

LNG 冷能发电系统关键设备选型与经济效益研究

刘冬玥（山东莱克工程设计有限公司，山东 东营 257000）

摘要：冷能发电系统作为一种高效、环保的能源利用方式，近年来受到了广泛关注。本文旨在探讨冷能发电系统中关键设备的选型问题，通过分析不同类型设备的性能特点、经济性和适用条件，为冷能发电系统的设计和优化提供参考。

关键词：冷能发电；膨胀机；工质循环泵；经济性；经济效益

1 引言

冷能发电系统是利用低温冷能转化为电能的装置，具有高效、环保、节能等优点。在液化天然气（LNG）、工业余热、低温废水等领域具有广泛的应用前景。然而，冷能发电系统的性能和经济性很大程度上取决于关键设备的选型。因此，本文将对冷能发电系统中的关键设备进行深入研究，以期为系统的优化设计和运行提供指导。

2 冷能发电系统概述

冷能发电系统主要由冷源、工作介质循环系统和发电装置三部分组成。其中，冷源提供低温冷能，工作介质循环系统负责将冷能传递给发电装置，发电装置则利用冷能驱动发电机发电。在冷能发电过程中，关键设备的性能直接影响系统的整体效率和稳定性。

3 关键设备选型分析

3.1 膨胀机选型对比

膨胀机的种类主要有螺杆膨胀机和透平膨胀机。

3.1.1 螺杆膨胀机

螺杆膨胀机属于容积式膨胀机，具有以下技术特点：

①对介质适应性强，能适应过热蒸汽、饱和蒸汽、气液两相流体和热水（包括高盐分热水工质）；②效率高，适应工况范围内效率高于透平膨胀机；③高效运行区间宽，在热源参数、功率及热负荷 50% 变化范围内，能保持较高运行效率；④操作方便，运行维护简单，而且具有除垢自洁能力，大修周期长；⑤受机组结构限制，机组转速低、尺寸大、易损件多且单机功率较小（50kW~2000kW）；⑥多用于小型余压余热利用装置，包括带压水蒸气、带压气体、热水、烟气及发动机尾气等多种应用场合。

3.1.2 透平膨胀机

①单机功率高，最高可达 8000kW，适宜于大流量工况；②适应工况范围宽，理论上对于压差及进气

压力无限制；③机组转速高、体积小、重量轻、结构简单、易损件少，因而制造维修工作量小；④小型机组（≤ 500kW）时，成本高于螺杆膨胀机；⑤多用于空分、天然气或其他各种气体膨胀制冷或增压及汽轮机无法适用的压差余热发电等多个领域。经过综合比较，透平膨胀机体积小、重量轻、结构简单、适应范围宽，且单机发电效率高。

3.2 透平膨胀机选型说明

透平膨胀机是 LNG 冷能发电的关键设备，是保证整套装置稳定运行的核心。其主要原理是利用有一定压力的气体在透平膨胀机蜗壳内进行绝热膨胀对外做功而消耗气体本身的内能。透平膨胀机按照结构不同可以分为轴流式和径流式，其中向心式透平单级膨胀比大，膨胀机等熵效率高，尺寸小，结构紧凑；容积流量较小情况下仍有较高内效率；适用于小流量小压比的工质膨胀做功。

轴流式膨胀机单级膨胀比小、叶轮数量多，常用于多级膨胀；轴流式膨胀机适用于大流量大压比的工质膨胀做功，当用于 10MW 以下机组时，级间的间隙损失和摩擦损失等较大。

结合工艺参数和对国内供货商调研情况，膨胀机类型推荐选用向心式透平膨胀机。透平膨胀机组包括润滑油控制油系统、机械密封、涡轮机、发电机、变速齿轮箱、润滑油站等。膨胀机拟采用 CCS 系统，随机组成套供货。该机组的润滑油冷却器采用循环冷却水冷却。该机组功率较大，为保证电网稳定，拟采用同步电机。

4 换热器

4.1 换热器的选型

在液化天然气冷能利用的技术方案中，换热器扮演着至关重要的角色，其操作的灵活性与效率直接决定了冷能回收的总体效能。在众多换热器类型中，间壁式换热器因其广泛的应用而备受青睐，其设计特点

是通过固体壁面将冷热流体分隔，实现热能的传递。间壁式换热器根据壁面的结构不同，可以细分为管式、板式以及翅片式。尽管板式和翅片式换热器在传热效率和处理能力方面表现出色，但在高压环境下使用时会受到一定的限制。而管式换热器则包括沉浸式、喷淋式、套管式和管壳式等多种形式，其中管壳式换热器因其广泛的应用和大量的使用，在石油化工领域尤为常见。

