

# 液化天然气接收站再冷凝工艺优化研究

杨志国, 李亚军

(华南理工大学强化传热与过程节能教育部重点实验室, 广东 广州 510640)

**摘要:** 目前液化天然气(LNG)接收站终端普遍采用再冷凝工艺来处理蒸发气体(BOG)。对 BOG 再冷凝工艺进行了热力学模拟, 并通过单变量法对影响 BOG 再冷凝工艺的运行参数进行了分析。结果表明: LNG 输出量随下游用气负荷波动的变化及 LNG 组成及储存压力的不同, 都将引起 BOG 再冷凝工艺的运行参数(压缩机压比和功耗)的改变。建议在实际工艺运行中, 确保管网输气系统安全平稳运行, 适当调整压缩机压比、物料比等再冷凝工艺参数, 从而实现 BOG 再冷凝工艺的优化运行。

**关键词:** LNG 接收站; 蒸发气体; 再冷凝; 工艺参数; 压缩机功耗

中图分类号: O473.24; TB652

文献标识码: A

文章编号: 0253-4320(2009)11-0074-04

## Influence of operational parameters on boil off gas recondensation process

YANG Zhi-guo, LI Ya-jun

(Key Laboratory of Heat Transfer Enhancement and Energy Conservation of the Ministry of Education, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** The recondensation process is generally adopted to deal with the boil off gas (BOG) in LNG receiving terminals currently. The recondensation process is simulated by the software PRO/II 8.0, and the process parameters affecting the recondensation process for BOG are analyzed by means of changing single parameter presented in this paper. The results show that all the change of the sendout of LNG with the ranging of LNG used, the composition of LNG and the pressure of the storage can cause the difference of the parameters (such as the pressure ratio of the BOG compressor and the energy consumption) of the recondensation process. In the actual process operation, it is advised to properly adjust the parameters of the recondensation process such as the ratio of the BOG compressor pressure and the ratio of materials. So that the gas transmission pipeline network can operate safely and stably, and the recondensation process can be ensured to run under optimal conditions.

**Key words:** LNG receiving terminal; boil off gas; recondensation; process parameter; compressor power consumption

加快发展进口液化天然气是目前我国优化能源结构、改善环境和提高能效的最有力的措施。随着深圳大鹏和福建莆田 2 座 LNG 接收站的建成和投运, 2015 年我国将在长三角、环渤海地区、泛珠三角地区建设 10 个左右的 LNG 接收站, 届时将形成进口量 5 000 万 t/a 以上规模的 LNG 接收设施<sup>[1]</sup>。由于 LNG 在常压下温度低至 -160.0℃, 由于其特殊的储存条件, 在接收站储存时“漏热”便不可避免, 即 LNG 在储存中会产生大量的蒸发气体, 一般地上储罐日蒸发量(质量分数) ≤ 0.05%; 同时除储罐“漏热”产生 BOG 外, 在 LNG 船卸货期间也会产生大量的 BOG。目前, 工程上对 BOG 的处理主要有 2 种工艺流程: 直接压缩工艺和再冷凝工艺<sup>[2-3]</sup>。对于气源型接收站, 由于采用 7~9 MPa 高压外送管网<sup>[4]</sup>, 故普遍采用再冷凝工艺。目前的再冷凝工艺大都为压缩后的 BOG 和 LNG 直接进行换热, 利用 LNG 的冷能将压缩后的 BOG 再冷凝<sup>[5-7]</sup>。由于 LNG 气化

输送下游管网时, 因不同时段输气负荷波动的原因, BOG 再冷凝工艺的操作受到影响, 接收站在实际运行中不能根据实际情况采取最合理的操作, 使得能耗较大。本文中对影响 BOG 再冷凝工艺运行的主要参数进行了分析, 提出改善工艺操作弹性的措施。

## 1 现有 BOG 再冷凝工艺流程

目前某一接收站接收船运进口的 LNG, 其组成如表 1 所示。

表 1 LNG 组成

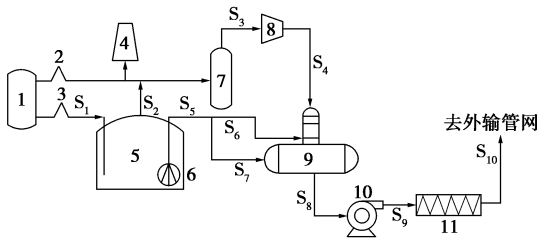
组分	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	iC <sub>4</sub>	nC <sub>4</sub>	iC <sub>5</sub>	N <sub>2</sub>
摩尔分数/%	88.774	7.542	2.588	0.454	0.562	0.004	0.074

