

# 液化天然气接收站再冷凝器换热模式的探究

李川（国家管网集团粤东液化天然气有限责任公司，广东 揭阳 515200）

**摘要：**为解决传统液化天然气接收站再冷凝器换热效率低下的问题，本文首先对传统逆流型、顺流型再冷凝器的换热设计原理、优缺点、局限性等进行了分析。在此基础上，本文介绍了一种立式结构的天然气接收站再冷凝器，并对这种再冷凝器的硬件构成、压力控制、换热原理及相关优势等进行了分析，以期对相关工作人员提供一定的参考。

**关键词：**液化天然气；闪蒸天然气；再冷凝器；换热效率；压力稳定性

在液化天然气接收站中，再冷凝器是十分重要的设备，其核心功能是对闪蒸天然气进行冷却、回收，并平衡高压泵入口处的压力。按照我国一般液化天然气接收站内的闪蒸天然气压缩机等设备的配置情况，接收站在运行过程中经常出现的问题时，闪蒸天然气量并不是一个相对固定值，而是在很大的区间范围内变动。

与此同时，现有再冷凝器的单位时间处理能力是一个定值（一般在每小时30t左右），导致闪蒸天然气实际量与再冷凝器需要处理量之间难以对应。另一个问题是，受闪蒸天然气量不确定的影响，压缩机一旦处于低负荷运行状态，便有可能做无用功。由此造成的结果是，再冷凝器处理的闪蒸天然气的温度也存在较大的温差范围。上述因素都会对再冷凝器的运转效率造成影响，故应当重点分析、解决相关问题。

## 1 传统液化天然气接收站再冷凝器的设计原理简析

### 1.1 逆流型再冷凝器换热设计原理

逆流型再冷凝器换热较为常见，主要设计原理是：借助整装填料，可以有效降低闪蒸天然气通过再冷凝器时的气体阻力，从而令闪蒸天然气和液化天然气能够在填料内充分接触，进而实现热量交换。

我国很多液化天然气接收站设置的逆流塔设施便是应用了逆流型再冷凝器换热机制，这也是最常见的换热机制（再冷凝器被设置在内部），具体运行过程如下：

①温度较低的液化天然气从逆流塔的顶部经由专用管道进入其中，闪蒸天然气则从逆流塔的下方经由专用管道进入其中，二者在塔内逆向通行，最终汇流后，逐渐完成换热；

②逆流塔的优点在于，具有较好的换热性能。缺点在于，能够维持“较好换热性能”的空间范围较为

有限，超出之后便无法保证换热效率。此外，“逆流换热”过程中的最大问题是，容易有液泛及雾沫夹带发生，导致这种现象常见的原因是，逆流塔在运转过程中，接近五分之四的时间会偏离设计工况，加之需要考虑对闪蒸天然气的温度变化进行补偿，造成液气比例控制难度加大，稍有不慎便会出现液泛及雾沫夹带现象，从而使再冷凝器的换热功能下降。另一个容易造成上述不良现象的原因是，受设计工艺影响，再冷凝器一般被放置于高压外输泵入口附近。

若要确保长期维持正常工况，需要稳定高压外输泵入口处的压力。但在实际运行中，如上文所述，闪蒸天然气从逆流塔下部区域经由特定管道进入时，容易导致塔内压力降低，此时为了稳定压力，需要补充外输气体，可提高液气比例失调概率，最终出现液泛及雾沫夹带。受到不良影响的除了塔内液气比例之外，由于高压泵入口处的压力会偏离正常值，如果长期无法纠正，则高压泵容易受到腐蚀，进一步降低换热效率。

### 1.2 顺流型再冷凝器换热设计原理

顺流型再冷凝器换热的设计原理是，将闪蒸天然气与液化天然气（液体状态）并流，之后采取散堆填料的方式。由于散堆填料中加入了闪蒸天然气，在阻力作用下会形成高压降，进而引导出现更多湍流，以达到提高换热效率的目的。与逆流型设计不同，应用顺流型设计之后，保持逆流塔通气口及内部再冷凝器不变，将低温液化天然气从再冷凝器塔盘上部通入，将闪蒸天然气同样从再冷凝器顶部通入，即可实现“并向汇流”。

在这种设计下，“换热”区域会集中在再冷凝器填料部分。由于散堆填料在提供湍流的同时，还会使闪蒸天然气及低温液化天然气（包括液体状态）之间的接触面积大幅度提升，故换热效率也会随之提升。

根据上文所述可知，顺流型再冷凝器换热的综合效率和优点相较于逆流型再冷凝器换热虽然较高，但问题在于，如果在逆流塔塔径、填料层高度方面的设计缺乏合理性，同样会严重影响再冷凝器的工作效率。基于此，围绕再冷凝器的换热模式、换热原理进行深度分析时，应该进行综合考虑。

