

氦储运技术研究进展

孙润林¹ 龙海洋¹ 谭建华² 蒲黎明¹

1. 中国石油工程建设有限公司西南分公司, 四川 成都 610041;
2. 中国石油天然气股份有限公司塔里木油田分公司, 新疆 库尔勒 841000

摘要: 氦在国防、高科技产业等领域有着重要的用途, 氦储运是产业链中的关键环节, 研究氦储运技术的发展和相关设备的设计、制造对氦产业的发展至关重要。根据氦储运相态不同, 氦储运分为气氦储运和液氦储运。介绍了气氦和液氦的不同储存方式, 气氦的地上储存多以高压储存为主, 地下储存多以储氦库为主, 而液氦以低温低压储存为主; 对多层包扎储罐、管束、液氦罐箱、液氦杜瓦罐等储运相关设备进行了阐述。研究认为大规模、长距离运输以液氦储运为主, 高压气氦更适合小规模氦储运, 最后对氦储运设备未来发展方向进行了展望。

关键词: 气氦储运; 液氦储运; 储氦库; ISO 液氦罐箱

DOI: 10. 3969 /j. issn. 1006-5539. 2024. 03. 005

Advances in helium storage and transportation technology: A review

SUN Runlin¹, LONG Haiyang¹, TAN Jianhua², PU Liming¹

1. CPECC Southwest Company, Chengdu, Sichuan, 610041, China;
2. PetroChina Tarim Oilfield Company, Korla, Xinjiang, 841000, China

Abstract: Helium plays a crucial role in various sectors, including national defense and the high-tech industry, making storage and transportation of helium pivotal to the industrial chain. The development of helium storage and transportation technology, along with the design and manufacturing of associated equipment, is essential for the growth of helium industry. Helium storage and transportation are categorized into gas and liquid phases. This study covers different storage methods for gaseous and liquid helium: gaseous helium is primarily stored above ground under high pressure and in underground helium storages, while liquid helium is stored at low temperatures and pressures. This paper elaborates on storage and transportation equipment, including multi-layered wrapping storage tanks, tube bundle, liquid helium tank, and liquid helium Dewar flasks. It is concluded that large-scale, long-distance transportation predominantly utilizes liquid helium as the transportation medium, whereas high-pressure helium gas is more suitable for small-scale transportation. Finally, the future development directions for helium storage and transportation equipment are discussed.

Keywords: Gaseous helium storage and transportation; Liquid helium storage and transportation; Helium gas storage; Liquid helium ISO tanks

收稿日期: 2024-02-21

基金项目: 中国石油天然气集团有限公司关键核心技术攻关项目(2021ZG13)

作者简介: 孙润林(1986-), 女, 山东烟台人, 工程师, 硕士, 主要从事天然气设计相关工作研究。E-mail: sunrunl_sw@cnpc.com.cn

通信作者: 蒲黎明(1982-), 男, 四川南充人, 正高级工程师, 硕士, 主要从事天然气净化、凝液回收、液化、提氦及深冷技术研发及工程应用工作。E-mail: puliming_sw@cnpc.com.cn

0 前言

氮是元素周期表中仅次于氢的第二轻元素,也是一种惰性元素。由于氮分子量小、穿透性强、汽化潜热低,很难被液化。氮广泛应用于低温超导、航天、光纤和半导体、焊接保护、色谱分析、气体检漏等领域,是一种重要能源。氮产品的储存和运输是连接需求端与供给端的纽带,氮储运设备需具备高密封性、高洁净度等条件,才能保障氮产品的高效运输和稳定供应,氮储运是产业链中不可或缺的一环。

根据氮储运相态不同,氮储运分为气氮储运和液氮储运。氮储存多以固定式设备为载体,运输则需依靠可移动的设备。

1 气氮储存

根据储存方式的不同,气氮储存可分为地上储存和地下储存;根据储存压力的不同又可分为高压储存和低压储存。地上储存多通过气态压缩的方式,将气氮压缩到储罐、管束、气瓶等高压容器内,具有成本低、能耗低、充放速度快等优点。此外,气囊也是气氮地上储存的方式,因其压力低、储存容积小,仅作为余气储存手段。地下储存采用储氮库将粗氮储存在地下,是一种大规模的储氮方式,储气井也是气氮地下储存的方式之一。

