

文章编号: 1004-4051(2025)12-0015-10

DOI: 10.12075/j.issn.1004-4051.20251532

全球和我国氦气产业链发展现状、机遇与挑战

黄 骞¹, 王春燕¹, 张 哲¹, 麻忠伟², 张 朔², 蒋文学¹, 孙春良¹

(1. 中国石油规划总院, 北京 100083;

2. 中油辽河工程有限公司, 辽宁 盘锦 124000)

摘 要: 氦气作为关乎国家安全与经济发展的战略性资源, 凭借其独特的低沸点、化学惰性、强导热性等特性, 在国防军工、航空航天、高端制造、医疗及科研领域具有不可替代性。本文系统梳理全球及我国氦气产业链发展现状, 揭示资源分布特征、技术瓶颈问题与发展优化路径。全球氦气资源高度集中, 美国、卡塔尔、俄罗斯及阿尔及利亚四国掌控 88% 的可采储量, 形成美国和卡塔尔主导的供应格局; 西方资本依托德国林德(Linde)、法国液化空气(Air Liquide)、美国空气产品(Air Products)三大国际气体公司, 垄断全球 70% 的市场份额, 并通过技术壁垒限制关键设备出口。近年来我国氦气产业快速发展, 消费规模持续扩大, 自产气量显著提升, 自主供应能力显著增强, 技术装备国产化取得突破性进展, 产业整体迈入加速发展新阶段。但我国氦气产业链仍面临多重核心风险: 资源禀赋先天不足导致自产能力增幅有限; 提氦成本高企削弱市场竞争力; 战略储备缺失使得应急保供与产销平衡手段薄弱; 全链技术体系尚未完善, 制约产业高效建设。在当前复杂国际形势下, 氦气供应安全仍面临严峻挑战——美欧脱钩断链、联合制裁、进口渠道中断等极端情境下可能发生断供风险, 将直接威胁国家安全、人民健康与经济发展。因此, 亟需构建高效自产、多元进口与战略储备协同的保障体系, 同时通过产学研用协同攻关加速全链技术装备国产化进程, 最终筑牢产业链安全屏障, 推动全产业链自立自强。

关键词: 氦气; 产业链; 供需格局; 对外依存度; 战略资源安全; 技术自主化

中图分类号: TD-9; TE64 **文献标识码:** A

Global and China's helium industry chain: development status, opportunities, and challenges

HUANG Qian¹, WANG Chunyan¹, ZHANG Zhe¹, MA Zhongwei², ZHANG Shuo²,
JIANG Wenxue¹, SUN Chunliang¹

(1. China Petroleum Planning and Engineering Institute, Beijing 100083, China;

2. China Liaohe Petroleum Engineering Co., Ltd., Panjin 124000, China)

Abstract: Helium, as a strategic resource critical to national security and economic development, is irreplaceable in defense, aerospace, high-end manufacturing, and medical research due to its unique

收稿日期: 2025-07-28 责任编辑: 聂虹

基金项目: 中国石油天然气集团有限公司科技项目“油气和新能源融合发展关键技术研究与应用”专项下属课题三“气田生产与新能源融合发展关键技术研究与应用”资助(编号: 2023ZZ31YJ03)

第一作者简介: 黄骞(1995—), 男, 汉族, 山东泰安人, 博士, 高级工程师, 主要从事油气加工及集输储运方向的研究工作, E-mail: huangqian-cppe@petrochina.com.cn。

通讯作者简介: 张哲(1986—), 女, 汉族, 河北邯郸人, 硕士, 高级工程师, 主要从事油气加工及集输储运方向的研究工作, E-mail: zhangzhe55@petrochina.com.cn。

引用格式: 黄骞, 王春燕, 张哲, 等. 全球和我国氦气产业链发展现状、机遇与挑战[J]. 中国矿业, 2025, 34(12): 15-24.

HUANG Qian, WANG Chunyan, ZHANG Zhe, et al. Global and China's helium industry chain: development status, opportunities, and challenges[J]. China Mining Magazine, 2025, 34(12): 15-24.

properties including low boiling point, chemical stability, and radiological inertness. This paper systematically examines the development status of the global and China's helium industry chain, revealing resource distribution patterns, technological bottlenecks, and optimization pathways. Global helium resources are highly concentrated, with the United States, Qatar, Russia, and Algeria controlling 88% of recoverable reserves, forming a supply landscape dominated by the U.S.-Qatar core. Western capital monopolizes 70% of the global market share through three international gas giants—Linde (Germany), Air Liquide(France), and Air Products(U.S.)—while leveraging technological barriers to restrict exports of critical equipment. China's helium industry has developed rapidly in recent years: consumption continues to expand, domestic production has surged significantly, autonomous supply capabilities have markedly improved, and breakthroughs in technology localization have propelled the industry into an accelerated development phase. However, the helium industry chain still faces multiple core risks: limited production growth constrained by poor resource endowment; weakened market competitiveness due to high extraction costs; inadequate emergency supply and production-sales balancing mechanisms resulting from the absence of strategic reserves; and constraints on efficient industrial development caused by incomplete full-chain technologies. Under complex international conditions, helium supply security remains severely challenged, extreme scenarios such as decoupling, joint sanctions by the U.S. and Europe, or import channel disruptions could trigger supply interruptions, directly threatening national security, public health, and economic stability. Therefore, an urgent need exists to establish a synergistic safeguard system integrating efficient domestic production, diversified imports, and strategic reserves. Concurrently, accelerating the localization of full-chain technologies and equipment through collaborative R&D involving industry, academia, research institutes, and end-users is essential to fortify industry chain security and promote comprehensive self-reliance.

Keywords: helium; industry chain; supply-demand dynamics; import dependency; strategic resource security; technology localization

0 引言

氦气是一种极轻、无毒、无色、无味的单原子气体,具有沸点低($-268.9\text{ }^{\circ}\text{C}/4.2\text{ K}$)、超低温(2.2 K)下呈超流体特性、化学惰性、在水中溶解度极低、导热性好、渗透性强、电离电位高等独特性能^[1],广泛应用于国防军工、航空航天、高端制造、医疗及科研等领域,事关国家安全、人民健康与经济发展,是不可替代的战略性资源^[2]。

氦气产业链是指通过工程技术手段,将含氦气体从地层中开采,并将微量氦组分分离提纯为氦气产品,最终销往终端用户的完整链条。横向维度涵盖氦资源、氦生产、氦储存、氦运输、氦销售五大环节。氦资源指含氦组分的气体,包括天然气、地层水溶气、空气等。因空气中氦含量极低(仅 $0.000\text{ }5\%$),地层水溶气资源量虽然很大,但品位低,同样不适合提氦。当前工业化获取氦气的主要方式为从含氦天然气中提取,故本文氦气资源主要指天然气中的氦气资源。氦生产指通过深冷分离或常温分离等技术,从含氦气体中分离出氦的过程。基于应用需求,可产出不同纯度的气态氦、高纯液态氦等多类产品。作为产业链的首个环节,氦生产既是分离提纯的起点,也是成本与能耗占比最高的环节。氦储存指将分离出的不同浓度氦气产品以气态形式或液态形式,

