

大型空分联合技术发展趋势与相关技术研究

厉彦忠, 赵敏, 司标

(西安交通大学能源与动力工程学院, 陕西省西安市咸宁西路 710049)

摘要: 我国化工、煤炭、电力等行业的崛起, 给大型空分设备的发展带来了机遇。深入研究大型空分设备的相关技术, 对促进我国气体工业高效节能发展具有重要意义。文章从系统联合的角度, 探讨了大型空分设备在原料气、净化以及动力方面与其他工业用氧系统的联合形式, 着重讨论了空分设备与天然气液化以及 LNG 冷能利用系统之间的联合技术。在此基础上通过举例, 指出了联合流程中参数匹配的重要性, 同时给出了一些解决办法。最后讨论了低温条件下板翅式换热器的性能变化及其对传热性能的影响。

关键词: 大型空分设备; 气体工业; 系统联合; 参数匹配; 板翅式换热器

中图分类号: TB6 **文献标识码:** A

Development trend of large sized air separation combined technology and research of related technology

Li Yanzhong, Zhao Min, Si Biao

(School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, West Xianning Road, Xi'an 710049, P. R. China)

Abstract: Development of chemical, coal and electrical power industry in China renders good opportunity to development of large sized air separation plant and deep research of related technology of large sized air separation plant is much essential to promote our effective and economical development of gas industry. Here, the combination form of the large sized air separation plant in raw air, purification, and power with other industry oxygen system is systematically approached, and the combination technology of air separation plant with NG liquefaction and LNG cryogenic energy utilization system is discussed in details. On this base through examples, the importance of parameters matching in combined process is pointed and some solutions are raised. Finally, the change of performances of plate fin heat exchanger under low temperature condition and its impact on heat transfer performance are discussed.

Keywords: Large sized air separation plant; Gas industry; System combination; Parameters matching; Plate fin heat exchanger

符号说明

c_p —— 定压比热容, $\text{kJ}/(\text{kmol}\cdot\text{K})$
 f —— 翅片摩擦因子
 h_f —— 翅片高度, mm

j —— 翅片传热因子
 Q —— 热负荷, kW
 Re —— 雷诺数
 T_0 —— 环境温度, K
 T —— 温度, K

收稿日期: 2010-03-26

作者简介: 厉彦忠, 男, 西安交通大学教授, 博士生导师。

- α ——表面传热系数, $W / (m^2 \cdot K)$
- β ——高、低温膨胀气体量之比
- δ_f ——翅片厚度, mm
- η_f ——翅片效率
- λ ——导热系数, $W / (m \cdot K)$
- Ω ——热力学卡诺因子, $\Omega = T_0 / T - 1$

前 言

1902年, 卡尔·林德设计制造了世界上第一台工业化制氧机, 至今空分设备的发展已经历了100多年, 目前空分设备已经发展成大型化、液体化、低能耗、高可靠性、高自动化的大型设备。纵观其发展历程, 可以看到空分设备的发展是与工业发展分不开的, 不断追求高效、节能是其发展的目标。

2005年和2006年, 我国依次取代德国、日本成为全球第二大化工产值国家。自此我国的化工行业对大型空分设备的需求与日俱增, 仅2007年一年时间, 为了满足化工行业需要, 我国就连续招标建设3套3000 t/d (约90000 m³/h) 特大型空分设备^[1]。化工行业的崛起, 给大型空分设备的发展带来了难得的机遇。深入研究大型空分设备的相关技术, 对发展我国民族气体工业具有十分重要的意义。

大型空分设备的技术涉及面广, 包括流程组织、机器和各个单元设备的优化以及工程设计和管道配置等等, 关于这方面的文献很多。^[2~7] 基于作为目前热点的整体煤气化联合循环,^[8~11] 文章将从系统联合角度, 探讨大型空分设备在动力、原料气以及净化系统方面与其他工业用氧系统的联合形式, 着重讨论空分系统与天然气液化以及LNG冷能利用系统之间的联合技术; 然后在此基础上通过例证, 指出联合流程中参数匹配的重要性, 并提出一些解决办法; 最后讨论低温下板翅式换热器翅片的传热因子 j 和摩擦因子 f 的变化规律。

1 空分系统与其他工业用氧系统的联合

在大型工业系统中, 空分设备往往是必不可少的一个系统单元。此时, 空分设备不再是一个独立系统, 而应与工业系统中其他部分统筹考虑。就节能而言, 空分设备通常为其他工业系统提供氧、氮、氩等气体产品, 如果能够利用工业系统中已有的水、电、汽等能源与资源, 使空分设备与工业系统双向融合, 就能达到整体节能的目的。

1.1 空分设备动力系统

空分设备的动力可以来自蒸汽轮机、燃气轮机或者电机(如图1所示)。对于大型空分设备而言, 其动力已经很少通过电机获得, 这是因为相对于电机驱动, 蒸汽轮机或燃气轮机驱动可以省去“机械能—电能—机械能”的转换环节, 从而提高效率, 达到整体节能的目的。

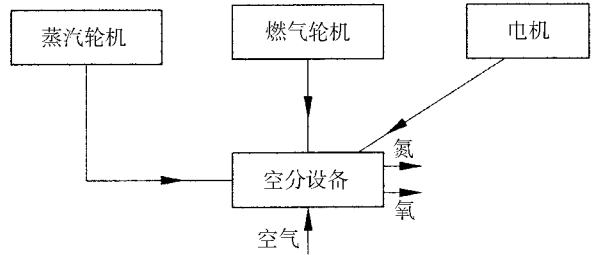


图1 空分设备动力系统的联合

1.2 空分设备原料气^[12]

