高炉煤气氨法脱碳制备碳酸氢铵的试验研究

张士董，丁伯根，高 杰，顾宝澍，春铁军
（安徽工业大学 冶金工程学院，安徽 马鞍山 243032）

摘要：高炉煤气有较高的 CO_2 含量，其中的 CO_2 捕集及资源化利用不仅有助于钢铁工业碳减排，还可以增加高炉煤气的热值。本文采用氨水作为吸收剂来捕获 CO_2（氨法），分别研究氨水浓度、气液比、反应温度和高炉煤气 CO_2 体积分数等因素对 CO_2 减排的影响。结果表明：提高氨水浓度能够显著增强氨水对 CO_2 的化学吸附作用，提高氨水温度会加快 CO_2 的吸收速率，提高气液比能够使得喷淋塔中液体在喷洒装置的作用下与 CO_2 的接触更加充分。氨水浓度、温度、气液比的提高均能导致 CO_2 脱除率上升；随着 CO_2 的持续通入，NH_3 和 CO_2 的物质的量之比减小，反应推动力随之降低，不利于 CO_2 的吸收。当氨水浓度为 1.5 mol/L、气液比为 1.3 L/m^3、反应温度为 20 ℃、高炉煤气中 CO_2 体积分数为 15% 时，氨法 CO_2 脱除率可达 90.73%。将吸收溶液进行蒸发，可得到白色晶体产物碳酸氢铵（NH_3HCO_3）。

关键词：高炉煤气；氨法脱碳；碳捕集；碳酸氢铵
中图分类号：TF57；X701.7 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－8764(2024)06－0104－07
doi：10.13403/j.sjqt.2024.06.096

Research on ammonia decarbonization of blast furnace gas to produce ammonium bicarbonate

ZHANG Shidong, DING Baigen, GAO jie, GU Baoshu, CHUN Tiejun
(School of Metallurgical Engineering, Anhui University of Technology, Ma'anshan 243032, Anhui, China)

Abstract: Blast furnace gas presents high CO_2 content, and the CO_2 capture and resource utilization of blast furnace gas cannot only help to reduce carbon emissions in the iron and steel industry, but also increase the calorific value of blast furnace gas. The ammonia is employed as an absorbent to capture CO_2 (ammonia method), and the effects of ammonia concentration, gas-liquid ratio, reaction temperature and CO_2 volume fraction of blast furnace gas on CO_2 emission reduction are carried out. The results show that increasing the concentration of ammonia can significantly enhance the chemical adsorption of CO_2 by ammonia, increasing the temperature of ammonia will accelerate the absorption rate of CO_2, and increasing the liquid-gas ratio can make the contact between the liquid in the spray tower and CO_2 more fully under the action of the spraying device, so increasing ammonia concentration, temperature and gas-liquid ratio can lead to the increase of CO_2 removal rate. With the continuous introduction of CO_2, the ratio of the amount of NH_3 to CO_2 decreases, and the reaction impetus decreases, which are not conducive to CO_2 absorption. When the concentration of ammonia is 1.5 mol/L, the gas-liquid ratio is 1.3 L/m^3, the reaction temperature is 20 ℃, and the CO_2 volume fraction in blast furnace gas is 15%, the CO_2 removal rate of ammonia method can reach 90.73%. The absorption solution is evaporated to obtain the white crystal product ammonium bicarbonate (NH_3HCO_3).

Key words: blast furnace gas; ammonia decarburization; carbon capture; ammonium bicarbonate

收稿日期：2024－08－22；**修回日期**：2024－09－14
基金项目：安徽省自然科学基金资助项目(2408085Y030)
作者简介：张士董(2000—)，男，硕士研究生，从事冶金固废及资源化利用方面的研究。
通信作者：春铁军(1984—)，男，教授，从事烧结、球团理论与新技术方面的研究。

