

LNG冷能发电技术现状分析

陈利琼¹ 许培林¹ 孙 磊¹ 董文浩¹ 马 凯²

1.西南石油大学研究生院,四川 成都 610500;

2.中国石油江苏液化天然气有限公司,江苏 南通 216000

摘 要:目前,LNG冷能发电是石油天然气行业节能降耗的一项重要举措,国内外学者对此进行了较深入的研究,并取得一些应用成果,但该技术还存在不少问题。通过对国内外冷能发电技术现状的文献调研,总结了已应用的六种LNG冷能发电技术,包括直接膨胀法、二次媒体法、联合法、混合媒体发电法、布雷顿循环法、燃气轮机利用法,分析比较了各自的优缺点和适应性。指出:布雷顿循环发电效率最高,可达到55%,但有冷却器温度的要求;二次媒体法-单工质最低,只有18%;直接膨胀法虽然冷能利用效率低,仅为24%,但原理简单。二次媒体法、联合法、燃气轮机法效率低于布雷顿循环法,但适用性强、限制条件少,值得推广。同时介绍了九种新研发但还未应用于实际的方法,为提高LNG冷能发电效率提出了建议。

关键词:LNG;冷能;发电;焓;效率

DOI:10.3969/j.issn.1006-5539.2013.06.012

0 前言

LNG(Liquefied Natural Gas,液化天然气)是常温天然气经过脱酸、脱水处理,再经过冷冻工艺液化成的一种无色、无味、无毒且透明的低温液体,比水轻(存储密度约为 420 kg/m^3),不溶于水。随着我国LNG工业的蓬勃发展,LNG接收站冷能利用产业应运而生。LNG的存储压力较低,一般小于 200 kPa ,温度约为 $-162 \text{ }^\circ\text{C}$,根据不同的用户需求,经LNG接收站加压、加热后,输送至用户。传统的加热方式是直接采用海水汽化器或燃气加热器加热,使得约 830 kJ/kg 冷量白白浪费,因此LNG接收站冷能回收具有重要意义。LNG冷能利用方式很多,冷能发电是其中的一种。理论上,1t LNG可发电 $240 \text{ kW}\cdot\text{h}^{[1-2]}$,且发电过程中不消耗其它燃料,所发电能满足接收站应用需求,使LNG冷能发电利用率高,具有可观的经济效益和社会效益。

1 LNG冷能利用原理

LNG冷能主要产生于LNG与周围环境(如空气、海水)的温差及压力差趋于平衡态的过程中。焓是衡量冷能

大小的重要指标,表征着系统由一任意状态可逆地变化到与给定环境相平衡的状态时,理论上可以无限转换为任何其他能量形式的那部分能量,也就是热力系工质的可用能,即用于确定某指定状态下所给定能量中有可能做出有用功的部分。冷能焓分析不仅能从能量的数量上反映能量的传递及转换,还可以揭示能量系统内不可逆损失分布、成因及大小,为合理利用能量提供重要理论指导。

LNG从初态 (T, p) 经一系列的可逆过程,最终达到与环境的平衡态 (T_0, p_0) ,由系统稳定流动能量方程可得该过程的最大有用功,即系统工质的焓 ex 为:

$$\begin{aligned} ex &= (h - h_0) + T_0(s_0 - s) \\ &= c_p(T - T_0) + T_0 \int_{T_0}^T \frac{\delta q}{T} - T_0 R \int_{p_0}^p \frac{\delta q}{p} \end{aligned} \quad (1)$$

LNG冷量焓包括一定压力 p 下,由温差引起的温度焓 ex_T 及在环境温度 T_0 下由压差引起的压力焓 ex_p 两部分,其中温度焓为:

收稿日期:2013-07-04

基金项目:中国石油科技创新基金项目"提高LNG接收站冷能梯级利用效率优化技术研究"(2012D-5006-0602)

作者简介:陈利琼(1976-),女,四川射洪人,副教授,博士(后),主要从事油气储运教学、研究和设计工作。

$$ex_T = c_p(T - T_0) + T_0 \int_{T_0}^T \frac{\delta q}{T} \\ = c_p(T - T_0) + c_p T_0 \ln(T_0/T) \quad (2)$$