LNG 通过卸料臂卸载到 LNG 储罐, 储罐为 2 个容量 16 万 m<sup>3</sup> 的全容式混凝土低温常压储罐, 操作压力为 115 kPa, 每个储罐储货总量为 147 520 t,

收稿日期: 2009-05-26

作者简介: 杨志国(1982-), 男, 硕士生; 李亚军(1969-), 女, 副教授, 主要从事过程能量优化和液化天然气高效利用方面的研究, 通讯联系人, 020-87112044, liyajun@scut.edu.cn。

液货日蒸发率小于 0.05% (质量分数)。该接收站 BOG 再冷凝工艺流程如图 1 所示。



1—LNG 船;2—气相回流装卸臂;3—码头装卸臂;  
4—火炬;5—LNG 储罐;6—第一级泵;7—分离器;  
8—BOG 压缩机;9—再冷凝器;10—第二级泵;11—气化器

图 1 再冷凝工艺流程

储罐中的 LNG 经第一级泵压缩过冷后分成 2 股,1 股去再冷凝器上部冷凝 BOG,1 股去再冷凝器下部与冷凝液混合。储罐产生的 BOG 和在卸货过程中产生的 BOG,先在分离器中缓存并分离凝液,气相进入 BOG 压缩机增压,目前在正常操作条件下,产生 BOG 量约为 6.7 t/h。增压后的 BOG 在冷凝器中和经过第 1 级泵增压到相同压力的过冷 LNG 换热并全部冷凝,之后与再冷凝器下部的 LNG 混合,经第 2 级泵增加至管网压力 9 MPa 后进入气化器气化,然后输送至管网<sup>[8]</sup>。

从图 1 可以看出,BOG 再冷凝工艺主要设备是 BOG 压缩机及再冷凝器,主要工艺参数亦是压缩机的压比及完全将 BOG 再冷凝的 LNG 用量。表 2 为现有 BOG 再冷凝工艺流程的主要运行参数,其中用来冷凝 BOG 的 LNG 与 BOG 的质量比为 9.2。

表 2 现有 BOG 再冷凝工艺的主要运行参数

物流	温度	压力/ $10^5$ Pa	流量/ $t \cdot h^{-1}$
BOG-S <sub>2</sub>	-137.0	1.15	6.7
压前 BOG-S <sub>3</sub>	-133.0	1.15	6.7
压后 BOG-S <sub>4</sub>	-1.4	11.0	6.7
LNG-S <sub>6</sub>	-158.3	11.0	61.6
进汽化器-S <sub>9</sub>	-145.1	90.0	180.0

## 2 操作参数对 BOG 再冷凝工艺的影响

本文中主要从热力学方面对流程的各个参数进行分析,并且只对流程性能的影响进行分析。由于参数众多,笔者采用单因素分析法,即在每次分析时只改变 1 个因变量参数而固定其他参数。由于气化产生的 BOG 的组成很难准确分析,因此笔者以 LNG 组成及 LNG 液货罐的操作条件为基础,根据物料平

衡、热量平衡和相平衡,通过模拟计算出 BOG 组成。在流程模拟中压缩机和泵的效率按 75% 计算,这与工程实际相吻合。

### 2.1 压缩机出口压力对 BOG 再冷凝工艺的影响

压缩机出口压力主要从 2 个方面对工艺流程产生影响:物料比和工艺能耗。

首先分析出口压力对物料比的影响。图 2 为最小物料比随压缩机出口压力的变化曲线(其中最小物料比定义为根据热力学平衡和冷凝器效率计算的将所有 BOG 冷凝所需要的最少 LNG 与 BOG 的质量比)。

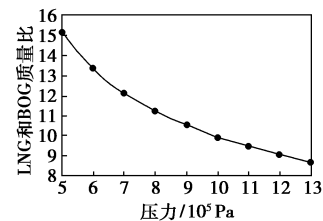
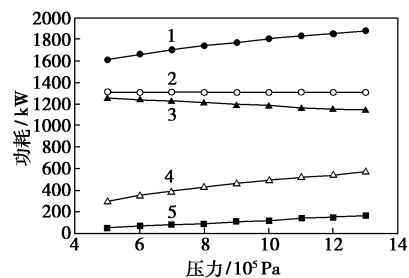


