

## 双碳战略下百年纯碱发展机遇与挑战

马渊<sup>a</sup>, 雷和波<sup>b</sup>, 刘程琳<sup>a</sup>, 于建国<sup>\*,a</sup><sup>(a)</sup> 华东理工大学国家盐湖资源综合利用工程技术研究中心, 上海 200237)<sup>(b)</sup> 江西晶昊盐化有限公司, 江西, 樟树 331200)

**摘要:** 2020年, 中国政府提出了碳达峰和碳中和的双碳战略, 以应对世界气候变化。纯碱行业作为基础原材料行业, 碳排放源头较多, 包括供热供电系统的碳排放及石灰窑煅烧产生的温室效应, 减碳降排任务较重。回顾了纯碱工业百年发展历程, 分析了目前纯碱行业碳减排状况及存在问题, 展望了双碳战略下纯碱行业面临的机遇和挑战。

**关键词:** 纯碱; 百年发展历程; 碳减排; 机遇与挑战

**中图分类号:** O641.4      **文献标志码:** A

### Opportunities and Challenges for Century-Old Soda ash Industry under the Dual Carbon Strategy

Ma Yuan<sup>a</sup>, Lei Hebo<sup>b</sup>, Liu Chenglin<sup>a</sup>, Yu Jianguo<sup>\*,a</sup><sup>(a)</sup> School of Chemical Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200273, China)<sup>(b)</sup> Jiangxi Jinghao Salt Chemical Company Limited, Zhangshu, Jiangxi 331200, China)

**Abstract:** In 2020, Chinese government proposed a dual carbon strategy of carbon peak and carbon neutrality to cope with world climate change. As a basic raw material industry, the soda ash industry has many sources of carbon emissions, including heating and power supply systems and the greenhouse effect generated by lime kiln calcination, thus the task of carbon and emission reduction is heavy. This article reviews 100-year development history of soda ash industry, analyzes the current carbon emission reduction status and existing problems in soda ash industry, and looks forward to the opportunities and challenges faced by soda ash industry under the dual carbon strategy.

**Key words:** soda ash; 100 years of development; carbon emission reduction; opportunities and challenges

随着世界人口的持续增长和工业化进程的飞速发展, 人类活动对生态环境造成的压力不断增大, 全球变暖已成为国际社会广泛关注和亟需解决的问题。温室效应是致使全球变暖的主因。温室效应是指大气中二氧化碳(CO<sub>2</sub>)、甲烷(CH<sub>4</sub>)、一氧化二氮(N<sub>2</sub>O)和氟化气体(HFCs、PFCs、SF<sub>6</sub>、NF<sub>3</sub>)等温室气体吸收辐射能量, 导致地球表面温度升高的效应。其中CO<sub>2</sub>是最主要的温室气体, 占温室气体总排放量的80%左右; 其次是CH<sub>4</sub>, 占温室气体总排放量

的10%左右<sup>[1]</sup>。国际环境保护组织协会(IEPOA)预测: 世界各国如不采取有效控制措施, 预计到2060年CO<sub>2</sub>排放量将达到701亿t<sup>[2]</sup>。国际政府间气候变化委员会(IPCC)估计, 到2100年全球平均温度上升1.9℃, 同时将造成海平面平均高度上升38cm<sup>[3]</sup>。由此造成的恶劣气候变化、环境危机不可预估。

2021年, 我国CO<sub>2</sub>排放量超过119亿t, 占全球总量的33%<sup>[4]</sup>, 双碳战略的提出对我国和世界都具

收稿日期: 2023-04-13; 修回日期: 2023-05-05; 录用日期: 2023-07-05

\* E-mail: jgyu@ecust.edu.cn

有重大意义。

化工行业是经济社会发展的支柱产业,同时也是耗能和温室气体排放大户。国际能源署(IEA)数据显示,2020年,全球化工行业的CO<sub>2</sub>排放量为11.60亿t,占工业总排放量13.27%<sup>[5]</sup>。与能源、运输等其他行业相比,化工行业的碳减排更具有挑战性,因为其不仅涉及发电和供能的碳排放,还涉及化工过程中的碳排放。

