

全容式 LNG 储罐绝热性能及保冷系统研究

彭明¹ 丁乙²

1. 中国石化青岛液化天然气有限责任公司 2. 中国石化天然气分公司

彭明等. 全容式 LNG 储罐绝热性能及保冷系统研究. 天然气工业, 2012, 32(3): 94-97.

摘要 我国大型 LNG 接收站中的储罐均为全容式 LNG 储罐, 其通常处于低温微正压状态, 外界热量的漏入会引起 LNG 的蒸发, 增加能耗, 也可能使储罐产生分层及翻滚现象, 对其安全造成较大威胁, 因此, 需要对它的绝热性能及保冷系统进行研究。为此, 根据全容式 LNG 储罐的结构特点, 分别对罐顶、罐壁和罐底进行了漏热量计算, 结合实例进行了 LNG 储罐总漏热量及日蒸发率的计算分析, 探讨了 LNG 储罐的绝热性能, 找到了影响储罐漏热量的主要因素: 保冷材料的导热系数、保冷层的厚度、储罐表面的吸收率、环境温度等, 为 LNG 储罐保冷系统的设计提供了相关依据; 并根据 LNG 储罐保冷系统的需要, 归纳总结了保冷材料的选择原则、施工方法及其注意事项。

关键词 LNG 全容式储罐 漏热 日蒸发率 绝热性能 保冷系统 保冷材料 保冷施工

DOI:10.3787/j.issn.1000-0976.2012.03.021

近几年, 中国液化天然气 (LNG) 进口量大大增加, 并已成为天然气进口的重要途径^[1-2]。LNG 储罐是 LNG 接收站的核心设备, 也是 LNG 的主要储存设备^[3-4]。LNG 储罐有多种类型, 但现在人们更倾向于采用安全可靠更好的全容式储罐, 中国大型 LNG 接收站中的 LNG 储罐均为全容式储罐。全容式 LNG 储罐通常处于低温微正压状态, 外界热量的漏入会引起 LNG 的蒸发, 增加能耗; 同时蒸发气会引起 LNG 储罐压力的增加, 也可能产生分层及翻滚现象^[5], 对 LNG 储罐的安全造成较大威胁。因此, LNG 储罐保冷系统的保冷性能将直接影响到能耗和 LNG 储罐的安全运行。

1 全容式 LNG 储罐的绝热计算方法

全容式 LNG 储罐主要由内罐、预应力钢筋混凝土外罐、外罐内侧底部热角保护系统、内外罐之间的保冷系统以及工艺仪表等附件构成 (图 1)。内罐顶为铝合金吊顶, 通过吊杆连接到外罐穹顶, 铝合金吊顶与内罐壁顶部设有柔性密封系统^[6-7]。全容式 LNG 储罐结构复杂, 罐体传热方式包括导热、对流和辐射等多种传热方式。根据全容式 LNG 储罐的结构特点, 分别从储罐的罐顶、罐壁和罐底进行漏热分析^[8]。

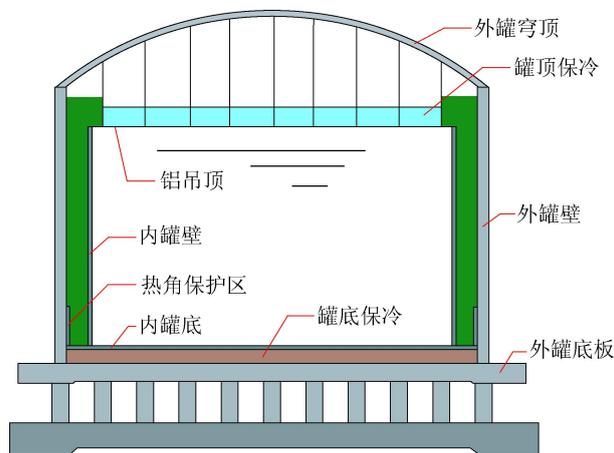


图 1 全容式 LNG 储罐的结构示意图

1.1 罐顶漏热量的计算

罐顶漏热的主要形式是罐顶向吊顶的热辐射及对流换热, 然后通过吊顶保冷层向内罐导热。

外罐顶通过热传导传入的热流量 (Φ) 为:

