 500~600 μm 的样品比 0~20 μm 的样品完全煅烧所需时间延长了约 2 min,主要是由煅烧产生的 CO<sub>2</sub> 气体在石灰石颗粒孔隙中扩散阻力的差异造成的。

2.2 粒径大小对碳酸化反应的影响

图 2 是煅烧温度为 850 °C 时 MFS 石灰石样品煅烧产物 CaO 在 650 °C 碳酸化条件下,样品粒径对其碳酸化反应转化率的影响。从图中可以看出,随

着粒径的增大,碳酸化转化率逐渐下降,当石灰石样品粒径为 50~100 μm 时,CaO 转化率达到最小值。当粒径为 200~300 μm 时,CaO 碳酸化转化率反而提高,当粒径为 400~500 μm 时 CaO 碳酸化转化率达到最大值 0.78,此后继续增大粒径转化率下降,表明粒径大小与转化率并不是单调关系。

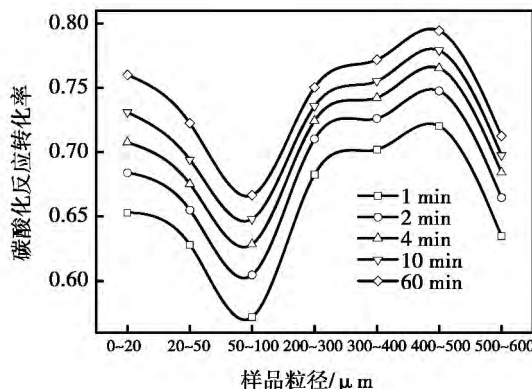


图 2 样品粒径对 CaO 碳酸化反应转化率的影响  
Fig. 2 Effect of the particle diameter of the sample on the conversion rate of CaO in its carbonation reaction

2.3 不同煅烧条件下样品粒径对碳酸化反应的影响

图 3 为在不同煅烧温度条件下 MFS 石灰石样品煅烧产物 CaO 在碳酸化反应温度为 650 °C 时,粒径对其碳酸化反应转化率的影响。实验结果表明,虽然煅烧条件有所变化,然而对于样品粒径这一变量而言,存在一个粒径范围使得碳酸化转化率最高。当粒径在 50~100 μm 范围内时,随着煅烧温度的减少,CaO 碳酸化转化率提高,这一现象与文献 [2] 的实验结果一致。对于平均粒径为 96 μm 的石灰石,当煅烧温度从 790 °C 增加到 1 100 °C,硫酸化转化率逐渐下降,原因是随着煅烧温度的增加,煅烧样品表面积不断减少 [2]。样品粒径从 200~300 μm 增加到 400~500 μm,提高煅烧温度碳酸化转化率反而增加。Dogu 也发现对于直径 1.5 cm 的石灰石样品 [3],当煅烧温度从 750 °C 提高到 950 °C 时,石灰石样品的脱硫能力提高。Dogu 发现当煅烧温度提高后,样品的平均孔径也在不断增大,这导致了更高的硫酸化转化率。当粒径增大到 500~600 μm 后,

CaO 碳酸化转化率逐渐下降,这符合粒径影响的一般认识。

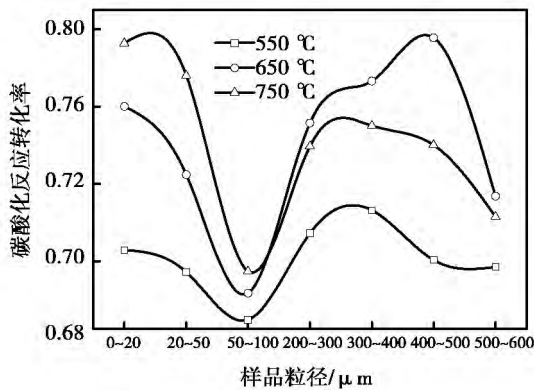


图3 煅烧温度和样品粒径对 CaO 碳酸化反应转化率的影响

Fig. 3 Influence of the calcination temperature and particle diameter of the sample on the conversion rate of CaO in its carbonation reaction