1.1 地上储存

1.1.1 储罐

根据储罐结构形式不同,高压气氮储罐有单层和多层两种,单层储罐采用锻焊式及板焊式结构,多层储罐多采用包扎结构^[1]。高压气氮储罐若采用单层,筒体封头用钢板相对较厚,板材不易采购,只能采用锻件加工,导致成本增加;若采用多层包扎结构,可根据实际情况增减层板来满足筒体强度的要求,突破板材厚度的限制,且材料利用率高、韧性好、脆性破坏率低、安全性更可靠^[2]。因此,气氮高压储存多采用多层包扎储罐,本文所述储罐特指多层包扎高压储罐。

多层包扎高压储罐主要由筒体和封头组成,其中筒体由内筒和层板构成,封头为单层。内筒一般为厚度 20~30 mm 的优质钢板(或合金钢板),各层板通常由厚度 <20 mm 的钢板卷焊而成^[3],见图 1。

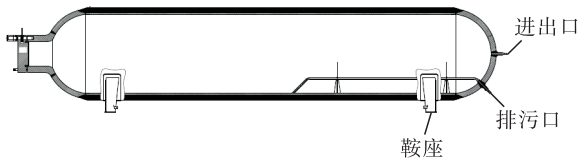


图 1 多层包扎高压储罐示意图

Fig. 1 Schematic diagram of multi-layered wrapping high-pressure storage tank

由于高压储罐筒体是多层包扎结构,不宜在筒体上开口。封头为单层结构,人孔及工艺开口多在封头上。

多层包扎高压储罐具有以下特点:层板材料不受整体厚度限制,每层应力基本均匀,韧性较好^[4];层板纵缝收缩时产生的预应力使筒壁应力沿壁厚分布较均匀,能有效改善筒体应力;由于层板包扎时各层焊缝错开,筒体沿厚度方向没有连续两层以上的焊缝,焊缝削弱产生的影响较小;层板筒体上开有穿透层板报警孔,当内筒发生泄漏时,可及时发现处理,安全性高。

多层包扎高压储罐尺寸受限于罐体壁厚的卷制能力,一般可根据储存时间和压力的要求进行设计。单罐容积小,可采用重叠布置;单罐容积大,可采用成排布置。

1.1.2 管束

用于气氮储存的管束为高压储气瓶组管束,管束内设有若干高压大容积钢质无缝气瓶。气瓶采用大直径铬钼钢材料,铬钼钢具有优良的机械性能,尤其在高强度水平上仍能保持良好的塑性和韧性,目前应用于高压气氮储存的大容积钢质无缝气瓶材料主要牌号为 4130X。管束内气瓶的容积固定,气瓶之间互相连通,并设有安全放空系统。管束的容积由气瓶数量决定,用户可根据容积需求定制管束。

以 28.2 m³ 高压储气瓶组管束为例,技术特性参数见表 1。

表 1 高压储气瓶组管束技术特性参数表

Tab. 1 Technical parameters table for high-pressure gas storage tube bundle

参数	数值
工作压力 /MPa	20
设计压力 /MPa	22
工作温度 /℃	-40~60
水压试验压力 /MPa	28.6
气密性试验压力 /MPa	22
气瓶尺寸(直径×长)/mm	Φ559×11 780
气瓶数量/个	12
总容积 /m ³	28.2
充装介质	气氮
充装质量 /kg	991
外形尺寸(长×宽×高)/mm	2 856×2 168×12 200
设计使用年限 /a	20
设备形式	固定式

注:不同管束供货商的单个气瓶尺寸和容积不同,以上数据仅供参考。

1.1.3 气瓶

气瓶是一种容积 <1 000 L,正常环境下(-40~60℃)可重复充气使用,用于储存、盛装气体的移动式压力容

器。按照容积不同,气瓶可分为三类:容积 ≤ 12 L 为小容积气瓶;12 L < 容积 ≤ 150 L 为中容积气瓶;容积 > 150 L 为大容积气瓶。

气瓶多用于用气量较小的场景,可根据用气量的需求选择不同数量的气瓶集成气瓶组,并用钢结构固定于集装箱内。

1.1.4 气囊

气囊是一种低压储存设备,多用于余气回收。气囊主要材料为聚氯乙烯,其耐受压力低(约 4 kPa)。气囊在使用过程中,需注意接口处的密封,防止气氦泄漏。气囊需配置水封筒、泄压筒及它们之间的连接软管,采用水封形式进行泄压。

1.2 地下储存

1.2.1 储氦库

储氦库主要分为气藏型和盐穴型两类,储气规模大,多储存粗氦。储存时将粗氦加压注入储氦库,有气氦需求时,储氦库的粗氦经地面气氦工厂纯化氦产品。储氦库的建立为国家用氦安全和长久供应提供了重要保障。