存储于固定式气态/液态氦储罐、压力管道、地下储氦库等设施,旨在保障上游提氦装置连续生产、下游用户稳定供气,并应对战争或大规模自然灾害等极端情况,是产业链的关键环节。氦运输指将氦产品充装至特定容器或管道,运送至分装站、终端用户或储库的过程,作为连接产需的中间环节。因氦气产品规模有限,车船拉运为主要运输方式,管道输送仅适用于短距离高输量场景;按输送方式可分为汽车陆路运输与船舶海洋运输;按包装形式则包括液氦罐箱、液氦杜瓦、高压管束车及气瓶等。氦销售指依托销售网络,通过运输工具将不同形态、纯度的氦气产品配送至终端用户,并根据需求提供纯化、终端充装或补充替换等服务,最终完成产品销售的环节。纵向维度覆盖资源勘查、装备制造、生产加工、贸易应用等领域,对应国民经济中的石油和天然气开采业、燃料加工业、通用设备制造业、专用设备制造业、交通运输业、科学研究和技术服务业等行业,涉及中国石油天然气集团有限公司(以下简称“中国石油”)、中国石油化工股份有限公司(以下简称“中国石化”)、内蒙古兴圣天然气有限责任公司(以下简称“内蒙古兴圣”)等30余家上游生产商,广钢气体(广州)有限责任公司(以下简称“广钢气体”)等100余家中游服务商及100 000余家下游应

用方。氦产业链和石油天然气等大宗商品相比有其特殊性^[3-7], 具有产业链条长、技术难度高、应用领域

广、辐射范围大等特征。氦产业链知识图谱如图 1 所示。

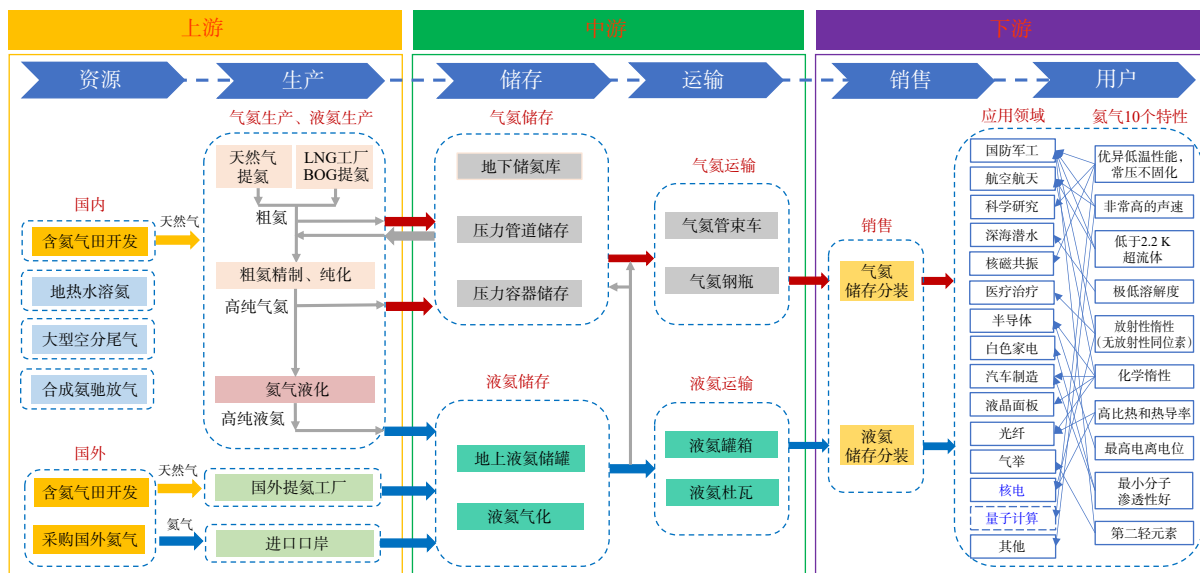


图 1 氦产业链知识图谱

Fig. 1 Knowledge graph of helium industry chain

1 全球氦气产业链现状与发展趋势

1.1 资源和生产现状

氦气作为全球稀缺的战略性资源, 其地质赋存呈现显著的非均衡特征^[8-9]。全球氦气资源分布情况如图 2 所示。根据美国地质调查局(USGS)数据^[10], 全球氦气可采储量总量为 $519 \times 10^8 \text{ m}^3$, 其中, 美国($206 \times 10^8 \text{ m}^3$, 占比 40%)、卡塔尔($101 \times 10^8 \text{ m}^3$, 19%)、阿尔及利亚($82 \times 10^8 \text{ m}^3$, 16%)和俄罗斯($68 \times 10^8 \text{ m}^3$, 13%)四国合计掌控全球 88% 的资源储量; 我国氦气储量仅 $11 \times 10^8 \text{ m}^3$, 占比不足 2%, 资源禀赋劣势明显。从资源品质维度分析, 全球含氦天然气资源禀赋差异显著: 美国天然气中氦平均丰度达 0.37%(部分气

田高达 11.4%), 而我国氦平均丰度仅为 0.03%, 是美国丰度的 1/12, 资源开发难度显著高于国际主流产区。基于资源分布格局, 全球氦气供应呈现高度集中态势。2024 年全球氦气产量达 $1.88 \times 10^8 \text{ m}^3$, 其中, 美国($5.800 \times 10^4 \text{ m}^3$, 31%)、卡塔尔($7.300 \times 10^4 \text{ m}^3$, 39%)占据主导地位, 两国合计贡献全球 70% 的产量。阿尔及利亚($2.000 \times 10^4 \text{ m}^3$, 11%)和俄罗斯($2.200 \times 10^4 \text{ m}^3$, 12%)作为重要补充, 形成“美卡双核、阿俄协同”的供应格局。

美国是氦气开采最早、资源最丰富的国家, 拥有提氦和储氦库建设技术。1921 年, 美国建设了全球第一座提氦厂。1925 年, 美国颁布了《氦气法案》, 规定内务部统筹全国氦生产、储运, 要求氦含量大于 0.3% 的天然气必须提氦, 并授权内政部落下的矿务局建造和运营 6 座提氦工厂。二战期间, 氦气开始用于潜水、焊接、海军和气球, 曼哈顿原子弹计划也使用了大量氦气, 受到需求牵引, 矿务局又建设了一批提氦工厂。二战后氦气需求量急剧下降, 大部分工厂停产, 内务部开展先导试验把多余的氦气储存在克里夫赛德储氦库(Cliffside)。克里夫赛德储氦库(Cliffside)是全球首座储氦库, 总库容 $12 \times 10^8 \text{ m}^3$, 1995 年储存量达到 $9.7 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。1996 年美国颁布了《氦气私有化法案》, 开始出售克里夫赛德储氦库(Cliffside)中的氦气。2003—2017 年, 储氦库年抛销量在 $4.000 \times 10^4 \text{ m}^3$ 以上, 到 2022 年克里夫赛德储氦库(Cliffside)已基本采空。2024 年美国提供了全球氦

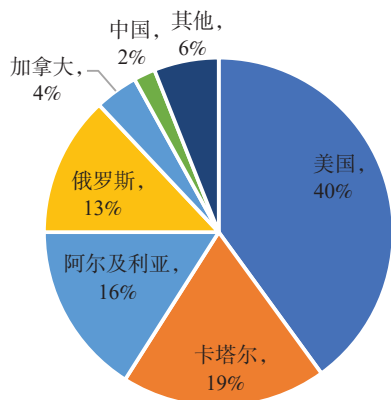


图 2 全球氦气资源分布

Fig. 2 Global distribution pattern of helium resources

(资料来源: 美国地质调查局(USGS))