$$\Phi = \frac{\lambda(T_1 - T_2)}{\delta} A_1 \quad (1)$$

罐顶内表面与吊顶保冷材料上表面的热传导主要有辐射与对流换热, 热流量 (Φ) 为:

$$\Phi = \frac{\sigma(T_2^4 - T_3^4)}{\frac{1-\varepsilon}{A_1 \varepsilon} + \frac{1}{A_2 X_{1.2}} + \frac{1-\varepsilon}{A_3 \varepsilon}} + A_2 h_i (T_2 - T_f) \quad (2)$$

吊顶通过热传导传入罐内的热流量(Φ)为:

$$\Phi = \frac{(T_3 - T_4)A_3}{\sum \frac{\delta_i}{\lambda_i}} \quad (3)$$

式中 λ 、 λ_i 分别为罐顶混凝土的导热系数和吊顶上各层保冷材料的导热系数, $W/(m \cdot K)$; δ 、 δ_i 分别为外罐顶厚度和吊顶上各层保冷材料的厚度, m ; T_1 、 T_2 、 T_3 、 T_4 、 T_f 分别为罐顶外表面的温度、罐顶内表面的温度、吊顶保冷层表面的温度、内罐中 LNG 的温度、罐顶与吊顶气相空间的气体平均温度, K ; A_1 、 A_2 、 A_3 分别为外罐顶外表面、外罐顶内表面和吊顶的面积, m^2 ; h_i 为罐顶内表面的平均表面传热系数, $W/(m^2 \cdot K)$; σ 为波尔兹曼常数; ε 、 ε 分别为罐顶内表面与保冷层上表面的发射率; $X_{1.2}$ 为角系数。

根据能量守恒原理, $\Phi = \Phi = \Phi$, 联立式(1)、(2)、(3), 代入已知参数即可求解罐顶的漏热量。

1.2 罐壁漏热量的计算

罐壁漏热的主要形式是罐壁外表面热量通过罐壁、保冷材料向内罐导热。假设保冷材料层之间接触良好, 不考虑接触热阻。外罐壁导入罐内的热流量(Φ)为:

$$\Phi = \frac{(T_5 - T_4)\pi L}{\frac{1}{hd_1} + \sum \frac{1}{2\lambda_i} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i}} \quad (4)$$

式中 h 为罐外表面的平均表面传热系数, $W/(m^2 \cdot K)$; λ_i 为外罐壁混凝土和内外罐壁环形空间各保冷层的导热系数, $W/(m \cdot K)$; d_1 、 d_i 分别为外罐直径和各层的内径, m ; T_5 为外罐壁外表面的温度, K ; L 为外罐壁的高度, m 。

1.3 罐底漏热量的计算

罐底漏热的主要形式是罐底大气热量通过罐底板、保冷材料向内罐导热。假设罐底与保冷材料接触良好, 不考虑接触热阻。外罐底导入罐内的热流量(Φ)为:

$$\Phi = \frac{(T_6 - T_4)A_4}{\sum \frac{\delta_i}{\lambda_i}} \quad (5)$$

式中 λ_i 为罐底混凝土和各保冷材料层的导热系数, $W/(m \cdot K)$; δ_i 为罐底混凝土和各保冷层的厚度, m ; T_6 为罐底外表面的温度, K ; A_4 为罐底保冷材料的面积, m^2 。

1.4 主要参数的计算

1.4.1 外罐外表面各部分温度(T_1 、 T_5 、 T_6)

