DOI：10.19666/j.rlfd.202512034

寒冷地区压缩气体供热与水基碳捕集耦合系统研究

魏　蝶[1,2,3]，张留淦[2]，林　健[4]，杨　声[5]，叶　楷[2,3]，陈龙祥[2,3]
（1. 福州大学电气工程与自动化学院，福建　福州　350108；
2. 中国科学院福建物质结构研究所泉州装备制造研究中心，福建　泉州　362200；
3. 中国科学院大学福建学院，福建　福州　350000；
4. 厦门大学能源学院，福建　厦门　361102；
5. 中南大学能源科学与工程学院，湖南　长沙　410083）

［摘　　要］【目的】为解决寒冷地区冬季供暖面临的高碳排放和清洁供暖需求间的矛盾，突破传统水基碳捕集法在常压下 CO_2 溶解度受限的技术瓶颈，本文提出了一种寒冷地区压缩气体供热与水基碳捕集耦合系统。【方法】系统集成了气体压缩、水基碳捕集和余热回收技术，利用寒冷地区天然冷能优势，降低气体压缩能耗的同时提升 CO_2 溶解能力，并回收压缩热用于供暖，实现碳捕集与清洁供暖的协同增效。基于热力学仿真建模，对系统的捕集性能、能耗特性及供热能力进行了多维度的量化分析。【结果】结果表明：在 10 MW 供热负荷工况下，系统的 CO_2 捕集能耗仅为 290.18 kW h/t，对应能耗成本为 183.51 元/t，较传统胺基化学吸收法降低约 25.43%；敏感性分析进一步表明，系统在较低环境温度、二级吸收压力≥1 200 kPa、二级循环水流量约 300～500 kg/s 以及入口 CO_2 浓度≥15%的工况下运行性能更优。【结论】本研究提出的耦合系统通过压缩热梯级利用和两级碳捕集循环的协同设计，实现了高效碳捕集和稳定供暖，为寒冷地区实现清洁供暖与碳减排目标提供了一种新思路。

［关　键　词］水基碳捕集技术；压缩热；供暖；余热回收；能量梯级利用

［引用本文格式］魏蝶，张留淦，林健，等. 寒冷地区压缩气体供热与水基碳捕集耦合系统研究[J]. 热力发电，2026，55(9)：170.　Wei D，Zhang L G，Lin J，et al. A coupled system of compressed gas heating and water-based carbon capture for cold regions[J]. Thermal Power Generation，2026，55(9)：170.

A coupled system of compressed gas heating and water-based carbon capture for cold regions

Wei Die[1,2,3], Zhang Liugan[2], Lin Jian[4], Yang Sheng[5], Ye Kai[2,3], Chen Longxiang[2,3]
(1. College of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China;
2. Quanzhou Institute of Equipment Manufacturing, Fujian Institute of Research on the Structure of Matter, Chinese Academy of Sciences, Quanzhou 362200, China;
3. Fujian College, University of Chinese Academy of Sciences, Fuzhou 350000, China;
4. College of Energy, Xiamen University, Xiamen 361102, China;
5. School of Energy Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: [Objective] To address the practical challenges in cold northern regions of China, including the growing demand for winter heating, severe pollution from coal combustion, and the performance degradation, efficiency drop and frost formation of air-source heat pumps under low-temperature conditions, this paper proposes a novel

收 稿 日 期：2025-12-10　修 回 日 期：2026-01-14　接 受 日 期：2026-01-22　网络首发日期：2026-04-24
基 金 项 目：福建省自然科学基金项目（2025J01039）；中国科学院青年创新促进会项目（2023315）
Supported by：Natural Science Foundation of Fujian Province (2025J01039); Project of Youth Innovation Promotion Association of the Chinese Academy of Sciences (2023315)
第一作者简介：魏蝶（2001），女，硕士研究生，主要研究方向为热力系统优化，13123756987@163.com。
通信作者简介：陈龙祥（1988），男，博士，研究员，主要研究方向为高效物理储能、碳捕集与利用、工业节能技术，chenlx@fjirsm.ac.cn。

compressed gas heating and water-based carbon capture integrated system. [Methods] The system increases the pressure of flue gas through multi-stage compression, with the compression heat being utilized in a cascaded manner. The high-grade compression heat is used for residential heating, thereby avoiding the problem of frost formation in low-temperature environments with heat pump heating. Subsequently, the low-grade compression heat is harnessed to preheat the gas before it enters the expander within the expansion module, thus increasing the power output of the expander. In parallel, a two-stage water-based carbon absorption-desorption cycle is adopted to achieve CO_2 enrichment and purification, harnessing the cold climate of northern regions to promote the dissolution of CO_2 into the circulating water, while recovering a portion of the compression work via the expander. To evaluate the system's performance, a simulation model of the proposed system is constructed in Aspen Plus, with the specific energy consumption for CO_2 capture, heating load, CO_2 separation efficiency, and product gas purity designated as the key performance indicators. Based on these criteria, a quantitative performance analysis of the system is then carried out. A sensitivity study is conducted on key parameters such as ambient temperature and absorption pressure. [Results] Under the design condition of 10 MW heating supply, the system achieves a CO_2 capture rate of 85.65% and a product gas purity of 99.72%. The specific energy consumption for CO_2 capture is 290.18 kW ħ/t and the capture cost amounts to 183.51 yuan/t, representing a reduction of about 25.43% compared with that of the conventional amine-based capture technology. Sensitivity analysis indicates that lower ambient temperature, higher second-stage absorption pressure (≥1 200 kPa), a moderate second-stage circulating water flow rate (300~500 kg/s), and a medium-to-high inlet CO_2 concentration (≥15%) are conducive to achieving low-energy and high-efficiency operation of the system. [Conclusion] This study proposes an integrated system that combines compressed gas heating, low-temperature water-based carbon capture, and cascaded waste heat utilization, which enables the effective synergistic achievement of the dual goals of heating supply and carbon emission reduction. The system features the advantages of low capture energy consumption, stable heat supply, and strong environmental adaptability, providing a promising technical pathway for clean heating and low-carbon flue gas treatment in cold northern regions.