气供应量的31%,达 $5\,800\times 10^4\text{ m}^3$,其中, $5\,200\times 10^4\text{ m}^3$ 由天然气生产, $600\times 10^4\text{ m}^3$ 由克里夫赛德储氦库(Cliffside)提供。

卡塔尔目前是全球最大氦气生产国,其天然气可采储量约 $25\times 10^{12}\text{ m}^3$,绝大部分来源于北方气田(North Field)。为高效利用北方气田(North Field)天然气资源,卡塔尔能源(Qatar Energy)在卡塔尔东北部建设了拉斯拉凡工业城(Ras Laffan),将天然气转化为液化天然气、氦气、丙烷、丁烷等一系列下游产品。卡塔尔能源(Qatar Energy)目前经营 Helium-1、Helium-2 和 Helium-3 等三座提氦工厂,2024 年供应量约为 $7\,300\times 10^4\text{ m}^3$,占全球供应量的39%;正在建设 Helium-4 和 Helium-5 等两座提氦工厂,总产能约 $8\,400\times 10^4\text{ m}^3$,分别于2027年和2028年投产。Helium-4 和 Helium-5 投产后,卡塔尔氦气产能将达 $1.5\times 10^8\text{ m}^3/\text{a}$,占据全球氦气供应量的一半以上。

俄罗斯现在运营三座天然气提氦工厂:奥伦堡提氦厂(Orenburg)于1977年建成,产能 $500\times 10^4\text{ m}^3/\text{a}$,由俄气公司(Gazprom)运营;伊尔库茨克雅拉克塔提氦厂(Yarakta)于2023年建成,产能 $750\times 10^4\text{ m}^3/\text{a}$,由伊尔库茨克石油公司(INK)运营;阿穆尔天然气处理厂(Amour)设计天然气处理规模 $420\times 10^8\text{ m}^3/\text{a}$,商品天然气产能 $380\times 10^8\text{ m}^3/\text{a}$,氦气产能 $6\,000\times 10^4\text{ m}^3/\text{a}$ 、乙烷产能 $250\times 10^4\text{ t/a}$ 、丙烷产能 $100\times 10^4\text{ t/a}$ 、丁烷产能 $50\times 10^4\text{ t/a}$ 、轻烃产能 $20\times 10^4\text{ t/a}$ 、重烃产能 $20\times 10^4\text{ t/a}$,是全球最大的天然气处理厂和提氦工厂之一,由俄气公司(Gazprom)运营。阿穆尔项目共有三条氦气生产线,目前在运一条,产氦能力 $2\,000\times 10^4\text{ m}^3/\text{a}$;计划在2030年之前调试投运另外两条生产线,达到设计产能 $6\,000\times 10^4\text{ m}^3/\text{a}$ 。

1.2 供应链现状

全球氦气产业链由西方资本控制的寡头垄断。全球氦气供应以长协为主,实行配额制,德国林德(Linde)、法国液化空气(Air Liquide)、美国空气产品(Air Products)等全球三大氦气供应商占据了全球70%的市场份额,具有极高的话语权。

德国林德(Linde)作为全球工业气体龙头,在氦气产业链中占据核心地位,市场份额约为40%。该公司通过先进的氦气提取与液化技术,持续强化全球供应链能力,通过技术入股的形式,参与美国、阿尔及利亚、卡塔尔、澳大利亚的多个提氦装置,从源头上掌握着氦气资源供应。德国林德(Linde)还在全球拥有50个氦气转运设站,其液氦罐箱技术和液氦充装转运能力处于行业领先水平,支撑了氦气资源的稳定跨境调配。法国液化空气(Air Liquide)是工

业气体领域的领导者,也是氦气领域的主要参与者,市场份额约为20%。美国空气产品(Air Products)拥有深厚的历史积淀,设计并建造了全球首套深冷法天然气提氦装置,奠定了工业级氦气分离的技术标准,目前市场份额约10%。

以美国为首的西方企业或资本不仅从源头上掌控氦气的分配,还掌握着国际领先的提氦技术和装备制造技术,通过限制液氦罐箱、大型氦气液化器、大型液氦储罐、超低温核心部件的销售,巩固其在产业链上的垄断地位。如美国商务部明确规定,20 K 以下制冷机及核心部件禁止出口中国;欧盟要求低温设备对中国出口必须报最终用户,且设备卖方有现场检查权和否决权;日本从2015年开始禁止制冷压缩机出口中国。美国空气产品(Air Products)、法国液化空气(Air Liquide)、德国林德(Linde)等公司生产的液氦罐箱和氦气液化器在供应有政府或央企背景的中国企业时,限制销售或在合同中增加限制性条款。

1.3 未来供需格局

全球氦气供需双涨,预期整体趋于宽松态势。从供给侧来看,全球氦气产能预计进入快速投放期^[11-13],全球氦气勘查开发主体日益多元化,预计2030年以前,将有六个大型项目投产,总产能达 $1.39\times 10^8\text{ m}^3/\text{a}$ (表1)。综合考虑投运不确定性和老厂产量递减,预计2025年全球氦气产量 $2.03\times 10^8\text{ m}^3$,2030年可达 $3.23\times 10^8\text{ m}^3$ 。全球氦气供需情况如图3所示。由图3可知,全球氦气供应将呈现美国、卡塔尔、俄罗斯“三分天下”的格局。从需求侧来看,2024年全球氦气消费量约 $1.85\times 10^8\text{ m}^3$,按照3%的增速预测,预计2025年消费量 $1.9\times 10^8\text{ m}^3$,2030年有望增至 $2.2\times 10^8\text{ m}^3$ 。自2025年开始,全球氦气供应将呈宽松态势^[14]。

表1 全球近期投产的大型提氦项目

Table 1 Global recently commissioned large-scale helium extraction projects

序号	项目名称	产能/ ($\times 10^4\text{ m}^3/\text{a}$)	国家	释放时间
1	伊尔库茨克(Irkutsk)	500	俄罗斯	2025年
2	Helium-4	4 200	卡塔尔	2027年
3	Helium-5	4 200	卡塔尔	2028年
4	阿穆尔二列(Amour-2)	2 000	俄罗斯	2028年
5	阿穆尔三列(Amour-3)	2 000	俄罗斯	2030年
6	Arzew/Kikda	1 000	阿尔及利亚	2030年
	合计	13 900	—	—