随着气候变化问题的日益严重，减少温室气体排放已成为全球共同面临的紧迫任务。温室气体的过度排放导致了全球气温升高、海平面上升、极端气候事件的频繁发生，对人类的生存和发展构成了巨大威胁。在众多温室气体中，CO_2 是引起温室效应的主要气体之一，因此，减少 CO_2 排放是应对气候变化的关键。钢铁行业是能源消费大户，也是温室气体排放大户。钢铁生产过程的 CO_2 排放在工业碳排放中占比较高，其排放量每年约 26 亿吨，占废气总排放量的 7%[1]。国际能源署《2023 年二氧化碳排放》数据表明，2023 年全球能源相关的 CO_2 排放量达到了前所未有的 374 亿吨，相较于上一年度增加了 4.1 亿吨，增长幅度为 1.1%。高炉炼铁过程中的碳排放通常占整个钢铁生产过程碳排放总量的 60%~70%，占全国碳排放总量的 9%~15%[2]。高炉煤气是在高炉炼铁过程中，由铁矿石、焦炭和熔剂等原料在高温下进行还原反应所产生的，其成分包括 CO_2、CO、H_2、N_2 等。CO_2 在高炉煤气中占据一定比例，约为 6%~22%[3]。根据钢铁联合企业的能源转换和碳素流分析，有一半以上的碳素转移到高炉煤气中。研究表明，高炉煤气的碳捕集可以为钢铁行业减排约 10% 的 CO_2，为实现钢铁行业的可持续发展提供有力支持。

目前 CO_2 的捕集、运输和封存技术还存在不足[4]。从高炉煤气的组成来看，CO 的反应活性相对较高。然而，在某些情况下，需要除去高炉煤气中的 CO_2。CO_2 脱除的方法主要有物理吸收法、膜分离法、变压(变温)吸附法和化学吸收法[5]。CO_2 捕集的关键是开发有效的吸收剂，而理想的 CO_2 吸收剂应具有对 CO_2 的高选择性、高吸收能力、低吸收热、高循环性、良好的热化学稳定性以及低成本等特点[6]。以氨水作为吸收剂的氨法碳捕集技术展现出了诸多优势，包括高效吸收、适应性强、腐蚀性较低以及吸收剂成本低廉等特点。通过加热等方法对吸收 CO_2 后的氨水进行再生，使 CO_2 从氨水中释放得以循环利用。这种方法不仅降低了运行成本，同时还可以脱除不同酸性气体污染物，且副产物为化肥或化工产品[7]。BAI 等[8]和 YEH 等[9]研究了电厂烟气中 CO_2 的脱除能力，利用半连续鼓泡吸收装置，以氨水作为吸收剂，在不同氨水浓度和不同环境条件下进行了深入的探索，为后续研究提供了重要基础。吕泽宁等[10]通过设计并建立可改变高度的喷淋塔模型，进行了氨水吸收 CO_2 的试验研究，通过调整低温操作参数，研究影响氨逃逸率和 CO_2 脱除率的因素及其变化趋势，结果表明：随着氨水温度和摩尔分数的增加，CO_2 的脱除率也会相应提高。高炉煤气中 CO_2 与氨气反应，生成碳酸氢铵，从而实现 CO_2 的脱除。研究表明，氨浓度对 CO_2 的脱除率有显著影响，较低的氨浓度可以获得较高的 CO_2 吸收效率[11]。然而，目前从高炉煤气中回收 CO_2 用于碳酸氢铵生产的研究还相对较少。

通过氨与从高炉煤气中捕获的 CO_2 反应生产碳酸氢铵，将增加 CO_2 捕获装置的经济合理性[12]。本文通过试验研究氨浓度、反应温度、气体流量等因素对 CO_2 脱除率的影响，揭示氨法捕集技术的内在机制和反应动力学，为进一步改进和优化该技术提供理论基础；同时深入研究 CO_2 脱除过程的反应速率、平衡常数、传质过程等，以更好地理解和控制反应过程，为高炉煤气脱碳提供技术支撑。