Key words: water-based carbon capture technology; compression heat; heating; waste heat recovery; energy cascade utilization

在北方寒冷地区，冬季供暖方式的选择是平衡居民生活需求与应对气候变化的核心问题[1]。随着城市化快速推进及居民生活水平提高，北方地区冬季供暖需求显著增加，供暖在我国能源消费中的比重不断上升。目前，我国北方地区主要采用燃煤供暖，但这一供暖方式存在燃烧不充分、能源效率低和大量污染物排放等问题[2]，对空气质量和居民健康造成了巨大影响。同时，燃煤供暖产生的碳排放也是导致全球气候变化的因素之一。

在“碳达峰、碳中和”[3]背景下，空气源热泵[4]被视为潜力替代技术之一。该技术依靠电力驱动，将低品位热量转换为高品位热量用于供暖[5]。然而，空气源热泵在低温条件下易结霜[6]，使循环能效比（COP）降低至 2.5 以下[7]，导致制热性能下降、能源利用效率降低，并可能在极端情况下造成设备超负荷或损坏[8]。

虽然热泵供暖理论上比燃煤供暖低碳高效，但其依赖电力驱动，而目前我国电力生产仍以化石能源为主[9]。因此，无论是直接燃煤供暖还是间接依赖电网的热泵供暖，都存在大量碳排放。在此背景下，作为全球主要 CO_2 排放国之一[10-11]，我国正在积极推进低碳转型。为实现北方地区清洁供暖，需革新供暖技术并结合碳捕集技术[12]，以实现供暖与碳减排协同发展。

基于胺基溶液的化学吸收法[13]是目前最成熟的燃烧后碳捕集技术[14]，但该技术存在溶剂再生能耗过高[15]、吸收液在高温下易氧化和热降解[16]、溶剂挥发破坏环境及材料腐蚀威胁设备可靠运行[17]等问题。水基碳捕集技术[18]是一种新兴碳捕集技术。该技术依据 CO_2 在水中的物理溶解度高于 N_2、O_2 的特性[19]，实现对 CO_2 的选择性吸收；同时，其以水为吸收剂避免了胺基溶剂产生的环境问题。然而，常压条件下 CO_2 分压较低，其在水中的溶解度有限，导致循环水流量急剧增大，输送功耗显著增加，进而引起碳捕集功耗上升，制约了该技术的实际应用。

为提升 CO_2 溶解度并降低捕集能耗，可采用增压和降温两种途径。Chen 等人[20]提出将水基碳捕集与绝热压缩空气储能系统耦合，利用多级压缩提高烟道气总压以增强吸收，但他们只关注了压力对系统碳捕集性能的影响，未探究温度变化带来的影响。一方面，气体增压过程产生的压缩热可用于供热，且以压缩热作为热源可以避免空气源热泵在低温下结霜的问题。另一方面，北方地区丰富的天然

冷空气资源可用于降低碳捕集系统操作温度，提升 CO_2 在水中的溶解度。

因此，本文综合考虑增压与降温的协同效应，探索进一步优化系统能效的潜在路径，提出一种寒冷地区压缩气体供热与水基碳捕集耦合系统（compressed gas heating and water-based carbon capture coupled system，CGH-WCC）。该系统以水为吸收剂，利用北方低温环境来降低气体压缩能耗、提高 CO_2 溶解能力。同时，将气体压缩过程产生的压缩热用于居民供暖，避免热泵供暖在低温下结霜的问题，进一步提升系统综合性能。通过建立耦合系统的仿真模型，本研究对系统性能（碳捕集率、碳捕集能耗、供热量等）进行了量化评估，并对影响系统性能的关键参数进行了敏感性分析。

1 系统建模与性能评价方法

1.1 系统流程与运行特性

本文提出的压缩气体供热与水基碳捕集耦合系统示意如图 1 所示。该系统由气体压缩模块、水基碳捕集模块以及气体膨胀模块 3 个部分组成。在气体压缩模块中，富含 CO_2 的废气（a1）通过四级压缩机组加压至设定压力。其中，气体压缩过程产生的高品位压缩热在换热器组（H1、H2、H3、H4）中被用于加热居民端暖媒水，剩余的低品位热量在换热器组（X1、X2、X3、X4）中用于加热膨胀模块的低温气体，从而实现压缩热的梯级利用。经过压缩之后，高压气体（a13）进入水基碳捕集模块进行脱碳处理。

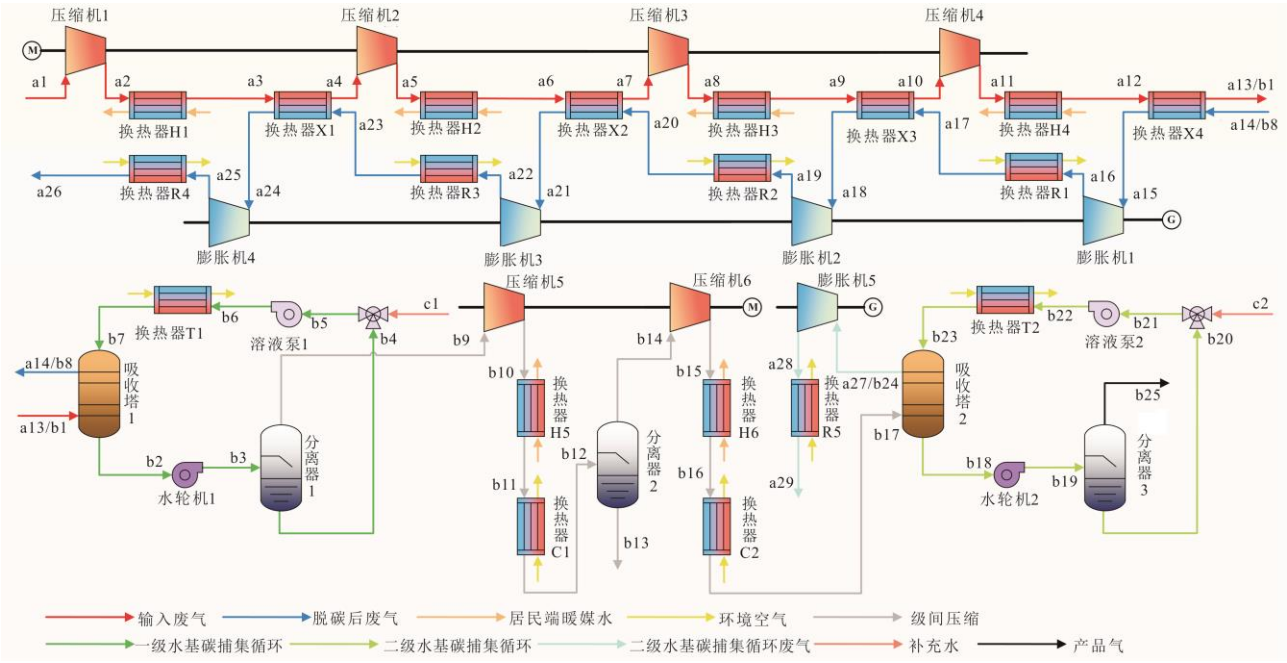


图 1 寒冷地区压缩气体供热与水基碳捕集耦合系统示意

Fig.1 Schematic diagram of the compressed gas heating and water-based carbon capture coupled system for cold regions