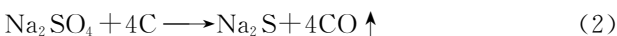
纯碱作为化工行业重点高耗能行业之一,碳减排潜力较大,其2020年排放量约为0.2亿t<sup>[6]</sup>。我国纯碱产量约占世界总产量的一半,要实现我国双碳战略的愿景,纯碱行业碳减排不可或缺,但目前对于纯碱行业碳减排的研究和探索还相对较少。

纯碱的主要成分为碳酸钠(Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>),是诸多工业的基础原料,被广泛应用于人们的日常生活以及化工、轻工、冶金、纺织、建材等行业,在国民经济中占有十分重要的地位。纯碱又分轻质纯碱(轻碱)和重质纯碱(重碱),轻碱由碳酸氢钠直接煅烧而得,不含有结晶水,密度为500~600 kg/m<sup>3</sup>,呈白色结晶粉末状,一般用于日用玻璃、泡花碱、小苏打、洗涤剂、氧化铝、碳酸锂、味精等领域;重碱由轻碱水合而成,含有一个结晶水,密度为1 000~1 200 kg/m<sup>3</sup>,呈白色细小颗粒状,主要用于平板玻璃和光伏玻璃领域<sup>[7]</sup>。玻璃生产是纯碱最主要的需求领域,需求占比达50%以上,其中平板玻璃需求最大,主要用于建筑建材领域,每吨玻璃消耗0.2 t纯碱<sup>[8]</sup>。若能实现纯碱行业碳的净零排放,对于纯碱行业的绿色可持续发展将具有重要意义。

## 1 纯碱百年发展历程

### 1.1 路布兰制碱法——世界化学工业的开端

18世纪下半叶,路布兰研发出以食盐、硫酸、木炭和石灰石为原料的路布兰制碱法,反应式(1)~式(3)所示。具体工艺流程为:食盐与硫酸反应,加热后分离HCl气体,得到硫酸钠;用木炭将硫酸钠还原为硫化钠,之后再与石灰石反应,即得到碳酸钠。



路布兰制碱法为人类历史上第一个大规模化学制碱的方法,一直延续到1920—1930年,但因该法生产的纯碱纯度低(质量分数为85%~92%)、质量差、作业环境恶劣、卫生无法保障等,当时称之为黑

灰,且生产过程均为固相操作,难以连续作业,生产成本高,副产盐酸腐蚀性强,必须外销或另作处理等,后被索尔维法完全取代。

### 1.2 索尔维法——世界纯碱工业的成就者

1860年,索尔维发现将CO<sub>2</sub>通入氨盐水中可得到碳酸钠,由此研发出索尔维制碱法,即氨碱法,并获得专利。具体工艺流程为:先将氨气通入饱和食盐水中得到氨盐水,再通入CO<sub>2</sub>碳酸化,生成NaHCO<sub>3</sub>沉淀和NH<sub>4</sub>Cl溶液,NaHCO<sub>3</sub>沉淀经过滤、洗涤、干燥后,煅烧即得纯碱产品,为进一步节约氨原料,实现氨气的循环使用,将含有氨的滤液与石灰乳混合加热、蒸馏,回收得到氨气。经过蒸馏去除氨气的原液,被称为蒸氨废液,一般直接排弃。反应工艺过程如图1所示。

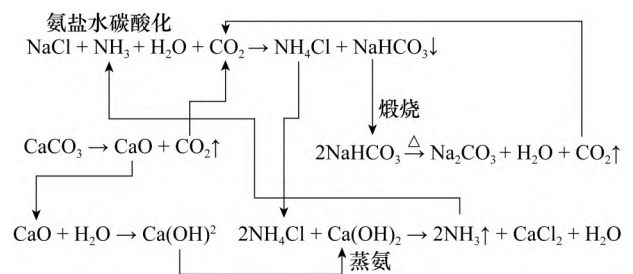


图1 氨碱法化学反应过程

氨碱法具有成本低廉、产品纯净、流程简单、适于大规模生产的优点。

尽管如此,氨碱法仍存在不足之处:一是原盐利用率不高,只有72%~75%;二是每生产1 t纯碱需排放11 m<sup>3</sup>的氯化钙废液和未反应的氯化钠的蒸氨废液废渣,占用大量土地,污染江海。