整体煤气化联合循环(IGCC)是清洁煤发电技术中相当重要的一种, 相比于其他清洁煤发电技术(例如燃料电池), 其更容易实现, 因此有关IGCC的研究成为了热点。整体煤气化联合循环如图2所示。由图2可以看出, 空分设备的原料气全部或者部分来自燃气轮机, 而空分设备的产品氧则进入煤气化炉, 供煤转化为合成气使用; 产品氮则进入燃烧室做稀释剂, 避免壁面过热。

1.3 空分设备净化系统

空分设备净化系统的能耗在空分设备总能耗中占有一部分比例, 如果利用从燃气轮机抽出空气的余热或工厂其他系统蒸汽来加热空分设备分子筛再生气, 可省掉加热再生能耗(如图3所示), 可以使空分设备节能2%~3%。^[13] 空分设备规模越大, 这部分节能所占的比例就越高。

2 空分设备与天然气系统的联合

天然气作为一种优质洁净燃料, 在能源、交通等领域应用前景广阔, 近年来天然气的开发和利用受到各国重视, 我国也多方引进液化天然气(LNG)来满足国民经济发展的需要。LNG具有高品质的冷能, 将LNG冷能用于空分设备, 可以实现在最接近温区利用LNG冷能, 提高LNG的利用效率。目前空分设备发展也趋向大型化、液体化, 将空分设备与天然气系统两者结合, 既有可行性又有较好的经济性。下面分LNG冷能利用和天

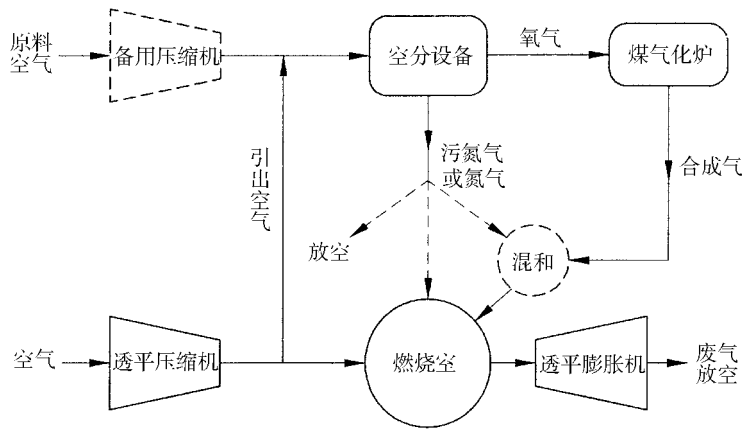


图2 空分设备原料气的联合

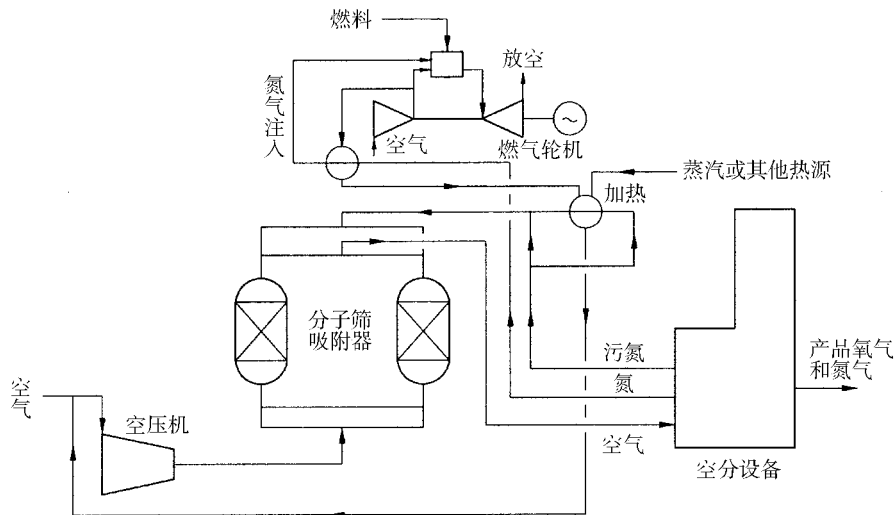


图3 空分设备净化系统的联合

然气液化两方面进行讨论。

2.1 利用 LNG 冷能的空分设备

目前,国内已建或筹建的利用 LNG 冷能的空分设备见表 1。一般来讲,生产同样的液体产品,利用 LNG 冷能的空分设备能耗大约只有传统空分设备的一半,同时还减少了汽化 LNG 所需的海水量,有利于减少海水、大气污染,具有良好的经济效益和社会效益。^[14~17]利用 LNG 冷能前后的氮气循环膨胀制冷空分流程比较如图 4 所示。^[18]由图 4 可见,利用 LNG 冷能后可以省去氮气循环系统的透平膨胀机和增压压缩机,流程组织变得更简单;而且模拟结果表明系统所需的循环氮气量减少,最高运行压力从 4.6 MPa 降低到 2.6 MPa,液态产品的单位能耗降低约 53%。

表 1 国内已建或筹建的利用 LNG 冷能的空分设备

LNG 接收站	生产能力 / (t/d)			LNG 使用量 / (t/h)	电力消耗 / (kW·h)
	液氮	液氧	液氩		
福建莆田	340	250	10	约 50	约 6250
广东大鹏	300	300	10	约 54	约 6600
浙江宁波	400	200	20	约 68	约 8027

2.2 利用空分设备提供冷量液化天然气

与传统的复叠式或混合制冷剂天然气液化流程相比,利用空分设备冷量液化天然气有以下优点:①提高了对原料天然气变化的适应能力;②省去了对制冷剂的贮存和管理环节;③简化了系统的启动过程。