在水基碳捕集模块中，使用两级水基碳捕集循环实现 CO_2 的富集和提纯：首先，来自气体压缩模块的高压气体（b1）进入一级碳捕集循环，与低温高压的循环水（b7）在吸收塔 1 中逆流接触，以实现 CO_2 的富集。之后，吸收塔 1 出口的剩余高压气体（b8）进入气体膨胀模块，回收部分气体压缩消耗的功。吸收了 CO_2 的循环水（b2）则通过水轮机 1 膨胀降压，再利用气液分离器 1 将 CO_2 气体（b9）分离。气液分离器 1 出口的循环水（b4）经过损耗补充、溶液泵 1 加压、换热器 T1 冷却后，重新回流至吸收塔 1 完成循环。需要注意的是，气液分离器分离出的气体（b9）中 CO_2 的纯度不高，因此需要进一步通过二级碳捕集循环提纯处理。在此之前，气体（b9）需要经过再次压缩提高吸收压力，以增加 CO_2 的溶解能力。该阶段产生的压缩热同样用于加热暖媒水，气体在换热器 C1 中冷却后，进入分离器 2 进一步脱除水分，分离出的少量冷凝水（b13）从气液分离器底部排放至环境中。之后，经过环境冷源降温后的加压气体（b17）进入二级碳捕集循环，重复上述 CO_2 吸收和解吸操作流程。分离

器 3 出口的气体（b25）经过冷凝除湿后，获得系统的产品气。二级吸收塔顶部排出的气体（b24）则被送至膨胀机，用于回收部分压缩功。

在气体膨胀模块，同样使用四级膨胀机组，从而与四级压缩机组相匹配，以实现压缩功的高效回收。为提高膨胀机输出功率，气体（a14）在进入膨胀机前被环境热源（换热器 R1、R2、R3、R4）和来自压缩模块的低品位压缩热（换热器 X4、X3、X2、X1）依次加热。最终，膨胀后的脱碳气体（a26）释放到环境中。

1.2 系统建模

针对本研究提出的 CGH-WCC 系统，采用 Aspen Plus 软件开展流程模拟[21]。系统关键部件采用以下模块进行建模：吸收塔采用 RadFrac 模块，气液分离过程采用 Flash 模块，换热器采用 HeatX 模块，压缩机与膨胀机采用 Compr 模块，溶液泵和水轮机则通过 Pump 模块进行模拟。选择 ENRTL-SR 物性方法，并将 N_2、O_2 和 CO_2 设置为亨利组分，以精确描述其在液相中的溶解行为。所构建的系统模型能够完整表征系统内的能量转换与质量传递过程，从而保障了仿真结果的可靠性。

此外，为简化系统计算，进行如下假设[20,22-23]：

1）进入系统前，烟气被空气冷却至比环境温度高 10 K；

2）在用于级间冷却的换热器组（C1、C2）中，气体被环境空气冷却到比环境温度高 10 K；

3）在利用环境空气预热的换热器组（R1、R2、R3、R4、R5）中，气体被环境空气加热到比环境温度低 10 K；

4）在内部余热回收换热器组（X1、X2、X3、X4）中，热流体入口温度与冷流体出口温度的最小温差为 5 K；

5）忽略系统中管道及其他部件的压力损失和热量损失，仅考虑各换热器中 3%的压降。

为确保吸收塔模型的准确性，对系统核心部件吸收塔进行验证，将其与文献[24]的相应数据进行对比。图 2 展示了贫液负荷为 0.2 mol CO_2/mol MEA 条件下，吸收塔塔板数变化对贫吸收剂流量需求的仿真值与文献数据的对比情况。在塔板数为 4~15 的范围内，两者相对误差均小于 3%，证明本文所使用的吸收塔模型具有较好的准确性。

此外，将本研究中气体压缩模块和气体膨胀模块仿真数据与文献[25]的相关数据进行对比，验证气体压缩模块和气体膨胀模块的准确性。表 1 汇总了各级压缩机功率消耗和各级膨胀机功率输出的仿真值与参考值。结果显示仿真数据与参考数据高度吻合，最大相对误差小于 0.5%，进一步验证了当前建模方法的准确性和可靠性。

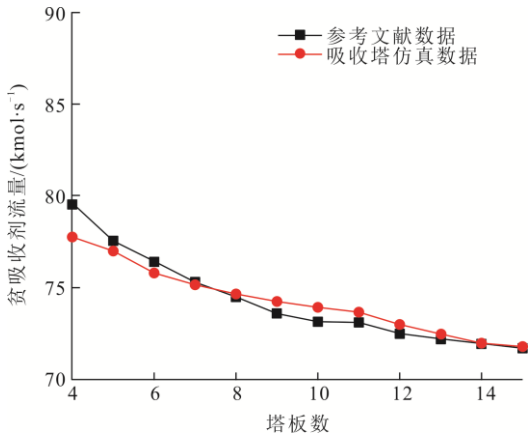


图 2　吸收塔模型仿真数据和文献[24]数据对比
Fig.2 Comparison between the simulation data of the absorption tower model and the data from reference [24]

表 1　压缩机和膨胀机功率仿真数据与文献[25]数据对比
Tab.1 Comparison of power simulation data for compressors and expanders with data from reference [25]

做功部件	参考值/kW	模拟值/kW	相对误差/%
一级压缩机	88.02	88.04	0.02
二级压缩机	89.48	89.52	0.03
三级压缩机	89.45	89.54	0.10
四级压缩机	89.41	89.62	0.15
五级压缩机	89.44	89.88	0.50
一级膨胀机	318.48	317.26	0.38
二级膨胀机	239.29	238.41	0.37
三级膨胀机	177.86	177.21	0.36

1.3 评价指标

为了全面评估系统的综合性能，对系统进行多维度量化，建立了如下的热力学评价体系。

系统的总输入功表示为：

$$W_{\text{in,total}} = \sum W_{\text{pump}} + \sum W_{\text{comp}} \tag{1}$$

式中：$\sum W_{\text{pump}}$ 为系统中溶液泵的总功耗；$\sum W_{\text{comp}}$ 为系统中压缩机的总功耗。

总回收功表示为：

$$W_{\text{out,total}} = \sum W_{\text{exp}} + \sum W_{\text{tur}} + \sum W_{\text{heat}} \tag{2}$$

式中：$\sum W_{\text{exp}}$ 为系统通过膨胀机回收的总功；$\sum W_{\text{tur}}$ 为系统通过水轮机回收的总功；$\sum W_{\text{heat}}$ 为热能等效发电功，该项参照基准热泵性能系数（COP）将供热量折算成等效发电功，以统一衡量供热收益的能量价值。

单位CO_2捕集能耗定义为系统净输入功与所捕集 CO_2 总量的比值[20]：

$$W_{\text{unit}} = \frac{W_{\text{in,total}} - W_{\text{out,total}}}{m(\text{CO}_2)} \tag{3}$$