2 我国氦气产业链现状

2.1 市场销售

2016—2024年我国氦气消费情况如图4所示。

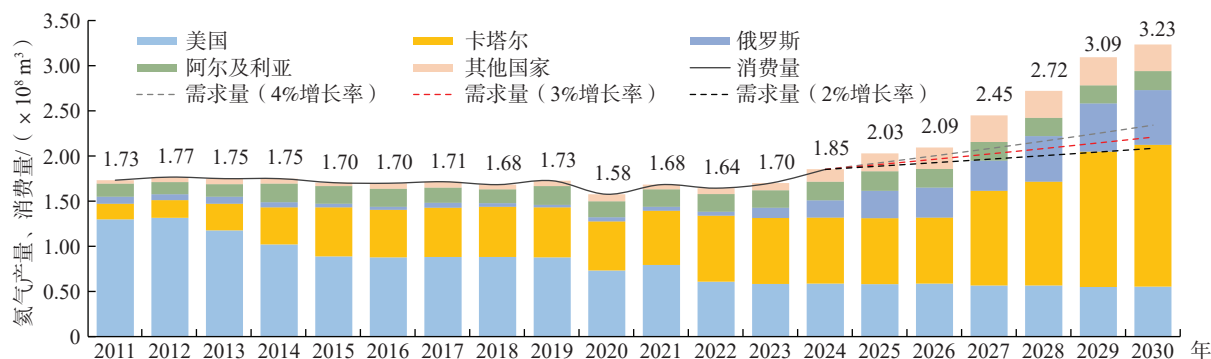


图 3 2011—2030 年全球氦气供需格局

Fig. 3 Global helium supply and demand dynamics from 2011 to 2030

由图 4 可知, 2016—2024 年, 我国氦气消费量整体处于增长态势, 复合增长率约 5%。2016—2018 年, 受核磁共振设备、光纤、半导体、实验室等终端需求刺激, 氦气消费量不断增加。2019 年, 受到全球氦气资源紧缺造成的供应不足影响, 加之受光纤光缆行业需求疲软, 氦气消费量下降。2020 年, 受到新冠疫情疫情影响, 需求表现相对乏力, 整体需求量延续下滑走势。2021 年开始, 随着新冠疫情得到有效控制, 下游工业活动逐渐恢复, 氦气需求也相应提高。2024 年, 我国氦气总消费量约为 $2\,705 \times 10^4 \text{ m}^3$, 同比增加 5.1%。

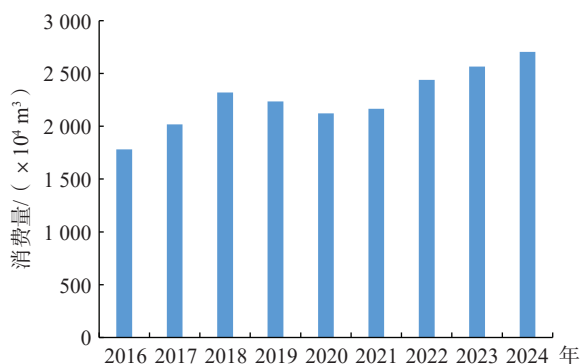


图 4 2016—2024 年我国氦气消费量

Fig. 4 China's helium consumption from 2016 to 2024

按照医疗、民用、工业、航空航天、军工、科研等六个行业, 将我国氦气消费细分为核磁共振、医疗治疗、气举、光纤、液晶面板、半导体、白色家电、汽车制造、航空航天、军工、科研、深海潜水等 12 个消费领域。其中, 我国氦气市场最大的下游为核磁共振领域, 2024 年消费量约 $982 \times 10^4 \text{ m}^3$, 占比在 36.3% 左右。核磁共振也是最大的液氦应用领域, 液氦被用于进行冷却超导磁体, 以维持超导磁性正常使用所需超低温, 主要用途包括核磁共振设备的初装和医院磁共振设备保有设备的补装氦。半导体是我国氦气消费的第二大领域, 主要用于半导体器件和芯片的晶圆制造环节, 作为载气、填充气体和检漏气体,

2024 年消费量 $438 \times 10^4 \text{ m}^3$, 占比约 16.2%。第三大消费领域为民用气举领域, 包括飞艇和气球两大领域, 以气球应用为主, 因氢气球易爆炸, 在文艺活动、商业演出及结婚典礼等活动中氦气球被普遍使用, 2024 年消费量 $360 \times 10^4 \text{ m}^3$, 占比约 13.3%。白色家电领域主要在空调、冰箱等制造过程中用作示踪检漏气体, 2024 年需求量 $162 \times 10^4 \text{ m}^3$, 占比约 6.0%。汽车制造领域主要用于汽车燃料箱、变矩器散热器、换热器、空调等重要汽车部件测试和安全气囊填充, 2024 年消费量约 $88 \times 10^4 \text{ m}^3$, 占比约 3.1%。在科学研究领域: 一是利用液氦低温特性制作超导磁体, 用于粒子对撞机、磁悬浮列车、大科学装置等试验研究; 二是利用化学惰性和高电离电位, 作为色谱、色质等分析检测的载气, 供科研院所和实验室使用; 三是利用分子小质量轻、扩散穿透性强、感应快且稳定等特点, 进行仪器检漏, 2024 年消费量 $35 \times 10^4 \text{ m}^3$, 占比约 1.3%。此外, 在国防军工、航空航天、光纤制造、液晶面板、医疗治疗、深海潜水等领域, 氦气也有着广泛的应用^[15-16]。

2.2 国内生产

我国氦气资源以贫氦为主^[17-18], 全国平均氦含量比美国低一个数量级, 加之提氦技术研究起步较晚, 我国氦气产量在 2019 年之前一直保持低位。2020 年 10 月, 中国科学院理化技术研究所成功攻克了一系列技术和工程难题, 与宁夏深燃众源公司联合开发建设的国内首套液化天然气蒸发气 (BOG) 低温提氦项目在宁夏盐池建成投产, 氦气产能达到 $11 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$ 。同年 12 月, 四川空分设备 (集团) 有限责任公司的全资控股子公司兴圣公司提氦装置在内蒙古自治区鄂尔多斯市杭锦旗一次性开车成功, 生产出纯度 99.999% 以上的高纯氦气, 是国内首个产能超过百万立方米的提氦项目。2021 年 6 月, 瑞华能源提氦项目投产, 年产能 $20 \times 10^4 \text{ m}^3$, 是国内首套常温法 BOG 提氦项目。自此, BOG 提氦技术、装备已经基本成

熟,我国BOG提氮产能出现了井喷式的增长。与此同时,中国石油、中国石化等能源企业也聚焦贫氮天然气直接提氮技术,系统性地将膜分离^[19-20]、乙烷回收、天然气液化^[21-22]、深冷精馏^[23]、变压吸附^[24]等多种新技术优化集成,研发形成了单级膜分离富集及天然气液化联产提氮技术、多级膜分离富集及变压吸附提氮技术、乙烷回收及深冷精馏提氮联产LNG技术等低含氮天然气系列化提氮原创技术^[25-26],并实现了工业化应用,建成一系列天然气直接提氮项目。截至2024年底,我国共建成36套提氮项目,总产能超过 $1\,000\times 10^4\text{ m}^3/\text{a}$ 。2016—2024年我国氮气自产量如图5所示。由图5可知,2020年之前,我国氮气年产量均低于 $10\times 10^4\text{ m}^3/\text{a}$;2020年开始氮气产量爆发性增长,全年生产氮气 $46\times 10^4\text{ m}^3$,同比增长375%;之后氮气产量维持高速增长,2023年国内氮气产量达到 $268\times 10^4\text{ m}^3$,占当年消费量的10.4%,推动对外依存度降低至89.6%,首次降至90%以下;2024年氮气产量再创新高,达到 $442\times 10^4\text{ m}^3$,推动对外依存度再降6个百分点,达到83.7%,为历史最大降幅。