1　反应机理

氨法脱碳是采用氨水作为吸收剂来捕获 CO_2 的方法，该方法是一个较为复杂的反应过程，涉及众多化学反应，其可在不同的反应温度和反应物浓度条件下进行。在吸收过程中，氨水($NH_2\cdot H_2O$)与 CO_2 发生反应。由于氨水具有碱性，CO_2 是酸性气体，它们之间会发生酸碱中和反应，总的反应如式(1)所示。

$$NH_3 + H_2O + CO_2 = NH_4HCO_3 \quad (1)$$

CO_2 进入液相与氨反应首先生成氨基甲酸铵(NH_2COONH_4)[式(2)]，之后大量生成的氨基甲酸铵在溶液中水解生成碳酸氢铵(NH_4HCO_3)[式(3)]，该反应迅速且为不可逆的二级反应。

$$2NH_3 + CO_2 \rightarrow NH_2COONH_4 \quad (2)$$

$$NH_2COONH_4 + H_2O = NH_4HCO_3 + NH_3 \quad (3)$$

与此同时，氨气与水反应生成一水合氨(NH_4OH)：

$$NH_3 + H_2O = NH_4OH \quad (4)$$

生成的碳酸氢铵与一水合氨反应生成碳酸铵[$(NH_4)_2CO_3$]和水：

$$NH_4HCO_3 + NH_4OH = (NH_4)_2CO_3 + H_2O \quad (5)$$

碳酸铵吸收过量的二氧化碳最终生成碳酸氢铵：

$$(NH_4)_2CO_3 + CO_2 + H_2O = 2NH_4HCO_3 \quad (6)$$

式(3)~(6)均为可逆反应，并且当温度高于38 ℃才能够发生。氨法脱碳过程中，CO_2 的物理溶解是第一步，随后 CO_2 与氨水发生化学反应，先生成碳酸氢铵，再经历一些中间过程转化为碳酸铵，碳酸铵继续吸收 CO_2 最终生成碳酸氢铵。在反应过程中，当 CO_2 气体扩散到气液界面时，其通过物理溶解进入液相。在这个过程中，温度越高，物理溶解速度越快。随后，溶解在液相中的 CO_2 与氨水发生化学反应，经过氨基甲酸铵水解，生成碳酸氢铵。随着 CO_2 吸收的不断推进，生成的 NH_4HCO_3 浓度会逐渐上升。当 NH_4HCO_3 的浓度超过其在氨水中的饱和溶解度时，碳酸氢铵副产品便会结晶析出[13]。

本文选取喷淋塔出口处 CO_2 体积分数作为评估参数研究氨水脱碳规律。CO_2 的脱除率按式(7)计算。

$$w = \frac{w_1 - w_2}{w_1} \times 100\% \quad (7)$$

式中：w 为 CO_2 脱除率,%；w_1、w_2 分别为初始、反应后 CO_2 的体积分数,%。

2 试验原料与方法

2.1 试验原料与装置

试验所用气体包括 N_2、CO 和 CO_2，纯度(体积分数)≥99.99%；试验所用氨水为上海某化工公司生产，质量分数为25%，密度为0.88 g/cm^3。氨法脱碳试验装置如图1所示，主要包括配气系统、喷淋塔系统、烟气检测系统。喷淋塔系统由喷淋塔塔体、喷洒装置以及塔体连接件(螺栓、密封环)等组成，喷淋塔内径为200 mm、外径为210 mm、高度为600 mm，隔板小孔内径为20 mm。喷淋塔具有较好的气密性，其顶部设有出气口，底部设有进气口，塔体的下侧还设有氨水溶液的循环口、取样口，用于收集煤气及吸液样本。

试验采用玻璃转子流量计控制配气系统，模拟试验所需的高炉煤气成分；采用数显恒温水浴锅(HH-4)对氨水进行恒温加热使之达到设定温度；向喷淋塔内喷淋氨水吸收煤气，将反应后的气体干燥处理；采用煤气分析仪(德国 MRU VARIO PLUS-new)检测 CO_2 的浓度。