式中：$m(CO_2)$为系统中捕集的 CO_2 质量流量。

2 结果与讨论

本研究以燃煤电厂排放的烟气作为待脱碳气体，烟气成分主要为 N_2、O_2、CO_2 和 H_2O，假设烟气在进入系统前已完成脱水处理，并且忽略 SO_2、NO_x 等微量成分的影响。烟气的初始状态参数与成分组成详见表 2。其中，在系统供热负荷为 10 MW 的条件下对所需废气质量流量进行了设定。系统的主要设计工况和边界条件（包括吸收塔工作压力、设备等熵效率等）见表 3。系统参考第四代供热网络技术[26]，通过换热器组（H1、H2、H3、H4、H5、H6）将居民端的暖媒水回水从 303.15 K 加热到 333.15 K[27]，然后输送到居民端用于供暖。

表 2 进入系统的烟气组分和状态
Tab.2 Composition and state of the flue gas entering the system

参数	数值
温度/K	273.15
压力/kPa	100
CO_2 质量分数	0.228 5
N_2 质量分数	0.742 0
O_2 质量分数	0.029 5
输入废气质量流量/(kg s^{-1})	34.41

表 3 系统主要设计参数
Tab.3 Key design parameters of the system

参数	数值
环境温度/K	263.15
环境压力/kPa	100
一级吸收塔操作压力/kPa	5 100
二级吸收塔操作压力/kPa	1 300
一级水轮机膨胀压力/kPa	100
二级水轮机膨胀压力/kPa	100
压缩机压缩比	2.84
压缩机等熵效率/%	87
膨胀机膨胀比	2.52
膨胀机等熵效率/%	88
溶液泵等熵效率/%	70
水轮机等熵效率/%	80
加热暖媒水后气体温度/K	308.15
吸收塔入口水温/K	283.15

2.1 系统仿真结果分析

基于上述参数设定，对 CGH-WCC 系统进行了稳态热力学仿真，压缩与膨胀过程各关键节点（对应图 1 中的节点 a1—a29）的状态参数详见表 4。仿真结果显示，每级压缩机出口气体温度均可达 360 K 以上，为加热暖媒水提供了高品位热源。此外，气体中还剩余的低品位余热可用于加热膨胀模块的气体，如表 4 所示，余热温度为 308.15 K，而待加热的脱碳后气体在换热器（X1、X2、X3）中的入口温度为 253.15 K，在 X4 中为 283.31 K。利用换热器（X1、X2、X3、X4）中冷热流股温差对冷流股进行预热，可有效提高膨胀机入口温度，从而增强其做功能力。

表 4 压缩和膨胀过程系统流股节点状态表
Tab.4 State parameters of the system stream nodes during the compression and expansion processes

节点	温度/K	压力/kPa	流量/(kg s^{-1})
a1	273.15	100.00	34.41
a2	376.18	284.16	34.41
a3	308.15	275.63	34.41
a4	267.32	267.37	34.41
a5	368.51	759.74	34.41
a6	308.15	736.95	34.41
a7	267.09	714.84	34.41
a8	368.54	2 031.29	34.41
a9	308.15	1 970.35	34.41
a10	266.96	1 911.24	34.41
a11	369.03	5 430.97	34.41
a12	308.15	5 268.04	34.41
a13	291.69	5 110.00	34.41
a14	283.31	5 100.00	27.06
a15	303.15	4 956.70	27.06
a16	240.16	1 970.35	27.06
a17	253.15	1 911.24	27.06
a18	303.15	1 853.90	27.06
a19	241.28	736.95	27.06
a20	253.15	714.84	27.06
a21	303.15	693.40	27.06
a22	241.66	275.63	27.06
a23	253.15	267.37	27.06
a24	303.15	259.34	27.06
a25	241.56	103.56	27.06
a26	253.15	100.00	27.06
a27	283.19	1 300.00	0.61
a28	154.61	100.00	0.61
a29	253.15	100.00	0.61

系统碳捕集模块各节点（对应图 1 中节点 b1—b25）的热力学参数与组分变化如表 5 所示。经过一级碳捕集循环，在状态点 b9 处获得 CO_2 质量分数为 91.95%的富集气体。为了提高产品气体的质量分

数，将该富 CO_2 气体送入二级碳捕集循环进行提纯处理。最终，在状态点 b25 处获得的 CO_2 气体质量分数达到 99.14%，同时系统的 CO_2 捕集率为 85.65%。经冷凝脱水处理，系统的 CO_2 质量分数可进一步提高至 99.72%，满足高纯度 CO_2 输送与封存标准[28]。

为维持系统循环水的平衡，需向碳捕集循环中补充适量循环水。仿真结果表明，一级与二级循环分别需要补充 0.05 kg/s 与 0.03 kg/s 的循环水（对应图 1 中流股 c1 和 c2）。

表 5 两级水基碳捕集循环流股节点状态表
Tab.5 State parameters of the stream nodes for the two-stage water-based carbon capture cycle

状态点	温度/K	压力/kPa	流量/(kg s^{-1})	组分/(kg kg^{-1})				工质状态
				N_2	O_2	CO_2	H_2O	
b1	291.69	5 110.00	34.41	74.20%	2.95%	22.85%	0	气相
b2	284.63	5 104.74	607.82	0.08%	6.70×10^{-5}	1.31%	98.59%	液相
b3	283.68	100.00	607.82	0.08%	6.70×10^{-5}	1.31%	98.59%	气液相混合
b4	283.68	100.00	600.42	2.40×10^{-6}	3.81×10^{-7}	0.20%	99.80%	液相
b5	283.68	100.00	600.47	2.40×10^{-6}	3.81×10^{-7}	0.20%	99.80%	液相
b6	285.39	5 110.00	600.47	2.40×10^{-6}	3.81×10^{-7}	0.20%	99.80%	液相
b7	283.15	5 110.00	600.47	2.40×10^{-6}	3.81×10^{-7}	0.20%	99.80%	液相
b8	283.31	5 100.00	27.06	92.46%	3.60%	3.91%	0.02%	气相
b9	283.68	100.00	7.40	6.95%	0.55%	91.95%	0.56%	气相
b10	396.38	384.67	7.40	6.95%	0.55%	91.95%	0.56%	气相
b11	308.15	373.13	7.40	6.95%	0.55%	91.95%	0.56%	气相
b12	273.15	361.94	7.40	6.95%	0.55%	91.95%	0.56%	气液相混合
b13	273.15	361.94	0.04	1.11×10^{-5}	1.80×10^{-6}	1.03%	98.97%	液相
b14	273.15	361.15	7.36	6.98%	0.55%	92.39%	0.08%	气相
b15	384.28	1 392.28	7.36	6.98%	0.55%	92.39%	0.08%	气相
b16	308.15	1 350.52	7.36	6.98%	0.55%	92.39%	0.08%	气相
b17	273.15	1 310.00	7.36	6.98%	0.55%	92.39%	0.08%	气相
b18	285.34	1 301.04	357.18	4.50×10^{-5}	7.56×10^{-6}	2.09%	97.90%	液相
b19	285.12	100.00	357.18	4.50×10^{-5}	7.56×10^{-6}	2.09%	97.90%	气液相混合
b20	285.12	100.00	350.39	8.23×10^{-8}	2.78×10^{-8}	0.21%	99.79%	液相
b21	285.12	100.00	350.43	8.24×10^{-8}	2.78×10^{-8}	0.21%	99.79%	液相
b22	285.53	1 310.00	350.43	8.24×10^{-8}	2.78×10^{-8}	0.21%	99.79%	液相
b23	283.15	1 310.00	350.43	8.24×10^{-8}	2.78×10^{-8}	0.21%	99.79%	液相
b24	283.19	1 300.00	0.61	82.19%	6.23%	11.51%	0.07%	气相
b25	285.12	100.00	6.79	0.24%	0.04%	99.14%	0.59%	气相