压力焓为:

$$ex_p = T_0 R \int_{p_0}^p \frac{\delta q}{p} = T_0 R \ln(p/p_0) \quad (3)$$

通常,汽化LNG用作管道燃气时,天然气输送压力较高(2~10 MPa),压力焓大,低温焓相对较小,可有效利用的是压力焓;而在LNG接收站利用冷能发电时,由于汽化压力较低(0.5~10 MPa),压力焓小,低温焓大,则利用的是温度焓^[3]。

2 LNG冷能发电技术方法

2.1 已应用的六种技术

2.1.1 直接膨胀法

直接膨胀法发电工艺见图1^[4]。原理为:LNG从储罐出来到低温泵加压后经由LNG蒸发器汽化,成为高压常温气体;然后利用LNG的物理焓在高压汽化时转化成的压力焓,直接驱动透平膨胀机,带动发电机发电;之后经过加热器进行外输。

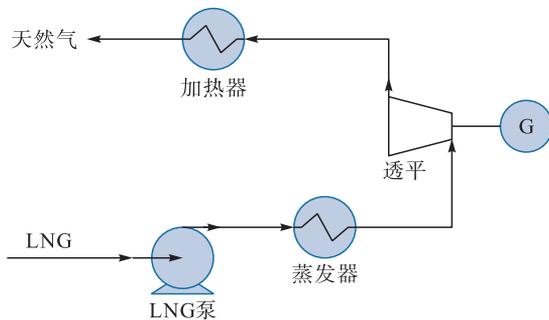


图1 天然气直接膨胀发电流程

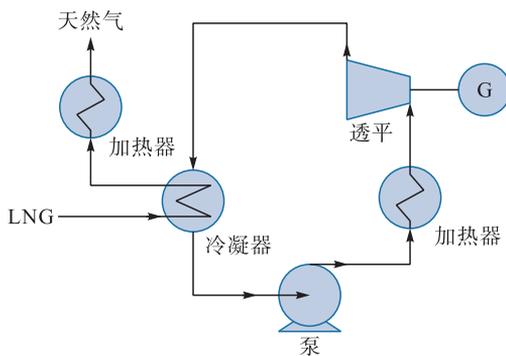


图2 二次媒体法（中间冷媒的朗肯循环）发电流程

2.1.2 二次媒体法

二次媒体法(中间冷媒的朗肯循环)的发电工艺见图2^[4]。原理为:LNG与经过透平膨胀后的低压冷媒蒸汽

在冷凝器中换热,冷媒凝结成液体;低压冷媒液体经泵提高压力,加热变成高压蒸汽;高压冷媒蒸汽经透平膨胀成低压蒸汽,对外输出动力,带动发电机发电。

2.1.3 联合法

联合法综合了直接膨胀法与朗肯循环法,其流程见图3。原理为:LNG经压缩后,通过换热器2将冷能转移给冷媒,LNG经过换热器3成为高压常温气体,再通过透平机2膨胀,带动电机2发电,最后经过换热器4变成一定压力常温气体之后外输。而冷媒被液化经过泵1压缩和回热器变成高压气体,再经泵2压缩和换热器1成为高压常温气体,最后透过透平机1带动电机1发电,出来的冷媒再次循环利用^[5]。

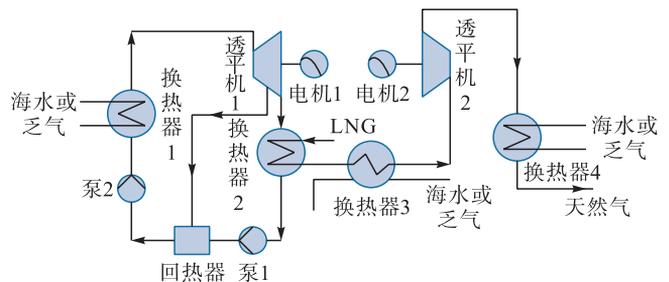


图3 LNG冷能回收联合法发电流程

2.1.4 混合媒体发电

由于LNG的温度在整个过程中是变化的,和单一媒体比较,使用混和媒体可以覆盖低温天然气更大温度范围的冷能,可使LNG冷能得到梯级利用。但由于混合媒体本身的不稳定性,这种方法在实际应用中会出现很多困难。

