

# 皂化废渣生产绿色高纯轻质碳酸钙 新技术现状及展望

颜鑫<sup>1,2\*</sup>, 颜璞杰<sup>3</sup>, 李志敏<sup>1</sup>

(1. 湖南化工职业技术学院化学工程学院, 湖南 株洲 412004;  
2. 湖南省无机高纯纳米粉体材料开发与应用工程研究中心, 湖南 株洲 412004;  
3. 湖南化工职业技术学院制药与生物工程学院, 湖南 株洲 412004)

**摘要:**以环氧氯丙烷(ECH)生产过程的皂化废渣和CO<sub>2</sub>为主要耗材,通过铵盐浸取反应、CO<sub>2</sub>碳化反应、煅烧反应等工艺步骤,可以得到绿色高纯轻质碳酸钙、绿色轻质MgO 2个高附加值产品,同时实现皂化废渣的资源化、无害化、减量化和CO<sub>2</sub>永久固定的目标。如果采用复合碳化新工艺还可得到纳米级高纯轻质碳酸钙。皂化废渣减量化的关键技术在于采用高比表面积氢氧化钙取代普通氢氧化钙来减少过剩系数,并严格控制其中镁、铁、铝、硅等元素含量,从源头上实现皂化废渣的减量化和降低生产成本的目标。在双碳新时代,这种兼具环境效益、社会效益和经济效益的循环经济项目新技术值得重视与推广。

**关键词:**环氧氯丙烷(ECH);皂化废渣;绿色高纯轻质碳酸钙;绿色轻质MgO;固碳;高比表面积氢氧化钙

中图分类号:X783

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2025)12-0224-05

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2025.12.039

## Current status and prospects of new technology for producing green high-purity light calcium carbonate from saponification waste residue

YAN Xin<sup>1,2\*</sup>, YAN Huang-jie<sup>3</sup>, LI Zi-min<sup>1</sup>

(1. School of Chemical Engineering, Hunan Chemical Vocational Technology College, Zhuzhou 412004, China;  
2. Hunan Provincial Engineering Research Center for Development and Application of Inorganic High-Purity Nanopowder Materials, Zhuzhou 412004, China; 3. School of Pharmaceutical and Bioengineering, Hunan Chemical Vocational Technology College, Zhuzhou 412004, China)

**Abstract:** Taking the saponification waste residue from the epichlorohydrin (ECH) production process and CO<sub>2</sub> as the main raw materials, green high-purity light calcium carbonate and green light MgO can be obtained through the processes such as ammonium salt leaching reaction, CO<sub>2</sub> carbonation reaction, and calcination reaction. The re-utilization, harmless treatment, and reduction of the saponification waste residue are therefore achieved, and the permanent fixation of CO<sub>2</sub> can be realized. If a novel composite carbonization process is adopted, nano-scale high-purity light calcium carbonate can also be obtained. The key technology for reducing the amount of saponification waste residue lies in using calcium hydroxide with a high specific surface area to replace ordinary calcium hydroxide to reduce the excess coefficient, and strictly controlling the content of elements such as magnesium, iron, aluminum, and silicon in residue, thereby achieving the goals that reduces the amount of saponification waste residue and lowers production cost from the source. In the new era of "carbon dioxide emission peaking and carbon neutrality", this circular economy project new technology that combines environmental benefits, social benefits, and economic benefits deserves attention and promotion.

**Key words:** epichlorohydrin; saponification waste residue; green high-purity light calcium carbonate; green light MgO; carbon fixation; calcium hydroxide with high specific surface area

目前国内环氧氯丙烷的工业生产方法主要有甘油法、丙烯高温氯化法、醋酸丙烯酯法,其中甘油法超过半壁江山,丙烯高温氯化法次之,醋酸丙烯酯法最少。不管是哪一种环氧氯丙烷生产工艺,都存在中间产物二氯丙醇需要经过皂化反应才能生成环氧氯丙烷,而皂化剂可以是液体烧碱和氢氧化钙,由于氢氧化钙的成本远低于烧碱而得到广泛应用。但采用氢氧化钙进行皂化反应将产生废渣,废渣数量多少和成分主要取决于氢氧化钙中钙含量大小、化学活性高低及其过剩系数<sup>[1]</sup>。