### 1.3 侯氏制碱法——中国纯碱工业的奠基者

19世纪90年代初,我国开始采用氨碱法制碱。历时三年多,发明了将合成氨厂和纯碱厂联合配套生产的联碱法<sup>[7]</sup>。

联碱法制碱反应如图2所示。由合成氨厂提供CO<sub>2</sub>和NH<sub>3</sub>,无需通过蒸氨将氨气循环使用,

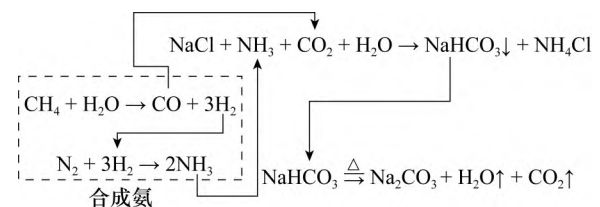


图2 联碱法化学反应过程

$\text{NH}_4\text{Cl}$  作为产品出售,具体操作是向过滤掉  $\text{NaHCO}_3$  后的母液中添加细粉状  $\text{NaCl}$ ,通入氨气,由于  $\text{NH}_4\text{Cl}$  在  $\text{NaCl}$  溶液中的溶解度比在水中的小很多,故可以析出  $\text{NH}_4\text{Cl}$  晶体,进一步处理即得到  $\text{NH}_4\text{Cl}$  产品。同时,在滤出  $\text{NH}_4\text{Cl}$  沉淀的滤液中, $\text{NaCl}$  基本达到饱和, $\text{NaCl}$  由此可以循环利用。

联碱法把原盐利用率从 75% 提高到 98%,很好地解决了氨碱法原盐利用率不高的问题,并且无废弃物排放。不足之处则是每生产 1 t 纯碱会副产 1 t 氯化铵,氯化铵可作为氮肥出售,但随着更高含氮量尿素的出现,市场受限,产能过剩。

侯德榜在《纯碱制造》<sup>[9]</sup>一书中,将氨碱法、联碱法制造纯碱的技术公诸于众,供世界所有制碱从业人员学习参考<sup>[10-14]</sup>。

## 2 纯碱行业的碳减排问题

纯碱行业是碳减排的重点行业之一,每吨纯碱的能耗是 160~490 kg 标煤<sup>[15]</sup>。纯碱生产过程中涉及的碳排放包括电厂发电供能造成的碳排放以及生产工艺内部产生的碳排放。纯碱行业要实现  $\text{CO}_2$  的净零排放,需将工艺内部的  $\text{CO}_2$  排放尽数转化。若纯碱厂自设有电厂,还需将电厂所排放的  $\text{CO}_2$  尽数转化,由此方可实现纯碱行业碳的净零排放。

### 2.1 氨碱厂碳排放

纯碱制造的三种方法中以氨碱法和联碱法的碳排放量居多,联碱法碳排放集中在合成氨部分,制碱部分碳排放较少。而氨碱厂因设有石灰窑、蒸氨塔等高耗能装置,碳排放量最多,亦预期碳减排量最多。

此外,氨碱厂还一直遗留着氯化钙废液难以处理的技术难题,如能综合处理氨碱厂的氯化钙废液及达到碳减排的目的,不失为一种最优解法。

目前,工业上已有的处理氯化钙废液的方式大致有三种:(1) 氨碱厂临海而建,修筑堤坝,将氨碱废液直接排弃在堤坝内,自然澄清,随着时间的推移,待清液各项指标达标后,清液入海,固体留在渣场,此种处理方法占用大量土地、破坏环境,现已明令禁止;(2) 氯化钙废液回注矿井,只适用于硫酸钠型矿井,氯化钙和硫酸钠反应生成硫酸钙沉积在矿藏底部,蒸氨废液中氯化钠得到再次利用,提高卤水中氯化钠含量,但此法生成硫酸钙会覆盖下方矿藏,且由于技术原因该部分硫酸钙无法得到资源化利用,且会使矿井中硝卤日益减少,最后甚至无硝可采;(3) 将氯化钙废液资源化利用,目前工业上已有发展的

是采用氯化钙废液制备工程土、水泥、红砖等建筑材料,制备的建筑材料功能优良,此外还用以制作钙基化肥。但由于蒸氨废液废渣中含有氯元素,导致制备的建筑材料或钙基化肥均具有一定限制。氯元素会使得工程土触变性大,容易风干粉化;使得水泥吸水性强,易潮解,易腐蚀钢筋;红砖上会产生泛霜现象;钙基化肥不适用于忌氯作物。为进一步提高蒸氨废液废渣资源化利用率,需对其进行脱氯处理,对此目前已有研究,但尚未工业化<sup>[16]</sup>。近些年,还有研究将氯化钙废液制为高强石膏<sup>[17]</sup>,将其资源化利用,避免了氯化钙废液的排放。