2.1.5 布雷顿循环

布雷顿循环(气体动力循环)的发电工艺流程见图4^[6]。原理为:左边是低温工作条件下的以N₂为介质的布雷顿循环,右边则是LNG直接膨胀发电。用LNG冷能冷却压缩机进口气体使温度降低,压缩机在达到相同增压比情况下耗电降低,高压N₂经加热器加热进入气体透平膨胀做功,对外输出电能,使装置热效率显著提高。

2.1.6 燃气轮机利用方法

图5为燃气轮机发电循环流程图^[6]。其原理是:采用不同的冷却介质(水、氟利昂、CO₂、甲醇、乙二醇等)通过直接或间接的方法将LNG汽化时释放的冷能用于降低燃气轮机入口空气温度或用来冷却蒸汽轮机的排汽,利用LNG冷能冷却压缩机进口气体,显著提高了装置的热效率。

六种发电方法的优缺点、适用性比较见表1,五种冷能发电方法效率见图6。分析表1及图6并结合上文可知气体动力循环发电效率最高,可达到55%;二次媒体法—

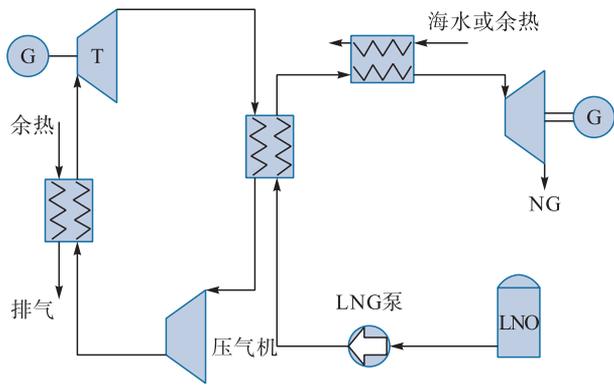


图 4 低温布雷顿法流程

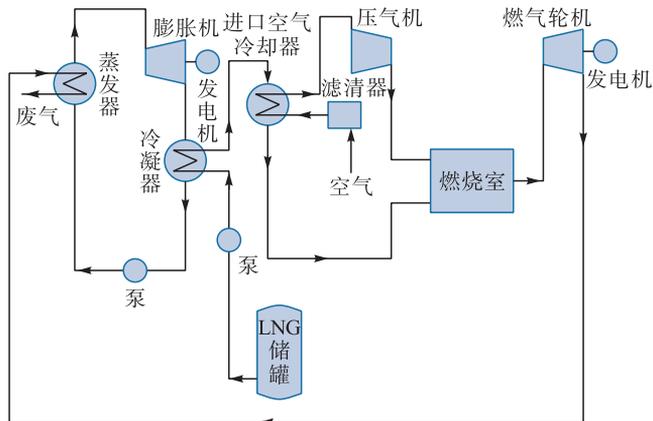


图 5 基于 LNG 冷能的燃气轮机发电循环流程

表 1 六种发电方法的优缺点、适用性比较

发电方法	优点	缺点	适用性
直接膨胀法	原理简单	冷能利用效率低,发电功率小	用于回收部分冷能、小型 LNG 汽化站、低压天然气
二次媒体发法	效率较高,混合媒体可达 36 %	高于冷凝温度的天然气冷能未得到利用,流程较复杂	-
联合法	效率高达 50 %,综合造价低,有利于环保	混合媒体本身不稳定,实际应用较难	-
混合媒体法	可以覆盖低温天然气更大温度范围的冷能,能够梯级利用 LNG 的冷能	冷却温度如在 0 °C 以下,水蒸汽会在冷却装置表面冻结	中、大型 LNG 汽化站
布雷顿循环法	效率高于 50 %	流程较复杂	冷却温度 0 °C 以上
燃气轮机利用法	显著提高热效率	-	大型 LNG 汽化站