### 2.4 不同碳酸化条件下样品粒径对碳酸化反应的影响

图4是煅烧温度为850 °C MFS 石灰石样品在不同碳酸化温度条件下粒径对其碳酸化转化率的影响。对于粒径小于50~100  $\mu\text{m}$  的样品而言,当碳酸化温度从550 °C增加到750 °C时,碳酸化转化率逐渐增加,这与文献[4]的实验结果一致。从实验结果可以看出,随着碳酸化反应温度的增加,碳酸化产物层逐渐变厚,导致了更高的转化率。当样品粒径从200~300  $\mu\text{m}$  增加到500~600  $\mu\text{m}$  时,对于相同粒径,CaO在750 °C发生碳酸化反应的转化率反而低于650 °C的转化率。对于进入颗粒孔隙内部的CO<sub>2</sub>分子,或者在孔隙壁面上与CaO发生化学反应,或者随着气流向内部扩散,发生化学反应或是向内部扩散两个过程相互影响。存在一个临界粒径范围50~100  $\mu\text{m}$ ,导致温度对转化率的影响出现了变化。由于CO<sub>2</sub>分子在颗粒内部行程加大,一旦孔隙发生阻塞,碳酸化反应进入产物层扩散阶段。而在较低温度时,相同温度产物层厚度较低,CO<sub>2</sub>更容易扩散到内部与CaO反应,导致随着反应温度提高,大粒径CaO转化率反而下降。

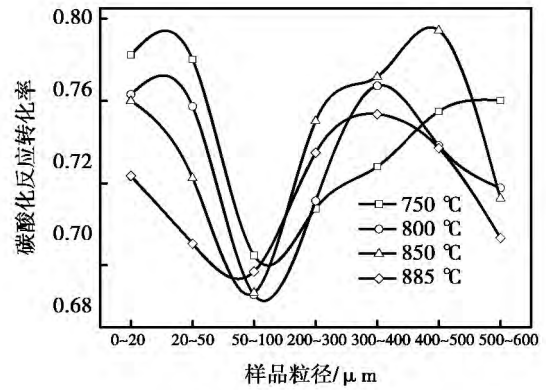


图4 碳酸化温度和粒径对 CaO 碳酸化反应转化率的影响

Fig. 4 Influence of the carbonation temperature and particle diameter of the sample on the conversion rate of CaO in its carbonation reaction

### 2.5 氮吸附实验结果分析

利用氮吸附仪测量得到的不同煅烧温度条件下的孔隙结构特征如表2所示。煅烧温度为850 °C、当样品粒径从0~20  $\mu\text{m}$  增大到500~600  $\mu\text{m}$  时,平均孔径从199.7 nm 增加到23.94 nm,而样品比表面积从40.7  $\text{m}^2/\text{g}$  减少到34.1  $\text{m}^2/\text{g}$ 。实验结果显示在煅烧温度一定的条件下,孔隙结构参数均与样品粒径大小成单调关系。随着颗粒粒径的增大,CO<sub>2</sub>扩散路径延长,由此导致反应时间延长。在CO<sub>2</sub>气氛中的煅烧反应会加剧样品的烧结,造成平均孔径增大同时比表面积和孔隙率逐渐下降。然而在一定的粒径条件下,煅烧温度却对平均孔径、孔体积和比表面积存在不同的影响。在实验选择的范围内,平均孔径随煅烧温度的增加而增大,而孔体积和比表面积在850 °C存在最大值。这是由于提高反应温度,反应速率加快,使得反应时间减少,会减少石灰石的烧结,然而煅烧温度的提高同时加剧石灰石烧结。这两个因素的相互作用使煅烧反应存在一个温度使石灰石的孔体积和比表面积最大。对于煅烧温度对孔隙结构的影响也可以参考Dogu的实验结果<sup>[3]</sup>。Dogu对比了煅烧温度750~1150 °C范围内石灰石样品内部孔隙平均孔径大小,他发现在750~950 °C范围内,平均孔径随温度增大而增大,此规律与本文实验规律一致。所不同的是当温度继续从950 °C升高到1150 °C,平均孔径反而下降。这一现

象仍然可以利用煅烧温度同时加快反应速度和加剧烧结来进行解释。提高反应温度同时加快反应速度,减少反应时间,同时提高温度也加剧烧结。这两个因素的相互作用使煅烧反应存在一个温度使石灰