图 2 物料比随 BOG 压缩机出口压力变化

从图 2 中可以看出,随着压缩机出口压力增大,再冷凝所需要的物料比逐渐减小,这主要是因为 BOG 压力越高,其冷凝温度越高,较易液化,将 BOG 再液化所需要的 LNG 冷量越少,并且 BOG 压力越高,经过第 1 级泵增压到相同压力的过冷 LNG 提供的冷量越多,在这双重作用下,物料比,即 LNG 用量越来越小。但从图 2 中还可以看出,随着压力的增大,物料比减小速度逐渐趋缓,也就是说,随着压力的增大,压力对物料比的影响逐渐减小,当压力达到一定程度后,再通过改变压力来调节物料比,效果就不很明显了。

再从工艺能耗方面分析,图 3 为 LNG 输出量为 180 t/h,BOG 产生量为 6.7 t/h(415.6 kmol/h)的条件下,压缩机功耗、一级泵功耗、二级泵功耗和总功耗随 BOG 压缩机出口压力的变化曲线。



1—总功耗;2—泵总功耗;3—二级泵功耗;  
4—压缩机功耗;5—一级泵功耗

图 3 设备功耗随 BOG 压缩机出口压力的变化

从图 3 可以看出,一级泵功耗随压缩机出口压力增加而增加,二级泵功耗在减少,一级泵和二级泵总功耗略有减少,也就是说一级泵功耗的增加略小于二级泵功耗的减少,说明增加一级泵出口压力对减少泵总功耗有利。而压缩机功耗和总功耗都在增加,并且总功耗的增加远远大于泵功耗的减少,所以总功耗的增加完全来自压缩机的功耗增加。因此在操作条件允许的情况下应尽量降低压缩机压比,如可以通过增加物料比来降低压缩机的出口压力,从而降低压缩机功耗。

## 2.2 LNG 输出量对 BOG 再冷凝工艺的影响

由于天然气用户的用气量波动频繁,不同时段和季节的变化量相当大,故 LNG 的气化要根据下游管网输气的峰、谷负荷来确定。图 4 所示的是该接收站 2007 年每天的 LNG 输出量变化图。

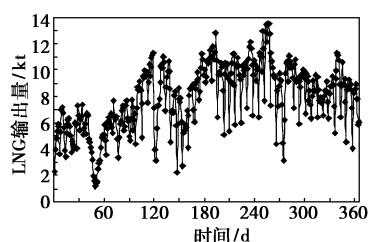


图 4 LNG 输出量随时间变化

从图 4 中可看出,接收站在输送高峰时期达到输气量 13 500.0 t/d,合 562.5 t/h,在输送低谷时期,输气量只有 1 184.5 t/d(49.0 t/h)。从上述分析的压缩机出口压力对物料比的影响可知,压缩机出口压力越低所需要的物料比越大,出口压力越大物料比越小。因此,在气化负荷较低时,LNG 输出量较少,用来冷凝 BOG 的 LNG 量就会比较少,在输气负荷低谷时,将给操作上带来一定困难。为了保证 BOG 被完全冷凝,BOG 需被增压至较高压力,导致压缩机功耗较大。因此,随着下游用气负荷的波动,LNG 输出量随之变化,在实际操作中要根据 LNG 输出量来调节压缩机出口压力和物料比。当气化负荷高时,可以通过增大物料比来降低压缩机的出口压力,从而降低压缩机功耗,以实现再冷凝工艺流程的最优化操作。

## 2.3 LNG 组成对 BOG 再冷凝工艺的影响

### 2.3.1 乙烷含量变化对再冷凝工艺的影响

LNG 接收终端可能接收来自不同地方的 LNG,组分不同会导致 LNG 物性有所不同,从而对再冷凝工艺产生一定的影响。LNG 中除甲烷之外,乙烷含量最多,因此乙烷含量对 LNG 物性的变化起着主要