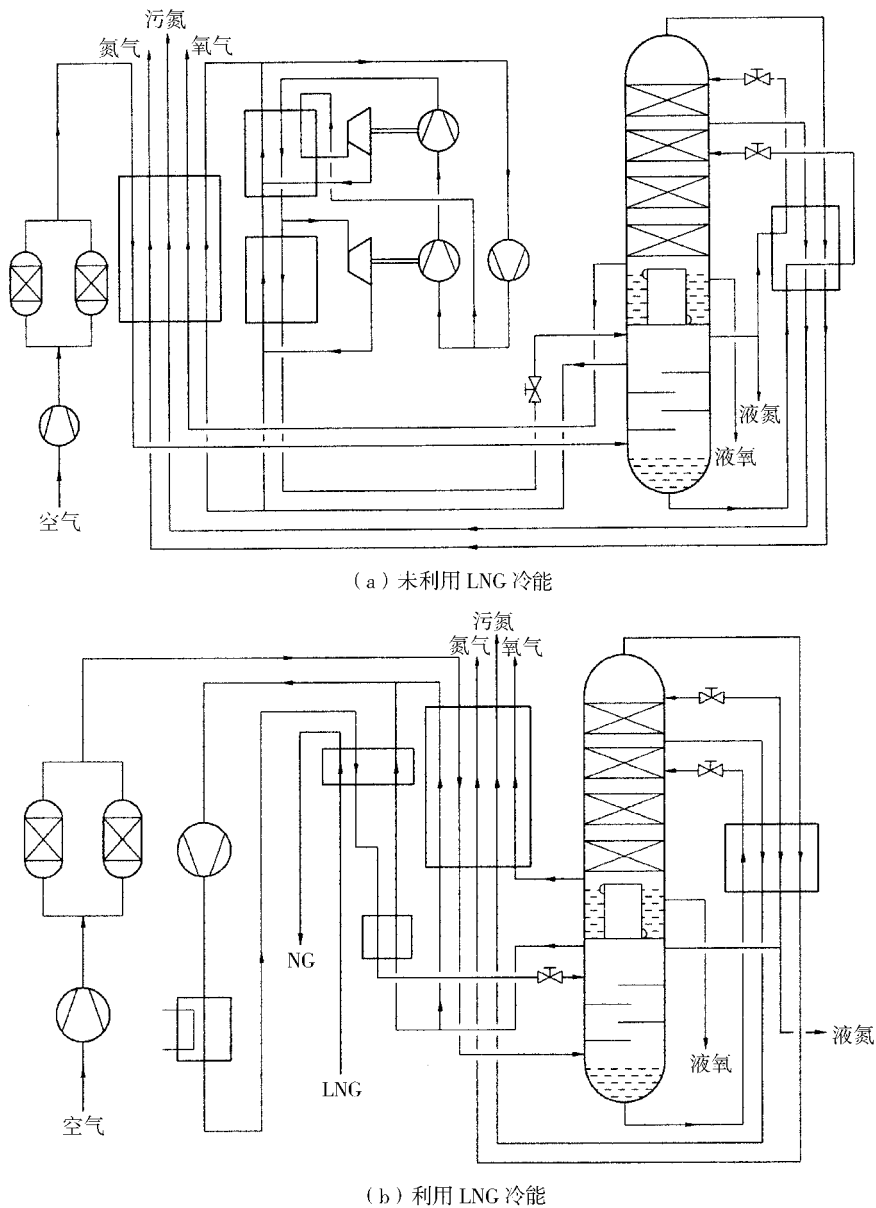


图4 氮气循环膨胀制冷空分流程

下面介绍两个典型事例：一是美国专利 US 7143606 B2. 2006-12-05^[19]，它采用空气膨胀制冷流程；二是中国发明专利 ZL 200610104466.1^[20]（西安交通大学），它采用氮气膨胀制冷流程。

2.2.1 空气膨胀制冷流程

美国专利 US 7143606 B2. 2006-12-05 首先提出了部分空气直接膨胀制冷方案（如图5所示）。这种方案由于其膨胀空气量受到原料空气的限制，只能用来液化少量的天然气。为了提高液化天然气

产量，该专利又提供了一种循环空气膨胀制冷方案（如图6所示），这种方案中膨胀空气量不再受原料空气的限制，但是循环空气需要加压到7 MPa。

为了解决天然气在主换热器中泄漏引起爆炸的问题，该专利最后设计了氮循环回路改进流程（如图7所示）。在这个改进流程中，天然气不再与主换热器中的空气或氧换热，而是在独立设置的换热器中与氮换热，从而使系统更加安全。