管壳式换热器，又称列管式换热器，是以壳体中管束的壁面为传热面的间壁式换热器，它的结构比较简单、操作可靠，可用各种结构材料（主要是金属材料）制造，能在高温、高压等多种工况下使用，主要有固定管板式、浮头式、U型管式、缠绕管式四种，其优缺点对比如下表1所示。

4.2 换热器的选材

设备材料的选择应考虑设备的使用条件（如设计温度、设计压力、介质特性和操作特点等）、材料的性能（力学性能、工艺性能、化学性能和物理性能）、容器的制造工艺以及经济合理性。

材料的选择除应符合TSG R0004-2009《固定式压力容器安全技术监察规程》、GB150.1~150.4-2011《压力容器》、GB/T151-2014《热交换器》、HG20581-2011《钢制化工容器材料选用规定》和SH3075-2009《石油化工钢制压力容器材料选用规范》等相关标准规范及规定，还应满足工艺设计条件的要求。

5 工质循环泵

常用的工质循环泵主要有离心泵、潜液泵、屏蔽泵和筒袋式离心泵。

5.1 离心泵

离心泵是一种依靠叶轮旋转产生的惯性离心力来抽送液体的泵。这种泵的工作原理是，当叶轮在泵内旋转时，它带动液体高速回转，从而将机械能传递给所输送的液体。它主要有以下几个技术特点：①结构简单，易于维护和操作；②流量范围大且均匀，适用

于多种应用场景；③运行平稳，振动小，噪音低；④转速高，可以直接与电动机或汽轮机连接，实现高效能转换；⑤效率高，通常能达到50%以上，节省能源；⑥成本较低，满足大多数工业应用需求。

5.2 潜液泵

潜液泵主要是利用离心力原理来吸水和泵水的。当潜液泵电机正常启动时，电动机驱动泵转子旋转。泵的转子借助离心力的作用，将水从泵的进水口吸入泵体，并通过泵体与电机的联轴器向上排出。它主要有以下几个技术特点：①直接潜入液体中工作，占地面积小。②适用性广，能够满足各种液体输送的需求。③可以输送不同类型的液体，用途广泛。④具备自吸功能，不受进口气体影响。

5.3 屏蔽泵

①无泄漏：由于采用了屏蔽结构，使得泵的密封性能得到了大大改善，不易泄漏，并能有效保护环境，降低生产成本。

②低噪音、低振动：采用了屏蔽结构，使得轴和轴承的机械噪声得到大幅降低，从而使整个泵的噪音和振动也大幅减少。

③高效节能：屏蔽泵的机械效率和水力效率都非常高，在较大流量下仍能保持高效稳定的性能，同时还具有较低的能耗。

④使用寿命长：屏蔽泵的主要部件都采用了耐磨材料，轴承寿命长，泵的寿命也就随之延长。

5.4 筒袋式离心泵

筒袋泵是一种常见的离心泵，主要由泵体、进口、出口、叶轮和电动机部分组成。当电动机启动后，叶轮开始旋转，通过离心力将液体吸入泵体中，通过进口阀门进入叶轮，液体在叶轮的作用下被强制向外移动，在离心力的作用下形成高压区域，液体通过出口阀门离开泵体，并进入管道系统输送至需要的位置。它主要有以下几个技术特点：①抗汽蚀性好，特殊的首级设计能够使泵在极低的必须汽蚀余量工况下以速

表1 四种管壳式换热器的比较

换热器类型	固定管板式	浮头式	U型管式	缠绕管式
结构特点	两端管板和壳体为一体	有一端管板不与外壳相连，可自由伸缩	管子均为U型，进出口同侧，可自由伸缩	传热管按螺旋线形状交替缠绕
优点	结构简单，成本低	消除热膨胀的影响，便于清洗和检修	不受热膨胀影响，结构较简单，重量轻	温度范围广、适应热冲击、热应力自身消除、紧凑度高
缺点	热膨胀会引起管子拉弯，清洗、检修困难	结构比较复杂，造价较高，浮头结构限制了使用的温度、压力	管子不便拆换，不能机械清洗，制造困难	结构形式复杂，造价成本高
适用场合	两流体温差不大($\leq 70^{\circ}\text{C}$)，壳程流体压强较低的场合	炼油或乙烯工业中，一般 $P_{\text{max}} \leq 6.4\text{ MPa}$, $T_{\text{max}} \leq 400^{\circ}\text{C}$	适用于高温、高压、大温差场合的换热器	适用于同时处理多种介质、在小温差下需要传递较大热量且管内介质操作压力较高的场合