美国于 1925 年在克里夫赛德气田将氦含量约 70% 的天然气注入枯竭气田^[5-6],建成气藏型储氦库,将氦作为战略储备物资保护起来。美国是第一个将含氦天然气田开发提取的大量气氦再储存的国家。此外,俄罗斯于 1979 年建立了奥伦堡盐穴型储氦库,法国液化空气集团近年来在德国也建立了盐穴型储氦库。

国外储氦库技术发展相对较早,目前国内已陆续开发出盐穴型储气库用于储存天然气,但盐穴型储氦库尚处于研究阶段,未有实际应用案例。

1.2.2 储气井

储气井由井底装置、井筒、排液管、井口装置、固井水泥环、表层套管、扶正器等构成。储气井竖向埋设于地下,井筒与井壁之间采用水泥浆进行全填充封固,整体无焊接^[7]。储气井具有安全性高、占地面积小、单井储存量大等优势。但由于地下外部环境为浅表地层,地层中有土壤、沙石、各类化合物和细菌等,会对储气井造成较重的外部腐蚀,且储气井的钢管和其他装置等都需强力组装,环空需水泥固井^[8-9],因此对一次性制造质量要求高,不易维修。

2 气氦运输

用于气氦运输的设备必须可移动,主要为管束式集装箱和气瓶。高压储气瓶组管束主要用于气氦储存,而气氦运输多为公路运输,国内气氦运输主要依托管束式集装箱。管束式集装箱将管束放置于长管拖车上进行运输,见图 2。长管拖车所用管束式集装箱多为 8 ~ 12

个高压储气管束并联,目前常用的管束式集装箱容积为 18 ~ 30 m³,工作压力为 20 MPa,可运输气氦 3 600 ~ 6 000 m³。



图 2 管束式集装箱照片

Fig. 2 Picture of tube bundle container

气瓶既可以用于储存,也可用于运输,但由于容积小仅适合小规模储运。如使用小容积气瓶,随着气瓶数量增多,瓶阀和接口数量增多,可能会导致氦泄漏率提高。因此,可根据需求直接选择中容积或大容积气瓶,降低维护费用。

3 液氦储存

随着技术的进步和新材料的出现,液氦储存日渐发展。由于液氦密度远大于气氦密度,液氦储存所需储存容器的体积较小,设备维护更简单。与气氦储存不同,液氦为低压储存,储存设备主要有液氦罐箱、液氦杜瓦罐等。

3.1 液氦罐箱

液氦罐箱通常采用真空绝热形式,主要有高真空绝热、真空多孔绝热、高真空多层绝热等方式^[10]。由于液氦沸点低,汽化潜热也非常低,仅为液氧汽化潜热 1/10^[11-12],长期有效储存比较困难。常见的高真空多层绝热方式无法满足液氦储存的要求,需采用特殊的绝热方法,如具有液氮保护屏的高真空多层绝热。高真空多层绝热是指罐体的夹层空间内设置多层交替组合的间隔材料和反射屏,并抽至高真空所形成的绝热方式。高真空多层绝热可减少储罐内外热量交换,绝热效率及运输效率高^[13-14]。

液氦罐箱主要由内罐、外罐、液氮冷屏等组成,以 40 m³ 罐箱为例,内部结构见图 3。

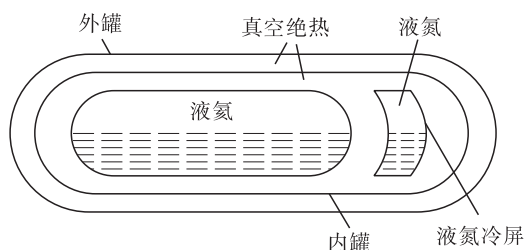


图 3 液氦罐箱内部结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of internal structure of liquid helium tank

由图3可见,液氮置于中心容器,液氮置于冷屏,2个容器置于内罐内,在液氮中心容器和液氮冷屏之间、内外罐之间形成高真空空间,液氮冷屏成为内罐的低温保护层,构成温度为 -196°C 的辐射热壁,降低壁面间温度差,减小热辐射的热流,阻断来自外界环境的热辐射,减小液氮的蒸发量。

3.2 液氮杜瓦罐

液氮杜瓦罐因最初创造人杜瓦而得名,与液氮罐箱相比容积较小,当用量未达到液氮罐箱的容积时,液氮杜瓦罐成为液氮终端使用的首选,目前主要容积为 $100\sim 500\text{ L}$ 。液氮杜瓦罐见图4。