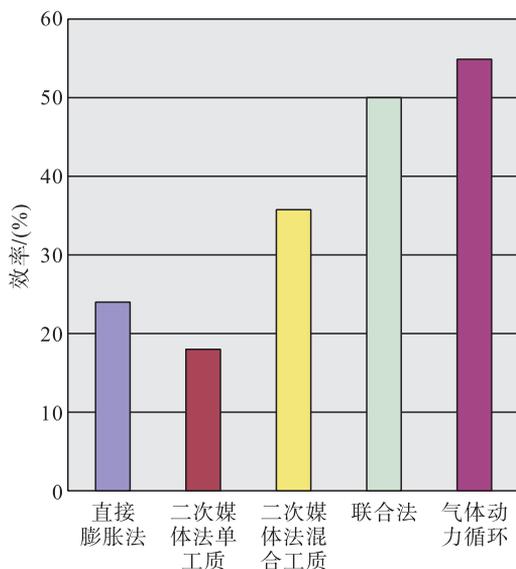


图 6 五种冷能发电方法效率

单工质最低只有 18%。在注重效率的同时还需要考虑设备投资、操作难度及冷能利用效率等因素。

2.2 新研究的九种发电方法

2.2.1 低温半导体温差发电

半导体温差发电利用 LNG 冷能方案以半导体材料的热电性质(当两种不同导体组成的闭合回路的接点处存在温差时,回路中就有电流产生)为基础。发电原理为: LNG—水换热器采用了多孔铝扁管为 LNG 换热器,在铝扁管两面粘贴半导体温差发电片,再用薄铝箔胶带将 LNG 换热器及半导体温差发电片密封,在侧上方布置水喷淋头的形式。工作时,铝扁管内通入 LNG,水喷淋到铝箔面,水的热量穿过铝箔并通过温差发电片传给夹层内部的 LNG,使 LNG 受热汽化,在电片两侧有温差,产生直流电^[7]。

2.2.2 温差发电联合动力装置

温差发电联合动力装置回收利用 LNG 冷能的系统结构见图 7^[7]。LNG 从贮存罐中输出,经泵的压缩成为低温高压的液体。换热器 1(Ex1)由海水(20 °C)将 LNG 汽化并升温至 10 °C。高压天然气经透平机 1 膨胀到中间压力对外做功发电,其温度将下降,然后经过换热器 2(Ex2)被

海水回热到 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 后,经透平机2再做功,压力下降到 0.5 MPa (城市供气压力),其温度也相应降低,在对外输送前需要经换热器3(Ex3)由海水再加热到接近常温。天然气除了经过透平机向外输出功以外,经过换热器时还向海水输出了大量的冷能,所以在系统中换热器1处构造了一种温差发电机,利用海水与低温天然气之间的大温差通过热电效应将冷能转化为电能,在一定程度上提高了LNG冷能回收利用率。基于动力循环的改进联合发电,可以将LNG冷能的利用率提高到 55% 。

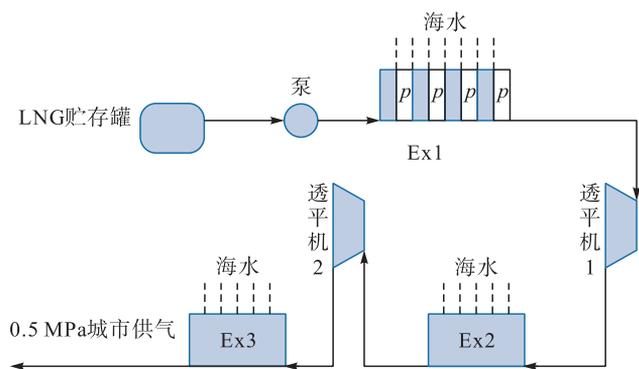


图7 温差发电联合动力装置回收 LNG 冷能系统图

2.2.3 低温天然气与太阳电池联合发电

为使太阳电池在较低温度下工作,实际的电池板背面一般需要冷却,大型光伏系统往往有水冷装置配套。LNG汽化后,天然气仍然具有很低的温度,若能使这种低温天然气与太阳电池冷却液之间进行热交换,即将LNG与半导体温差发电及太阳电池联合,一方面可以通过温差发电和太阳电池将冷能部分转化为电能,并且提高太阳电池的效率,另一方面还可以对LNG冷能实现梯级利用,提高冷能的回收效率,温差发电联合动力装置可回收 28% 的LNG冷能。图8为联合发电的流程图^[7]。

2.2.4 基于LNG的联合发电系统

西安交通大学发明了一种基于LNG冷能利用的燃料电池和有机朗肯循环联合发电系统^[8],包括:固体氧化物燃料电池和燃气轮机的联合循环系统,有机朗肯循环系统和LNG冷能源;SOFC中未反应完的燃料和空气在后燃室中继续燃烧,产生高温高压的燃气,进入燃气轮机做功输出电能,燃气轮机的高温排气依次预热空气、燃料和水;有机朗肯循环系统将预热空气、燃料和水后的中低温烟气余热进行回收利用,转换为电能输出,实现能量的梯级利用;LNG冷能源作为有机朗肯循环的冷源,冷凝有机工质透平的排气,使有机工质透平背压显著降低,增加有机朗肯循环的功率输出,同时回收利用了LNG的冷能。该发明系统显著提高了能源转化效率,减少了污染物排放,改善了系统的性能。