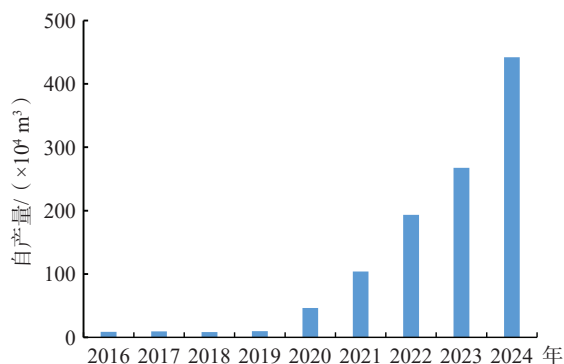


图5 2016—2024年我国氮气自产量

Fig. 5 China's domestic helium production from 2016 to 2024

2.3 国外进口

我国氮气资源品位差,自产量低,一直高度依赖进口,2016—2024年的氮气进口情况如图6所示。由图6可知,我国氮气进口量整体呈现稳中有升的趋势。2016—2017年,氮气价格虽一直处在成本线附近,但受卡塔尔“包销”协议限制,氮气进口量仍保持增长;2018年我国氮气市场价格处于相对较高位置,高额利润下,进口量进一步提高;2019年全球范围内氮气资源紧张,我国氮气进口量 $2\,226\times 10^4\text{ m}^3$,比2018年减少3.7%;受新冠疫情影响,2020—2021年,国内氮气需求受到一定限制,2020年氮气进口量约 $2\,076.3\times 10^4\text{ m}^3$,比2019年减少6.7%,2021年,我国共进口氮气 $2\,062\times 10^4\text{ m}^3$,较2020年减少0.7%;2022年,受到核磁共振、航空航天、军工等行业提振的影响,

在需求的推动下,我国氮气进口量恢复增长,年进口氮气 $2\,247\times 10^4\text{ m}^3$,较2021年增加8.9%;2023年,我国氮气进口量小幅增加,共进口氮气 $2\,297\times 10^4\text{ m}^3$,较2022年增加2.2%;2024年,我国氮气国产化进程加快,随着国内氮气产量的显著增长,市场自给率继续提升,进口量下滑至 $2\,263\times 10^4\text{ m}^3$,较2023年同期下降1.5%。

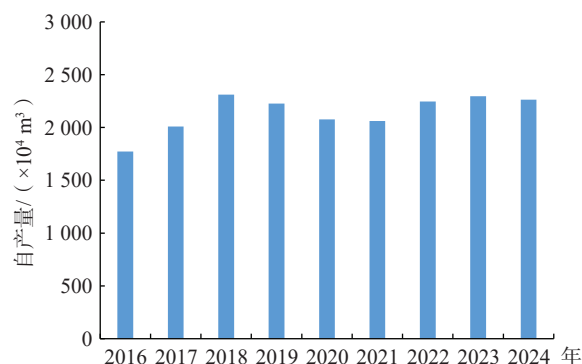


图6 2016—2024年我国氮气进口量

Fig. 6 China's helium imports from 2016 to 2024

(资料来源:海关总署)

我国氮气进口来源结构如图7所示。由图7可知,我国氮气进口主要来自卡塔尔、俄罗斯和美国,来自卡塔尔进口氮气 $1\,404\times 10^4\text{ m}^3$ 、占比62.0%;来自俄罗斯进口氮气 $758\times 10^4\text{ m}^3$ 、占比33.5%;来自美国进口氮气 $101\times 10^4\text{ m}^3$ 、占比4.5%。从近三年进口情况来看,自卡塔尔、美国、澳大利亚等国家的进口量逐年减少,俄罗斯进口量呈增加态势。虽然从卡塔尔进口量有所下滑,但其2024年仍居首位,进口量占到一半以上。美国、澳大利亚自用量增加,近年来外销量下滑明显。由于俄罗斯受到西方国家制裁,氮气出口欧洲受限,我国几乎成为俄罗斯唯一的出口国,加之黑河、珲春等路上氮气进口口岸开通,2023年开始,

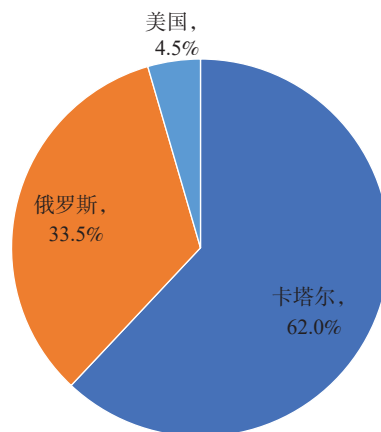


图7 2024年我国氮气进口来源国结构

Fig. 7 Structure of China's helium import sources in 2024

自俄罗斯的进口量增幅明显, 2024 年其跃居至第二位, 成为中国氦气第二大进口国。预期随着俄罗斯阿穆尔项目完全投产, 来自俄罗斯的氦气进口比例还会进一步上升, 届时将形成俄罗斯和卡塔尔“二分天下”的格局。

我国氦气进口企业结构如图 8 所示。由图 8 可知, 进口方面依然是以外资企业为主, 德国林德 (Linde)、法国液化空气 (Air Liquide)、美国空气产品 (Air Products)、日本岩谷 (Iwatani)、日本大阳日酸 (Taiyo Nippon Sanso)、德国梅塞尔 (Messer) 的占比分别为 15.0%、15.5%、15.0%、11.5%、5.0% 和 4.2%, 六家外资企业进口占比达到 66.2%。相比 2023 年, 外资企业的进口份额普遍处于下降趋势, 从 2023 年的 83.8% 下降到 2024 年的 66.2%, 这主要是由于外资企业的进口资源多来自于卡塔尔和美国, 2024 年受到俄罗斯资源价格优势的冲击, 占比有所下降; 国内贸易商企业, 如广钢集团、上海济阳、华特集团、金宏气体、杭氧集团等自主从俄罗斯外采气源, 进口量较往年有所增加, 国内贸易商进口占比从 2023 年的 16.2% 增长到 2024 年的 33.8%。

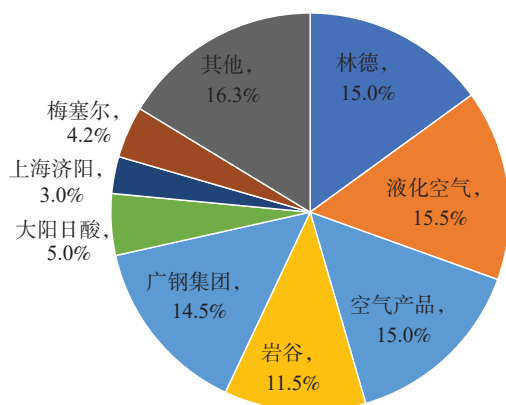


图 8 2024 年我国氦气进口企业结构

Fig. 8 Structure of China's helium import enterprises in 2024

2.4 储存运输

2.4.1 氦气储存

氦气储存主要是指储氦库, 属于氦气产业链的中游, 是稳定上游生产、保证下游供应的重要设施。氦储存是我国氦产业链的最短板, 目前尚未建立储氦库, 储氦技术尚处于攻关阶段。由于液氦极易气化, 主要采用气态形式进行储存, 按照所储存氦气的纯度可以分为粗氦储库和纯氦储库; 按照储存介质可以分为地下储氦库和地面储氦库。