皂化反应后浆液的主要成分有氯化钙、氢氧化钙、少量碳酸钙、氧化铁、氧化铝、氧化硅等,以及微量二氯丙醇、环氧氯丙烷等有机物,具有成分复杂、白度不高、碱性强等特点。皂化浆液通常经板框压滤固液分离为废渣和母液。衡阳建滔实业有限公司(简称衡阳建滔公司)产生的皂化废渣滤膏呈浅黄色块状固体,需要委托环保公司进行付费处理,价格约为50元/t,增加企业成本约150万元。皂化母液大部分循环用于配制石灰乳,小部分排入采卤水形成的废井,对环境危害较大<sup>[1]</sup>。在“双碳”新时代,

收稿日期:2025-03-11;修回日期:2025-09-23

作者简介:颜鑫(1967-),男,硕士,教授,长期从事纳米碳酸钙生产技术和钙基固废综合利用研究工作,通讯联系人, hnhgyanxin@126.com。

对皂化废渣进行无害化、减量化、资源化处理成为现实而迫切的需求。

## 1 皂化废渣生产高纯 PCC 原理

### 1.1 皂化废渣的成分

衡阳建滔公司的环氧氯丙烷系丙烯高温氯化法生产工艺,其皂化废渣组成如表 1 所示。

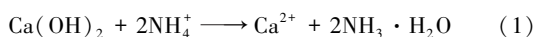
	水分	氢氧化钙	氢氧化镁	氯化钙	碳酸钙	其他不溶性残渣	合计
湿基	33	44.0	13.0	0.7	8.0	1.3	100
干基	0	65.7	19.4	1.0	11.9	2.0	100

可见,皂化废渣的成分以  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  为主,含镁量较高,反映出所用氢氧化钙的活性较差、过剩系数大,系高镁型氢氧化钙废渣<sup>[2]</sup>。干基废渣中  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  和  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  二者之和在 85% 以上,pH 达 12 以上,腐蚀性较强。衡阳建滔公司年产 6 万 t 环氧氯丙烷,理论上需消耗  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  2.4 万 t,实际需要消耗普通氢氧化钙(有效成分为 85%)约 4.5 万 t(干基),表观过剩系数达 87.5%, $\text{Ca}(\text{OH})_2$  过剩系数为 60%,一年可产生约 3.1 万 t 湿基废渣或 2.2 万 t 干基废渣。

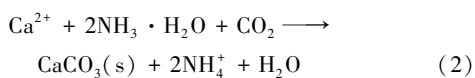
### 1.2 皂化废渣生产高纯 PCC 原理

对于高镁型  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  废渣,需同时回收钙元素和镁元素,基本工艺过程为:铵盐浸取、过滤洗涤、滤液  $\text{CO}_2$  碳化反应、滤渣  $\text{CO}_2$  碳化反应、蒸发煅烧等工艺步骤实现分离<sup>[1-2]</sup>。由于经铵盐浸取、过滤洗涤后得到的滤液是无色、澄清、透明的钙盐氨水溶液,滤液碳化后将得到高纯轻质碳酸钙(亦称沉淀碳酸钙,简称 PCC),PCC 质量分数可达 99.5%,白度可达 95 以上,明显高于常规 PCC 的纯度和白度<sup>[2-3]</sup>。滤渣经  $\text{CO}_2$  碳化反应、过滤洗涤和煅烧分解反应得到轻质  $\text{MgO}$  和少量不溶性中性残渣<sup>[2]</sup>。由于 PCC 和  $\text{MgO}$  源于皂化废渣,又可称之为绿色 PCC 和绿色  $\text{MgO}$ <sup>[4-5]</sup>。化学原理如下。

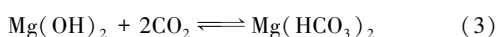
浸取反应:



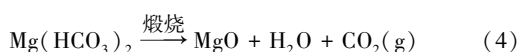
滤液碳化:



滤渣碳化:



煅烧反应:



考虑到滤渣碳化速度慢,效率低,如果镁元素含量较低,则只需回收钙元素,少量镁元素可归纳于不溶性残渣中,化学原理与  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  型废渣回收原理相同<sup>[2-3]</sup>,仅需采用浸取反应和滤液碳化 2 个步骤,只得到绿色高纯 PCC 和不溶性中性残渣。 $\text{Ca}(\text{OH})_2$  型废渣经铵盐浸取反应并过滤后得到无色透明澄清的  $\text{Ca}^{2+}$  氨水溶液,不同于传统生产工艺制备 PCC,只要经过适当洗涤除掉  $\text{Cl}^-$ ,就可以得到高纯 PCC<sup>[2-3]</sup>。如果采用复合碳化新工艺还可得到高纯纳米级 PCC<sup>[4-7]</sup>。

## 2 皂化废渣生产高纯 PCC 工艺流程

将高镁型  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  废渣进行充分搅拌、铵盐浸取、过滤分离,滤液经  $\text{CO}_2$  碳化反应,再经过滤、洗涤、干燥后,最终得到高纯 PCC,滤液主要成分是铵盐,可循环用于浸取反应。浸取后的滤渣加适量清水并充分搅拌后通入  $\text{CO}_2$  进行滤渣碳化反应,再过滤分离,滤渣为不溶性中性残渣<sup>[1-2]</sup>,滤液为无色澄清透明的碳酸氢镁溶液,碳酸氢镁溶液可以直接加热蒸发得到  $\text{Mg}_2(\text{OH})_2\text{CO}_3$  或  $\text{MgCO}_3$ ,或煅烧得到绿色轻质  $\text{MgO}$ ,煅烧产生的高浓度  $\text{CO}_2$  循环用于碳化反应,如图 1 所示。

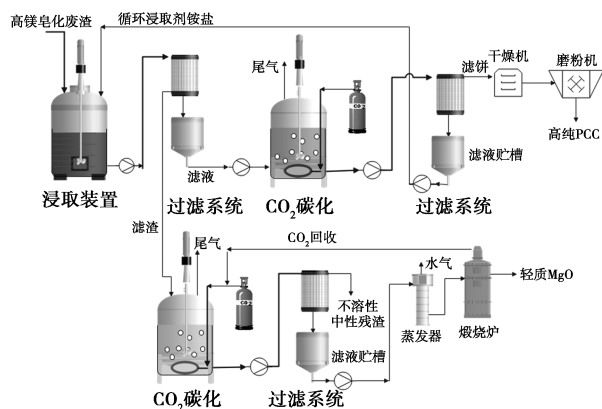


图 1 高镁皂化废渣生产高纯 PCC 和  $\text{MgO}$  工艺流程

将有害皂化废渣分离回收为高纯 PCC、 $\text{MgO}$  等化工新型粉体材料和不溶性中性残渣,使皂化废渣得到充分综合利用,同时固定大量  $\text{CO}_2$ ,实现以废治废目标。

对于低镁的普通型  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  废渣,可以参照电石渣生产轻质碳酸钙的工艺流程<sup>[2-6]</sup>。将皂化废渣转入铵盐浸取装置,进行充分搅拌、铵盐浸取、过滤分离;所得浸取液进行  $\text{CO}_2$  碳化反应,再经过滤、洗涤、干燥后得到绿色高纯 PCC,滤液循环用于浸取