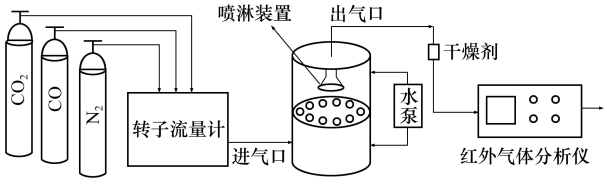


图1 氨法脱碳试验装置

Fig. 1 Experimental apparatus for ammonia decarbonization

2.2 试验方法

将提前配置好的氨水放于密闭容器中，同时开启气体分析仪预热0.5 h以上；设置为试验所需气体流量，然后打开模拟高炉煤气气瓶，观察气体分析仪上显示的 CO_2 体积分数变化，等待 CO_2 体积分数稳定后，加入提前配置好的氨水；打开水泵并开始计时，从喷淋塔的顶部喷入氨水，随后采用水泵抽出氨水继续喷淋，如此循环。在吸收塔内，将氨水与 CO_2 进行逆流充分混合反应，然后采用干燥硅胶进行脱水处理，使用气体分析仪测量混合气体中 CO_2 的体积分数。通过改变氨水浓度、氨水温度、气液比、CO_2 初始体积分数等条件，探究最佳脱碳效率条件并获得副产物碳酸氢铵。试验结束后，将装有吸收剂的喷淋塔清洗干净，并将残留氨水排出，防止其对下一次对照试验产生影响。试验完成后，采用气体分析仪记录不同时刻 CO_2 体积分数的变化情况，进而计算不同条件下 CO_2 脱除率的数据。各条件下喷淋塔脱碳系统的试验参数如表1所示。

3 试验结果与讨论

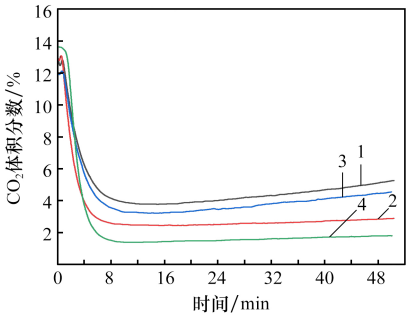
3.1 氨水浓度的影响

在 CO_2 体积分数为15%、气液比为1.3 L/m^3、氨水温度为20 ℃的条件下，试验研究不同氨水浓度对CO_2脱除率的影响,结果如图2所示。由图2

表 1　氨法脱碳试验参数

Table 1　Experimental system parameters for ammonia decarbonization

氨水浓度/(mol·L^{-1})	氨水温度/℃	CO_2 体积分数/%	气体流量/(L·min^{-1})
0.25	30	10	1.5
0.50	40	15	2.0
1.00	50	20	2.5
1.50	60	25	3.0



氨水浓度/(mol·L^{-1})：1—0.25；2—0.50；3—1.00；4—1.50。

图 2　不同氨水浓度下 CO_2 体积分数

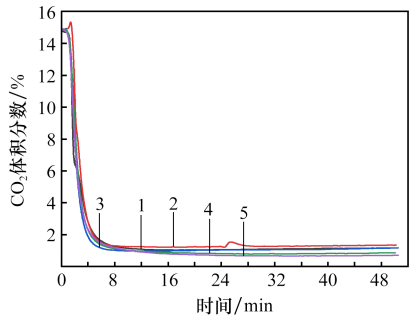
Fig. 2　Influence of ammonia concentrations on CO_2 volume fraction

可见，随着氨水浓度的提升，CO_2 体积分数的下降趋势更快，最终值更低，即脱碳效率更高。当氨水浓度为 0.25 mol/L 时，CO_2 脱除率即可达到 74.9%，说明低浓度的氨水也能实现较高的脱碳效率；此外，当氨水浓度为 0.50、1.00、1.50 mol/L 时，计算得到 CO_2 脱除率分别为 78.53%、83.67%、90.70%，脱除率随氨水浓度的增加显著提升。这主要归因于氨水浓度的增加，溶液中的 NH_3 分子会扩散至气液两相的交界处，即界面上的自由氨浓度升高[14]。