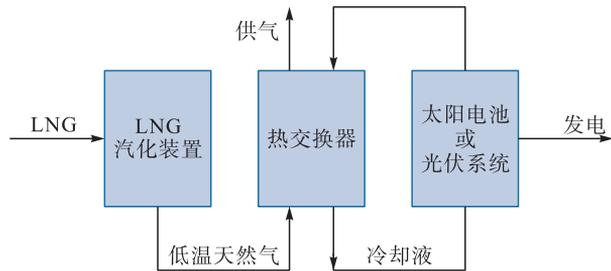


图8 低温天然气与太阳电池联合发电流程

2.2.5 LNG冷能发电的集成优化方法

华南理工大学发明了一种提高液化天然气冷能发电效率的集成优化方法^[9],包括三部分:天然气直接膨胀发电系统;冷媒朗肯循环发电系统;冰水系统。该发明设计了冰水冷却系统,将LNG的冷能间接用来冷却冷水,提高了液化天然气冷量回收率,节省了现有系统的海水使用量,获得了一定量的冰水,节省了传统冷冻冰水机压缩制冷的电功耗。低温余热的回收利用,提高了LNG冷能发电效率。该发明将燃气电厂的低温余热引入系统中,用来加热天然气和冷媒工质,提高天然气和冷媒工质进透平膨胀机的温度,从而提高系统的发电效率。

2.2.6 一种LNG冷能四级回收利用系统

北京天成山泉电子科技有限公司发明了一种实用新型LNG冷能四级回收利用系统^[10]。该系统包括:由LNG储罐、加压泵、第一冷凝器、第二冷凝器、第三膨胀透平机和换热器构成的LNG汽化升温膨胀主回路;由第一冷凝器、第一压缩机、第一蒸发器、第一膨胀透平机和第一发电机构成的第一级朗肯循环发电单元;由第二冷凝器、第二压缩机、第二蒸发器、第二膨胀透平机和第二发电机构成的第二级朗肯循环发电单元;由第三膨胀透平机和第三发电机构成的膨胀发电单元;由换热器、循环泵和储冰槽构成的低温储冰供冷单元。理论计算表明,在 8 MPa 的工作压力下,所述系统LNG冷能的综合利用率可达 38% 以上。

2.2.7 温差发电模块及其制备方法

华东理工大学研发了一种LNG冷能温差发电模块及其制备方法^[11]。首先以镜面抛光石英 SiO_2 玻璃片或聚氨酯作底片,以摩尔比为 $\text{Pb}:\text{Bi}:\text{Sb}=(0.1\sim 0.3):6:1$,和 $\text{Te}:\text{Bi}:\text{Sb}=(0.05\sim 0.2):6:1$ 的比例,分别磁控溅射沉积Te、Bi、Sb混合晶体,制备出P型和N型纳米薄膜片;按照P型和N型纳米薄膜片之间串联的方式将其嵌入绝缘陶瓷并连接,形成面向低温使用的温差发电模块的主体结构,使用温差发电模块可以更好地利用LNG的冷能。该发明采用全静态的热电材料温差发电方式,结构简单,可方便地进行串联或并联组合,是一种实现LNG低温冷能温差发电颇具前景的途径。

2.2.8 AASRI提出的冷能发电新方法

方法一:单阶段单工质朗肯循环与单阶段直接膨胀法相结合。

在该工艺中LNG先由泵加压,成为低温高压液体,后经冷凝器对朗肯循环的单工质进行冷凝,再经换热器汽化、膨胀机发电,最后再次经过换热器升温输送给用户。朗肯循环中单工质被冷凝后经泵加压,再经换热器汽化后带动膨胀机发电,该工艺发电效率为19.1%。