表 6 汇总了系统运行过程中的能量输入、输出及热能利用情况。系统总输入功（主要来自压缩机和溶液泵）为 20.18 MW，总回收功（包含总输出功 9.63 MW 和热能等效发电功 3.45 MW）为 13.08 MW。系统总供暖量为 10 MW，加热的暖媒水质量流量为 79.75 kg/s。基于上述数据，系统的净输入功（总输入功与总回收功的差值）为 7.10 MW。最终，系统的单位捕集能耗为 290.18 kW h/t。

为了评估 CGH-WCC 系统的性能优势，将本研究所提系统与传统化学吸收法进行对比。鉴于二者能耗形式不同（化学吸收法主要消耗热能，CGH-WCC 主要消耗电能），考虑到电能与蒸汽热能在能量品位上的差异，不能将电能简单地转换成蒸汽热能进行对比。因此，将 CO_2 捕集能耗转换成相应的能耗成本进行进一步对比，结果如表 7 所示。与传统的化学吸收法（>99.9%）相比，CGH-WCC 的 CO_2 产品气纯度（99.72%）略低，但其 CO_2 单位捕集能耗大幅降低至 290.18 kW h/t。基于济南市现行工业电价（0.632 4 元/(kW h)）和最新工业蒸汽价格（265 元/t），分别对 CGH-WCC 系统（主要消耗电能）与传统胺法（主要消耗热能）的 CO_2 捕集能耗成本进行核算。结果表明，CGH-WCC 系统的 CO_2 捕集能耗成本仅为 183.51 元/t，较传统胺捕集法（246.08 元/t）降低了 25.43%。这一结果充分证明了本研究所提系统在降低碳捕集能耗成本方面的巨大潜力。

表 6 系统能量流分配与性能量化评估
Tab.6 Energy flow distribution and performance quantification of the system

系统部件	输入功/MW	输出功/MW	供热量/MW	暖媒水流量/(kg s^{-1})
压缩机 1	3.536	—	—	—
换热器 H1	—	—	2.359	18.81
压缩机 2	3.455	—	—	—
换热器 H2	—	—	2.109	16.78
压缩机 3	3.436	—	—	—
换热器 H3	—	—	2.142	17.08
压缩机 4	3.398	—	—	—
换热器 H4	—	—	2.258	18.01
膨胀机 1	—	1.665	—	—
膨胀机 2	—	1.689	—	—
膨胀机 3	—	1.700	—	—
膨胀机 4	—	1.704	—	—
溶液泵 1	4.300	—	—	—
水轮机 1	—	2.452	—	—
压缩机 5	0.749	—	—	—
换热器 H5	—	—	0.606	4.83
压缩机 6	0.702	—	—	—
换热器 H6	—	—	0.531	4.24
溶液泵 2	0.606	—	—	—
水轮机 2	—	0.345	—	—
膨胀机 5	—	0.077	—	—
总计	20.181	9.632	10.00	79.75

注：表中“—”表示该部件无此项。

表 7 传统化学吸收法与 CGH-WCC 碳捕集性能对比
Tab.7 Carbon capture performance of the conventional chemical absorption method and the CGH-WCC system

参数	化学吸收法	CGH-WCC
CO_2 捕集能耗	~2.6 GJ/t[29]	290.18 kW ħ/t
工业蒸汽价格[30]	265 元/t	
工业电价[31]		0.632 4 元/(kW ħ)
CO_2 捕集能耗成本	246.08 元/t	183.51 元/t
CO_2 气体纯度	>99.9%	99.72%

2.2 系统关键参数敏感性分析

为进一步评估 CGH-WCC 的性能表现，针对环境温度、二级吸收压力、二级循环水流量及输入废气 CO_2 质量分数 4 个关键参数开展系统的敏感性分析，以揭示各参数对系统捕集效率与能耗特性的影响规律。

2.2.1 环境温度

环境温度是影响系统热力学性能的重要外部因素，其对单位 CO_2 捕集能耗和供热量的影响如图 3 所示。由图 3 可见，环境温度升高，系统能够向外提供的热量相应增加。这主要是因为级间冷却后气体温度升高，使其在加热暖媒水的换热器组（H5、H6）中能释放更多高品位热量。同时，环境温度升高也提高了级间压缩的能耗，最终导致单位 CO_2 捕集能耗上升。因此，在较低环境温度下运行虽然会减少供热量，但有助于降低系统单位 CO_2 捕集能耗。

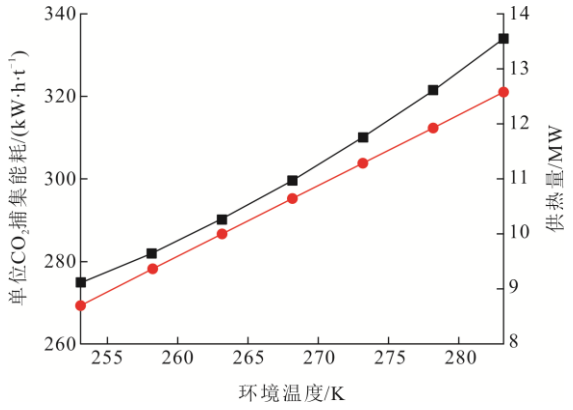


图 3 环境温度对单位 CO_2 捕集能耗和供热量的影响
Fig.3 Influence of ambient temperature on specific energy consumption for CO_2 capture and heating capacity