由式(1)可知，氨水浓度的增加将显著推动反应的化学平衡向正方向移动。故而，提高氨水浓度能够显著增强氨水对 CO_2 的化学吸附作用，提升 CO_2 脱除率。不过，从氨的挥发角度来看，氨水浓度并非越高越好。升高氨水浓度会使得反应过程中 NH_3 浓度增加，进而导致氨逃逸量增加。这不仅会导致氨的损失，还会影响反应的平衡。较高的氨水浓度通常可以提供更高的脱碳效率，然而，过高的浓度可能会导致其他如氨逃逸增加、设备腐蚀加剧等问题。因此，需要在脱碳效率和其他因素之间进行合理权衡选取适宜的氨水浓度。实际应用中，在提高 CO_2 脱除率的同时，应选择适宜的温度、压力、气体流量等条件，以实现最佳的脱碳效果和经济效益。由图 2 可以看出，氨水浓度选用 1.50 mol/L 时，可在保证经济效益的同时实现较高的脱碳效率(90%以上)。

3.2　温度的影响

在 CO_2 体积分数为 15%、氨水浓度为 1.5 mol/L、气液比为 1.3 L/m^3、氨水流量为 2 L/min的条件下，试验研究不同温度条件下氨水对 CO_2 脱除率的影响，结果如图 3 所示。由图 3 可见：温度对 CO_2 的脱除有一定的影响，当氨水温度为 20、30、40、60 ℃时，计算得到 CO_2 脱除率分别为 90.73%、91.93%、93.53%、95.53%。对于氨法脱碳，较高的温度可能会导致 CO_2 在氨水中的溶解度降低，从而减少吸收量，导致增速降低。由图 3 可以看出，提高温度可使得 CO_2 的脱除率略微增加，脱碳效率升高的主要原因是喷淋塔中生成的 NH_4HCO_3 尚未饱和，这促使总反应向正方向进行，从而不断吸收 CO_2。因此，在一定范围内，提高氨水的温度会加快 CO_2 的吸收速率，提高 CO_2 脱除率。



温度/℃：1—20；2—30；3—40；4—50；5—60。

图 3　不同温度下 CO_2 体积分数变化

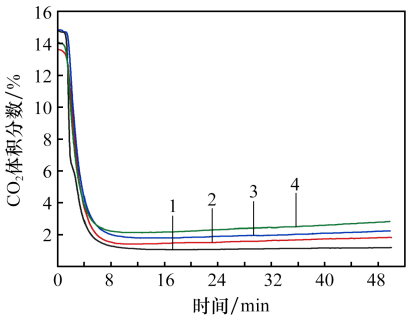
Fig. 3　Influence of temperature on CO_2 volume fraction

氨是挥发性物质，温度升高会增加氨的挥发速率。较高的温度可能会导致更多的氨逃逸到大气中，这不仅会降低脱碳效率，还可能对环境造成污染。同时，高温可能对设备和材料提出更高的要求。综上，实际应用中选择温度为 20 ℃，即可达到较为理想的脱碳效率。

3.3　气液比的影响

气液比是氨法脱碳的一个重要参数。试验通

过固定液相流量，改变气相流量来考察气液比对脱碳效率的影响。在 CO_2 体积分数为 15%、氨水浓度为 1.5 mol/L、氨水温度为 20 ℃的条件下，试验研究不同气液比对 CO_2 脱除率的影响，结果如图 4 所示。由图 4 可见：当气液比为 0.67、0.80、1.00、1.30 L/m^3 时，计算得到 CO_2 脱除率分别为 85.87%、88.13%、90.73%、93.13%。对于特定喷淋塔而言，增大气体流量即增大了塔内气体的表观流速。研究表明，增大喷淋塔内气体流速可以加强气流湍动，增强液滴的湍动，进而提高 CO_2 的吸收速率[15]。随着气液比的不断增加，氨水对高炉煤气的 CO_2 脱除率也不断升高，这是由于随着气体流量的增大，喷淋塔中液体在喷洒装置的作用下与 CO_2 的接触更加充分。在液滴总面积保持不变的情况下，气体携带更多的 CO_2 与氨水进行了反应，使液体与气体的传质面积增加，加快了化学反应的速度，导致反应向正反应方向移动，最终使氨水对 CO_2 脱除率得到提升。较高的气液比需要更多的液体循环和泵送，这会增加能源消耗，处理大量的液体也可能需要更大的设备和更高的运行成本。在实际工业应用中，气液比不仅影响脱碳效率，还影响吸收塔的连续稳定运行，所以选择合适的气液比对于氨法脱碳至关重要。