没有太阳辐射时, 罐顶、罐壁及罐底外表面的温度与周围空气温度相近, 计算时可取空气温度值; 有太阳辐射时, 罐顶壁外表面的温度比没有辐射时高一些, 此时储罐漏热量相应增加, 罐外表面与空气的对流换热量也相应增加, 根据热量平衡方程有:

$$\eta \varepsilon I = K(T_w - T_e) + h(T_2 - T_e) \quad (6)$$

式中 η 为受太阳辐射的罐外表面积所占百分比; ε 为罐外表面热辐射吸收系数; I 为太阳的辐射强度, W/m^2 ; K 为储罐的平均传热系数, $W/(m^2 \cdot K)$; T_w 、 T_e 分别为有辐射的外罐外表面各部分平均温度和环境空气的温度, K 。将已知参数代入式(6)可求出罐外表面的温度。

1.4.2 储罐外表面平均表面传热系数(h)

储罐外表面平均表面传热系数(h)按空气横掠过圆管的强制对流换热公式计算:

$$h = c \frac{\lambda}{l} Re^n Pr^{1/3} \quad (7)$$

式中 λ 为空气导热系数, $W/(m \cdot K)$; l 为特征长度, m ; Re 为空气雷诺数; Pr 为空气的普朗特数; c 、 n 为常数。

1.5 储罐总漏热量及日蒸发率的计算

储罐的总漏热量(Φ)为罐顶、罐壁和罐底的漏热量之和:

$$\Phi = \Phi + \Phi + \Phi \quad (8)$$

考虑到太阳辐射作用及辐射时间的长短, 储罐的实际总漏热量($\Phi_{\text{实}}$)为:

$$\Phi_{\text{实}} = \eta \Phi_{\text{有辐射}} + (1 - \eta) \Phi_{\text{无辐射}} \quad (9)$$

式中 η 为每天太阳辐射时间百分比; $\Phi_{\text{有辐射}}$ 、 $\Phi_{\text{无辐射}}$ 分别为有无太阳辐射时的总漏热量, W 。

储罐日蒸发率(BOR)是指在 1 天内蒸发的 LNG 占储罐 LNG 总质量的百分比, 其计算公式为:

$$BOR = \frac{24 \times 3\,600 \times \Phi_{\text{实}}}{\gamma \rho V} \times 100\% \quad (10)$$

式中 γ 为 LNG 的蒸发潜热, J/kg ; V 为储罐容积, m^3 ; ρ 为 LNG 密度, kg/m^3 。

1.6 影响漏热量的主要因素

从漏热量的计算公式可以看出影响储罐漏热量的主要参数有保冷材料的导热系数、保冷层的厚度、储罐表面的吸收率、环境温度等。保冷材料的导热系数越大, 保冷层的厚度越小, 环境温度越高, 漏热量越大, 因此, 可选取导热系数小的保冷材料并增大保冷层厚度

来减小 LNG 的蒸发率。储罐表面的吸收率越大,漏热量越大,因此,可以在储罐外表面涂白色涂料或在太阳辐射强烈时对罐壁进行喷淋降温以减小漏热量。

1.7 实例

以某 LNG 接收站 $16 \times 10^4 \text{ m}^3$ 全容式储罐为例计算储罐漏热量及日蒸发率。

储罐基础参数及保冷材料参数见表 1、2。

表 1 LNG 储罐基础参数表

基础参数	数 值
环境温度/°C	35
罐内 LNG 温度/°C	-162
外罐内壁直径/m	82
内罐直径/m	80
热角保护高度/m	5
储罐工作容积/ m^3	160 207
外罐表面吸收系数	0.6
LNG 密度/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	422
LNG 气化潜热/ $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	510

表 2 LNG 储罐主要保冷材料参数取值表

保冷材料	厚度/m	导热系数
罐壁、罐顶、罐底混凝土	0.80、0.40、0.60	3.200
吊顶玻璃纤维毡	1.00	0.033
侧面膨胀珍珠岩	0.70	0.038
侧面弹性毡	0.30	0.040
热角保护泡沫玻璃	0.15	0.037
罐底中心泡沫玻璃	0.50	0.037
罐底混凝土环梁	0.40	3.200
环梁下泡沫玻璃	0.30	0.043