反应,如图 2 所示。

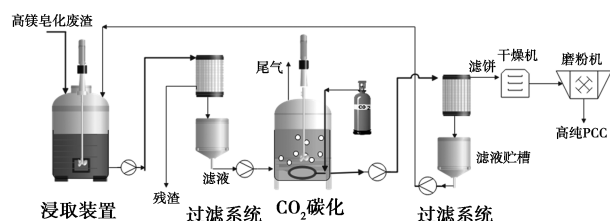


图 2 皂化废渣生产高纯 PCC 工艺流程

可见,皂化废渣如果按普通型  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  废渣进行处理,则原理简单、工艺步骤少、工业生产成本低。如果按高镁型  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  废渣进行处理,要兼顾钙镁 2 种元素的分离与回收,该工艺投资成本较高,工艺较复杂,但轻质  $\text{MgO}$  的附加值高。

### 3 皂化废渣减量化关键技术

#### 3.1 采用高比表面积氢氧化钙显著减少过剩系数

为了提高皂化反应的速度、提高二氯丙醇转化率和环氧氯丙烷收率,普通氢氧化钙用量必须超过理论用量的 40%~60%。普通氢氧化钙比表面积仅为  $15\sim 18\text{ m}^2/\text{g}$ ,粒度为微米级,化学活性较差;而高比表面积氢氧化钙比表面积达  $30\sim 45\text{ m}^2/\text{g}$ ,属于纳米级氢氧化钙,化学活性良好。因此,采用高比表面积氢氧化钙,过剩系数可减少至 10%,可从源头上减少 80% 以上的废渣数量。普通氢氧化钙和高比表面积氢氧化钙 1 年所产废渣数量对比情况如表 2 所示。

表 2 普通氢氧化钙和高比表氢氧化钙一年所产废渣数量对比

氢氧化钙类型	普通氢氧化钙	高比表氢氧化钙
过剩系数/%	60	10
$\text{Ca}(\text{OH})_2/\text{万 t}$	1.44	0.24
$\text{CaCO}_3/\text{万 t}$	0.68	0.14
$\text{Mg}(\text{OH})_2/\text{万 t}$	0.68	0.14
$\text{SiO}_2/\text{万 t}$	0.68	0.14
$\text{Al}_2\text{O}_3/\text{万 t}$	0.68	0.14
$\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{万 t}$	0.68	0.14
废渣总量(干基)/万 t	2.12	0.38

皂化废渣的成分来源主要有 2 部分,一是皂化反应中  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  完全反应带来的不溶性残渣,二是过量氢氧化钙带来的。为了简便起见, $\text{CaCO}_3$ 、 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 、 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$  等杂质均视为不溶性

残渣,在此没有必要分别检测其各自的准确含量; $\text{Ca}(\text{OH})_2$  为微溶性粉末,在过剩部分中也没有考虑其溶解量。

普通氢氧化钙中有效成分含量为 85%、过剩系数为 60% 时,皂化废渣  $X$  数量计算如下:

$$X_{\text{普}} = (24/0.85 - 24) + (24/0.85) \times 60\% \approx 2.12 \text{ 万 t/a}$$

可见,普通氢氧化钙产生的皂化废渣(干基)为 2.12 万 t/a,如果折算为含水量为 30% 的滤饼,则达 3.03 万 t/a,这与表 1 的实际生产数据相当吻合。付费处理单价为 50 元/t 时,成本达 151 万元/a。

高比表面积氢氧化钙中有效成分为 95%、过剩系数为 10% 时,皂化废渣数量计算如下:

$$X_{\text{高}} = (24/0.95 - 24) + (24/0.95) \times 10\% \approx 0.38 \text{ kt/a}$$

可见,高比表面积氢氧化钙产生的皂化废渣(干基)为 0.38 万 t/a,仅为普通氢氧化钙废渣数量的 18%。如果折算为含水量为 30% 的滤饼,则达 0.54 万 t/a,付费处理单价为 50 元/t 时,成本仅为 27 万元/a。

普通氢氧化钙和高比表面积氢氧化钙的售价分别为 600、1 000 元/t 时,二者的总成本  $Y$  分别为:

$$Y_{\text{普}} = (2.4/0.85) \times (1 + 60\%) \times 600 + 151 \approx 2861.6 \text{ 万元/a}$$

$$Y_{\text{高}} = (2.4/0.95) \times (1 + 10\%) \times 1000 + 27 \approx 2806 \text{ 万元/a}$$