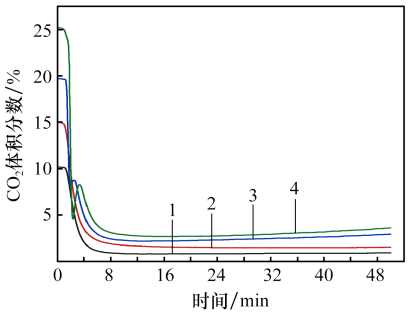
气液比/(L·m^{-3})：1—0.67；2—0.80；3—1.00；4—1.30。

图 4 不同气液比下 CO_2 体积分数变化

Fig. 4 Influence of gas-liquid ratio on CO_2 volumetric fraction

3.4 CO_2 初始体积分数的影响

在氨水浓度为 1.5 mol/L、气液比为 1.3 L/m^3、氨水温度为 20 ℃的条件下，试验研究不同 CO_2 初始体积分数对 CO_2 脱除率的影响，结果如图 5 所示。由图 5 可见，当 CO_2 初始体积分数为 10%、15%、20%、25%时，计算得到 CO_2 的脱除率分别为 91.90%、90.20%、88.93%、89.36%，整体呈下降趋势。主要是因为当流量以及浓度不变的情况下，氨水所能吸收的 CO_2 有限。当氨水溶液逐渐达到饱和时，随着 CO_2 的持续通入，NH_3 和 CO_2 的物质的量之比减小[16-17]，反应推动力随之降低，不利于 CO_2 的吸收，导致 CO_2 脱除率下降。当 CO_2 体积分数提高到 25%时，即气相中 CO_2 的分压提高，初始接触情况下气膜内的传质驱动力增大，CO_2 的吸收速率得到有效增加，反而使得 CO_2 脱除率变化不大[18-20]。虽然低浓度的 CO_2 可以获得更高的脱除效率，但针对高炉煤气生产过程中的实际情况，当 CO_2 体积分数为 15%~22%时，CO_2 脱除率可维持在 88%以上。



CO_2 初始体积分数/%：1—10；2—15；3—20；4—25。

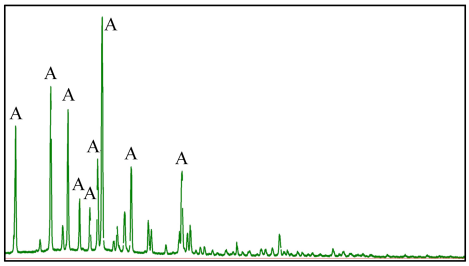
图 5 不同 CO_2 初始体积分数下 CO_2 体积分数变化

Fig. 5 Influence of initial CO_2 volume fraction on CO_2 volume fraction

3.5 结晶原理及反应产物分析

碳酸氢铵溶液性质不稳定，36 ℃以上开始分解产生 CO_2、NH_3 和 H_2O，60 ℃可分解完全。结晶时通过加热蒸发溶液，使溶剂不断挥发，溶液逐渐浓缩。综合考虑溶液的分解速度和结晶效率，试验温度应控制在 40 ℃。当溶液达到过饱和状态时，停止加热，让溶液自然冷却。冷却后的溶液中会有白色晶体析出。试验结束后，将得到的白色晶体产物，经烘干、研磨过后，进行 XRD 分析。检测结果如图 6 所示。由图 6 可见，得出反应产物的成分为碳酸氢铵。碳酸氢铵是一种含氮量较高的氮肥，能为植物提供氮元素，促进植物的生长和发育，增加农作物的产量。作为一种氮肥，合理使用碳酸氢铵有助于提升土壤肥力，降