的影响作用,进而影响再液化流程。

设定储罐的漏热量 ( $3.68 \times 10^6$  kJ/h) 和储存压力保持不变,由于罐压保持恒定,储存温度会随 LNG 组成不同而稍有变化,同时 BOG 的组成也会有所变化。在分析 LNG 组成对再冷凝工艺流程的影响中,设定甲烷和乙烷之外的组分含量不变。表 3 为各工艺参数随乙烷含量变化的模拟计算结果。

表 3 各参数随乙烷含量的变化

乙烷摩尔 分数/%	BOG 量/ $\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$	LNG 量/ $\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$	压缩机功耗/ kW
7.542	6781.2	38087.5	492.1
6.542	6821.6	38180.0	495.3
5.542	6869.3	38327.8	498.9
4.542	6896.4	38401.4	501.0
3.542	6915.9	38460.1	502.6
2.542	6940.4	38498.8	504.5

从表 3 数据看出,LNG 中乙烷含量越少,单位时间内产生的 BOG 越多,这表明单位时间内要再冷凝的 BOG 越多,这主要是因为乙烷的气化潜热较大,并且当 LNG 中乙烷含量减少时,LNG 的储存温度降低,乙烷等多碳组分更难挥发,所以相同的漏热量可以气化出更多的 BOG,并且 BOG 中甲烷含量更多<sup>[9]</sup>。在压缩机进出口压力相同,进口温度相差不大的情况下,压缩机的功耗主要由 BOG 的流量来确定,所以乙烷含量的减少也会增加压缩机的功耗,其变化关系见表 3。同时,BOG 的增加也造成液化 BOG 的 LNG 用量增加。因此,LNG 中乙烷含量对整个再液化流程都有着重要的影响,LNG 中乙烷含量多,相应地产生的 BOG 量减少,在相同的输气负荷下,可以适当降低压缩机出口压力,从而减少压缩机功耗。故当接收站接收不同产地、不同组成的 LNG 时,因根据组成的不同,调整再冷凝工艺操作。

### 2.3.2 氮气含量对再冷凝工艺的影响

由于氮气在常压条件下的气化温度为  $-190^\circ\text{C}$  以上,因此  $-160^\circ\text{C}$  左右的储存温度很容易让氮气从 LNG 中溢出,所以氮气的存在对再液化流程影响也比较大,表 4 为各工艺参数随氮气含量变化的模拟计算结果。

从表 4 可以看出,在相同的储存压力条件和漏热情况下,随着 LNG 中氮气含量的增加,单位时间产生的 BOG 的量逐渐减少,这主要是因为,随着 LNG 中氮气含量的增加,LNG 的泡点温度越来越低,

甲烷更难气化出来,而溶解在 LNG 中的氮气从 LNG 中解析出来需要很大的解析热,所以在外界漏热一定的情况下,氮气含量越多,储存温度就越低,气化出来的气体越少。由于产生的 BOG 的量减少,所以压缩机的处理量也减少,因此压缩机功耗也相应减少。由于 BOG 的量减少,所用再冷凝需要的 LNG 的量也随之减少。

表 4 各参数随氮气含量的变化

氮气摩尔 分数/%	BOG 量/ kg·h <sup>-1</sup>	LNG 量/ kg·h <sup>-1</sup>	压缩机功耗/ kW
0.074	6781.153	38087.53	492.1
0.084	6735.817	37822.12	487.9
0.094	6688.96	37547.55	483.5
0.104	6643.596	37281.06	479.3
0.114	6597.584	37010.99	475.0
0.124	6551.395	36739.95	470.7
0.134	6504.771	36464.76	466.5

通过以上分析可知,储罐 LNG 的组成从多方面影响再液化冷凝工艺。所以当接收站接收不同组成的 LNG 时,应根据组成的不同,调整再冷凝工艺操作,即在相同的输气负荷下,可以根据组成的不同,适当调整 BOG 压缩机出口压力,从而减少压缩机功耗。

#### 2.4 储罐压力对 BOG 再冷凝工艺的影响

因 LNG 是以甲烷为主,包括氮、乙烷、丙烷等组分的低温液体混合物,其泡点温度随压力的改变而变化,所以在不同的压力下,LNG 不同的泡点温度下挥发出来的 BOG 的组成也会不同,本文中对 LNG 储存压力对再冷凝工艺的影响进行了研究,在此设定 BOG 压缩机的出口压力为 1 MPa 不变。图 5 为在漏热相同的情况下,产生的 BOG 的量随 LNG 储存压力的变化情况。