地下储氦库是利用构造完整、密闭性好的地质体作为储存空间, 由于储存规模大、储存成本低, 是长期大规模储存氦气的首选。地下储氦库可以分为

枯竭气藏型和盐穴型两种类型, 由于枯竭气藏中残存着天然气, 注入的氦气纯度会降低, 因此, 气藏型储氦库一般用于储存粗氦, 而盐穴型储氦库可以储存粗氦或者纯氦。国外储氦库技术已经成熟, 早在 1963 年, 美国就建设了气藏型地下储氦库, 用于储存粗氦, 储存能力 $9.5 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。俄罗斯奥伦堡氦气厂 (Orenburg)、法国液化空气 (Air Liquide)、美国空气产品 (Air Products) 等先后建设了盐穴型储氦库, 用于储存粗氦或纯氦。国内地下储氦库尚处于研究攻关阶段, 其中, 储库评价方法和建设工艺是关键。储氦库评价重点在于储氦库规模、地质体密封性, 建设工艺重点攻关方向包括井筒工艺、注采地面工艺及配套密封性监测技术等, 中国科学院武汉岩土力学研究所等科研院所正在开展储氦库前期选址评价工作。

地面储氦库是利用液氦贮罐等压力容器、高压管束橇、长距离压力管道储存氦气, 可以储存粗氦或纯氦。通过气瓶组与集装箱框架连接组成的固定高压管束橇应用已较为成熟, 可用于较大规模精制气氦储存; 长距离压力管道可用于大规模粗氦纯储, 中国石油开展了压力管道存储粗氦先导性实验, 证明利用管道储存粗氦技术上可行。液氦贮罐是大规模液氦储存的必备设施, 德国林德 (Linde) 和法国液化空气 (Air Liquide) 在液氦储罐制造和供应中占主导地位, 我国张家港中集圣达因、杭氧集团、南京晨光、中国石油、四川空分等企业也在开展设备研制, 取得了突破性进展, 已经初步具备工业化生产能力。

2.4.2 氦气运输

氦气运输是衔接提氦生产与下游用户的重要环节。我国进口的氦气均为高纯液氦, 利用移动式液氦罐箱通过远洋货轮运输至港口, 通关后再通过汽车陆路运输至分装站, 分装至高压气氦管束车、液氦杜瓦、气氦钢瓶中, 再经汽车拉运至各个用户。我国自产的氦气有高纯气氦、高纯液氦两种形式, 分别利用高压气氦管束车、移动式液氦罐箱通过汽车拉运至分装站, 分装后配送至用户。俄罗斯进口氦气可以经吉林珲春口岸和黑龙江黑河口岸入境, 采用陆路运输方式。

液氦罐箱是长距离、大规模氦运输的必备设施, 按照国际惯例, 签订氦气长协合同必须持有相应数量的液氦罐箱, 因此, 液氦罐箱成为制约氦气进口能力的关键因素。长期以来, 德国林德 (Linde) 和美国空气产品 (Air Products) 旗下加德纳 (Gardner) 垄断了全球液氦罐箱的制造和供应。我国张家港中集圣达因、杭氧集团、四川空分、南京晨光、中科富海等企业已经具备液氦罐箱工业化生产能力。

小规模液氮运输多采用车拉杜瓦,常用规格有100 L、200 L、250 L、300 L和500 L不等。大规模气氮运输可采用高压管束车,常用规格为7管式和9管式,标准充装气量分别为4 500 m³和6 500 m³。小规模气氮运输可采用钢制气瓶,有10~50 L等不同容积,可以采用单瓶或多瓶集装格(16瓶或24瓶)包装。液氮杜瓦、高压气氮管束车和钢制气瓶运输均为成熟技术。

3 我国氮气产业链机遇与挑战

当前,国际局势变乱交织,百年变局加速演进,国际政治纷争和军事冲突多点爆发,全球发展和安全形势错综复杂。虽然近年我国氮气产业迅速发展,自主供应能力显著提升,产业链进入快速发展的新阶段,但是我国氮气对外依存度仍在80%以上,自主可控能力差,在美欧脱钩断链、联合制裁,进口渠道和海运中断等极端情境下面临断供风险,将直接影响国家安全、人民健康和经济发展。

1)我国氮气消费量将持续稳定增长。将氮市场按照六大行业、12个细分领域分类。其中,军工、航空航天、科研为一类用户;医疗和高端制造为二类用户;其他为三类用户。采用行业分析法,结合各行业发展形势及氮用途用量,采集行业历史用气量、外部资料、氮利用原理、客户自提产品用气单耗等数据,综合国家经济发展、人口预期、利用政策等多方面因素,对各行业应用特点及趋势进行分析,逐行业构建需求预测模型开展需求预测。受航空航天与军工加速推进、半导体等高端制造迅猛发展、核磁共振需求快速增长等拉动,我国氮气需求量将持续稳步增长,预计2025年国内氮气需求量为 $2\,850\times 10^4$ m³,2030年为 $3\,750\times 10^4$ m³,2035年约 $4\,600\times 10^4$ m³,平均增长率5%。从消费领域看,一类用户增长快,预计其2025年消费量为 600×10^4 m³,2027年为 700×10^4 m³,2030年为 900×10^4 m³,2035年为 $1\,200\times 10^4$ m³,平均增长率8%。

2)我国资源品位差,提升产能潜力有限。全球已建大规模氮气工厂,如美国20座天然气提氮工厂,近几年投产的澳大利亚达尔文(Darwin)、俄罗斯阿穆尔(Amour)及即将投产坦桑尼亚提氮工厂原料气中氮气含量相对较高(体积分数大于0.2%),采用深冷法直接提氮成本相对较低,平均提氮成本仅30元/m³,我国到岸成本不超过90元/m³。我国氮气资源分散、提氮工厂规模小、资源贫,导致天然气直接提氮成本高达150元/m³,与进口气相比竞争力弱,加之近年来国内氮气价格大幅下降,企业生产经营压力进一步加大,氮气产能大规模建设受到制约。

虽然采用BOG提氮可以大幅降低提氮成本,但受限于LNG产能,BOG提氮潜力有限。

3)我国无氮气储备,缺乏应急保供的有效手段。储氮库是全产业链最重要环节,是消费端的“蓄水池”,可及时平供需、稳价格;是供应端的“仓储库”,可有效保生产、促进进口;是战略性的“压舱石”,可长期稳大局、保应用。美国、俄罗斯等国家高度重视氮气储备,由国家主导建设和运营氮气战略储备库。我国氮气对外依存度仍维持在80%以上,且进口企业多为国外跨国公司,在美国、欧洲、日本等脱钩断链、联合制裁情景下,关键核心领域用氮面临断供风险,将直接影响国家安全、人民健康和经济发展。

4)我国氮气全链技术尚不完善,制约了产业链高效建设。中国石油、中国石化、中国地质调查局、中国科学院、中国石油大学(北京)等相关科研院所积极开展全链技术、装备攻关,目前,已经初步形成富氮气藏富集成藏机制和氮资源评价方法^[17-18]、贫氮天然气提氮和BOG提氮技术^[25]、氮气纯化和液化技术^[27-28]、液氮储存和运输技术^[29-30],研制出300 L/h氮液化器、40 m³液氮罐箱、120 m³液氮储罐、提氮专用膜等关键装备,支撑了内蒙古兴圣等百万方级提氮工程建设。但是在富氮气天然气勘查方面,氮气富集机理认识不清、氮气资源评价技术尚不完善;在贫氮天然气提氮技术方面,中小型全流程提氮技术已经全部自主,但尚缺乏大型低成本贫氮天然气提氮技术;在氮气储存方面,适用于大规模储存的地下储氮库选址评价与建库技术尚处于理论研究阶段;装备制造方面,液氮温区阀门和仪表尚需攻关,氮气液化器、大型液氮储罐、提氮膜等尚需进一步提升性能,形成大型化系列化产品,一定程度上制约了产业链高效建设。