度运转，减少汽蚀现象的发生。②零部件通用化程度高，降低了维修和更换部件的难度和成本。③泵体采用整体式铸造，具有良好的刚性和耐腐蚀性。

6 设备选型原则与方法

在冷能发电系统关键设备的选型过程中，应遵循以下原则和方法：①性能优先：优先考虑设备的性能参数，如效率、可靠性和稳定性等，以确保系统的高效运行。②经济性考量：综合考虑设备的购置成本、运行成本和维护成本，选择性价比高的设备。③适应性分析：根据冷源的物理特性和系统需求，选择适应性强的设备，以确保系统的稳定运行。④综合评估：采用多因素综合评估方法，对备选设备进行全面评估，选择最优的设备组合。

7 案例分析

以某液化天然气冷能发电项目为例，对关键设备的选型进行具体分析。通过对比不同设备的性能参数和经济性，设备选型如下：

7.1 膨胀机

该项目采用朗肯双循环发电工艺，发电机组由两台膨胀机组组成，一级发电机组发电功率区间范围为 2863~3920kW，二级发电机组发电功率区间范围为 974~1696kW。考虑到一级透平机装机功率超出了螺杆膨胀机的单机功率，因此采用透平膨胀机组，不仅可以减少设备配置优化简化系统，而且可以整体降低投资和占地等。向心式膨胀机运行可靠性高，连续运行时间长，而且造价较高，机组检修可以安排在不发电工况，因此不设备机。机组轴封采用机械密封。

7.2 换热器

该项目 LNG 气化器在温差较大的场合下使用，故选用 U 型管式换热器。循环工质蒸发器的管程和壳程温差较小，考虑设备制造成本，故选用固定管板式换热器。针对超低温下运行的换热器，选用耐低温的材料制造。

7.3 工质循环泵

考虑到该项目工质循环泵流量较大，扬程不高，操作温度较低，根据其比转速的情况，以及操作的需求，选用离心筒袋型式（API610 VS6 结构）。拟采用国内成熟可靠的产品。

8 经济效益分析

在液化天然气冷能发电项目中，关键设备的选型对经济效益有着至关重要的影响。以下是对该项目关键设备选型的经济效益分析：

膨胀机：该项目采用朗肯双循环发电工艺，发电

机组由两台膨胀机组组成，一级发电功率区间为 2863~3920kW，二级为 974~1696kW。由于一级透平机装机功率超出螺杆膨胀机单机功率，选用透平膨胀机组，能减少设备配置，简化系统。从投资成本看，虽透平膨胀机初始购置成本可能较高，但因减少设备数量，整体投资成本得以降低；在占地方面，设备数量减少使得占地面积减小，降低了土地使用成本。同时，向心式膨胀机运行可靠性高，连续运行时间长，虽造价较高，但机组检修可安排在不发电工况，无需设备机，避免了备用设备的购置与维护成本。机组轴封采用机械密封，密封性好，减少了因泄漏导致的能源损失与维护成本。

换热器：LNG 气化器在温差较大场合选用 U 型管式换热器，循环工质蒸发器温差较小，考虑设备制造成本选用固定管板式换热器。U 型管式换热器适用于温差大的工况，能有效保证换热效率，减少因温差导致的设备损坏风险，降低维修成本；固定管板式换热器在温差小的情况下，制造成本低，从源头上控制了投资成本。针对超低温运行的换热器选用耐低温材料，虽材料成本有所增加，但能保证设备在极端工况下的稳定运行，减少设备故障带来的经济损失。

工质循环泵：项目工质循环泵流量大、扬程不高、操作温度低，根据比转速及操作需求，选用离心筒袋型式（API610 VS6 结构）并采用国内成熟可靠产品。国内产品价格相对较低，降低了采购成本；同时，该结构的泵效率高，能有效降低运行能耗，长期来看可节省大量的电费支出，提高了项目的经济效益。

9 结论与展望

本文通过对冷能发电系统关键设备的选型研究，提出了设备选型的原则和方法，并通过案例分析验证了其有效性。未来，随着技术的不断进步和环保要求的不断提高，冷能发电系统关键设备的选型将更加注重高效、环保和经济性等方面的综合考虑。同时，也需要加强设备研发和创新，以推动冷能发电技术的进一步发展。

参考文献：

- [1] 朱杰人, 曹先常, 陈志良, 朱群志. 低品位热能有机朗肯循环发电技术进展 [J]. 低温与超导, 2020.
- [2] 陶海亮, 夏扬, 张宁. 光伏电池的仿真及其模型的应用研究 [J]. 工业控制计算机, 2011.
- [3] 赵星辰, 冯荣, 李旭杰, 李泽泉等. 汽油发电机驱动的热泵干燥系统制热性能仿真 [J]. 中国农机化学报, 2021.