假设每天太阳辐射时间为 12 h,漏热量及日蒸发率计算结果如表 3 所示。

表 3 LNG 储罐漏热量及日蒸发率计算结果表

项 目	结 果
罐顶(包括吊顶人孔等)漏热量/MJ	3 482.5
罐壁漏热量/MJ	6 127.2
罐底(包括环梁)漏热量/MJ	6 698.4
总漏热量/MJ	16 308.1
日蒸发量/kg	31 976.7
日蒸发率	0.047%

$16 \times 10^4 \text{ m}^3$ LNG 储罐日蒸发率控制要求为不大于 0.050%,计算结果为 0.047%,因此,本储罐保冷设计符合要求。

2 保冷材料的选择与安装

全容式 LNG 储罐的保冷系统主要由罐底保冷、罐壁保冷、吊顶保冷和接管保冷等系统构成。通过对漏热量主要影响因素的分析可知,保冷材料的选取和安装对储罐的保冷效果有重要的影响。

2.1 保冷材料的选择

用于全容式 LNG 储罐的保冷材料除具有较小的导热系数外,还应满足密度小、吸水率小、阻燃性强、抗冻性强、价格低廉、安装方便的要求,并在极低的温度下满足机械强度高、耐腐蚀、对人体无害、经久耐用等要求^[9]。全容式 LNG 储罐的主要保冷材料如表 4 所示。

在保冷系统的设计及保冷材料的选择上,除了要考虑保冷材料的绝热性能外,还应结合储罐的结构特点、材料的经济性、安装方便性等因素综合考虑。罐底保冷材料需要承受罐体及罐内 LNG 的负荷,因此,宜选择抗压强度较高的泡沫玻璃。吊杆通过焊接及螺栓连接的方式把吊项悬挂在罐顶钢梁上,吊顶上保冷材料要选择密度较小的玻璃纤维毡或膨胀珍珠岩。考虑到保冷材料的经济性,内外罐壁间环形空间选择堆

表 4 全容式 LNG 储罐的主要保冷材料统计表

保冷材料名称	导热系数/ $\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$	密度/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	适用位置
泡沫玻璃	<0.060	150	罐底、环梁、热角保护区
珍珠岩混凝土	0.120~0.250	500~1 032	环梁
膨胀珍珠岩	0.028~0.048	70~250	内外罐壁间、吊顶上
玻璃纤维毡	<0.042	11~16	吊顶上、罐底
弹性玻璃纤维毡	0.040	16	内外罐壁间
聚氨酯发泡料	0.019~0.029	30~60	内外罐壁间、罐底

积绝热方式,保冷材料选用膨胀珍珠岩;储罐会因温度变化产生收缩,因此,在内罐壁外安装弹性玻璃纤维毡为珍珠岩提供弹性,可以防止或减小珍珠岩的沉降。

除了表4中的主要材料外,保冷系统还包括铝箔、玻璃纤维布、沥青毡、马蹄脂、粘结剂、密封胶、保温钉等辅助材料。高强度玻璃纤维布及铝箔保护层安装在弹性玻璃纤维毡表面,用于防止其因自重撕裂。水蒸气对保冷材料的危害最大,需要对储罐进行防潮隔气保护,马蹄脂和粘结剂都具有良好的防潮、隔气性能。

2.2 保冷材料的安装

大型全容式 LNG 储罐保冷系统的施工工程量较大,施工工序多,施工质量直接影响到储罐的保冷效果,因此,合理的施工工序及施工方法是保冷材料安装的关键。以某 $16 \times 10^4 \text{ m}^3$ 全容式 LNG 储罐为例介绍保冷系统的施工方法及注意事项。

2.2.1 罐底保冷

罐底保冷设计复杂,保冷层数较多,从混凝土底板到内罐底板的保冷层依次为:外罐底衬板、素混凝土或干砂找平层、中间垫毡层、多层泡沫玻璃砖(罐内外圈为强度较高的泡沫玻璃砖、混凝土环梁)、中间垫毡层、素混凝土或干砂找平层、第二层罐底板、素混凝土找平层、内罐底板,混凝土底板到内罐底板的总厚度为 700 mm。安装保冷材料采用从下到上、由内而外的施工工序,控制基础底板及各绝热层的平整度及缝隙,防止底板扭曲并保证保冷结构的连续性,以免出现“热短路”。