石的平均孔径最大。从本文的实验结果结合 Dogu 的实验结果可以看出,对于气体在颗粒内部扩散不可忽略的石灰石样品,必须从反应速率和烧结速率两个方面考虑煅烧温度对孔隙结构的影响。

表2 不同样品粒径、不同煅烧温度条件下 CaO 孔隙结构特征

Tab. 2 Porous structural characteristics of CaO at various particle diameters of the sample and various calcination temperatures

样品粒径	0 ~ 20 μm			50 ~ 100 μm			200 ~ 300 μm			500 ~ 600 μm		
	750 °C	850 °C	950 °C	750 °C	850 °C	950 °C	750 °C	850 °C	950 °C	750 °C	850 °C	950 °C
平均孔径/nm	18.65	19.97	21.07	19.83	21.27	22.02	21.42	22.05	23.56	21.71	23.94	26.22
比体积/cm <sup>3</sup> ·g <sup>-1</sup>	0.247	0.254	0.241	0.231	0.241	0.236	0.223	0.239	0.228	0.215	0.238	0.224
比表面积/m <sup>2</sup> ·g <sup>-1</sup>	37.6	40.7	36.8	36.4	39.2	35.7	33.2	36.3	33.4	32.5	34.1	32.9

根据实验结果以及对孔隙结构的分析,由于石灰石粒径不同,导致煅烧后孔隙的差异。也是由于孔隙结构的差别,直接影响了不同粒径样品的吸收能力,不同粒径煅烧及碳酸化反应后孔隙结构示意图如图5所示。对于煅烧反应,由于大粒径石灰石分解经历更长的反应时间,同时颗粒外部的孔隙的烧结时间明显延长。因此随着粒径的增大,孔隙率和比表面积不断下降而平均孔径增大。对于碳酸化反应,对于粒径0~20 μm的样品而言,颗粒内部气体扩散阻力可以忽略,因此此粒径的CaO可以完全利用内部的孔隙和表面积。CaO不能达到完全转化的原因在于CaCO<sub>3</sub>的摩尔体积大于CaO的摩尔体积,虽然气固反应表面积在所有样品中最大,但不能提供足够的空间容纳反应物,这是CaO样品不能完全转化成CaCO<sub>3</sub>的原因。对于粒径50~100 μm的样品,由于球体体积与半径的立方成正比,因此如果半径增大一倍则体积增大8倍,此时不能忽略由于样品半径的增大所导致孔隙内部气体扩散阻力。由于CO<sub>2</sub>气体扩散路径延长,一旦与CaO反应生成的CaCO<sub>3</sub>堵塞了孔隙,则气体无法进一步向内部扩散与CaO表面直接接触,则反应进入产物层扩散阶段。这样样品颗粒内部的空间不能完全得到利用,也导致了随着样品粒径的增大转化率逐渐下降。当样品粒径为300~400 μm时, CaO平均孔径为22.05 nm。由于反应时间的延长和烧结的加剧,反应气体更容易进入样品颗粒内部,堵塞孔隙的显现明显减少。虽然测量的孔隙率和比表面积与较小粒径相比不断减少,但样品内部的孔隙得到有效利用,使得CaO的利用率反而提高。样品的粒径增大到500~600 μm时,其平均孔径为23.94 nm。随着样

品的粒径增大,虽然孔隙提前堵塞的问题因孔径增大得到缓解,但是由于比表面积和孔隙率不断减少而使得CaO的利用率开始下降。综上所述,由于样品粒径的不同,造成石灰石样品的孔隙结构存在差异。而碳酸化反应是一种生成物摩尔体积大于反应物的气固反应,CaO的利用率与半径大小并不是单调关系,固体颗粒孔隙平均孔径的大小对于转化率结果具有重要影响。需要说明的是,本研究是从比较粒径大小导致的转化率的不同进行的分析,影响石灰石的煅烧和碳酸化反应因素的作用规律非常复杂。例如样品粒径为500~600 μm时,CaO在颗粒内部也有可能出现孔隙堵塞现象,而样品粒径在0~20 μm时,在接近CaO颗粒表面处也有可能出现孔隙没有完全利用现象。本研究只是对实验现象进行分析和解释,对于粒径对碳酸化反应的影响将来还需进一步利用模型来进行分析。