2.2.2 二级吸收压力

吸收塔的操作压力是影响 CO_2 溶解平衡的关键参数。二级吸收压力对产品气中 CO_2 质量分数和 CO_2 捕获率的影响如图 4 所示。

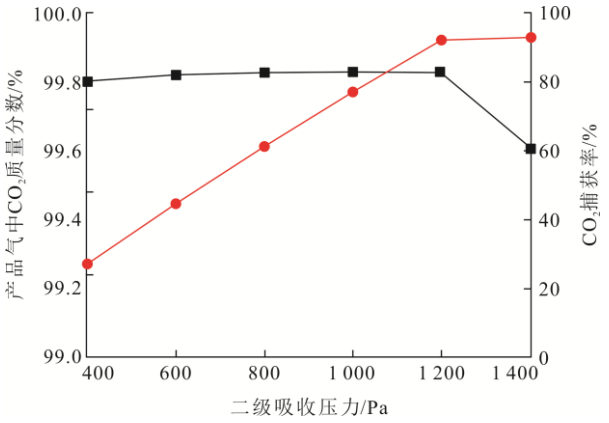


图 4 二级吸收压力对产品气中 CO_2 质量分数和 CO_2 捕获率的影响
Fig.4 Influence of secondary absorption pressure on CO_2 mass fraction in product gas and CO_2 capture rate

由图 4 可见：随着二级吸收压力的提高，CO_2 捕集率先逐渐增加，后趋于平稳；而产品气中 CO_2 的质量分数呈现先缓慢增加后下降的趋势。原因分析如下：根据亨利定律，CO_2 在水中的溶解度与其气相分压成正比。提升二级吸收压力，直接增大了 CO_2 的分压，从而提高了其溶解量，这既促使 CO_2 捕集率上升，也使得产品气中 CO_2 的质量分数在初期有所提高。然而，当压力>1 200 kPa 后，受气相中 CO_2 总量的限制，吸收逐渐接近饱和，提升压力所获得的增益逐渐减弱。与此同时，N_2 和 O_2 的溶解量增速高于 CO_2，导致产品气中 CO_2 的质量分数

随二级吸收压力的增大逐渐下降。

二级吸收压力对单位CO_2捕集能耗和供热量的影响如图 5 所示。由图 5 可见，提高二级吸收压力会增加级间压缩机的功耗并升高压缩机出口气体温度，从而提高换热器组（H5、H6）的供热量，导致系统输出的总供热量逐渐增加。单位 CO_2 捕集能耗由捕获的气体总量和系统净输入功共同影响。由图 4 可知捕获的 CO_2 总量急速上升然后趋于平稳，二级吸收压力<1 200 kPa 时，捕获量的快速增加导致系统单位 CO_2 捕集能耗呈现下降趋势；而当压力≥1 200 kPa 后，捕获量趋于平稳，系统净输入功继续增加，导致捕集能耗又呈现轻微上升趋势。综上，当二级吸收塔压力≥1 200 kPa 时，系统拥有良好的性能表现，若需提高供热量，可适当提高系统二级吸收压力。

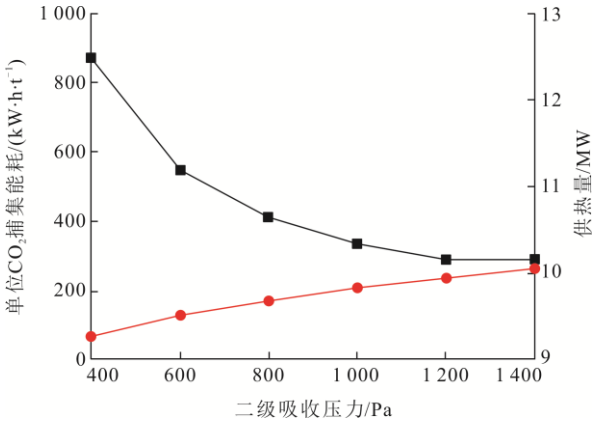


图 5 二级吸收压力对单位 CO_2 捕集能耗和供热量的影响

Fig.5 Influence of secondary absorption pressure on specific energy consumption for CO_2 capture and heating capacity

2.2.3 二级循环水流量

循环水流量影响溶液泵和水轮机的输入、输出功率，也影响吸收塔内气体的溶解行为。二级循环水流量对产品气中 CO_2 质量分数和 CO_2 捕获率的影响如图 6 所示。由图 6 可知，随着二级循环水流量的增加，CO_2 捕集率迅速上升，但当流量≥400 kg/s 时，受气相中 CO_2 总量的限制，增长速率放缓并趋于饱和。值得注意的是，循环水流量的增加也会导致 N_2 和 O_2 的吸收量增加，使产品气中 CO_2 的质量分数轻微下降。

二级循环水流量对单位CO_2捕集能耗和供热量的影响如图 7 所示。由图 7 可知，二级循环水流量的变化对系统供热量没有影响，但系统的单位 CO_2 捕集能耗会随循环水流量的增加急速下降然后轻微上升。这是因为，当循环水流量<400 kg/s 时，捕获能耗主要受气体捕获量的影响，呈现逐渐下降的趋势，而当流量≥400 kg/s 后，捕获量增长饱和，捕获能耗更多受系统净输入功的影响，呈现轻微上升的趋势。综上所述，当二级循环水流量在 300~500 kg/s 内时，系统可在 CO_2 捕获率（>80%）、产品气纯度（>98%）和单位 CO_2 捕集能耗（<300 kW ħ/t）之间实现较好的平衡。

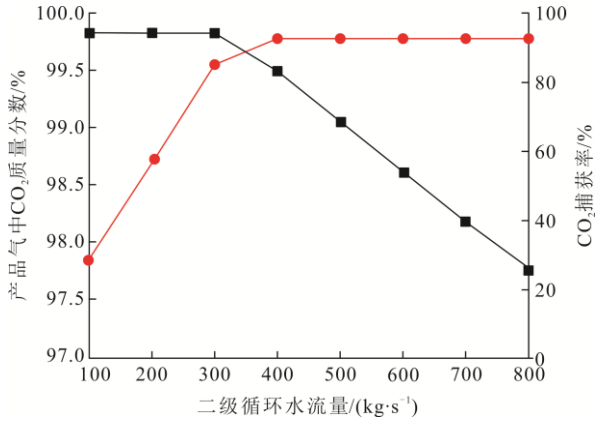


图 6 二级循环水流量对产品气中 CO_2 质量分数和 CO_2 捕获率的影响

Fig.6 Influence of secondary circulating water flow rate on CO_2 mass fraction in product gas and CO_2 capture rate

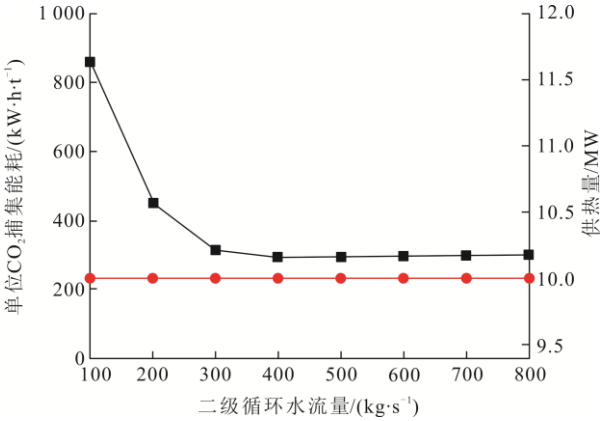


图 7 二级循环水流量对单位 CO_2 捕集能耗和供热量的影响

Fig.7 Influence of the secondary circulating water flow rate on specific energy consumption for CO_2 capture and heating capacity