低对化学合成肥料的过度依赖，对推动农业可持续发展具有重要意义。



2θ/(°)

A—NH_4HCO_3。

图 6　脱碳产物 XRD 分析结果

Fig. 6　XRD analysis results of decarbonization products

4　结　论

（1）氨水浓度越高越有利于 CO_2 的脱除。当氨水浓度为 1.5 mol/L 时，脱除率可达 95%。利用稀氨水喷淋脱除高炉煤气中的 CO_2，即使在较低氨水浓度下，也能实现显著的 CO_2 脱除率。温度对 CO_2 的脱除率影响相对较小，随着温度的不断升高，CO_2 脱除率增加缓慢。氨水浓度为 1.5 mol/L、高炉煤气流量为 2 L/min、反应温度为 20 ℃、高炉煤气中 CO_2 占比为 15% 时，CO_2 脱除率达到 90.73%。

（2）提高气液比有助于脱碳效率的提升，增加气液比意味着增大了气液的接触面积，从而使反应更快速、更彻底。结果表明，在 20 ℃的实际工况下，选择气液比为 1.3 L/m^3，脱碳效率可以达到 85% 以上。

（3）使用氨法脱碳产生的碳酸氢铵作为氮肥，可以减少对传统氮肥生产的依赖，降低能源消耗和环境污染。氨法脱除高炉煤气制备氨肥不仅实现了高炉煤气中资源的综合利用，而且也为农业生产提供了重要的氮肥原料，有助于减少温室气体的排放，具有重要的经济和环境意义。

参考文献：

[1] 袁凤慧，段艳慧，张洋洋，等. 氨法碳捕集技术应用研究现状[J]. 氮肥技术，2017，38(1)：49－51.
YUAN Fenghui，DUAN Yanhui，ZHANG Yangyang，et al. Application research status of carbon capture technology by ammonia method[J]. Nitrogenous Fertilizer Technology，2017，38(1)：49－51.

[2] 宋清诗，张永杰，陈国军. 高炉煤气碳捕获技术浅析[J]. 宝钢技术，2017(3)：53－58.
SONG Qingshi，ZHANG Yongjie，CHEN Guojun. Analysis of carbon capture technology for blast furnace gas[J]. Baosteel Technology，2017(3)：53－58.

[3] 黄战. 高炉煤气氨法脱碳过程传热传质数学模型[D]. 马鞍山：安徽工业大学，2020.
HUANG Zhan. The model of heat and mass transfer on carbon dioxide capture from blast furnace gas by ammonia method[D]. Ma'anshan：Anhui University of Technology，2020.

[4] 王小丰. 探究 CO_2 捕集，运输和封存技术的现状、发展与挑战[J]. 当代化工研究，2017(5)：111－112.
WANG Xiaofeng. Study of the gathering and transportation of CO_2 and the status quo，development and challenge of storage technology[J]. Modern Chemical Research，2017(5)：111－112.

[5] 姜兆波. 高炉煤气中二氧化碳的分离回收研究[J]. 科技资讯，2007，5(9)：234－235.
JIANG Zhaobo. Study on separation and recovery of carbon dioxide from blast furnace gas[J]. Science & Technology Information，2007，5(9)：234－235.

[6] 余景文，王淑娟. 氨法脱碳模拟中热力学模型的比较[J]. 燃烧科学与技术，2015，21(5)：394－402.
YU Jingwen，WANG Shujuan. Comparison of thermodynamic models for carbon capture with aqueous ammonia[J]. Journal of Combustion Science and Technology，2015，21(5)：394－402.