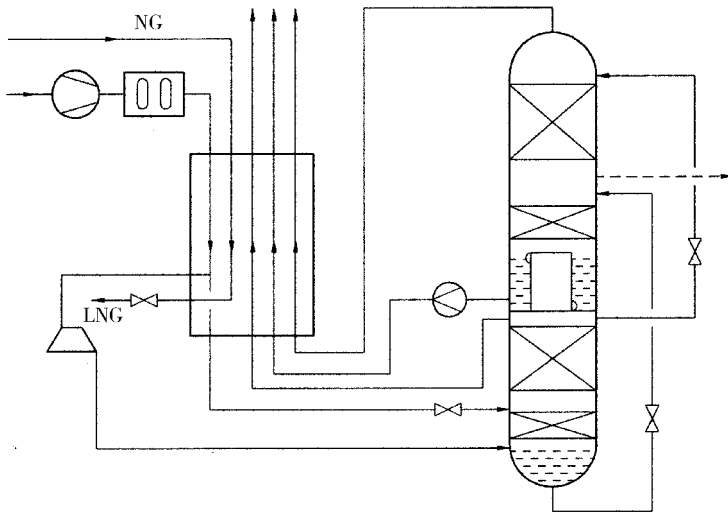


图 5 部分空气直接膨胀制冷流程

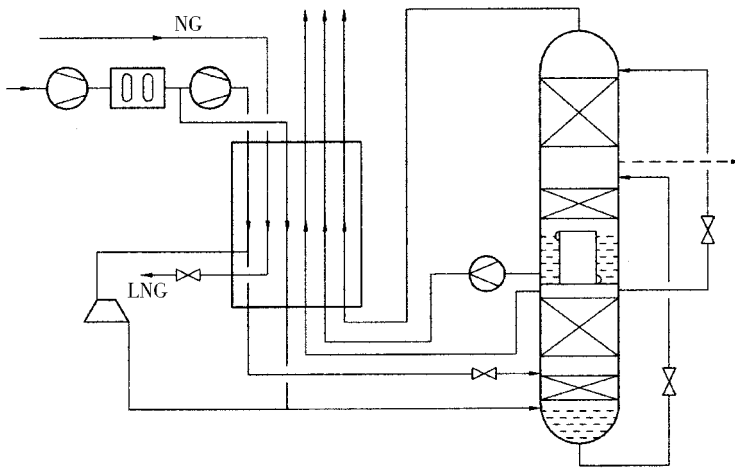


图 6 循环空气膨胀制冷流程

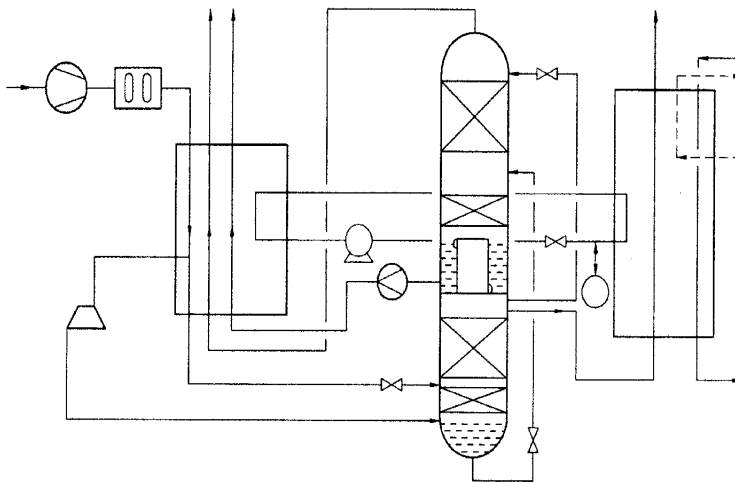


图 7 氮循环回路改进流程

2.2.2 氮气膨胀制冷流程

氮气膨胀制冷流程（中国专利 ZL 200610104466.1）是由西安交通大学提出的一种氮气双温膨胀制冷方案（如图 8 所示）。这种方案流程，冷量完全由中压循环氮气提供，通过调节高、

低温膨胀氮气体量来实现冷量的合理分配。变负荷能力和液化能力强，能同时生产 LNG、氮气、氧气等多种产品，而且系统最高运行压力低。由图 8 可以看出，天然气也仅与氮气换热，系统的安全性得到保证。

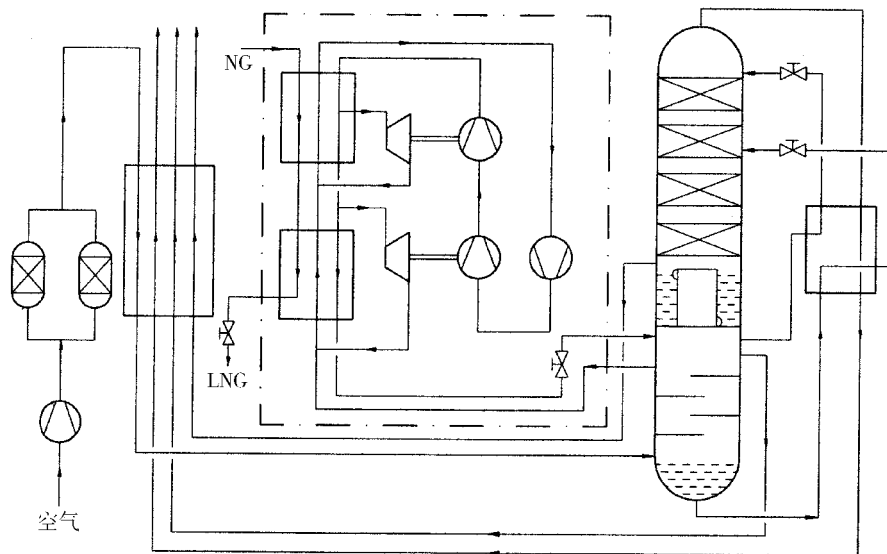


图 8 氮气双温膨胀制冷流程

2.2.3 空气膨胀制冷流程与氮气膨胀制冷流程的对比

最高运行压力、安全性、能耗以及对变工况适应能力等方面的比较见表 2。

空气膨胀制冷流程与氮气膨胀制冷流程在系统

表 2 空气膨胀制冷流程与氮气膨胀制冷流程的比较

指标	美国专利		中国专利
	部分空气直接膨胀制冷	循环压缩空气膨胀制冷	氮气双温膨胀制冷
制冷方式	丙烷预冷 空气膨胀 节流制冷	丙烷预冷 空气膨胀 节流制冷	循环氮气膨胀 节流制冷
最高运行压力/MPa	2.15	7.00	4.60
生产耗功	丙烷预冷机组耗功 原料空气压缩功	丙烷预冷机组耗功 原料空气压缩功 循环空气压缩功	原料空气压缩功 循环氮气压缩功
安全性	不安全—氮循环回路解决	不安全—氮循环回路解决	安全
变工况适应能力	差	较强	强