目前对于综合利用氯化钙废液和  $\text{CO}_2$  且不再产生新的含氯废液的研究很少,多数只研究到加入一种碱性助剂,如  $\text{NH}_3$ <sup>[18]</sup>、 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ <sup>[19]</sup> 等,矿化得到碳酸钙后就结束了,未对新产生的含氯废液做进一步处理,并未真正解决废液排放的问题。Li<sup>[20]</sup> 和 Dong 等<sup>[21]</sup> 采用油性 N-235 作萃取剂,以反应-萃取-结晶耦合的方式,将氯化钙中的  $\text{Cl}^-$  萃取到油相中,从而使得反应可以发生,得到碳酸钙沉淀和有机胺盐酸盐,然后采用热法解吸的方式再生有机胺,并副产  $\text{HCl}$ 。该法虽未实现工业化,但为综合利用  $\text{CaCl}_2$  废液和  $\text{CO}_2$ ,且不产生新的含氯废液提供了一条可行的思路。

### 2.2 氨碱-热电联产企业碳减排

部分纯碱厂设有热电厂,该热电厂燃煤后产生的烟道气通常经脱硫脱硝后直接排放,加剧温室效应。对于采用热电厂发电的纯碱园区,为实现碳的净零排放,应将该烟道气  $\text{CO}_2$  捕集充分利用。

这部分碳减排同电力行业的碳减排一致,捕集之后进一步封存利用, $\text{CO}_2$  捕集的方式有三种:燃烧前捕集、燃烧后捕集和富氧燃烧,其中以燃烧后捕集使用最为广泛。这方面的研究有很多<sup>[22-28]</sup>。

对于外输电力的纯碱园区,则不存在这方面碳减排的需要,只需解决纯碱生产内部导致的碳减排问题即可。

此外,随着双碳战略的不断推进,最终可再生能源终会取缔化石能源,热电厂在未来极有可能会被光伏发电、水电、风电等绿电所取代,在纯碱园区以可再生电力替代燃煤发电后,其碳排放量会大大减少。

### 2.3 氨碱工艺过程碳减排

#### 2.3.1 改进分离工艺降低能耗

许多研究对不断降低纯碱企业的能耗,节能降碳进行了研究,如采用膜分离技术替代盐水精制,减

少能耗和用水量;采用重碱加压过滤技术,降低重碱含水率,降低纯碱盐分等<sup>[14]</sup>。

### 2.3.2 工艺系统过程碳减排

在石灰窑煅烧石灰石时,为提供反应所需热量,需以焦炭作为燃料,以配焦比为7:100(质量比)计算,则每煅烧1 mol 石灰石,就会消耗0.5 mol 焦炭,由此算得石灰窑每煅烧1 mol 石灰石会产生1.5 mol CO<sub>2</sub>;在重碱煅烧的过程中亦是如此,会配有一定比例的焦炭用以提供热量,而这部分焦炭亦会产生CO<sub>2</sub>,经计算每生成1 mol 纯碱,除系统内部物料平衡外,纯碱生产工艺过程向大气环境排放约1 mol CO<sub>2</sub>,这部分CO<sub>2</sub>完全可以捕集起来用作他用。

对于这部分CO<sub>2</sub>的捕集利用,很少有研究报道,是因为这部分尾气CO<sub>2</sub>浓度较热电厂烟气CO<sub>2</sub>更低,杂质含量更多,捕集利用存在一定困难。

经核算,热电厂一台耗煤量为220t煤/h的锅炉,其CO<sub>2</sub>排放量约297.354万t/年,而年产60万t纯碱的纯碱厂需要消耗CO<sub>2</sub>量约为131.802万t,即热电厂一台锅炉排放的CO<sub>2</sub>即可完全满足年产60万t纯碱生产所需,而通常年产60万t的氨碱厂配备有3个如此规模的燃煤锅炉,故氨碱厂生产纯碱所需CO<sub>2</sub>完全可由热电厂提供而无需依赖石灰窑。