[7] 王甫，赵军，邓帅，等. 氨法碳捕集中氨逃逸抑制机制研究进展[J]. 化工进展，2017，36(12)：4641－4650.
WANG Fu，ZHAO Jun，DENG Shuai，et al. Review on development and mechanism of reducing ammonia escape from carbon dioxide capture process using ammonia method[J]. Chemical Industry and Engineering Progress，2017，36(12)：4641－4650.

[8] BAI H，YEH A C. Removal of CO_2 Greenhouse gas by ammonia scrubbing[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research，1997，36(6)：2490－2493.

[9] YEH A C，BAI H. Comparison of ammonia and monoethanolamine solvents to reduce CO_2 greenhouse gas emissions[J]. Science of the Total Environment，1999，228(2/3)：121－133.

[10] 吕泽宁，乔琨，王韬，等. 低温条件下喷淋塔氨法脱碳

实验研究[J]. 热力发电,2021,50(12):115 – 121.
LÜ Zening, QIAO Kun, WANG Tao, et al. Experimental research on ammonia decarbonization in spray tower at low temperature[J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(12):115 – 121.

[11] 马双忱,孙云雪,赵毅,等. 氨水捕集模拟烟气中二氧化碳的实验与理论研究[J]. 化学学报,2011,69(12):1469 – 1474.
MA Shuangchen, SUN Yunxue, ZHAO Yi, et al. Experimental and mechanism research on CO_2 capture from simulating flue gas using ammonia solution[J]. Acta Chimica Sinica,2011,69(12):1469 – 1474.

[12] KOOHESTANIAN E,SADEGHI J,MOHEBBI-KALHORI D,et al. A novel process for CO_2 capture from the flue gases to produce urea and ammonia[J]. Energy, 2018, 144:279 – 285.

[13] 张茂. 氨法脱除燃煤烟气中二氧化碳的实验研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2007.
ZHANG Mao. Experimental research and numerical simulation of ammonia-based CO_2 absorption in a spray column[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007.

[14] 赵杰. 喷淋塔氨法脱碳的实验研究和数值模拟[D]. 南京:东南大学,2016.
ZHAO Jie. Experimental study and numerical simulation of ammonia decarbonization in spray tower[D]. Nanjing: Southeast University,2016.

[15] 朱复东. 不同液气比条件下氨法脱碳工艺影响因素试验研究[J]. 安全与环境学报,2018,18(2):739 – 743.
ZHU Fudong. Experimental probe into the influential parameters on the CO_2 absorption process in the ammonia solution under the different liquid-gas ratio conditions [J]. Journal of Safety and Environment, 2018, 18(2): 739 – 743.

[16] 祝杰,吴振元,叶世超,等. 喷淋塔液滴粒径分布及比表面积的实验研究[J]. 化工学报,2014,65(12):4709 – 4715.
ZHU Jie, WU Zhenyuan, YE Shichao, et al. Drop size distribution and specific surface area in spray tower[J]. CIESC Journal,2014,65(12):4709 – 4715.

[17] WALLACE J,KRUMDIECK S. Carbon dioxide scrubbing from air for alkaline fuel cells using amine solution in a packed bubble column[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science,2005,219(11):1225 – 1233.

[18] 曾庆. 氨法吸收二氧化碳的实验研究[D]. 北京:清华大学,2011.
ZENG Qing. Experimental studies on carbon dioxide absorption into aqueous ammonia[D]. Beijing: Tsinghua University,2011.

[19] 龚赛赛. 氨法脱除烟气中二氧化碳的试验与工程应用方案研究[D]. 南京:东南大学,2017.
GONG Saisai. Experimental on ammonia removal of carbon dioxide in flue gas and research on the plan of engineering application[D]. Nanjing: Southeast University,2017.

[20] 齐国杰. 氨水溶液联合脱除二氧化碳和二氧化硫的研究[D]. 北京:清华大学,2013.
QI Guojie. Study on combined capture of CO_2 and SO_2 in aqueous ammonia[D]. Beijing: Tsinghua University, 2013.