

# 内河船用LNG燃料储供系统选型分析

罗 哲 余军庆 唐 雯 李 阳

荆门宏图特种飞行器制造有限公司 湖北 荆门 448000

**摘 要：**船用LNG燃料储供系统是LNG动力船舶安全稳定运行的核心装备，本文将通过对其主要系统部件的对比选型分析，为内河LNG燃料实船应用提供指引和建议。

**关键词：**船用LNG燃料舱；燃料供应；选型分析

## 引言

2021年随着国际海事组织要求全球航行船舶开始实行0.5%燃油硫含量限制，推进船舶能源转型，构建绿色航运发展产业体系的使命迫在眉睫。其中LNG（液化天然气）燃料作为优质的高效和经济清洁能源受到全球航运业的广泛关注和看好。2022年国家工信部、交通运输部等五部委联合发布《关于加快内河船舶绿色智能发展的实施意见》要求优先发展船舶绿色动力技术，积极稳妥发展LNG动力船舶，表明我国内河流域即将拉开LNG燃料动力船舶市场应用的大幕。本文将围绕内河船用LNG燃料储供系统选型分析，作出相应的技术指引，为内河LNG燃料动力实船的应用提供技术参考。

## 1 LNG 燃料储供系统组成

LNG燃料与传统燃油有着很大的不同之处，它需要以-162℃超低温液态形式储存，因此燃料必须经过供气

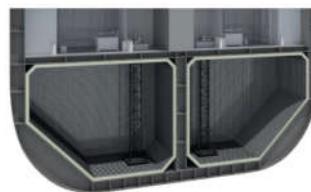
系统的处理，将其气化并达到适宜的温度和压力，以满足发动机的运行条件。因此船用LNG燃料储供系统是LNG动力船舶安全稳定运行的核心，其主要由LNG燃料舱、增压系统、气化系统、加注补给系统、安全监测系统等组成，下面将按上述组成部分进行详细的选型分析介绍。

## 2 LNG 燃料舱型式分析

作为LNG动力船舶的燃料储存设备，LNG燃料舱的型式选择尤为关键，在对船舶进行新造船设计或LNG动力改造时，首先就应根据项目实际情况确定所需适合的燃料储存结构。根据国际海事组织相关规则，LNG燃料舱型式可划分为薄膜燃料舱和独立燃料舱两种，其中独立燃料舱又包括A型独立燃料舱、B型独立燃料舱、C型独立燃料舱。不同燃料舱的型式特点分析如下表：

储罐型式	优点	缺点	使用范围
薄膜燃料舱	有效利用船舶空间，能够较好地适合于船体形状。	不耐压，国外专利技术、一般不允许部分充装，应用少。	一般应用于大型LNG运输船。
A型独立燃料舱	有效利用船舶空间，能够较好地适合于船体形状。	需要保压，由于低压，需要极大的透气系统。	一般应用于大型LNG运输船。
B型独立燃料舱	有效利用船舶空间，能够较好地适合于船体形状，分析设计精准。	需要保压，由于低压，需要极大的透气系统。	一般应用于大型LNG运输船。
C型独立燃料舱	双层罐	可耐压、自增压、制造安装成熟、双壁可提供一定的冗余保护（如内罐泄漏等）、保温性能好、应用广。	占用空间、无检修孔，不能内部检查。
	单层罐	可耐压、自增压、制造安装成熟、可以做双耳罐增大容积。	占用空间、一般绝热材料有可燃风险。

因船用燃料的储存需要使燃料舱内低温LNG能够在长周期内保证压力、温度的持续稳定，LNG燃料一般采用低温带压的储存方式，因此C型双层真空绝热燃料舱结构保温性能好，制造安装成熟、耐压能力高并且有较好的结构强度，无气体泄漏等特点，导致其在内河LNG船用LNG燃料储存型式中普及率最高、经济性最好。



薄膜燃料舱



C型独立双层燃料舱

### 3 LNG 燃料舱材料选择

船用LNG燃料舱材料低温工况性能要求苛刻，在-162℃超低温环境下应具备良好的抗断性能、高强韧性、防裂纹扩展性能、抗疲劳性能和化学组分稳定等，是LNG燃料舱制造的核心技术之一。现阶段LNG储存材料一般采用奥氏体不锈钢、9Ni钢、殷瓦钢、退火铝合金等。