## 2 一种立式结构液化天然气接收站再冷凝器换热模式的综合分析

### 2.1 此种立式结构液化天然气接收站再冷凝器的硬件构成

本文介绍一种立式结构液化天然气接收站再冷凝器，主要硬件构成如下：

①主要由外筒体、液化天然气均布器（主要由入口管、回流弯管、顶板、一次布液盘、二次布液盘组成）、内筒体、填料组成；

②液化天然气均布器设置在外筒体的上部区域，内筒体设置在液化天然气均布器的下方区域，且与内筒体之间的空隙作为气液混合空间；

③内筒体的上端设置为开口状态，下端设置成环形外折边，总体是上下贯通的筒体。此外，内筒体下端的环形外折边需要与外筒体的内壁基于焊接的方式连接成一个整体。这样设计的目的在于，令内筒体外壁、外筒体内壁共同提供一个环形空间，该空间的底部处于封闭状态，上部区域与上文所述的气液混合空间连通。在该环形空间的底部设置闪蒸天然气入口管（底部入口管），在气液混合空间设置闪蒸天然气上部入口管；

④液化天然气均布器上设置入口管，外筒底部设置液化天然气出口管，将填料设置在内筒体的中上部区域；

⑤在液化天然气均布器内部，需要按照自上而下的顺序分层设置顶板、一次/二次布液盘。此外，顶板和一次布液盘中均需设置安装孔，并在二次布液盘上设置布液孔。在顶板的中心区域设置开口，将液化天然气入口管与该顶板开口连通，使回流弯管呈现出180°的弯头状，由入口短管和出口长管组成。回流弯管的弯头部分应该设置在顶板上部区域，且令出口长管能够同时穿过顶板与一次布液盘上方对应的安装孔，分别与顶板及一次布液盘通过焊装的方式连接。入口短管同样需要穿过顶板上的安装孔且与顶板焊接后连接成整体。顶板以及一次布液盘、二次布液盘的外缘区域应当各自与外筒体的内壁焊接，从而使顶板、

回流弯管、一次布液盘、外筒体共同构成充液空间；

⑥液化天然气入口管的上端应当穿过外筒体的顶部并暴露在外筒体的外部，且需要在一次布液盘及二次布液盘之间的外筒体筒壁上方设置不凝气泄放管；

⑦内筒体的具体设置如下：a. 内部设置填料底板，且内筒体的上端开口处同样需要设置填料顶板。完成该设置之后，填充料输入期之中，会置身于由填料顶板、填料底板、内筒体三者围城的空间之内；b. 填料顶板与底板的具体设计基本相同，均设置圆孔通道，以正三角形状态布置在板的整个截面之上；c. 针对圆孔间隔进行设计时，需要设置为“凸台”形式，且应该确保填料顶板的开孔大小与二次布液盘相同；d. 填料底板主要用于支撑填料，其上的开孔应当小于填料尺寸。理想的填料可以是鲍尔环、拉西环以及其他规整性达标的填料。

### 2.2 此种立式结构液化天然气接收站再冷凝器换热模式分析

针对上述立式结构液化天然气接收站再冷凝器换热模式的相关分析如下。如上文所述，影响再冷凝器换热效率的因素包括压力稳定性、气液比例等，故必须对这些因素进行综合考量，从而达到提高换热效率的目的。硬件方面的具体设计及提高换热效率的实践结果如下：

①充液空间的进口是顶板的开口，出口是回流弯管入口短管的进口，整个充液空间是一个封闭空间，其主要作用是存储接收的液化天然气并与来流管共同提供一定的静水压力。由于静水压力与充液空间内部压力之间存在压力差，故在这一压力差以及液化天然气自身动能能够为充液空间中存储的液化天然气进入回流弯管提供动力。出于上述考量，充液空间必须具备一定的容积，如果容积值过小则有可能造成较大的波动，从而降低一次布液效果；但同时还应注意，充液空间的容积同样不能过大，否则有可能无法匹配安装空间。为了降低从液化天然气入口管处输入的液化天然气流体的冲击，从而导致换热效率下降事件发生的概率，决定在入口管与顶板开口之间设置扩径管，之后将入口管下端与扩径管管径较小的一端相连，将顶板开口与扩径管管径较大的一端相连。设置该扩径管的作用是，对入口管输入的液化天然气提供一种缓冲作用力，减小输入液化天然气对充液空间的冲击力度，使空间内部的布液情况能够长期保持相对稳定的状态；