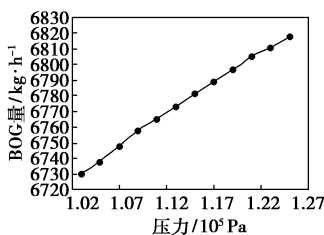


图 5 BOG 量随 LNG 储存压力变化

从图 5 中可以看出,随着 LNG 储存压力的降低,产生的 BOG 的量逐渐减少,并呈线性关系。因为随着储存压力的降低,LNG 储存温度也相应降低,

这样甲烷就更难气化出来,所以不同的储存压力,使得 BOG 的组成也不一样。

储罐压力的变化,使得 BOG 压缩机的入口压力也随之变化。随着储罐压力升高,虽然 BOG 的量增加,但压缩机功耗却逐渐减少,这主要是因为 BOG 压缩机进口压力对压缩机的影响大于 BOG 量增加对压缩机功耗的影响。而压缩机功耗主要来自气体体积的变化,所以储罐压力升高,BOG 压缩机入口压力增高,相对压比降低,压缩机功耗逐渐减少。

表 5 为 LNG 输出量为 180 t/h,最小物料比情况下,设备功耗随储罐压力不同的变化。从表 5 中可以看出,两级泵的总功耗随着 LNG 储存压力的增加而改变不大;压缩机的功耗随 LNG 储存压力增加而降低。由于压缩机功耗是影响总功耗的主要因素,所以总功耗亦随压缩机功耗降低而相应降低。

表 5 不同 LNG 储存压力下的设备功耗

压力/10 <sup>5</sup> Pa	压缩机功耗/kW	两级泵功耗/kW	总功耗/kW
1.05	515.7	1303.3	1819.0
1.09	506.7	1304.7	1811.3
1.13	496.9	1306.0	1802.9
1.17	487.5	1307.3	1794.8
1.21	478.6	1308.5	1787.1
1.25	469.7	1309.7	1779.4

由于储罐压力的提高,使得 BOG 量增加,在气化负荷低时,又会给再冷凝工艺的操作带来一定的困难,因此在实际工艺运行中,不能仅考虑单个因素对工艺的影响,重要的是要确保管网输气系统的安全平稳运行,保证下游天然气用户的供气安全。

### 3 结语

通过 LNG 组成,BOG 压缩机出口压力,LNG 输出量和 LNG 储存压力等参数对 BOG 再冷凝工艺运行的影响分析,得到以下结论:

(1) LNG 输出量随下游用气负荷的波动而变化,在实际操作中应根据 LNG 输出量来调整压缩机压比和物料比参数,从而达到能量消耗最少。

(2) LNG 中的氮气和乙烷含量都对再冷凝工艺有影响,当接收站接收不同组成的 LNG 时,应根据不同组成的 BOG 适时调整再冷凝工艺参数,以实现工艺的最优化运行。

(3) LNG 储存压力从 BOG 生成量和压缩机入口压力等方面影响再冷凝工艺,储存压力高,可使工艺总功耗降低。

(下转第 79 页)

### 1.1.1 预热空气系统

常温空气经蒸汽-空气列管式换热器加热后,在负压作用下进入试验系统,对各设备进行试验前的冲刷预热以及停车后的蒸汽置换,以减少蒸汽冷凝,同时在试验过程中混入部分高温空气也可降低蒸汽露点温度。空气温度由进入换热器的蒸汽流量阀门开度控制。

### 1.1.2 蒸汽喷射诱导系统

整个试验装置的负压由蒸汽喷射泵提供,通过调整蒸汽流量及喷嘴与喉部的距离来改变负压。

### 1.1.3 粉碎分级系统

粉碎分级系统由过热蒸汽粉碎分级机、密封加料装置组成。调好参数的过热蒸汽进入粉碎室,通过超音速喷嘴膨胀加速后喷出,同时物料由密封加料装置经通风加料管送入粉碎室,物料在喷嘴喷汇处冲击粉碎,合格粉体在负压气流带动下通过顶部设置的涡轮分级机由袋式除尘器收集。粉体粒度由加料量、蒸汽参数、分级机转速等控制。