**奥氏体不锈钢：**是一种铬和镍的高含量的合金钢，晶相组织为面心立方晶体的奥氏体结构，使得这种钢材即便在超低温环境下也具备出色的韧性和延展塑性，另外，奥氏体不锈钢还具备良好的焊接性能和耐腐蚀性能。由于这些材料特性，小型内河C型双层真空绝热燃料舱大多采用奥氏体不锈钢进行建造。

**9Ni钢：**是一种低碳高镍的调质高强钢，这种钢材在超低温环境下也具有良好的高强韧性，而且与奥氏体不锈钢相比强度更高、热胀系数小的优点，但其材料焊接时易产生冷裂纹、磁吹偏的缺陷，导致其只有在大型的单层LNG燃料舱的建造中具有成本经济优势。

**殷瓦钢：**是一种铁基超高镍合金，镍量高达36%，具备良好的耐低温性能和极低的膨胀率，钢材在低温环境下收缩时产生的内部应力很小，低压储存的薄膜型LNG燃料舱材料一般均采用其进行建造。

**退火铝合金：**是一种有色金属结构材料，也具备良好的低温力学性能和可焊性，但铝合金材料强度和设计许用

应力降低，还未在船用LNG燃料舱建造技术中推广应用。

值得一提的是，近年我司联合业界各研究机构开发一种新型的奥氏体低温钢材料。它是一种含锰量在25%的高锰合金钢，奥氏体高锰低温钢的低温韧性、抗疲劳性、耐腐蚀性等性能稳定，其强度性能指标高于9Ni钢。由于该材料没有使用我国紧缺的需进口的镍而大量使用我国丰富的锰资源，适合我国矿产资源富锰少镍国情。该项新材料的使用也大大降低了制造低温LNG储运容器的成本，未来该材料势必会在整个低温储运行业迅速推广运用。

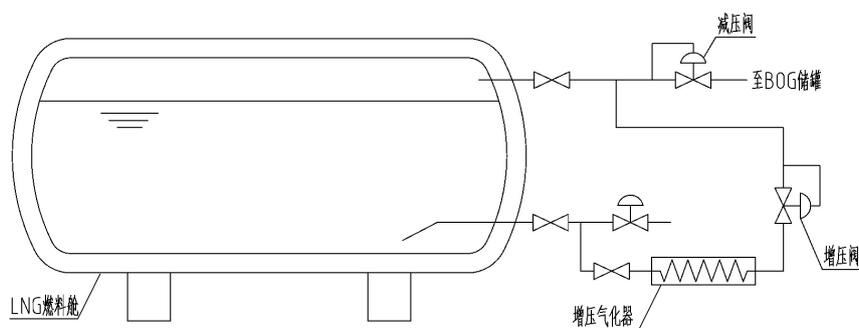
### 4 增压系统选型

由于船舶运行过程中LNG燃料不断被使用，LNG燃料舱的压力会随燃料液体的减少而降低，最终不能满足发动机对气体燃料压力的要求，为此必须设置一套增压系统保证LNG燃料舱一定的操作压力。目前LNG燃料舱的增压型式主要有三种：外部引源增压、机械增压、自增压。

**外部引源增压：**指将外部的惰性压缩气体引入燃料舱顶部气相空间从而使燃料舱压力升高，但该种增压方式将会持续使用外部惰性压缩气体，需设置独立的惰性气体装置，从而制约其在LNG燃料动力船上的应用。

**机械增压：**在燃料舱内配置低温潜液泵，通过低温潜液泵将液体燃料增压后输送至后端的燃料气化系统，该种增压方式中配置的低温潜液泵价格昂贵、附加能耗高，一般应用于较大容积（ $\geq 300\text{m}^3$ ）的燃料舱上，可有效降低燃料舱的操作压力，使其建造成本降低。

**自增压：**通过在燃料舱底部设置出液口，通过燃料本身的自重作为动力，将液体供应至后端的增压换热器，通过交换吸热后气化为气态，返回至燃料舱顶部的气相空间。从而补充燃料舱的压力损耗。该种增压方式一般可增压至1Mpa操作压力。针对小型LNG燃料舱，由于自增压方式所需的操作压力并不会带来显著的成本增加，并且其操作便捷，稳定性好，因此内河的LNG燃料舱更适宜于采用该种方式作为稳压系统。



LNG燃料舱自增压原理图

### 5 气化系统选型

气化系统将液态LNG燃料转变成气态天然气，同时随着液体的气化使燃料压力升高，为燃料提供动力从而克服管路阻力供应到动力系统中。目前国内LNG燃料动力船普遍采用空温式或水浴式两种气化方式：