但即便如此,蒸氨工段所需的石灰乳仍需石灰窑煅烧而得,故即使纯碱生产所需CO<sub>2</sub>由热电厂烟道气CO<sub>2</sub>提供,石灰窑在制碱工艺中仍然需要存在。而石灰窑煅烧石灰石温度在870℃左右,属于高耗能装置,且需加入焦炭作为燃料供能,无法避免化石能源的使用。

以目前的技术来看,还无法取缔掉石灰窑,之后为进一步避免化石能源的使用,需进一步对氨碱生产工艺进行改进,同时需平衡目前工艺经济性和改进后工艺的经济性。

综上所述,纯碱生产工艺已非常完备,对工艺进行节能降耗的空间有限;纯碱生产工艺内部的碳排放是由焦炭供能产生,对此有两种解决方法:(1)研究更先进的捕集技术将其捕集利用;(2)在纯碱生产工艺中,能否实现碳钙循环利用,开发新的制碱工艺,彻底取缔石灰窑工段。

### 2.4 纯碱厂碳减排潜力

Rumayor等<sup>[29]</sup>采用生命周期评估(LCA)和技术经济评估(TEA)的方式计算了在整个纯碱园区中使用可再生电力运行,即以光伏发电代替燃煤电

厂为整个生产园区提供电力和热量,并采用乙醇胺化学吸收的方式捕集纯碱生产工艺内部排放的CO<sub>2</sub>,提浓后用于制备甲醇,在不同情景下的碳减排和经济性情况。结果表明,纯碱的碳足迹(CF)将降低41%,加上电解精炼产生的H<sub>2</sub>和O<sub>2</sub>等副产品的商业化,纯碱的碳足迹将降低74%。

综上所述,纯碱工艺中尤其是氨碱工艺中,碳减排的潜力较大,充分捕集利用纯碱厂热电站及生产工艺内部排放的CO<sub>2</sub>,将其固化在更具价值的产品中,则有望实现纯碱行业碳的大幅减排。

## 3 双碳战略下,纯碱行业存在的机遇与挑战

双碳背景下,未来纯碱行业产量增量不会太多,但随着光伏发电和新能源汽车的快速发展,光伏玻璃对重碱需求以及碳酸锂对轻碱用量的增加,纯碱产能分配会向二者倾斜,纯碱行业有望保持高景气发展。

双碳战略下,关于纯碱工艺自身碳减排的机遇与挑战,可分为以下几个方面:

(1) 工艺内部节能降耗。培育标杆示范企业,淘汰小规模、落后、低效产能;加强先进节能技术的开发和应用,如一步法重灰技术、重碱离心机过滤技术、重碱加压过滤技术、回转干铵炉技术等;推动余热余压回收利用及生产用原材料的优化利用。

(2) 捕集利用生产工艺中产生的CO<sub>2</sub>。贯彻落实双碳战略,开发捕集纯碱生产工艺中低浓度、高杂质含量CO<sub>2</sub>尾气的技术;研究综合处理氯化钙废液及CO<sub>2</sub>产生高附加值产品且不产生新含氨废液等新技术。促进废物资源化综合利用,形成基于碳-钙联合循环的第四套制碱工艺。

(3) 碳钙循环利用,取缔石灰窑等高耗能设备。虽然纯碱生产工艺发展至今已非常完备,但由于现有工艺中使用石灰窑等高耗能设备,传统工艺仍有进一步创造革新的可行性,研发具有工业和商业可行性的新型制碱工艺具有重大意义。

图3为氨碱法制碱工业碳-钙联合循环工艺愿景图<sup>[30]</sup>,该法提供了一种取缔石灰窑的新思路,利用氨碱厂CaCl<sub>2</sub>废液和热电厂烟道气CO<sub>2</sub>,得到CaCO<sub>3</sub>产品,以此代替外购的石灰石为制碱工艺提供CO<sub>2</sub>和石灰乳,由于合成的CaCO<sub>3</sub>为粉体,可用回转窑代替高耗能的立式石灰窑,进一步节能降碳,碳钙循环工艺可实现氨碱法的无废弃物排放。