②为了使闪蒸天然气以更高的效率转换（冷凝）为液化天然气，应在本文2.1章节第③段落所述的“环形空间”内设置环形升气盘，且应当确保该环形升气盘的内径大于内筒体的外径，整体呈现环状圆板形态。该环形升气盘需要被套在内筒体的外壁之上，且自下而上应该呈现出“之”字形的倾斜分层状态。按照这种方式完成布置之后，上一层的环形升气盘的倾斜低端应当恰好与下一层环形升气盘的倾斜高端相对应。每层倾斜高端都应选择一侧设置正三角形的升气孔（最佳位置是环形升气盘中夹角介于 $60^{\circ}$ — $90^{\circ}$ 的扇形区域内）。另一个设计要点是，处于最下层的环形升气盘的倾斜低端必须设置在闪蒸天然气底部入口管的上方合适区域。按照上述方法完成环形升气盘各层位置的设置之后，应该将升气盘不同位置的内缘、外缘与内筒体外壁、内壁焊接。如果环形升气盘的倾斜角度在再冷凝器运转期间能够始终保持在 $2^{\circ}$ — $3^{\circ}$ 之间，那么设备换热冷凝作业效率便可以长时间维持正常水平。如果该倾斜角度较小，则闪蒸天然气的正常升举过程会受影响，从而影响换热效率；

③闪蒸天然气在上述“环形空间”内的分布均匀程度同样会影响换热冷凝效率。基于此，在环形空间底部设置闪蒸天然气均布器存在必要性。该均布器需要与环形空间底部的闪蒸天然气入口管连通，主要组成构件有二，其一是分支管，其二是扇形缓冲室，前者需要设置在后者的底部区域。此外，还需在扇形缓冲室的顶部设置圆形布气孔，同样以正三角形的形状布置。分支管既可以布置一支，也可以布置两支。如果布置两支，则应将两支布气管的交点作为“轴”，两侧应呈现出对称效果。理想夹角同样应当控制在 $60^{\circ}$ — $90^{\circ}$ 之间。如果夹角低于 $60^{\circ}$ 或者更低，则会导致闪蒸天然气在最下层环形升气盘倾斜低端集中分布，从而降低换热冷凝效率；如果夹角超过 $90^{\circ}$ 甚至更大，则同样会受到空间限制。扇形缓冲室的内外弧面应当与环形空间内外弧面严谨贴合，前者的曲率应当低于后者，总体高度不宜过大。

根据上文所述内容完成立式结构液化天然气接收站再冷凝器各部分装置、各构件的具体设置之后，再冷凝器会呈现出下列特点：

其一，基于带环形外折边的内筒体，令液化天然气再冷凝器实际上呈现出“单罐双壳”的结构。其中，外壳内部形成了环形空间冷凝区域，内壳内部形成了填料冷凝区域。在两个冷凝空间同时作用的情况下，

此种再冷凝器的冷凝效率相较于传统逆流型、顺流型再冷凝器，具有更高的换热冷凝效率，总体换热模式更具科学性和可行性。

其二，闪蒸天然气的气相入口有上、下两个，这种设置可以降低控制再冷凝器内部压力的难度，从而提高再冷凝器相关控制操作和运行的稳定性、安全性。

其三，底部闪蒸天然气会首先上行并逐渐进入环形空间冷凝区域，此即为对闪蒸天然气的第一次冷凝回收。本次未能回收的闪蒸天然气会进入气液混合空间，之后与经由均布器输入的液化天然气进行充分接触、混合，之后下行进入填料冷凝区域，此即为第二次冷凝回收。由于有两个冷凝回收区域，故可实现对几乎所有闪蒸天然气的换热冷凝处理，“漏掉率”会大幅度降低。总体来看，这种立式结构液化天然气接收站再冷凝器的换热冷凝模式完全解决了传统逆流、顺流型再冷凝器存在的问题，整体可行性较高。

### 3 结语

综上所述，传统逆流型、顺流型的液化天然气接收站再冷凝器在实践运用期间，会受各种因素的影响，导致换热冷凝作业效率低下。此外，由于对再冷凝器内部压力的控制不甚理想，有可能存在安全隐患。本文在对传统再冷凝器的设计原理进行分析后，结合自身工作经验，查阅大量资料，最终找到了一种立式结构液化天然气接收站再冷凝器。这种再冷凝器的最大特点是，基于“单罐双壳”结构，设置了环形空间冷凝区域，加上常规的填料冷凝区域，在这两个冷凝区域的共同作用下，不仅能够提高对闪蒸天然气的换热冷凝处理效率，还可以对冷凝器内部闪蒸天然气的分布情况、内部压力等进行精准调整、有效控制，总体可行性更高。

### 参考文献：

- [1] 彭延建,张超,姜夏雪,等.基于大数据的LNG接收站再冷凝器喷淋量计算方法研究[J].中国海上油气,2022,34(06):177-181.
- [2] 王若凡.液化天然气接收站再冷凝器换热模式分析[J].石化技术,2022,29(10):30-32.
- [3] 刘中河,孔令广,卞艺晓,等.LNG接收站高压泵入口过滤器极限压差计算及影响因素分析[J].当代化工,2022,51(06):1348-1352+1363.
- [4] 陈国霞.LNG接收站入口BOG温度对再冷凝器控制的影响[J].石油与天然气化工,2020,49(05):50-55.