可见,尽管高比表面积氢氧化钙价格比常规产品要高出约 66.7%,由于显著减少了过剩系数和废渣数量,总成本反而有所减少。

#### 3.2 严格控制氢氧化钙中镁、铁、铝、硅及碳酸钙含量,从源头上减少废渣数量

(1) 要求氢氧化钙中镁含量  $< 1\%$ ,简化废渣回收工艺。皂化废渣中镁来源于氢氧化钙中,这取决于不同地方石灰石资源中镁含量高低,氢氧化镁难溶于水,并不参与皂化反应。因此,氢氧化钙中镁含量越高,其用量和过剩系数都越高,回收工艺越复杂,生产成本越高。在选购氢氧化钙时不能只看表面的价格,还需要特别关注镁含量高低,一般要求镁含量低于 1%,这与常规纳米钙生产对原料石灰石中镁元素含量的要求是相同的<sup>[8]</sup>。

(2) 控制铁、铝、硅三者含量之和  $\leq 3\%$ ,从源头上减少残渣数量。氢氧化钙中其他的不溶性残渣主要是氧化铁、氧化铝和氧化硅,三者均来源于石灰石,是皂化废渣的重要成分。因此,石灰石中三者含量之和越少越好,其含量之和一般规定不超过 3%,

这点与常规纳米碳酸钙生产对原料石灰石的要求是相同的<sup>[8]</sup>。

(3)采用新鲜氢氧化钙来控制碳酸钙含量,保证反应活性。皂化废渣中碳酸钙含量多少主要来源于2个方面。一是氢氧化钙干法生产工艺中会带入少量未充分锻烧的原生碳酸钙,但锻烧越充分,氧化钙的化学活性越差,因此,石灰石的锻烧不是越充分越好,这部分碳酸钙难以完全避免<sup>[8]</sup>,只能通过改进消化工艺来尽量减少这部分原生碳酸钙的含量。二是取决于氢氧化钙存放时间的长短,存放期间 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 会缓慢吸收空气中 $\text{CO}_2$ 而生成碳酸钙,从而降低有效 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含量和反应活性<sup>[8]</sup>。因此,必须采用新鲜生石灰制备的新鲜氢氧化钙。

## 4 新工艺经济效益展望

### 4.1 新工艺产品分析

(1)纳米级高纯PCC。由于采用了铵盐浸取工艺,使皂化废渣中的氧化铁、氧化铝和氧化硅等不溶性杂质经过滤分离,其滤液为无色澄清透明的溶液,从而使出身于皂化废渣的PCC中 $\text{CaCO}_3$ 的含量可达99.5%以上,明显高于传统方法生产的PCC,且其中镉、砷、铅、汞等有害元素的含量远低于食品级PCC的国家标准或无法检出<sup>[1,4]</sup>。如果在碳化过程中采用复合碳化,巧妙控制好产品粒径大小达到纳米级范围,从而可得到纳米级高纯PCC<sup>[4-6]</sup>,这种纳米级高纯PCC可用于食品、医药、电子芯片领域,其价值将是普通PCC价格的5~10倍,可预期其经济效益、环境效益和社会效益是相当可观的。

(2)不溶性中性残渣。不溶性中性残渣主要含碳酸钙、三氧化二铁、氧化镁、二氧化硅等,可用作水泥或复混肥原料<sup>[1-2]</sup>,略有收益。碳化反应后的滤液主要成分是铵盐溶液,循环用于浸取反应,新工艺实现了变废为宝的循环经济目标。

(3)轻质MgO。采用高镁氢氧化钙作为皂化剂,则可附产轻质MgO,MgO可用作耐火材料、锅炉和管道的保温材料,以及食品、药品、化妆品、橡胶、墨水等的添加剂,附加值明显高于PCC。