3 联合流程中流体之间的参数匹配

联合流程相对于独立的空分流程，工质种类更多，流程参数（压力、温度、流量、组分）变化更加多样，工质的热物性变化更加显著。两股冷、热流体定压比热容 c_p 随温度变化的曲线如图 9 所示。

从图 9 中可以看出两者的 c_p 峰值在不同温度值上，这意味着当保证低温冷量充足时，高温冷量尤其是在 190 K~200 K 温度范围内就可能过剩，因此这两股冷、热流体的换热就存在匹配问题。另外，在大家熟知的内压缩空分流程中，高压主换热器的最

大传热温差可以达到二十几度，这同样需要合理匹配流程参数以缩小传热温差，减少不可逆损失。

下面举两个例子来说明流程中参数匹配问题，第一个是前面提到的氮气双温膨胀制冷循环中 β 值（进入高温膨胀气体量和进入低温膨胀气体量之比）的选择；第二个是天然气混合制冷剂液化流程中制冷剂组分与原料天然气的匹配问题。

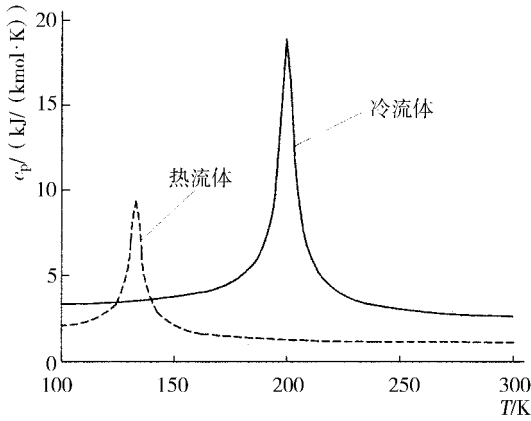


图9 两股冷、热流体定压比热容 c_p - T 曲线

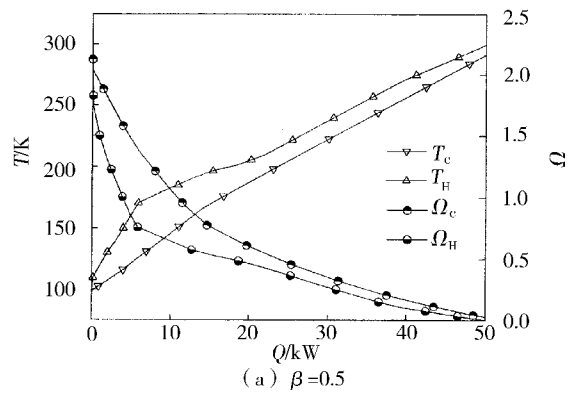
3.1 氮气双温膨胀液化天然气流程中高、低温膨胀气体量之比 β 的选择^[21,22]

由图8可知，对于氮气双温膨胀液化天然气流程，当天然气流量一定时，由于高温膨胀产生的冷量要大于低温膨胀，所以 β 越大系统所需的膨胀量就越小，单位产品的能耗就越低。但是 β 也不能无限增大，否则低温换热器的冷量就会不足，出现负温差。因此在一定工况下，膨胀气体量之比 β 存在一个最优值。

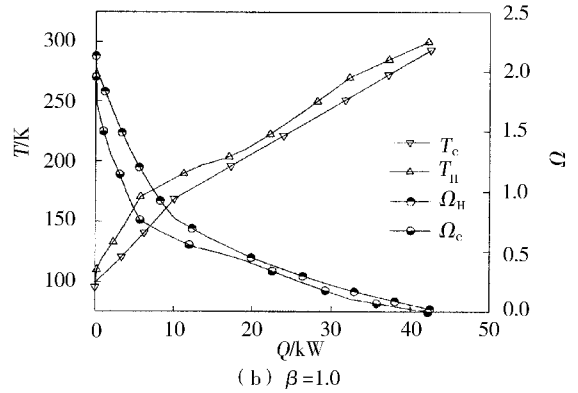
以天然气流量 $100 \text{ m}^3/\text{h}$ 为例， β 从 0.5 增加到 1.5 时，循环换热器热负荷及热力学卡诺因子 Ω 的分布如图10所示。从图10中可以看出，在不出现负温差的情况下，随着 β 增大，换热器的热负荷减小，换热器的传热温差更均匀，换热过程的不可逆损失更小。

3.2 混合制冷剂液化流程中制冷剂组分与原料天然气的匹配^[23]

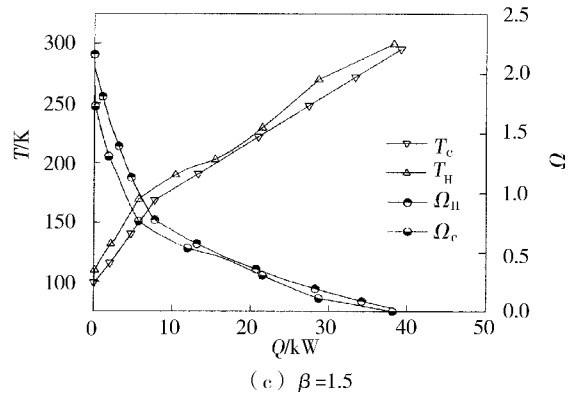
在天然气混合制冷剂液化流程中，原料天然气的液化是依靠混合制冷剂制冷循环实现的。与一般制冷循环不同的是，该流程的原料天然气与混合制冷剂均是多元混合物，影响流体 c_p 的因素更多，因此匹配问题更加突出。