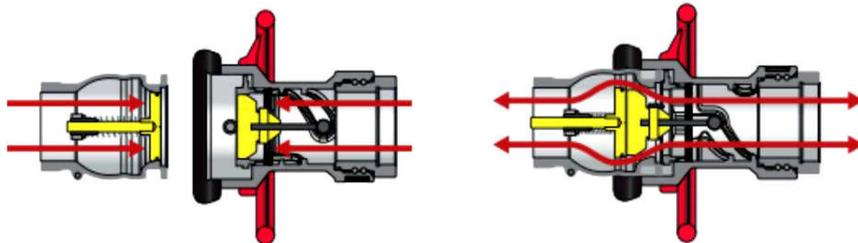
空温式热交换器一般采用不锈钢换热管外加铝翅片，热交换器的内部进口为液态LNG燃料，外部直接与大气接触，利用大气温度对液态燃料进行加热。其气化能力主要决定于铝翅片的面积大小。空温式热交换器结构形式简单，其缺点是冬季环境温度较低时热交换器表面凝结冰导致供气不稳定，因此一般空温式气化方式仅用于燃料舱增压系统中。

水浴式热交换器一般利用气体发动机的缸套水或废气加热乙二醇水溶液，再用热的乙二醇水溶液在热交换器中去加热液态燃料，使之气化。水浴式热交换器虽然本身结构较复杂，但由于气态发动机工作时的缸套水或

废气的热源比较稳定，不受到环境条件制约，输送的气体燃料也比较稳定，为此建议LNG燃料气化系统采用该种方式。

### 6 加注补给接口选型

LNG燃料动力船舶需要补给燃料时，通常需要通过接口设备连接加注装备为船舶进行补给。为保障LNG加注作业的安全性，《船舶应用天然气燃料规范》中明确规定，LNG燃料动力船舶加注接口需使用快速干式接头。快速干式接头是一种高效安全的连接设备，主要用于LNG燃料加注和传输管路，可在最低的泄漏量下实现快速配对和脱离保护，通常与低温拉断阀配套使用。LNG快速干式接头可取代原来的标准法兰充装方式，提高加注效率，且安全高效。接头配合连接的两端都带有自密封阀板，脱离后可实现快速关闭，避免发生低温液态泄漏事故。



干式接头工作图

### 7 安全监测系统分析

因LNG燃料存在低温损伤、易爆等特性，为将LNG燃料储供系统安全风险降低在可控范围内，LNG燃料的利用必须设置一套安全监测系统，监控对象包括LNG燃料舱的状态、燃料供应状态、燃料发动机的运行状态、机舱温度和可燃气体浓度等，下述对与LNG燃料储供系统相关的主要监测参数进行介绍。

LNG燃料舱涉及燃料储存状态和加注补给监测，主要对LNG燃料舱的液位、压力、温度进行监控。

液位监控应独立设置三个监测点，分别用于燃料舱液位指示、高液位报警、高高液位切断燃料加注。内河船舶中液位测量装置的形式一般选用伸入燃料舱的闭式装置，如常用的差压液位计、电子探头等。压力监测要求设置燃料舱就地显示压力并要求在驾驶室和集控室设有间接指示。温度监控方面，对于C型双层真空绝热燃料舱，因保温性能优良仅需在靠近燃料舱底部供液管路上设置温度监测即可。

燃料供应状态的优良主要是由燃料气化热交换器决定，因此对热交换器的监测是必不可少的重要环节。

因发动机对燃料的温度较敏感，为保证燃料温度质量，必须对热交换器出口的燃料温度进行监测，当燃料温度过低或过高，应能自动连锁报警。考虑到LNG超低温状态还应对热交换器传热介质的温度和流量进行监测，避免当传热介质停止循环后导致管路结冰超压。

### 结束语

本文中内河船用LNG燃料储供系统主要组成部件的选型分析经验，均是通过实际项目累积而成，希望能为内河船舶安全规范地利用LNG燃料提供一定的现实指导参考。对于LNG燃料水上应用的推广和发展，行业还需要更多的基础研究和实践探索。

### 参考文献

- [1]中国船级社[J].《船舶应用天然气燃料规范》.2021(08)96-98
- [2]中国船级社[J].《内河散装运输液化气体船舶构造与设备规范》.2017(02)152-155.
- [3]LNG燃料动力船的发展现状及前景分析[J].造船技术, 2015(04)88-90.