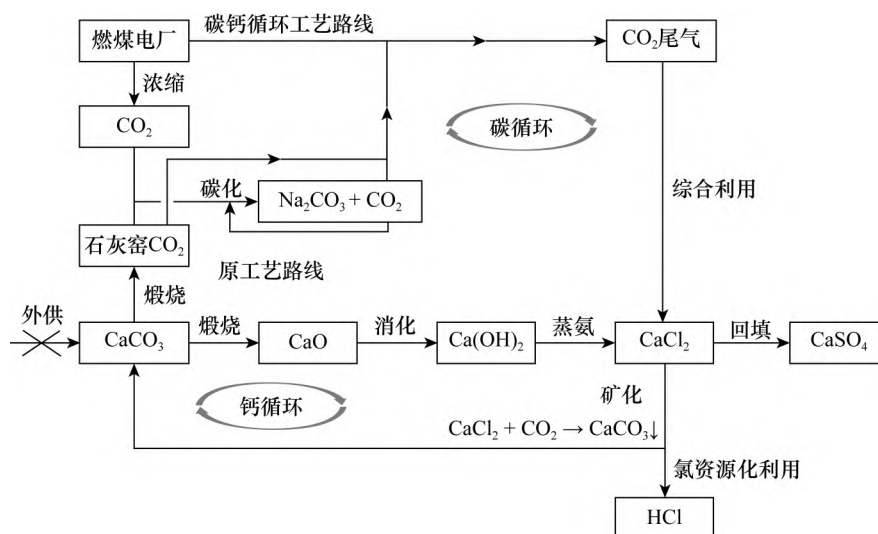


图3 氨碱法制碱工业碳-钙联合循环工艺图

## 4 结语

目前全世界气候剧烈变化,碳减排已刻不容缓,我国双碳愿景的实现需各行各业共同为之努力。纯碱行业作为化工行业重点高耗能子行业之一,亦必须加快碳减排的进程。如今距纯碱工业诞生已有两百多年的历史,经历了由路布兰制碱到氨碱法、联碱法、天然碱法等一系列里程碑式的发展。纯碱行业碳减排的难点在于碳排放来源的复杂性,特别是生产工艺中排放的 $\text{CO}_2$ 尾气,浓度低、杂质含量高,难以捕集利用;同时,传统纯碱生产工艺中存在石灰窑等高耗能装置,不利于碳减排,为此,纯碱生产工艺或需大胆革新才可更大程度助力碳减排;此外,在纯碱工业实现净零排放的路上,需耦合可再生能源,纯碱园区电气化和碳捕集利用技术发展,方可稳步实现纯碱工业的净零排放,促进纯碱工业的持续绿色发展。

## 参考文献

- [1] US Environmental Protection Agency. Inventory of US Greenhouse Gas Emissions and Sinks, 1990-2018 [R]. Washington: US Environmental Protection Agency, 2020.
- [2] Creamer A E, Gao B, Zhang M. Carbon Dioxide Capture Using Biochar Produced from Sugarcane Bagasse and Hickory Wood [J]. Chem Eng J, 2014, 249: 174-179.
- [3] Singh V K, Kumar E A. Measurement and Analysis of Adsorption Isotherms of  $\text{CO}_2$  on Activated Carbon [J]. Appl Therm Eng, 2016, 97: 77-86.
- [4] International Energy Agency. Global Energy Review:

$\text{CO}_2$  Emissions 2021 [R/OL]. 2022 Aug [Cited 2023 Feb 17]. <https://www.iea.org/news/>.