图4 液氮杜瓦罐照片

Fig. 4 Picture of liquid helium Dewar tank

液氮杜瓦罐是由双层紫铜球胆构成的高真空绝热容器,其内胆与热导率小的德银管焊接后再与外胆相连,内外胆之间形成真空,在球胆上部设有颈管,用来注入和倾出低温液体,并对球胆起支持作用。为防止晃动,内外胆之间用弹性垫固定,在真空夹层下部设有少量的吸气剂胶或活性炭,用于吸附可能因工艺或材料不佳而渗入真空夹层内的微量气体^[15-17]。

4 液氮运输

液氮运输的周期更短、效率更高、成本更低,因此大规模、长距离氮运输首选液氮运输。液氮运输的设备与液氮储存设备基本类似,可移动的液氮储存设备(如移动式液氮罐箱和液氮杜瓦罐)均可用于液氮运输。

液氮罐箱由于体积大,主要通过公路、水路的方式运输,可根据运输距离、运输成本等因素,综合考虑选择合适的运输方式。无论采用何种方式,均存在将液氮装车至移动式液氮罐箱的过程。在厂区内,液氮储存设备通常置于高层平台上。需要装车时,利用其与长管拖车上移动式液氮罐箱之间的重力,通过装车阀箱控制进行加注装车。

液氮罐箱的容积主要为 $20, 40, 60, 80, 120\text{ m}^3$ 等,适用于大规模的液氮储运,其中 40 m^3 移动式液氮罐箱在

目前应用最广泛,按照国际标准化组织(International Organization for Standardization, ISO)标准制造,因此也被称为ISO液氮罐箱。目前,国外加德纳公司、林德集团等具有 $40\sim 120\text{ m}^3$ 大容积液氮罐箱的制造能力。国内在液氮罐箱的设计制造方面尚处于试验和初步应用阶段,多家单位投入精力加快研制,逐渐具备液氮罐箱的设计制造能力。中国科学院理化技术研究所联合航天晨光股份有限公司研制出 40 m^3 移动式液氮罐箱,已进行现场测试;张家港中集圣达因低温装备公司研制出 40 m^3 移动式液氮罐箱;中国石油工程建设有限公司研制出 120 m^3 固定式液氮储罐并通过验收。

液氮杜瓦罐由于体积相对小巧,控制阀组及接头均安装在顶部,并可连接各种标准尺寸的软管,操作灵活方便,无需装车设备,公路、航空、水路均可运输。

液氮杜瓦罐生产技术相对简单,国内外已有成熟应用。英国威辛顿低温有限公司可生产 500 L 以上的液氮杜瓦罐,美国查特公司可生产 $100\sim 500\text{ L}$ 的液氮杜瓦罐。

1988年,上海交通大学研制出运输式液氮容器(TLHE-100型),可以进行液氮的短途运输和常规极低温实验,是国内第一只可靠运输的液氮容器。近年来,随着科学技术的发展,国内液氮杜瓦罐的制造应用也日渐发展。北京中科富海低温科技有限公司和查特深冷工程系统(常州)有限公司等均可生产系列容积的液氮杜瓦罐。

液氮杜瓦罐虽然是小容量的储运设备,但具有使用安全可靠、排液方便、静态日蒸发率损失低、运输便捷等优势。

综上所述,为提高储存容积和效率,气氮多采用高压储运,优点是流程简单、能耗相对较低,尤其是能够减少氮液化相关设备。但由于气氮储存密度远低于液氮储存密度,气氮运输频次高,随着储运规模扩大,气氮运输成本快速增加,且高压储运方式的运输效率相对较低。与气氮储运相比,液氮储运的优点是液氮储存密度大,能够有效减少运输频次,降低运输成本,适合远距离大规模的运输,但由于涉及低温制冷,流程复杂,设备采购周期长,能耗相对较大^[18-20]。

5 展望

氮在高科技产业中有非常重要的应用,也是国防军工领域不可或缺的战略资源。中国是氮需求大国,供应严重依赖进口,形成自己的氮产业链迫在眉睫,氮储运是生产和使用之间的桥梁。