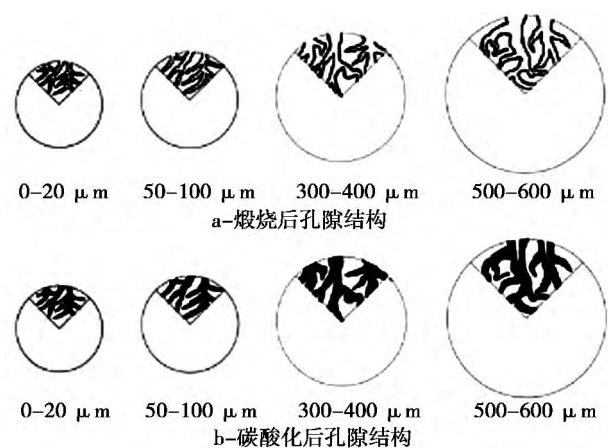


图5 孔隙结构的形成及对碳酸化反应的影响  
Fig. 5 Formation of the structure of pores and their influence on the carbonation reaction

### 3 结 论

(1) 粒径 500 ~ 600 μm 的样品比 0 ~ 20 μm 的样品完全煅烧所需时间延长了约 2 min , 主要是由煅烧产生的 CO<sub>2</sub> 气体在石灰石颗粒孔隙中扩散阻力的差异所造成的。

(2) 当石灰石在 850 °C 时煅烧 , 在 650 °C 碳酸化条件下 , 样品粒径为 50 ~ 100 μm 时 CaO 转化率达到最小值。样品粒径为 400 ~ 500 μm 时 CaO 转化率达到最大值 0.78。此后继续增大粒径 , 样品转化率下降。

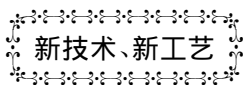
(3) CaO 粒径对碳酸化反应影响主要是通过孔隙结构的作用实现的。具有较大孔径的 CaO 一方面减少了孔隙堵塞情况的发生 , 另一方面也能够容纳更多的 CaCO<sub>3</sub>。这些因素导致了在一定粒径范围内 , 随着 CaO 粒径增大 , 碳酸化转化率反而提高。

#### 参考文献:

[1] Borgwardt R H , Harvey R D , Properties of carbonate rocks related to SO<sub>2</sub> reactivity [J]. Environ. Sci. Technol. , 1972 , 6(4) : 350.  
 [2] Hartman M , Coughlin R W. Reaction of sulfur dioxide with limestone and grain model [J]. AIChE J. , 1976 , 22(3) : 490 - 498.  
 [3] Ulerich N H , O'Neill E P , et al. A thermogravimetric study of the effect of pore volume-pore size distribution on the sulfation of calcined limestone [J]. Thermochim. Acta , 1978 , 26(1 - 3) : 269

- 282.  
 [4] Sun P , Grace J R , et al. The effect of CaO sintering on cyclic CO<sub>2</sub> capture in energy systems [J]. AIChE J. , 2007 , 53(9) : 2432 - 2442.  
 [5] Sun P , Lim J , et al. Cyclic CO<sub>2</sub> capture by limestone-derived sorbent during prolonged calcination/carbonation cycling [J]. AIChE J. 2008 , 54(6) : 1668 - 1677.  
 [6] Blamey J , Anthony E J , et al. The calcium looping cycle for large-scale CO<sub>2</sub> capture [J]. Prog. Energy Combust. Sci. 2010 , 36(2) : 260 - 279.  
 [7] Alvarez D , Abanades J C. Pore-size and shape effects on the recarbonation performance of calcium oxide submitted to repeated calcination/recarbonation cycles [J]. Energy Fuels 2005 , 19(1) : 270 - 278.  
 [8] Abanades J C , Alvarez D. Conversion limits in the reaction of CO<sub>2</sub> with lime [J]. Energy Fuels 2003 , 17(2) : 308 - 315.  
 [9] Fennell P S , Pacciani R , et al. The effects of repeated cycles of calcination and carbonation on a variety of different limestones , as measured in a hot fluidized bed of sand [J]. Energy Fuels 2007 , 21(4) : 2072 - 2081.  
 [10] Dogu T. The importance of pore structure and diffusion in the kinetics of gas-solid non-catalytic reactions—reaction of calcined limestone with SO<sub>2</sub> [J]. Chem. Eng. J. Bioch. Eng. , 1981 , 21(3) : 213 - 222.  
 [11] Wen C , Ishida M. Reaction rate of sulfur dioxide with particles containing calcium oxide [J]. Environ. Sci. Technol. , 1973 , 7(8) : 703 - 708.  
 [12] Borgwardt R H. Kinetics of reaction of SO<sub>2</sub> with calcined limestone [J]. Environ. Sci. Technol. , 1970 , 4(1) : 59 - 63.