2.2.4 输入废气 CO_2 质量分数

为评估系统对不同来源烟气的适应性，图 8 分析了输入废气 CO_2 质量分数变化对系统性能的影响。随着输入废气 CO_2 质量分数上升，CO_2 分压随之增加，从而促进了其在循环水中的溶解，使 CO_2 捕获率逐渐增加。然而，当输入废气 CO_2 质量分数超过 25%后，吸收塔内逐渐达到气液平衡状态，CO_2 捕获量的增加速率逐渐放缓，导致 CO_2 捕获效率随质量分数升高而降低。同时，产品气中 CO_2 的质量分数随输入废气 CO_2 质量分数的提高而增加。

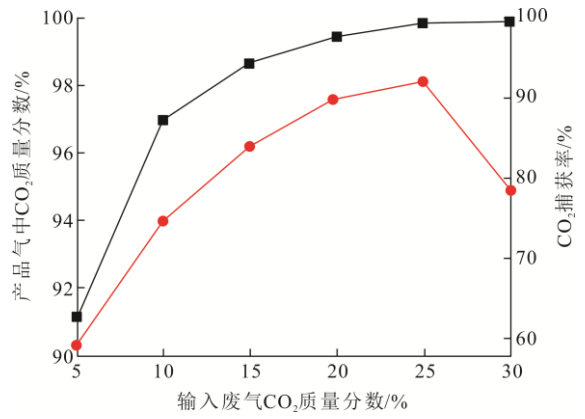


图 8 输入废气 CO_2 质量分数对产品气中 CO_2 质量分数和 CO_2 捕获率的影响

Fig.8 Influence of inlet flue gas CO_2 mass fraction on CO_2 mass fraction in product gas and CO_2 capture rate

输入废气 CO_2 质量分数对单位 CO_2 捕集能耗和供热量的影响如图 9 所示。由图 9 可知，输入废气 CO_2 质量分数升高使单位气体携带的压缩热增加，从而提升了系统的供热量。尽管系统的净输入功也会随之增加，但其增幅远小于气体捕获量的增幅，因此，系统的捕获功耗更多地受捕获的 CO_2 量的影响，其随入口废气 CO_2 质量分数的增加而逐渐下降。综上，系统对中高浓度的入口废气 CO_2 质量分数（≥15%）表现出良好的适应性。

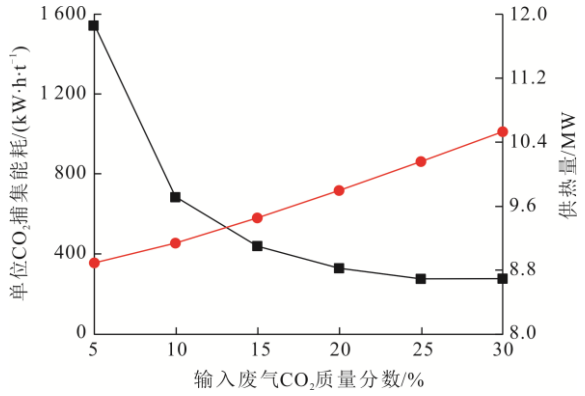


图 9 输入废气 CO_2 质量分数对单位 CO_2 捕集能耗和供热量的影响

Fig.9 Influence of inlet flue gas CO_2 mass fraction on specific energy consumption for CO_2 capture and heating capacity

3 结 论

本研究提出了一种寒冷地区压缩气体供热与水基碳捕集耦合系统，利用寒冷地区的低温环境提升水基碳捕集的效率，同时通过气体压缩热提供一定的供热负荷，实现碳减排与供暖双重目标。主要结论如下：

1）所提出的耦合系统利用北方低温环境的天然优势，克服了常压水基吸收中 CO_2 溶解度低的瓶颈，并结合两级吸收循环实现了 CO_2 的高效选择性捕集。此外，该系统能够稳定提供 10 MW 的供热负荷，有效缓解北方寒冷地区的供暖压力。

2）所提系统的 CO_2 捕集率为 85.65%，对应 CO_2 捕集能耗为 290.18 kW h/t，能耗成本为 183.51 元/t，比传统的胺基化学吸收法（约 246.08 元/t）降低了约 25.43%。最终 CO_2 产品气经处理后纯度达 99.72%，满足封存与利用要求。

3）系统对环境与操作参数具有良好的适应性。敏感性分析表明，在环境温度较低时更有利于降低捕集能耗。系统在二级吸收压力≥1 200 kPa、二级循环水流量在 300~500 kg/s 范围内、输入废气 CO_2 浓度≥15%的工况下性能表现优异，捕集率高且能耗较低，特别适用于中高浓度 CO_2 排放的场景。

4）本研究也存在一定的局限性，包括仿真基于稳态模拟、缺少实验支撑等。同时，与传统胺基碳捕集系统相比，所提出的 CGH-WCC 系统流程复杂度并未得到改善。因此，有必要进行完整的全生命周期经济性分析。后续工作将围绕上述局限性展开，包括：对所提系统进行瞬态仿真，探索时变条件下系统的稳定性；搭建一个小型实验测试系统，验证耦合系统的可行性；建立系统全生命周期经济性分析模型，全面评估系统的经济适用性等。

[参 考 文 献]

[1] 史新立, 裴娜. 北方农村地区不同供暖形式对比研究[J]. 唐山学院学报, 2024, 37(6): 43.
Shi X L, Pei N. Comparative study on different heating forms in northern rural areas of China[J]. Journal of Tangshan University, 2024, 37(6): 43.

[2] 葛保威. 北方农村住宅供暖现状调研与分析[J]. 区域供热, 2021(4): 78.
Ge B W. Investigation and analysis of heating status in northern rural residences[J]. District Heating, 2021(4): 78.

[3] 中华人民共和国国务院新闻办公室. 碳达峰碳中和的中国行动[N]. 人民日报, 2025-11-15.
The State Council Information Office of the People's Republic of China. China's actions on carbon peak and carbon neutrality[N]. People's Daily, 2025-11-15.

[4] 张柏林, 刘志国, 张有强, 等. 空气源热泵在严寒地区供热调节及实测分析[J]. 区域供热, 2025(5): 65.
Zhang B L, Liu Z G, Zhang Y Q, et al. Heating regulation and measured analysis of air source heat pumps in severe cold regions[J]. District Heating, 2025(5): 65.

[5] 李建尧, 肖云峰, 黄磊. 空气源热泵供热蓄热技术在温和地区的优化应用[J]. 制冷与空调(四川), 2025(5): 720.
Li J Y, Xiao Y F, Huang L. Optimal application of air source heat pump heating and thermal storage technology in temperate regions[J]. Refrigeration & Air Conditioning (Sichuan), 2025(5): 720.