高压气态储存是目前主要的氮储存技术,国内已有团队进行长输管道储氮研究。针对传统储存技术,研究轻质、耐压、储存密度高的新型储存容器可作为未来研

究方向之一。此外,地下储氦技术由于储气规模大、综合成本低,也将成为未来氦储存的关注重点。盐穴型储氦库注采气效率高,岩盐密封能力大,可有效防止气氦被污染,是非常有前景的地下储氦手段之一。中国目前尚无盐穴型储氦库的应用案例,可从防氦渗透材料、地面配套设备、气氦检测净化技术和地下监测综合模拟评估等方面着手研究。

储气井的单井储存量大、安全系数高,井内压力升高产生弹性形变密封效果更好,但对井身的施工要求较高,目前国内储气井以储氢和压缩天然气为主,尚未实现储氦的实际应用。未来可重点在材料适用性、地层土壤腐蚀性、损伤和失效模式上开展研究,储气井或将成为未来储氦趋势。

针对氦储运,国内多个科研团队和单位一直致力技术攻关,但尚无液氦生产、储存、运输的相关标准,液氦储运技术标准体系亟需完善。

参考文献:

- [1] 张羽翔,王 坚,宜飞远,等. 整体多层包扎式高压容器应力状态研究进展[J]. 化工机械,2008,35(2):107-113.
ZHANG Yuxiang, WANG Jian, YI Feiyuan, et al. Research progress of the stress state of the integrated multilayer-wrapped high pressure vessels [J]. Chemical Engineering & Machinery, 2008, 35 (2): 107-113.
- [2] 赵刘红,康泰瑞. 整体多层包扎式高压容器设计概述[J]. 机械管理开发,2013(5):51-53.
ZHAO Lihong, KANG Tairui. Introduction of design of integrated multilayer-wrapped high pressure vessels [J]. Mechanical Management and Development, 2013 (5): 51-53.
- [3] 刘艳琼,肖治国,樊安林. 多层包扎式结构在高压容器中的应用的优势[J]. 企业技术开发,2013,32(5):38-39.
LIU Yanqiong, XIAO Zhiguo, FAN Anlin. The advantages of multi-layer bandaged structure in the application of high-pressure vessels [J]. Technological Development of Enterprise, 2013, 32 (5): 38-39.
- [4] 沈鹏羽. 多层包扎式结构在高压容器中的应用[J]. 石油化工设备技术,2009,30(1):10-11.
SHEN Pengyu. Application of multilayer bandaged structure in high pressure vessel [J]. Petro-Chemical Equipment Technology, 2009, 30 (1): 10-11.
- [5] 韩 C A,伊戈申 A И,卡扎良 B A,等. 氦气地下储存[M]. 汤 林,何 刚,丁国生,等,译. 北京:石油工业出版社,2020.
HAN C A, IGOSZYN A И, KAZARYAN B A, et al. Underground storage of helium [M]. TANG Lin, HE Gang, DING Guosheng, et al, trans. Beijing: Petroleum Industry Press, 2020.
- [6] 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.
- [7] 中华人民共和国工业和信息化部. 储气井工程技术规范: SH/T 3216—2020[S]. 北京:中国石化出版社,2020.
Ministry of Industry and Information Technology of the People's Republic of China. Technical specification for gas storage well engineering: SH/T 3216—2020 [S]. Beijing: China Petrochemical Press, 2020.
- [8] 石 坤,段志祥,陈祖志,等. 地下天然气储气井的现状与前景[J]. 科技视点,2013,30(6):5-10.
SHI Kun, DUAN Zhixiang, CHEN Zuzhi, et al. Current situation and prospect of underground gas storage well [J]. Scientific and Technological Perspective, 2013, 30 (6): 5-10.
- [9] 陆佳敏,徐俊辉,王卫东,等. 大规模地下储氢技术研究展望[J]. 储能科学与技术,2022,11(11):3699-3707.
LU Jiamin, XU Junhui, WANG Weidong, et al. Development of large-scale underground hydrogen storage technology [J]. Energy Storage Science and Technology, 2022, 11 (11): 3699-3707.
- [10] 章宇庆,李 艳,余 枫,等. 多层低温绝热容器抽真空系统设计及应用[J]. 装备制造技术,2022(3):33-37.
ZHANG Yuqing, LI Yan, YU Feng, et al. Design and application of vacuum system for multi-layer cryogenic insulated vessel [J]. Equipment Manufacturing Technology, 2022 (3): 33-37.
- [11] 张 鹏,王如竹. 超流氦传热[M]. 北京:科学出版社,2009.
ZHANG Peng, WANG Ruzhu. Superfluid helium heat transfer [M]. Beijing: Science Press, 2009.
- [12] 陈国邦,张 鹏. 低温绝热与传热技术[M]. 北京:科学出版社,2004.
CHEN Guobang, ZHANG Peng. Low temperature insulation and heat transfer technology [M]. Beijing: Science Press, 2004.
- [13] 李均方,张瑞春,陈吉刚. 液氦储罐发展现状及关键技术[J]. 低温与特气,2021,39(5):8-10.
LI Junfang, ZHANG Ruichun, CHEN Jigang. Current situation and key technology of liquid helium storage tank [J]. Low Temperature and Specialty Gases, 2021, 39 (5): 8-10.
- [14] 张瑞春,李均方. 液氦与高压气氦储运的技术经济比较[J]. 低温与特气,2019,37(6):17-21.