( 陈 滨 编辑)



## Siemens 的 SGT - 750 燃气轮机

据《Diesel & Gas Turbine Worldwide》2014 年 10 月刊报道 , Siemens 公司已经完成了前两台工业用 SGT - 750 燃气轮机的安装和试运转。该燃气轮机是一型适用于电力生产和机械驱动的 38 MW 双轴燃气轮机。

两台工业用机组的第一台机组已经在德国卢布明市波罗的海的北施屈利姆天然气管线的中继站运行。该机组运行方式为联合生产 , 它排气的热量被用来对天然气管线重新加热。

该 SGT - 750 联合生产装置正在卢布明市季节性的运行 , 只是在一年中的寒冷时期运行。

第二台机组是墨西哥阿尔塔米拉的 60 Hz 联合生产装置 , 它是在 2014 年 5 月投入商业运行的 , 并且将为该地区的纺织厂提供电力和生产用蒸汽。

SGT - 750 简单循环的技术规范和额定性能:

推出年份	ISO 基本负荷额定输出功率/kW	热耗率/kJ · kWh <sup>-1</sup>	效率/%	压比	流量/kg · s <sup>-1</sup>
2012	35 930	8 831	38.7	23.8	113.3

( 吉桂明 摘译)

shale semi-coke bubbling fluidized bed

粒径及孔隙结构对石灰石脱除 CO<sub>2</sub> 能力的影响 = **Effects of Particle Size and Pore Structure on the Ability of Limestone Removing CO<sub>2</sub>** [刊, 汉] LIU Yang, FEI Hua, JIANG Da-hua ( Jiangxi University of Science and Technology, Key Laboratory of Jiangxi Province of Institute of Building and Surveying, Ganzhou, Jiangxi Province, China, Post Code: 341000), YANG Yong-ping ( Energy & power Engineering School of North China Electric Power University, Beijing, China, Post Code: 102206) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2016, 31(3). -97 - 102

Under the conditions of the various calcination and carbonation temperature, the calcination and carbonation conversion rates of the limestone with different particle sizes were investigated by the thermogravimetric analyzer in this paper. By ways of the nitrogen adsorption test, under the various carbonation conditions, the change rules of the various pore structures were compared in this paper. The test results indicate that the particle size and pore structure have a joint influence on the carbonation conversion rate. The high specific surface area of the calcined limestone samples with micro-structured particle size can make its conversion rate high. With increase of the particle size of the limestone sample the CaO specific surface area decreases and the carbonation conversion rate goes down. The mean particle size of the limestone sample increases as the specific surface area decreases. The CaO with increased particle size can reduce the possibilities of pore block on one hand and can contain more CaCO<sub>3</sub> on the other hand. Thus, with the increase of particle size of the limestone sample, the carbonation conversion rate becomes larger on the contrary, which can further increase the particle size of the limestone. When larger particle size of the calcined limestone is unable to compensate for the effects of decreased specific surface area, the carbonation conversion rate will decrease. **Key words:** carbon dioxide (CO<sub>2</sub>), chemical reaction, absorption, gas-solid reaction, pore structure

W 型火焰锅炉配风方式对 NO<sub>x</sub> 排放和经济性影响的试验研究 = **Experimental Research of Influence of Air Distribution Mode for a W-flame Boiler on NO<sub>x</sub> Emission and Boiler Economy** [刊, 汉] WANG Jian-xun, ZHANG Yan-hui, XIE Peng-fei ( Guodian Science & Technology Research Institute Beijing Electric Research Sub-institute, Beijing, China, Post Code: 100081), WANG Yong-zhao ( Guodian Xingyang Coal Electricity Integration Co., Ltd, Xingyang, Henan Province, China, Post Code: 450199) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2016, 31(3). -103 - 106