(a) $\beta=0.5$



(b) $\beta=1.0$



(c) $\beta=1.5$

图10 高、低温膨胀气体量之比 β 对循环换热器热负荷及传热温差的影响

不同压力、不同组分的6种原料天然气的 c_p - T 曲线如图11所示；以4种组分 N_2 、 CH_4 、 C_2H_6 和 C_3H_8 组成的混合制冷剂为例，与这6种原料气相对应的混合制冷剂组分如图12所示。对图11和12可以看出，随着压力降低，无论是对含95%还是含82% CH_4 的原料气，其 c_p 峰值均向低温区移动且增大（即原料气的液化难度增加），因此对应的混合制冷剂低沸点组分 N_2 和 CH_4 也相应增加，以满足低温区冷量增加的要求。由于原料气组分不同造成 c_p 变化幅度不同，因而混合制冷剂

低沸点组分的增加程度也不同, 含 95% CH₄ 的原料气低沸点组分高, 其 c_p 向低温区移动和增加的幅度大, 相应地其混合制冷剂中低沸点组分也就比含 82% CH₄ 的原料气增加得多。另外, 对于具有相同压力、不同组分的原料天然气, 压力高的原料

气, 组分对其 c_p 的影响小, 混合制冷剂组分相应的变化也就小, 而当原料气压力比较低时, 组分对其 c_p 的影响增大, 因而制冷剂组分的变化也相应增大。

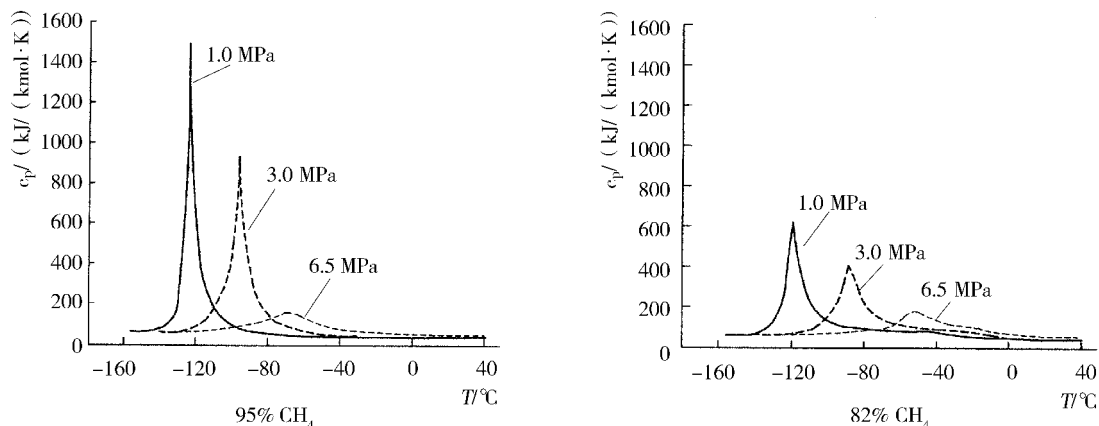


图 11 6种原料天然气的 c_p - T 曲线

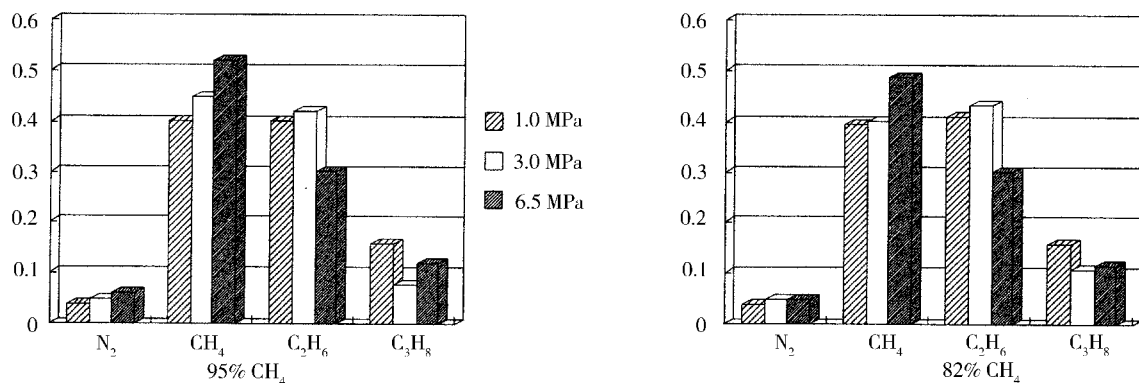


图 12 与 6种原料天然气相对应的混合制冷剂组分

4 低温下板翅式换热器翅片的性能研究

为了使空分设备高效、节能运行, 除了对流程进行优化、参数进行匹配以外, 也需要对单元结构进行优化。在各种流程中, 板翅式换热器是经常用到的设备, 对于板翅式换热器, 翅片性能的研究很重要。文献^[24]针对不同的 4 种翅片 (平直、锯齿、打孔和波纹) 进行了三维 CFD 模拟, 所得到的模拟结果与常温下经验关联式 (传热因子 j 和摩擦因子 f) 吻合得很好。对于空分设备来讲, 更关心的是在低温条件下, 翅片传热因子 j 和摩擦因子 f 的变化情况, 西安交通大学研究生脱瀚斐曾对此进行了一系列研究, 下面罗列一些他研究的主要成果。