- ZHANG Ruichun, LI Junfang. The technical and economic comparison of storage and transportation with liquid helium and high pressure gas Helium [J]. *Low Temperature and Specialty Gases*, 2019, 37 (6): 17-21.
- [15] DHURJAD S, MAHINDRAKAR A, MACHE A, et al. Design and development of liquid helium storage dewar [C]//Biennial International Conference on Future Learning Aspects of Mechanical Engineering, 3-5 August, 2022, India. Singapore: Springer Nature Singapore, 2022: 223-242.
- [16] PANDHARPATTE P, KURKURE K, KORE S, et al. Review and development of thermal design of a cryogenic dewar [C]//Biennial International Conference on Future Learning Aspects of Mechanical Engineering, 3-5 August, 2022, India. Singapore: Springer Nature Singapore, 2022: 319-331.
- [17] HEIDT C, GROHMANN S, SÜßER M. Modeling the pressure increase in liquid helium cryostats after failure of the insulating vacuum [C]//AIP Conference Proceedings, 17-21 June, 2013, Anchorage, Alaska, USA. American Institute of Physics, 2014, 1573 (1): 1574-1580.
- [18] 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.
- [19] 陈国邦,陈纯正,王如竹,等. 新型低温技术[M]. 上海:上海交通大学出版社, 2003.
- CHEN Guobang, CHEN Chunzheng, WANG Ruzhu, et al. *New cryogenic technology* [M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2003.
- [20] 吴远宽. 液氦输送技术[J]. *低温工程*, 1995, 87 (5): 11-16.
- WU Yuankuan. *Liquid helium transport technology* [J]. *Cryogenic Engineering*, 1995, 87 (5): 11-16.

(上接第 11 页)

- [12] 琚宜林,李 龙,钟志良,等. 粗氦提浓技术研究[J]. *天然气与石油*, 2010, 28(4): 40-42.
- JU Yilin, LI Long, ZHONG Zhiliang, et al. Research on crude helium concentration technology [J]. *Natural Gas and Oil*, 2010, 28 (4): 40-42.
- [13] SCHRIER J. Helium separation using porous graphene membranes [J]. *The Journal of Physical Chemistry Letters*, 2010, 1 (15): 2284-2287.
- [14] KOH D Y, MCCOOL B A, DEC KMAN H W, et al. Reverse osmosis molecular differentiation of organic liquids using carbon molecular sieve membranes [J]. *Science*, 2016, 353 (6301): 804-807.
- [15] FARAMAWY S, ZAKI T, SAKR A A E. Natural gas origin, composition, and processing: A review [J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2016, 34: 34-54.
- [16] 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 and Processing: Process Intensification*, 2017, 122: 296-318.
- [17] HE Ting, LIN Wensheng, DU Zhimin. Design and analysis of cascade liquefaction processes for coproducing liquid ethane and LNG [J]. *International Journal of Energy Research*, 2022, 46 (7): 9794-9811.
- [18] ANSARINASAB H, MEHRPOOYA M, PARIVAZH M M. Evaluation of the cryogenic helium recovery process from natural gas based on flash separation by advanced exergy cost method—Linde modified process [J]. *Cryogenics*, 2017, 87: 1-11.
- [19] ANSARINASAB H, MEHRPOOYA M, POURIMAN M. Advanced exergoeconomic evaluation of a new cryogenic helium recovery process from natural gas based on the flash separation—APCI modified process [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2018, 132: 368-380.
- [20] 罗尧丹,诸 林. 低含氦天然气提氦联产 LNG 工艺分析[J]. *天然气与石油*, 2015, 33(4): 21-24.
- LUO Yaodan, ZHU Lin. Analysis on combined process of helium extraction and LNG production from low helium natural gas [J]. *Natural Gas and Oil*, 2015, 33 (4): 21-24.