4 发展对策与建议

1)多措并举,提升氮气供应能力。积极发展国内提氮项目,扩大国产气规模。作为全球第二大氮气消费国,我国未来需求量将持续增长。系统推进国内提氮规模化建设是破除进口依赖、重构供应体系的关键路径。建议强化勘探开发投入,由油气勘探^[31-32]兼探氮气向氮气资源专探转变,充分释放资源潜力,优选高丰度气田建设现代化生产基地,实现集约化规模化绿色生产。此举不仅可显著提升国产气绝对产能,有效填补供需缺口,更能优化供给结构、降低对外依存度、增强供应链自主可控能力;长远来看,强大的本土产能将提升国际市场议价权,有效平抑进口成本波动,驱动全产业链高质量发展。

把握全球机遇,拓展国际资源获取渠道。随着

俄罗斯、卡塔尔等国的大型工程陆续投产, 国际供应趋向宽松。叠加俄乌冲突导致俄罗斯氦气出口欧洲渠道受限, 我国已成俄方主要目标市场。建议利用供应宽松窗口期, 加快进口设施建设, 同时优化来源结构、拓展多元进口渠道, 构建韧性强劲的供应体系。

科学布局储氦设施体系, 强化安全保障能力。针对生产销售端的短期调峰需求, 可采用压力容器储气; 应对区域性供需波动的中期调节, 宜采用地下储氦库或长输管道储气; 面向极端事件的战略储备, 应重点发展大规模地下储氦库。鉴于我国盐穴储库技术处于先导试验阶段, 建议同步推进两条技术路线: 加快开展选址灵活、技术成熟度较高的地下隧洞储氦技术研究及工程验证, 持续深化盐穴储氦库试验攻关, 破解储运设施瓶颈。

2) 产学研用协同攻关, 提升技术装备水平。以科技自主化与装备国产化为核心目标, 依托产业需求牵引和瓶颈突破导向, 构建产学研用协同攻关机制, 推动多学科深度交叉融合的技术创新体系。通过系统性攻关, 构建覆盖氦气全产业链的技术标准体系、规范管理体系及装备制造能力, 实现产业链完全自主可控。重点实施三大举措: 联合产业链生产企业、科研院所与高等院校, 统筹部署资源评价、生产工艺、储库建设、核心装备四大领域关键技术攻关, 同步建设中试平台验证推广国产装备, 确保技术自主化与产业链高效运行; 组建专业标准化委员会, 建立完善的氦气产业标准体系; 开展全产业链一体化优化研究, 构建智能化管控平台, 将资源勘探、生产加工、储运管理、终端销售等环节纳入统一管理体系, 实现全链条实时协同优化。最终形成技术自主可控、运行高效智能的产业生态闭环。

参考文献(References):

- [1] 张哲, 黄骞, 王春燕, 等. 中国氦气全产业链发展现状与展望[J]. 油气与新能源, 2024, 36(2): 1-9.
ZHANG Zhe, HUANG Qian, WANG Chunyan, et al. Status quo and prospects of the whole helium industry chain in China[J]. Petroleum and New Energy, 2024, 36(2): 1-9.
- [2] 孙庆国, 邱一男, 张晓萍, 等. 浅析氦气消耗与经济发展的关系[J]. 低温与特气, 2022, 40(5): 1-5.
SUN Qingguo, QIU Yinan, ZHANG Xiaoping, et al. Analysis on relationship between helium consumption and economic development[J]. Low Temperature and Specialty Gases, 2022, 40(5): 1-5.
- [3] 樊大磊, 王宗礼, 王戎嫣, 等. 2024年国内外油气资源形势分析及展望[J]. 中国矿业, 2025, 34(1): 46-54.
FAN Dalei, WANG Zongli, WANG Yuyan, et al. Analysis of oil and gas resources situation at home and abroad in 2024 and outlook[J]. China Mining Magazine, 2025, 34(1): 46-54.
- [4] 刘婧, 侯孟睿, 刘冲昊, 等. 基于马尔可夫决策过程的中国石油战略储备模型分析[J]. 中国矿业, 2025, 34(2): 126-138.
LIU Jing, HOU Mengrui, LIU Chonghao, et al. A Markov Decision Process-based model analysis for China's strategic petroleum reserve[J]. China Mining Magazine, 2025, 34(2): 126-138.
- [5] 郑明贵, 倪京生, 罗来文, 等. 中国石油资源产业链供应链安全评价[J]. 中国矿业, 2025, 34(2): 99-110.
ZHENG Minggui, NI Jingsheng, LUO Laiwen, et al. Security evaluation of industry and supply chains of petroleum resources in China[J]. China Mining Magazine, 2025, 34(2): 99-110.
- [6] 樊大磊, 王宗礼, 李剑, 等. 2023年国内外油气资源形势分析及展望[J]. 中国矿业, 2024, 33(1): 30-37.
FAN Dalei, WANG Zongli, LI Jian, et al. Analysis of domestic and international oil and gas resources situation in 2023 and outlook[J]. China Mining Magazine, 2024, 33(1): 30-37.
- [7] 杨丽丽. 新质生产力理念下中国油气高质量发展战略思考[J]. 中国矿业, 2024, 33(5): 32-38.
YANG Lili. Study on high-quality development strategy of oil and gas industry in China under the concept of new quality productive forces[J]. China Mining Magazine, 2024, 33(5): 32-38.
- [8] 张宇轩, 吕鹏瑞, 牛亚卓, 等. 全球氦气资源成藏背景、地质特征与产能格局初探[J]. 西北地质, 2022, 55(4): 11-32.
ZHANG Yuxuan, LYU Pengrui, NIU Yazhuo, et al. Preliminary study on the geological characteristics, resource potential and production capacity pattern of global helium resources[J]. Northwestern Geology, 2022, 55(4): 11-32.
- [9] 李玉宏, 李济远, 周俊林, 等. 国内外氦气资源勘探发现现状及其对中国的启示[J]. 西北地质, 2022, 55(3): 233-240.
LI Yuhong, LI Jiyuan, ZHOU Junlin, et al. Exploration and development status of world helium resources and its implications for China[J]. Northwestern Geology, 2022, 55(3): 233-240.
- [10] 秦胜飞, 李济远, 陶刚, 等. 氦气简史[J]. 石油知识, 2024(1): 9-28.
QIN Shengfei, LI Jiyuan, TAO Gang, et al. A brief history of helium[J]. Petroleum Knowledge, 2024(1): 9-28.
- [11] 贾凌霄, 马冰, 王欢, 等. 全球氦气勘探开发进展与利用现状[J]. 中国地质, 2022, 49(5): 1427-1437.
JIA Lingxiao, MA Bing, WANG Huan, et al. Progress and utilization status of global helium exploration and development[J]. Geology in China, 2022, 49(5): 1427-1437.
- [12] 唐金荣, 张宇轩, 周俊林, 等. 全球氦气产业链分析与中国应对策略[J]. 地质通报, 2023, 42(1): 1-13.
TANG Jinrong, ZHANG Yuxuan, ZHOU Junlin, et al. Analysis of global helium industry chain and China's strategy[J]. Geological Bulletin of China, 2023, 42(1): 1-13.
- [13] 周军, 陈玉麟, 王璿清, 等. 氦气资源产量及市场发展现状分析[J]. 低碳化学与化工, 2022, 47(5): 42-48.
ZHOU Jun, CHEN Yulin, WANG Xuanqing, et al. Analysis of helium resource production and market development status[J]. Low-Carbon Chemistry and Chemical Engineering, 2022, 47(5): 42-48.
- [14] 周起忠, 闫卫东, 胡容波, 等. 全球氦气供需形势分析与展望[J]. 中国矿业, 2025, 34(2): 493-502.
ZHOU Qizhong, YAN Weidong, HU Rongbo, et al. Analysis and out-