研究发现, 低温下随着翅片材质本身导热系数的降低 (温度越低, 铝材导热系数 λ 降低的坡度越

大, 如图 13 所示), 翅片效率也将降低。尤其是对翅片间距与翅片高度比值越小的换热器, 翅片效率降低的幅度越大。但是在同样低温下, 如果减小表面传热系数 α , 翅片效率降低状况将改善。例如同温下的气态和液态流体, 气态的翅片效率就比液态的高 (如图 14 所示)。研究还比较了同一规格翅片在低温下传热因子 j 和摩擦因子 f 的变化情况, 结果表明: 低温下翅片摩擦因子 f 的变化幅度小, 而传热因子 j 降低的幅度大, 当温度从 300 K 降到 5 K (对应空气到氢的温度) 时, 与常温的实验值相比, j 因子依次降低 3%、48.4%、59.2%、71.9% 和 89.7% (如图 15 所示)。

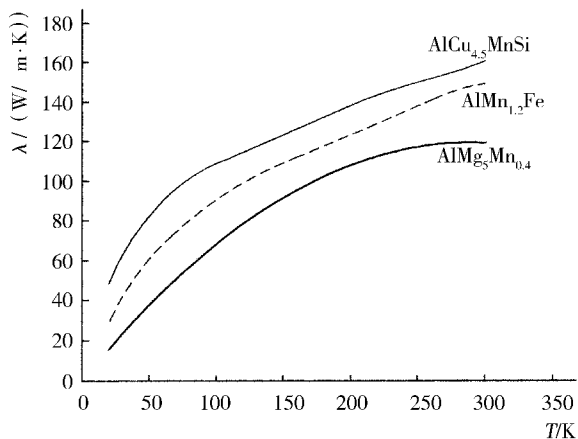


图 13 3 种铝材导热系数随温度的变化曲线

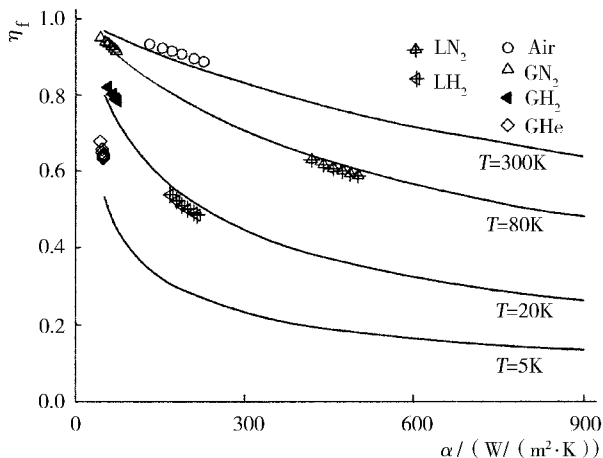


图 14 表面传热系数 α 对翅片效率 η_f 的影响

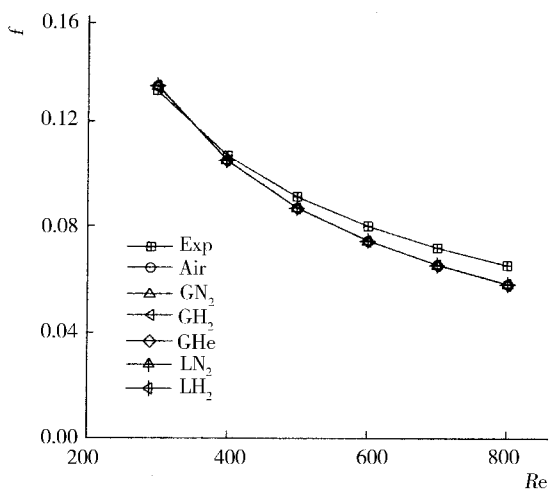
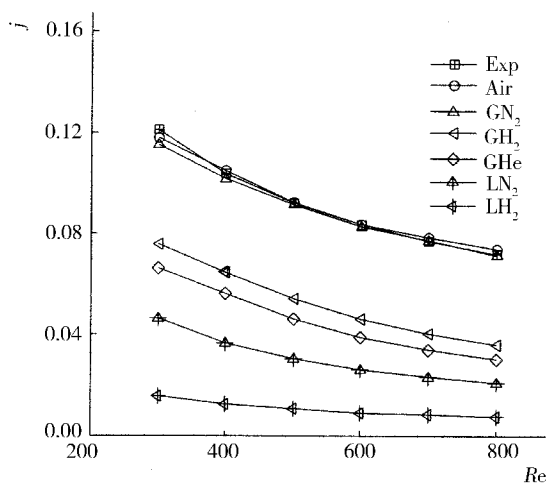


图 15 低温下锯齿型翅片 ($h_f = 7.15 \text{ mm}$, $\delta_f = 0.1 \text{ mm}$) 传热因子 j 和摩擦因子 f 的变化



5 结论

随着我国化工、煤炭、电力等行业的崛起，空分设备的最大客户已经由原来的钢铁企业转变到化工等其他多种行业，这给我国大型空分设备的发展带来了机遇。文章从各个系统的联合角度，从高效、节能出发，探讨了空分设备的原料气、动力以及净化等系统与工业用氧系统的联合形式，并且重点讨论了空分设备与天然气液化和 LNG 冷能利用系统之间的联合技术。对于联合系统，文章指出了参数匹配的重要性以及一些解决办法，最后给出了低温下板翅式换热器翅片传热因子 j 和摩擦因子 f 的变化规律。□

参考文献:

[1] 顾福民. 随谈当前国内外空分的一些走势 [OL]. [2010-02-26]. <http://www.cnghpa.com/bbs/>

displayBBS.asp? RoomID= 13& BBSID= 20290.