### 4.2 经济效益展望

以衡阳建滔公司6万t环氧氯丙烷皂化废渣项目为例,计算如下。

(1)1年产生湿基废渣约为3万t,付费处理成本约为50元/t,处理费用为150万元/a。

(2)按表1中湿基废渣氢氧化钙和氢氧化镁含量分别按44%、13%计算,二者的数量分别为1.32、

0.39万t;如果二者的收率都按95%计算,则1年可实际生产高纯PCC、MgO分别约为1.69、0.25万t。二者的售价分别为1000、95000元/t计算,则产值分别为1690万、23750万元,二者合计达25440万元。

(3)氢氧化钙和氢氧化镁碳化所吸收固定的 $\text{CO}_2$ 分别为0.7848、0.1479万t,二者合计为0.9327万t。如果按2024年碳交易均价100元计算,则减碳价值约93.2万元。

(4)按表1中湿基废渣中碳酸钙和其他不溶性中性残渣二者含量分别为8%、1.3%,二者合计9.3%,所得不溶性中性残渣总数为0.28万t,在此暂时不考虑其回收价值。

以上4项合计产生的效益为:25440+150+93.2≈25683万元/a。

生产成本基本由设备折旧、人工工资、水电费、融资利息等组成。考虑到Cl<sup>-</sup>对碳钢设备的腐蚀性较强,需要采用316或205不锈钢或其他复合材料作为反应器和贮槽材料,据保守估算该皂化废渣综合利用项目的估计设备投资为2000万元以内,总投资可控制在3000万元以内,建设周期为6个月左右,年纯利润按产值的30%估算为7705万元,投产不到5个月就可收回全部投资。

(5)如果采用表2中的高比表面积氢氧化钙,不考虑镁的回收问题。当废渣中 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 回收率为95%时,回收纳米级高纯PCC数量为0.308万t,固定 $\text{CO}_2$ 为0.135万t,不溶性中性残渣为0.14万t。为了简便起见,在此仅考虑纳米级高纯PCC的产值,其单价为3000元/t时,新增产值仅为924万元,新增纯利润按产值的30%计算约为277万元。由于高比表面积氢氧化钙的废渣数量仅为普通氢氧化钙的18%,因此处理废渣的工艺设备投资金额估计约为900万元,投产不到4个月就可收回全部投资。

皂化废渣综合利用新技术,工艺不复杂,投资不大,除了废渣和 $\text{CO}_2$ 2种耗材之外,铵盐循环利用,就可以将皂化废渣和 $\text{CO}_2$ 实现资源化、无害化、减量化、低碳化。残液属于含盐量低、有机物微量的废水,大部分可循环用于配制氢氧化钙浆液,小部分采用二级生化处理即可达标排放。

## 5 结语

(1)环氧氯丙烷皂化废渣生产高纯PCC新技术并不复杂,投资不大,估计投产4个月就可收回全部

投资,经济效益十分可观。以皂化废渣和  $\text{CO}_2$  为主要耗材,铵盐循环利用,就可以得到高纯 PCC 和轻质  $\text{MgO}$ ,同时实现皂化废渣的资源化、无害化、减量化,减碳化,可节省石灰石矿山的开采,保护生态环境,并达到“一箭三雕”的效果。

(2) 采用高镁的普通氢氧化钙进行皂化反应时,过剩系数大,产生的废渣数量多,镁元素需要回收,回收工艺复杂,投资较大,但回收轻质氧化镁的产值也很大。采用纯度较高的高比表面积氢氧化钙时,过剩系数小,产生的废渣数量少,镁元素无需回收,回收工艺简单,投资小。

(3) 皂化废渣减量化的关键技术在于采用高比表面积氢氧化钙取代普通氢氧化钙来减少皂化反应的过剩系数,并严格控制其中镁、铁、铝、硅等元素含量,从源头上减少皂化废渣数量,达到降低皂化废渣处理成本和投资的目的。