方法二:单阶段朗肯循环与天然气直接膨胀循环法相结合。

方法二和方法一的整体工艺一致,唯一不同的是在直接膨胀时将膨胀机处未被汽化的LNG循环至直接膨胀冷凝器处再次利用。该工艺发电效率高于方法一,为20.1%。

方法三:单阶段朗肯循环与两阶段的天然气膨胀循环法相结合^[12]。

方法三是在方法二的基础上在直接膨胀外输用户前进行了再次膨胀发电和换热。由于该法是方法二的改进,故发电效率可达28.7%,但该工艺流程比方法二复杂,设备冗多。

2.2.9 一种集成式LNG冷能发电方法

该方法在直接膨胀和朗肯循环相结合的工艺流程下,再次利用LNG热交换冷却水的冷能,提高冷能利用率。同时用已汽化的LNG加热工作介质丙烷,提高汽轮机天然气和丙烷的入口温度,从而提高发电效率。和朗肯循环、直接膨胀法相比,该发电方法每吨可多发61.5 kW,冷能利用效率提高到38%^[13]。

3 国内外LNG冷能发电实际应用

目前世界上LNG冷能发电技术较成熟的有日本、韩国、美国等发达国家,而印度等发展中国家也已开始注重冷能在发电上的应用。日本等发电技术较成熟的国家已经运行的冷能电站基本采用朗肯循环、直接膨胀及联合法,日本利用LNG冷能发电在冷能利用中比例超过70%,占主要地位,而印度LNG冷能也主要用于低温发电。

印度达波尔电厂和LNG接收站都由美国安然公司投资,安装美国GE公司740 MW的STAC209FA联合循环机组1套,1999年初投产,电厂设计每年使用 230×10^4 t LNG,电厂年工作时间约7 500 h。波多黎各Eco Electrica电厂也由美国安然公司投资建设,这两个电厂主要利用LNG冷能发电。

中国的LNG冷能发电起步较晚,发电技术有待提高。目前已建和拟建的LNG接收站及卫星汽化站有:广东大鹏、上海、福建德化、福建莆田等项目。运作的冷能电站基本采用简单朗肯循环或直接膨胀的发电方式,这样的发电方式工艺简单、操作容易、设备少,缺点是效率低、

经济效益差、环境破坏性大并且对冷能造成了极大的浪费。但这些项目为LNG冷能回收技术的发展奠定了基础。总体来说,目前国内外冷能利用效率偏低,发电方法存在很多不足,有待进一步改进。

4 结论

a)当压力较低时,宜采用冷量发电;高压时,宜采用压力发电;高温时不宜选用冷媒朗肯循环发电,宜选用直接膨胀发电;增大压比和提高工质入口温度可以增加膨胀机所做的功;增加甲烷含量,温度能和压能都会升高,电量也会升高;采取联合法、布雷顿循环法、燃气轮机利用法并结合相应的新技术,如多次利用低温工质、多级膨胀做功等,可提高发电效率。

b)在朗肯循环中,LNG膨胀后压力升高,此循环没有利用这部分压力能;在联合法中海水和空气带走了部分冷能;对冷媒的选取要视所选发电方法而定。

c)LNG冷能发电将会向着多级膨胀发电、多级复合循环发电、混合动力循环发电、多技术结合发电等方向发展。

参考文献:

- [1] 梁光川,蒲鹤,李俊,等.利用LNG冷能的空气分离流程[J].天然气与石油,2013,31(3):28-30.
Liang Guangchuan, Pu He, Li Jun, et al. Air Separation Process by Usage of LNG Cold Energy and Its Performance [J]. Natural Gas and Oil, 2013, 31(3):28-30.
- [2] 崔国彪,刘阳,安海燕,等.利用LNG冷能粉碎废旧橡胶工艺[J].天然气与石油,2013,31(2):24-26.
Cui Guobiao, Liu Yang, An Haiyan, et al. Wasted Rubber Pulverization Process by Utilizing LNG Cold Energy [J]. Natural Gas and Oil, 2013, 31(2):24-26.
- [3] 林文胜,顾安忠,鲁雪生,等.空分装置利用LNG冷量的热力学分析[J].深冷技术,2003,(3):26-30.
Lin Wensheng, Gu Anzhong, Lu Xuesheng, et al. Thermodynamic Analysis of LNG Cold Energy Utilized by Air Separation Units [J]. Cryogenic Technology, 2003, (3):26-30.
- [4] 边海军.液化天然气冷能利用技术研究及其过程分析[D].广州:华南理工大学,2011.
Bian Haijun. Study and Analysis on the Utilization Technique of Liquefied Natural Gas Cryogenic Energy [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2011.
- [5] 罗惠芳.液化天然气冷能利用的研究[D].武汉:华中科技大学,2011.
Luo Hui Fang. Research on Cold Energy Utilization of Liquefied Natural Gas [D]. Wuhan: Hua Zhong University of Science & Technology, 2011.