[2] 廖治鹏. 大型低温空分装置的技术现状及前景趋势 [J]. 通用机械, 2006 (12): 16-20.

[3] 倪剑刚. 杭氧大型化工型内压缩流程空分技术现状 [J]. 深冷技术, 2005 (5): 1-8.

[4] 倪剑刚. 内压缩还是外压缩——关于如何选择大型空分设备流程的一些看法 [J]. 深冷技术, 2003 (5): 11-14.

[5] 陈桂林. 大型空分膜式冷凝蒸发器的应用评述 [J]. 深冷技术, 2003 (6): 1-3.

[6] 毛央平, 柳红霞. 大型空分装置冷凝蒸发器结构的研究 [C]. 中国工业气体工业协会第十八次会员代表大会暨二〇〇八年会论文集.

[7] 管小勇. 杭氧大型空分设备精馏塔技术与研发现状 [C]. 中国工业气体工业协会第十八次会员代表大会暨二〇〇八年会论文集.

[8] SMITH A R, KLOSEK J. A Review of Air Separation

Technologies and Their Integration with Energy Conversion Processes [J]. Fuel Processing Technology, 2001, 70 (2): 115-134.

- [9] ALBRECHT B A, KOK J B W, VAN D M, etc. Co Production of Synthesis Gas and Power by Integration of Partial Oxidation Reactor, Gas Turbine and Air Separation Unit [J]. International Journal of Exergy, 2007, 4 (4): 357-370.
- [10] WIMER J G, KEAIRNS D, PARSONS E L, etc. Integration of Gas Turbines Adapted for Syngas Fuel with Cryogenic and Membrane Based Air Separation Units Issues to Consider for System Studies [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power Transactions of the ASME, 2006, 128 (2): 271-280.
- [11] SHAO Y, GOLOMB D. Power Plants with CO₂ Capture Using Integrated Air Separation and Flue Gas Recycling [J]. Energy Conversion and Management, 1996, 37 (6-7), 903-908.
- [12] 同文献 [10].
- [13] 同文献 [2].
- [14] 陈则韶, 程文龙, 胡 . 一种利用 LNG 冷能的空气分离装置新流程 [J]. 工程热物理学报, 2004, 25 (6): 913-916.
- [15] 金滔, 胡建军, 陈国邦, 等. 利用液化天然气冷能的

新型空分流程及其性能 [J]. 浙江大学学报 (工学版), 2007, 41 (5): 836-839.

- [16] 燕娜, 厉彦忠. 采用液化天然气 (LNG) 冷量的液体空分新流程及其分析 [J]. 低温工程, 2007 (2): 40-45.
- [17] 燕娜, 厉彦忠. 采用液化天然气冷量的空分系统新流程 [J]. 化学工程, 2007, 35 (9): 58-61.
- [18] 同文献 [16].
- [19] JEAN P T, L H R (FR). Combined Air Separation Natural Gas Liquefaction Plant: US 7143606 B2. 2006-12-05 [P].
- [20] 厉彦忠, 燕娜. 利用空分制冷系统的小型天然气液化装置, 中国发明专利 (ZL 200610104466. 1) [P].
- [21] 同文献 [20]
- [22] 脱瀚斐, 厉彦忠, 谭宏博. 空气分离与天然气液化组合流程 [J]. 化学工程, 2008, 59 (10): 2498-2504.
- [23] 赵敏, 厉彦忠. 丙烷预冷混合制冷剂液化流程中原料气及制冷剂匹配研究 [J]. 西安交通大学学报, 2010, 44 (2): 108-112.
- [24] ZHU YINHAI, LI YANZHONG. Three Dimensional Numerical Simulation on the Laminar Flow and Heat Transfer in Four Basic Fins of Plate Fin Heat Exchangers [J]. Journal of Heat Transfer Transactions of the ASME, 2008, 130 (11): 111801-18.

※

※

※

国内首个 LNG 冷能利用空分设备项目建成

2010年7月29日, 中国海洋石油总公司旗下的气电集团福建 LNG 公司指派技术骨干与中海石油空气化工产品 (福建) 有限公司冷能空分设备项目的调试人员组成联合调试团队, 开始对冷能空分设备项目 LNG 供应系统进行调试。调试从 01: 00 开始, 在经过管道冷却、加压等程序后, 于 11: 52 冷能空分设备开始向接收站输气干线返送高压天然气。至此, LNG 供应系统的调试顺利完成。

LNG 供应系统的调试成功, 标志着冷能空分设备项目正式进入调试期并开始进行空分设备的调试。据介绍, 冷能空分设备项目的调试期为 2010 年 7—9 月。

福建 LNG 冷能空分设备项目是福建 LNG 产业链的扩展项目, 其设计理念是利用 LNG 的冷能和少量电能使空气

低温液化, 并通过空分设备生产液氮、液氧和液氩等工业气体产品, 是一个节能环保型和资源循环利用型项目。福建 LNG 冷能空分设备项目将日产液氮、液氧和液氩等产品 600 余吨, 其生产方式比常规生产方式节能 50%、节水 70% 以上, 节能减排效应明显。据悉, 福建 LNG 冷能空分设备项目是国内首个建成并顺利进入调试期的 LNG 冷能利用项目。

中国海洋石油总公司开发 LNG 冷能, 努力为世界节能减排事业作贡献。2010 年 7 月 12 日, 由中国海油发展石化分公司 LNG 冷能项目组牵头研究的利用 LNG 冷能进行空气分离的方法学获得了联合国的批准。

本刊