(4) 在“双碳”新时代,这类兼具环境效益、社会

效益和经济效益的循环经济项目,值得重视与推广,对其他行业的皂化废渣也具有借鉴意义。

### 参考文献

- [1] 本刊.一种环氧氯丙烷皂化废浆综合利用新技术[J].无机盐工业,2020,52(12):118.
- [2] 颜鑫,魏义兰.含钙镁废渣综合利用的现状 & 展望[J].无机盐工业,2022,54(1):7-11.
- [3] 颜鑫,刘海路,马媛媛,等.以电石渣为原料生产食品级轻质碳酸钙的绿色新工艺[J].现代化工,2019,39(2):199-201.
- [4] 颜鑫,刘海路,刘保林,等.绿色纳米碳酸钙生产关键技术与机理研究[J].无机盐工业,2025,57(1):71-76.
- [5] 颜鑫,李斌,刘保林,等.电石渣生产绿色微细轻质(纳米)碳酸钙的新工艺研究[J].纸和造纸,2024,43(1):18-21.
- [6] 颜鑫,刘保林,刘奕,等.一种对置式偶数喷嘴复合碳化生产纳米碳酸钙的装置及方法:CN 2023103733179[P].2023-07-05.
- [7] 颜鑫,卢云峰,马媛媛,等.氯化钙-氨水体系生产纳米碳酸钙的复合碳化机理研究[J].无机盐工业,2019,51(7):77-80.
- [8] 颜鑫,卢云峰.轻质系列碳酸钙关键技术[M].北京:化学工业出版社,2016:38.■
- [9] 颜鑫,卢云峰.轻质系列碳酸钙关键技术[M].北京:化学工业出版社,2016:38.■
- [10] 贺鹏,郑伯红,龚凯.醇胺法碳捕集再生能耗影响因素研究[J].现代化工,2016,36(9):171-174.
- [11] 张金星,张祥,黄志甲,等.基于响应曲面法的高炉煤气  $\text{CO}_2$  吸收工艺参数优化[J].过程工程学报,2021,21(8):985-992.
- [12] Jung W, Lee J. Kinetic modeling of Polyamine-based Water-Lean solvents for  $\text{CO}_2$  capture; Reverse temperature dependence of the overall mass transfer coefficient[J]. Chemical Engineering Science, 2022,249:117355.
- [13] 陆诗建,高丽娟,王家凤,等.烟气  $\text{CO}_2$  捕集热能梯级利用节能工艺耦合优化[J].化工进展,2020,39(2):728-737.
- [14] 郭李恒,丁玉栋,廖强,等.基于蒸汽压缩-分流的电厂烟气  $\text{CO}_2$  捕集过程模拟优化[J].动力工程学报,2021,41(7):565-571.
- [15] 林海周,裴爱国,方梦祥.燃煤电厂烟气二氧化碳胺法捕集工艺改进研究进展[J].化工进展,2018,37(12):4874-4886.
- [16] 赵红涛,王树民.燃煤烟气胺法脱碳 MVR 再生系统关键参数及能耗分析[J].化工进展,2020,39(S1):256-262.
- [17] Li K, Cousins A, Yu H, et al. Systematic study of aqueous monoethanolamine-based  $\text{CO}_2$  capture process: Model development and process improvement[J]. Energy Science & Engineering, 2016, 4(1):23-39.
- [18] Yu J, Wang S. Development of a novel process for aqueous ammonia based  $\text{CO}_2$  capture[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2015, 39:129-138.
- [19] Liu W, Huang Y, Zhang X J, et al. Steam-assisted temperature swing adsorption for carbon capture integrated with heat pump[J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2023, 49:103749.
- [20] 李青,余云松,姜钧,等.基于热泵技术的化学吸收法二氧化碳捕集系统[J].高校化学工程学报,2010,24(1):29-34.
- [21] 吴锋明,李帅旗,何世辉,等.大温升蒸汽压缩式热泵系统优化研究进展[J].化工进展,2024,43(3):1178-1198.
- [22] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [23] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [24] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [25] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [26] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [27] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [28] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [29] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [30] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [31] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [32] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [33] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [34] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [35] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [36] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [37] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [38] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [39] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [40] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [41] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [42] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [43] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [44] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [45] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [46] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [47] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [48] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [49] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [50] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [51] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [52] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [53] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [54] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [55] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [56] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [57] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [58] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [59] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [60] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [61] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [62] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [63] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [64] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [65] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [66] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [67] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [68] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [69] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [70] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [71] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [72] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [73] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [74] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [75] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [76] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [77] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [78] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [79] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [80] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [81] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [82] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [83] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [84] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [85] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [86] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [87] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [88] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [89] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [90] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [91] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [92] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [93] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [94] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [95] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [96] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [97] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [98] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [99] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [100] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■