[6] 倪龙, 林木森, 魏文哲, 等. 变频空气源热泵供暖结霜

图谱[J]. 暖通空调, 2023, 53(8): 131.
Ni L, Lin M S, Wei W Z, et al. Frosting map for inverter air source heat pumps in heating mode[J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2023, 53(8): 131.
[7] 赵丽丽. 东北农村冬季清洁供暖技术节能改造应用技术研究[J]. 节能, 2025, 44(11): 88.
Zhao L L. Research on energy-saving renovation and application technology of clean heating in rural Northeast China in winter[J]. Energy Conservation, 2025, 44(11): 88.
[8] 冯松松, 贾纪康, 司鹏飞, 等. 空气吸热除霜技术在不同空气源热泵系统中的应用特性研究[J]. 暖通空调, 2025, 55(12): 97.
Feng S S, Jia J K, Si P F, et al. Application characteristics of air heat absorption defrosting technology in different air source heat pump systems[J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2025, 55(12): 97.
[9] Li R, Tang B J, Shen M, et al. Low-carbon development pathways for provincial-level thermal power plants in China by mid-century[J]. Journal of Environmental Management, 2023, 342: 118309.
[10] Chen L, Li K, Chen S, et al. Industrial activity, energy structure, and environmental pollution in China[J]. Energy Economics, 2021, 104: 105633.
[11] Li Y, Yang X, Ran Q, et al. Energy structure, digital economy, and carbon emissions: evidence from China[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2021, 28(45): 64606.
[12] Ahmed R, Liu G, Yousaf B, et al. Recent advances in carbon-based renewable adsorbent for selective carbon dioxide capture and separation: a review[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 242: 118409.
[13] Du J, Yang W, Xu L, et al. Review on post-combustion CO_2 capture by amine blended solvents and aqueous ammonia[J]. Chemical Engineering Journal, 2024, 488: 150954.
[14] Hanson E, Nwakile C, Hammed V O. Carbon capture, utilization, and storage (CCUS) technologies: Evaluating the effectiveness of advanced CCUS solutions for reducing CO_2 emissions[J]. Results in Surfaces and Interfaces, 2025, 18: 100381.
[15] Kemper J, Ewert G, Grunewald M. Absorption and regeneration performance of novel reactive amine solvents for post-combustion CO_2 capture[J]. Energy Procedia, 2011, 4: 232.
[16] Shoukat U, Knuutila H K. Effect of various parameters on the thermal stability and corrosion of CO_2-loaded tertiary amine blends[J]. Energies, 2020, 13(10): 2626.
[17] Ooi Z L, Tan P Y, Tan L S, et al. Amine-based solvent for CO_2 absorption and its impact on carbon steel corrosion: a perspective review[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2020, 28(5): 1357.
[18] Entezari A, Saifoddin A, Aslani A, et al. Optimizing combined cycle and integrated ORC waste heat recovery for enhanced energy efficiency in aqueous post-combustion carbon capture[J]. Energy Conversion and Management, 2026, 348: 120755.
[19] Sander R. Compilation of Henry's law constants (version 5.0.0) for water as solvent[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2023, 23(19): 10901.
[20] Chen L, Zhang L, Wang Y, et al. Design and performance evaluation of a novel system integrating water-based carbon capture with adiabatic compressed air energy storage[J]. Energy Conversion and Management, 2023, 276: 116583.
[21] 王俊鸿, 郭健翔, 张林阳, 等. 基于 Aspen Plus 的碳捕集耦合余热回收利用系统模拟与优化[J]. 青岛理工大学学报, 2025, 46(2): 107.
Wang J H, Guo J X, Zhang L Y, et al. Simulation and optimization of a carbon capture coupled waste heat recovery system based on Aspen Plus[J]. Journal of Qingdao University of Technology, 2025, 46(2): 107.
[22] Yao E, Zhong L, Zhang S, et al. Off-design performance evaluation of a combined heating and power system based on compressed air and thermochemical energy storage under optimized operation strategy[J]. Journal of Energy Storage, 2025, 130: 117485.
[23] He X, Wang H, Ge G, et al. Thermodynamic analysis of a hybrid system combining compressed air energy storage and pressurized water thermal energy storage[J]. Applied Thermal Engineering, 2023, 229: 120568.
[24] 周响球. 燃煤电厂烟气二氧化碳捕获系统的仿真研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2009: 10.
Zhou X Q. Simulation of CO_2 Capture System for Coal-fired Power Plants[D]. Chongqing: Chongqing University, 2009: 10.
[25] Wu S, Zhou C, Doroodchi E, et al. Thermodynamic analysis of a novel hybrid thermochemical-compressed air energy storage system powered by wind, solar and/or off-peak electricity[J]. Energy Conversion and Management, 2019, 180: 1268.
[26] Joderir A M, Goldsworthy M J, Buffa S, et al. Role of sustainable heat sources in transition towards fourth generation district heating: a review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2022, 158: 112156.
[27] 钟俊伟. 压缩空气余热利用系统设计及经济性分析[J]. 能源与节能, 2025(8): 43.
Zhong J W. Design and economic analysis of compressed air waste heat utilization system[J]. Energy and Energy Conservation, 2025(8): 43.
[28] GB/T 42797—2023 全国石油天然气标准化技术委员会. 二氧化碳捕集、输送和地质封存 管道输送系统[S].
GB/T 42797—2023 Carbon dioxide capture, transportation and geological storage—Pipeline transportation systems[S].
[29] Akinmoladum A, Tomomewo O S. Advances and future perspectives in post-combustion carbon capture technology using chemical absorption process: a review[J]. Carbon Capture Science & Technology, 2025, 16: 100461.
[30] 济南市发展和改革委员会关于调整工业蒸汽价格有关事项的通知[EB/OL]. (2023-01-06) [2025-12-03]. http://www.shandong.gov.cn/jpaas-jpolicy-web-server/front/info/detail?iid=79bf025a9039480d844a130343c11a05.
Jinan Municipal Development and Reform Commission. Notice on matters related to the adjustment of industrial steam prices[EB/OL]. (2023-01-06) [2025-12-03]. http://www.shandong.gov.cn/jpaas-jpolicy-web-server/front/info/ detail?iid=79bf025a9039480d844a130343c11a05.
[31] 济南市物价局. 济南市现行电价表[EB/OL]. (2017-01-15) [2025-12-03]. https://jn.bendibao.com/live/2015116/42924.shtm.
Jinan Municipal Price Bureau. Current Electricity Price List of Jinan[EB/OL]. (2017-01-15) [2025-12-03]. https://jn.bendibao.com/live/2015116/42924.shtm.

（责任编辑　李园）