- [6] 白芳芳. 提高LNG冷能发电效率的集成优化研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2011.
Bai Fangfang. Integrated and Cost-effective Design Utilizes LNG Cryogenic Energy for Power Generation [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2011.
- [7] 贾磊. LNG冷能利用与低温半导体温差发电研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2006.
Jia Lei. LNG Cold Energy Utilization and Research Semiconductor Thermoelectric Power Generation at Low Temperature [D]. Hefei: China University of Science and Technology of China, 2006.
- [8] 西安交通大学. 基于LNG冷能利用的燃料电池和有机朗肯循环联合发电系统[P]. 中国专利: F02C6/18; F02C6/00; F01K23/10; H01M8/10, 2012-08-08.
Xi'an Jiao Tong University. Based on the LNG Cold Energy Utilization of the Fuel Cell and Organic Rankine's Cycle Power Generation Systems [P]. Chinese Patent: F02C6/18; F02C6/00; F01K23/10; H01M8/10, 2012-08-08.
- [9] 华南理工大学. 一种提高液化天然气冷能发电效率的集成优化方法[P]. 中国专利: F03G7/04; F03G7/05; F01K25/10; F01D15/10; F02C6/18, 2010-08-18.
South China University of Technology. A Kind of Improve the Efficiency of LNG Cold Energy Integrated Optimization Method [P]. Chinese Patent: F03G7/04; F03G7/05; F01K25/10; F01D15/10; F02C6/18, 2010-08-18.
- [10] 北京天成山泉电子科技有限公司. 一种LNG冷能四级回收利用系统[P]. 中国专利: F01K25/10; F01D15/10; F01K11/02, 2012-05-30.
Beijing Tian Cheng Mountain Spring Electronic Technology Co.LTD. A Kind of LNG Cold Energy Level 4 Recycling System [P]. Chinese Patent: F01K25/10; F01D15/10; F01K11/02, 2012-05-30.
- [11] 华东理工大学. 利用LNG冷能的温差发电模块及其制备方法[P]. 中国专利: H02N11/00; C03C17/22, 2009-08-12.
East China University of Science and Technology. Use Temperature Difference Power Generation Module and Its Preparation Methods of LNG Cold Energy [P]. Chinese Patent: H02N11/00; C03C17/22, 2009-08-12.
- [12] Zhang Lixi, Tang Qiong. Comparisons of Different Power Generation Processes by LNG Cold Energy [Z]. American: Elsevier B.V. Selection and/or Peer Review Under Responsibility of American Applied Science Research Institute, 2012.
- [13] Li Yajun, Bai Fangfang. Integrated and Cost-effective Design Utilizes LNG Cryogenic Energy for Power Generation [C]. Wuhan: 2009 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, 2009.

“硫磺回收高温设备技术及撬装集成综合研究”科技成果 获全国石油化工科技进步二等奖

2013年10月25日在北京人民大会堂隆重举行了2013年度全国石油和化工科技创新颁奖大会。本届科技创新大会共评出技术发明奖授奖项目50项, 科技进步奖授奖项目219项。其中中国石油集团工程设计有限责任公司西南分公司完成的“硫磺回收高温设备技术及撬装集成综合研究”科技成果荣获科技进步二等奖。第十届全国人大常委会副委员长顾秀莲等国家领导人出席大会并为获奖代表颁奖。

“硫磺回收高温设备技术及撬装集成综合研究”科技成果创新地采用温度场、浓度场、速度场数值模拟技术, 突破传统硫磺回收装置的设计安装模式, 形成了硫磺回收高温设备撬装集成技术; 首次开发出高效环壁保护燃烧器并实现大型燃烧器设备国产化。该成果获得5项国家专利并形成一部企业标准, 经中国石油协会鉴定达到了国际领先水平。该成果有效提高了石油地面工程国产装备整体水平, 推动了行业科学技术进步, 具有显著的经济效益和社会效益。

(刘文广 马先 供稿)