- [5] International Energy Agency. Industry [R/OL]. 2022 [Cited 2023 Feb 17]. <https://www.iea.org/reports/>.
- [6] 温倩, 郑宝山, 王钰, 等. 石化和化工行业碳达峰、碳中和路径探讨[J]. 化学工业, 2022, 40(1): 12-18.
- [7] 大连化工研究设计院. 纯碱工学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2014.
- [8] 丁杨, 毛新宇. 2011~2016年全球纯碱市场分析报告[J]. 山东化工, 2017, 46(16): 128-130.
- [9] Hou T P. Manufacture of Soda [M]. New York: ACS Publications, 1933.
- [10] 徐徽. 从世界纯碱发展历史谈青海盐湖镁资源开发技术路线与镁产业发展前景[C]. 石家庄: 2018年镁化合物行业年会暨行业发展论坛(论文集), 2018.
- [11] 张文广, 刘正友, 刘凯, 等. 一种利用岩盐溶腔储存工业废液废渣的方法: CN 107363067B [P]. 2020-08-04.
- [12] 邓强, 李春林, 林应南, 等. 一种氨碱法制碱废液综合利用的方法: CN 112850770B [P]. 2022-10-18.
- [13] 李山岭, 吴巴特尔, 郭登攀. 纯碱制造设备现状与研发方向探讨[J]. 科技资讯, 2019, 17(34): 70-71.
- [14] 尚建壮, 石青松. 我国纯碱行业发展回顾及未来发展重点[J]. 化学工业, 2020, 38(1): 13-17.
- [15] 国家发展改革委, 工业和信息化部, 生态环境部, 国家市场监督管理总局, 国家能源局. 关于发布《工业重点领域能效标杆水平和基准水平(2023年版)》的通知: 发改产业[2023]723号 [S/OL]. 北京: 国家发展改革委网站, [https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202307/content\\_6890009.htm](https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202307/content_6890009.htm).
- [16] 王晓娜, 张云净, 王亚飞, 等. 氨碱法纯碱厂废渣综

- 合利用 [J]. 化学工程师, 2014, 28(2): 32-34.)
- [17] 蔡超, 张晓娟, 段东平, 等. 索尔维纯碱氯化钙废液中氯化钠回收及高强石膏的合成 [J]. 纯碱工业, 2021(2): 3-8.
- [18] Konopacka-Lyskawa D, Kościelska B, Karczewski J, *et al.* The Influence of Ammonia and Selected Amines on the Characteristics of Calcium Carbonate Precipitated from Calcium Chloride Solutions via Carbonation [J]. *Mater Chem Phys*, 2017, 193: 13-18.
- [19] 翟广伟, 韩明汉, 梁耀彰, 等. 氯化铵分解制氨气和氯化氢工 [J]. 过程工程学报, 2009, 9(1): 59-62.
- [20] Li Y Z, Song X F, Chen G L, *et al.* Preparation of Calcium Carbonate and Hydrogen Chloride from Distiller Waste Based on Reactive Extraction-Crystallization Process [J]. *Chem Eng J*, 2015, 278: 55-61.
- [21] Dong C H, Song X F, Zhang J, *et al.* Selecting Solvents for Intensification of Thermal Dissociation of Tri-*N*-Octylamine Hydrochloride by Calculating Infrared Spectra from Ab Initio Molecular Dynamics [J]. *Chem Eng J*, 2019, 377: 120120.
- [22] Sutherland B R. Lowering the Energy Cost of Carbon Capture [J]. *Joule*, 2020, 4(7): 1 361-1 363.
- [23] Wilberforce T, Baroutaji A, Soudan B, *et al.* Outlook of Carbon Capture Technology and Challenges [J]. *Sci Total Environ*, 2019, 657: 56-72.
- [24] Chao C, Deng Y M, Dewil R, *et al.* Post-Combustion Carbon Capture [J]. *Renewable Sustainable Energy Rev*, 2021, 138: 110490.
- [25] Jones W D. Carbon Capture and Conversion [J]. *J Am Chem Soc*, 2020, 142(11): 4 955-4 957.
- [26] Alivand M S, Mazaheri O, Wu Y, *et al.* Catalytic Solvent Regeneration for Energy-Efficient CO<sub>2</sub> Capture [J]. *ACS Sustainable Chem Eng*, 2020, 8(51): 18 755-18 788.
- [27] Alivand M S, Mazaheri O, Wu Y, *et al.* Engineered Assembly of Water-Dispersible Nanocatalysts Enables Low-Cost and Green CO<sub>2</sub> Capture [J]. *Nature Communications*, 2022, 13(1): 1249
- [28] El Hadri N, Quang D V, Goetheer E L V, *et al.* Aqueous Amine Solution Characterization for Post-Combustion CO<sub>2</sub> Capture Process [J]. *Appl Energy*, 2017, 185: 1 433-1 449.
- [29] Rumayor M, Dominguez-Ramos A, Irabien A. Toward the Decarbonization of Hard-To-Abate Sectors: A Case Study of the Soda Ash Production [J]. *ACS Sustainable Chem Eng*, 2020, 8(32), 11 956-11 966.
- [30] 于建国, 刘程琳, 杨颖, 等. 氨碱法制碱工业碳-钙联合循环工艺: CN 202310120289. X [P]. 2023-04-11.