2.2.2 罐壁保冷及热角保护

罐壁间环形空间保冷层由内而外依次为弹性玻璃纤维毡、高强度玻璃纤维布和膨胀珍珠岩,由内而外进行安装。弹性毡外表面覆盖玻璃纤维布,通过钩板悬挂在内罐壁外侧,并通过设置在罐壁表面的保温钉与罐壁固定。弹性毡悬挂好后使底部贴紧罐壁,修剪超长的部分。为满足系统的设计要求,珍珠岩保冷材料在保存、运输及充装时都应保持干燥。珍珠岩矿通过加热炉在现场膨胀,从顶部往下分层装填、分层夯实,直至填充到顶部。为防止破坏储罐的附件,在垂直管道及附件与其他部件距离不足 1 m 时不进行夯实。填充膨胀珍珠岩前,应安装吊顶密封及珍珠岩隔板,防止填充时珍珠岩进入内罐。

热角保护系统由第二层底板、高 5 m 的局部壁板和泡沫玻璃砖保冷层等构成。在外罐壁内侧先敷设泡沫玻璃砖,然后安装局部壁板,局部壁板上部通过环形板与预埋件焊接连接。

2.2.3 罐顶及接管保冷

吊顶上敷设 10 层厚度为 100 mm 的玻璃纤维毡,

由不锈钢丝等与吊顶固定。敷设时修剪玻璃纤维毡,使开口适合吊顶吊杆和其他支撑物。

接管保冷采用套管结构,在冷管和套管之间充填弹性玻璃纤维毡进行保冷。接管保冷材料的安装应先于珍珠岩填充与吊顶保冷材料的敷设。

3 结论

1)根据全容式 LNG 储罐的结构特点,分别计算了罐顶、罐壁和罐底处的漏热量,给出了全容式 LNG 储罐总漏热量及日蒸发率的计算方法。对某 LNG 储罐保冷设计的日蒸发率进行了核算,结果表明其符合控制要求。对保冷材料的导热系数、保冷层厚度、储罐表面及保冷材料吸收率等影响漏热量的主要因素进行了分析,保冷材料的导热系数、吸收率越小,保冷层厚度越大,储罐的保冷效果越好。

2)根据保冷材料选择的原则,给出了全容式 LNG 储罐各保冷系统适用的主要保冷材料。针对保冷系统施工工程量大、交叉作业多等特点,以某 $16 \times 10^4 \text{ m}^3$ 全容式 LNG 储罐为例给出了储罐各部分保冷系统的施工工序及施工方法,总结了保冷材料安装时所需注意的事项。

参 考 文 献

- [1] 王宁,桑广书.中国天然气进口的空间格局分析[J].世界地理研究,2010,19(2):148-154.
- [2] 杨帆,陈保东,姜文全,等.液化天然气技术在调峰领域的应用[J].油气储运,2006,25(10):26-28.
- [3] 孙青峰,赵德贵.LNG接收站储罐配置[J].油气储运,2009,28(3):17-18.
- [4] 王冰,陈学东,王国平.大型低温 LNG 储罐设计与建造技术的新进展[J].天然气工业,2010,30(5):108-112.
- [5] 王良军,刘扬.大型储罐内 LNG 翻滚机理和预防措施[J].天然气工业,2009,28(5):97-99.
- [6] YANG Y M, KIM J H, SEO H S, et al. Development of the world's largest above-ground full containment LNG storage tank [C]// 23rd World Gas Conference, 5-9 June 2006, Amsterdam, Netherland. New York:IGU, 2007.
- [7] 袁中立,闫伦江.LNG低温储罐的设计及建造技术[J].石油工程建设,2007,33(5):19-22.
- [8] 杨世铭,陶文铨.传热学[M].北京:高等教育出版社,2006.
- [9] 陈江凡,邹华生,龚敏.大型液化气低温储罐结构及其保冷设计[J].油气储运,2006,25(7):11-15.