### 1.1.4 过热蒸汽袋除尘系统

除尘器筒体直径 1 460 mm,高度 3 350 mm,玻纤滤袋,设计过滤风速 0.25 m/min。在除尘器入口处设置可调式导流装置,以保证良好的气流组织,即避免蒸汽在除尘器内因存在涡流而滞留冷凝,以及保证较佳的粉尘沉降规律。本研究中,通过计算机仿真模拟论证,采用石棉保温、电加热及特殊设计的旋切流加热装置,可极大提高过热蒸汽袋除尘器的抗结露能力;由于该装置脉冲喷吹流量所占比例较小,故未设压缩空气加热装置;另外在除尘器花孔板上下均布置有温度和压力测量点。

## 1.2 试验过程

试验是在滤袋已有  $d_{50} = 5.238 \mu\text{m}$  的超细粉煤

(上接第 77 页)

(4)在实际工艺运行中,不能仅考虑单个因素对工艺的影响,而应在管网输气系统的安全平稳运行,确保下游天然气用户的供气安全条件下,优化 BOG 再冷凝工艺的运行。

## 参考文献

- [1] 陈雪,马国光,付志林,等.我国 LNG 接收终端的现状和发展新动向[J].煤气与热力,2007,27(8):63-66.
- [2] 刘浩,金国强.LNG 接收站 BOG 气体处理工艺[J].化工设计,2006,16(1):13-16.
- [3] 顾安忠,鲁雪生,汪荣顺,等.液化天然气技术[M].北京:机械工业出版社,2004.

灰初层,且不进行压缩空气脉冲喷吹的情况下进行的,以维持较为恒定的滤袋阻力。试验过程如下:

(1)启动蒸汽喷射泵,调整蒸汽阀门开度,调至设定负压值。启动蒸汽-空气换热器,制备高温空气进行系统内部的冲刷预热,并开启涡轮分级机,加强气流扰动,缩短预热时间。不断改变除尘器入口高温空气温度,观察除尘器进出口压差变化。

(2)观察步骤(1)中系统各过程,稳定后开启电加热器及旋切流加热装置进行除尘器外部加热,并在线监测除尘器上下箱体温度,当除尘器内部各处均高于蒸汽露点温度时,开启超音速喷嘴进口蒸汽阀门,将蒸汽参数稳定在设定值一段时间,观察除尘器阻力变化。

(3)接着调整并维持蒸汽压力不变,不断改变蒸汽温度,但必须保证蒸汽参数在 0.5 MPa(表压),260℃以上,随时记录除尘器阻力、预热空气温度与流量、除尘器进出口温度等。停机时先关闭超音速喷嘴前蒸汽阀,用换热器预热的高温空气置换系统内残留的过热蒸汽 20 min,然后再关闭预热空气系统及蒸汽喷射泵,试验结束。

## 1.3 试验条件

通过减压阀调整蒸汽压力,水冷器调整蒸汽温度;采用变频器控制涡轮分级机;用毕托管和 U 型压力计测量压力损失,热线风速仪测量气流流速,热电偶及水银温度计测定温度。

## 2 试验结果与讨论

### 2.1 空气温度对过热蒸汽袋式除尘器阻力的影响

在未通入蒸汽的情况下,仅改变进入袋式除尘器的预热空气温度,测定过热蒸汽袋式除尘器阻力随空气温度的变化,结果见图 2。

- [4] 曹文胜,鲁雪生,顾安忠,等.液化天然气接收站终端及其相关技术[J].天然气工业,2006,26(1):112-115.
- [5] Chicago Bridge & Iron Company. System and apparatus for condensing boil-vapor from a liquified natrual gas container: US, 6470706 [P]. 2002-10-29.
- [6] Granger D. Natrual gas vapor recondenser system: US, 6745576 [P]. 2004-06-08.
- [7] 李志军.液化天然气接收站的工艺系统[J].中国海上油气(工程),2002,14(6):8-9.
- [8] Chu Yan-qun, Chen Wen-l, Niu Jun-feng. The applied techniques in LNG receiving terminals[J]. Natural Gas Industry, 2007, 27(1):120-122.
- [9] Osaka Gas Co Ltd. Boil-off gas reliquefaction method for reliquefying natural gas, involves mixing boil-off gas with part of liquefied gas at same pressure and performing heat exchange between mixture and remaining liquefied gas: JP, 2000146430-A [P]. 2000-05-26. ■