(上接第 218 页)

- [10] 贺鹏,郑伯红,龚凯.醇胺法碳捕集再生能耗影响因素研究[J].现代化工,2016,36(9):171-174.
- [11] 张金星,张祥,黄志甲,等.基于响应曲面法的高炉煤气  $\text{CO}_2$  吸收工艺参数优化[J].过程工程学报,2021,21(8):985-992.
- [12] Jung W, Lee J. Kinetic modeling of Polyamine-based Water-Lean solvents for  $\text{CO}_2$  capture; Reverse temperature dependence of the overall mass transfer coefficient[J]. Chemical Engineering Science, 2022,249:117355.
- [13] 陆诗建,高丽娟,王家凤,等.烟气  $\text{CO}_2$  捕集热能梯级利用节能工艺耦合优化[J].化工进展,2020,39(2):728-737.
- [14] 郭李恒,丁玉栋,廖强,等.基于蒸汽压缩-分流的电厂烟气  $\text{CO}_2$  捕集过程模拟优化[J].动力工程学报,2021,41(7):565-571.
- [15] 林海周,裴爱国,方梦祥.燃煤电厂烟气二氧化碳胺法捕集工艺改进研究进展[J].化工进展,2018,37(12):4874-4886.
- [16] 赵红涛,王树民.燃煤烟气胺法脱碳 MVR 再生系统关键参数及

(上接第 223 页)

- [11] 李守磊,徐国鹏,程建朝,等.超临界锅炉省煤器旁路复合热水再循环提升 SCR 入口烟温技术应用研究[J].山东电力技术,2022,49(5):76-80.
- [12] 王憧北.应用热水再循环技术实现宽负荷脱硝[J].锅炉技术,2018,49(4):71-75.
- [13] 徐嘉叶,朱晓磊,李剑宁,等.全负荷脱硝技术的应用与分析[J].动力工程学报,2020,40(7):580-585,604.
- [14] 蒋蓬勃.超超临界深度调峰机组锅炉全时段脱硝技术研究[J].电站系统工程,2023,39(1):77-80,84.
- [15] 邹祥波,席剑飞,伍宇鹏.省煤器分级在提升 700 MW 燃煤机组 SCR 脱硝系统投运率的应用研究与实践[J].锅炉技术,2020,51(1):65-69.
- [16] 靖长财.锅炉省煤器分级改造技术分析和效果[J].锅炉技术,

2016,47(1):70-73.

- [17] 龚明焯.锅炉省煤器分级改造技术研究[J].科学技术创新,2020,(2):186-187.
- [18] 关键,项群扬,沈利,等.省煤器给水旁路提升 SCR 进口烟温应用研究[J].中国电力,2017,50(9):116-120,128.
- [19] Aguilar-Romero M, Camposeco R, Castillo S, et al. Acidity, surface species, and catalytic activity study on  $\text{V}_2\text{O}_5\text{-WO}_3/\text{TiO}_2$  nanotube catalysts for selective NO reduction by  $\text{NH}_3$ [J]. Fuel, 2017, 198:123-133.
- [20] Chai Y, Zhang G, He H, et al. Theoretical study of the catalytic activity and anti- $\text{SO}_2$  poisoning of a  $\text{MoO}_3/\text{V}_2\text{O}_5$  selective catalytic reduction catalyst[J]. ACS Omega, 2020, 5(42):26978-26985.
- [21] 肖志前,吉硕.低负荷下给水温度对 SCR 及锅炉热效率的影响[J].广东电力,2015,28(9):22-27.■