- look of the global helium supply and demand situation[J]. *China Mining Magazine*, 2025, 34(2): 493-502.
- [15] 张哲,王春燕,王秋晨,等.中国氦气市场前景展望[J].*油气与新能源*, 2022, 34(1): 36-41.
- ZHANG Zhe, WANG Chunyan, WANG Qiuchen, et al. Development prospects of China's helium market[J]. *Petroleum and New Energy*, 2022, 34(1): 36-41.
- [16] 张哲,王春燕,王秋晨,等.浅谈中国氦气供应链技术壁垒与发展方向[J].*油气与新能源*, 2022, 34(2): 14-19.
- ZHANG Zhe, WANG Chunyan, WANG Qiuchen, et al. Barriers and development directions of helium supply chain in China[J]. *Petroleum and New Energy*, 2022, 34(2): 14-19.
- [17] 秦胜飞,李济远,王佳美,等.中国含油气盆地富氦天然气藏氦气富集模式[J].*天然气工业*, 2022, 42(7): 125-134.
- QIN Shengfei, LI Jiyuan, WANG Jiamei, et al. Helium enrichment model of helium-rich gas reservoirs in petroliferous basins in China[J]. *Natural Gas Industry*, 2022, 42(7): 125-134.
- [18] 秦胜飞,窦立荣,陶刚,等.氦气富集理论及富氦资源勘探思路[J].*石油勘探与开发*, 2024, 51(5): 1160-1174.
- QIN Shengfei, DOU Lirong, TAO Gang, et al. Helium enrichment theory and exploration ideas for helium-rich gas reservoirs[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2024, 51(5): 1160-1174.
- [19] SUNARSO J, HASHIM S S, LIN Y S, et al. Membranes for helium recovery: an overview on the context, materials and future directions[J]. *Separation and Purification Technology*, 2017, 176: 335-383.
- [20] SOLEIMANY A, HOSSEINI S S, GALLUCCI F. Recent progress in developments of membrane materials and modification techniques for high performance helium separation and recovery: a review[J]. *Chemical Engineering & Processing: Process Intensification*, 2017, 122: 296-318.
- [21] 裴向兵,冯光飞,张谭,等.天然气提氦联产液化工艺设计与分析[J].*石油与天然气化工*, 2025, 54(3): 57-63.
- PEI Xiangbing, FENG Guangfei, ZHANG Tan, et al. Design and analysis of the co-production liquefaction process for extracting helium from natural gas[J]. *Chemical Engineering of Oil and Gas*, 2025, 54(3): 57-63.
- [22] 张丽萍,巨永林.天然气及液化天然气蒸发气提氦技术研究进展[J].*低碳化学与化工*, 2022, 47(5): 32-41.
- ZHANG Liping, JU Yonglin. Research progress of helium extraction of natural gas and liquefied natural gas boil-off gas[J]. *Low-Carbon Chemistry and Chemical Engineering*, 2022, 47(5): 32-41.
- [23] 蒋洪,祝梦雪.双塔天然气氦气回收工艺设计及分析[J].*低碳化学与化工*, 2022, 47(3): 133-140.
- JIANG Hong, ZHU Mengxue. Design and exergy analysis of double-tower natural gas helium recovery process[J]. *Low-Carbon Chemistry and Chemical Engineering*, 2022, 47(3): 133-140.
- [24] JAHROMI P E, FATEMI S, VATANI A, et al. Purification of helium from a cryogenic natural gas nitrogen rejection unit by pressure swing adsorption[J]. *Separation and Purification Technology*, 2018, 193: 91-102.
- [25] 蒲黎明,李莹珂,王科.中国天然气提氦产业链技术发展现状及展望[J].*天然气与石油*, 2024, 42(3): 1-6.
- PU Liming, LI Yingke, WANG Ke. Current status and prospects of technological development of helium extraction from natural gas industrial chain in China[J]. *Natural Gas and Oil*, 2024, 42(3): 1-6.
- [26] 李莹珂,熊英杰,王科,等.天然气粗氦提取技术进展及展望[J].*天然气与石油*, 2024, 42(3): 7-11, 30.
- LI Yingke, XIONG Yingjie, WANG Ke, et al. Crude helium extraction from natural gas: technology progress and prospects[J]. *Natural Gas and Oil*, 2024, 42(3): 7-11, 30.
- [27] 杜军军,李正宇,刘立强,等.氦气内纯化器分析与实验[J].*华中科技大学学报(自然科学版)*, 2024, 52(7): 132-138.
- DU Junjun, LI Zhengyu, LIU Liqiang, et al. Analysis and experimental study of helium internal purifier[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology(Natural Science Edition)*, 2024, 52(7): 132-138.
- [28] 苏惠坤,李正宇,龚领会,等.高效双压氦液化循环研究[J].*华中科技大学学报(自然科学版)*, 2024, 52(4): 143-148.
- SU Huikun, LI Zhengyu, GONG Linghui, et al. Research on efficient double-pressure helium liquefaction cycle[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology(Natural Science Edition)*, 2024, 52(4): 143-148.
- [29] 郭超,沈全锋,赵艺皓,等.国内氦液化储运技术需求分析[J].*油气田地面工程*, 2024, 43(1): 38-43.
- GUO Chao, SHEN Quanfeng, ZHAO Yihao, et al. Technical requirement analysis of domestic helium liquefaction, storage, and transportation[J]. *Oil-Gasfield Surface Engineering*, 2024, 43(1): 38-43.
- [30] 孙润林,龙海洋,谭建华,等.氦储运技术研究进展[J].*天然气与石油*, 2024, 42(3): 25-30.
- SUN Runlin, LONG Haiyang, TAN Jianhua, et al. Advances in helium storage and transportation technology: a review[J]. *Natural Gas and Oil*, 2024, 42(3): 25-30.
- [31] 洪太元,程喆,郭元岭,等.含油气盆地勘探突破速度及其主控因素分析[J].*中国矿业*, 2025, 34(5): 257-263.
- HONG Taiyuan, CHENG Zhe, GUO Yuanling, et al. Analysis on exploration breakthrough speed and its main controlling factors in petroliferous basin[J]. *China Mining Magazine*, 2025, 34(5): 257-263.
- [32] 曹明.超深特深油气藏储层改造和油气测试工程技术进展[J].*中国矿业*, 2025, 34(6): 262-271.
- CAO Ming. Engineering and technological progress of stimulation and testing in ultra-deep and super-deep reservoirs[J]. *China Mining Magazine*, 2025, 34(6): 262-271.