

# LNG 船冷却试验分析计算及过程控制

陈新良

(上海华润大东船务工程有限公司, 上海 202155)

**摘要:** 本文针对 LNG 船管路冷却试验过程中使用的液氮用量, 氮气流量及温度控制进行分析计算, 并对冷却试验过程控制细节进行了阐述, 对管路冷却试验有指导意义。

**关键词:** 冷却试验; 液氮估算; 流量计算; 过程控制

中图分类号: U674.92 文献标识码: A 文章编号: 1006—7973 (2025) 21—0066—04

LNG 是当今世界发展最快的燃料, 自 1980 年以来, 以每年 8% 的速度增长<sup>[1]</sup>。近年来, 环保要求提升, LNG 双燃料船舶建造及改装项目层出不穷, FSU、FSRU、LNG 再液化改装数量逐年递增。在这些修理、改造工程中, 常涉及大量 LNG 低温管路的换新及安装工程, 低温管路安装完成后, 在正式投入使用之前, 必须进行管道的冷却试验。如果没有这一过程, 这个管道系统处于室温下, LNG 突然流入常温管道, 管道会迅速地收缩。管道的底部与沸腾的 LNG 直接接触, 而顶部相对较热, 因顶部温度相对较高, 这种结果便是所谓的香蕉效应。由于收缩不一致, 可能引起管道、支撑和管道补偿的损坏<sup>[1]</sup>, 所以 LNG 输送管路安装完成后的冷却试验必不可少。因此, 分析、计算和控制冷却试验过程具有非常重要的意义。

## 1 冷却试验过程分析

LNG 低温管路冷却试验是管路投入运营前模拟管路在输送 LNG 时的表现。主要检查管路材料、焊接质量、管路和管支架设计合理性及管路阀件在低温状态下的密封性能。同时, 冷却试验可以通过冷点位置和裂纹数量检查低温绝缘的施工质量。

冷却试验一般采用 LNG 蒸气或是 LN<sub>2</sub> 蒸气作为传热流体, 虽然 LN<sub>2</sub> 的温度比 LNG 低, 但测试结果可以换算。实际上, 材料在 -162℃ 和 -196℃ 范围内的特性变化不大, 因而测试结果不修正也可以使用<sup>[2]</sup>。从经济及安全的角度考虑, LN<sub>2</sub> 蒸气为管路冷却试验的首选流体。

管路冷却试验常用方法是在码头安装液氮罐及汽化器, 使用汽化器将液氮汽化。汽化后的氮气与液氮在

的教学场所和时间安排。未来, 云计算技术将进一步推动轮机模拟器的网络化发展。

## 7 结语

本文回顾了船舶轮机模拟器的发展历程, 探讨了其技术进步和应用现状。尽管我国在该领域取得了显著进展, 但与国际领先水平相比仍存在差距。未来, 轮机模拟器将向智能化和可持续化方向发展, 以适应智能船舶和绿色航运的需求。通过进一步优化 3D 显示技术和推动标准化建设, 并引入人工智能和虚拟现实等前沿技术, 轮机模拟器将为航运业的培训质量提升和安全保障提供更有力的支持。

参考文献:

[1] Jung, B.-G., So, M.-O., Eum, P.-Y., Paek, S.-H., & Kim, C.-H. (2007). Development of the Marine Engine Room Simulator. In *Journal of the Korean Society of Marine Engineering* (Vol. 31, Issue 7, pp. 872 -

880). <https://doi.org/10.5916/jkosme.2007.31.7.872>

[2] 伍巧芸. 船舶轮机模拟器的应用与发展 [J]. *中国水运* (下半月), 2023, 23(05): 43-45.

[3] Zeng, H., Liu, H., Zhang, J., Sun, M., & Wang, T. (2022). Design of Remote Upgrade System for Data Processing Unit in Marine Engine Room Simulator. *Applied Sciences* (Switzerland), 12(18). <https://doi.org/10.3390/app12189107>

[4] Dewan, M. H., Godina, R., Chowdhury, M. R. K., Noor, C. W. M., Wan Nik, W. M. N., & Man, M. (2023). Immersive and Non-Immersive Simulators for the Education and Training in Maritime Domain—A Review. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(1). <https://doi.org/10.3390/jmse11010147>

[5] 张勇亮, 张均东. 中外轮机模拟器对比分析 [J]. *中国水运* (下半月), 2018, 18(11): 87-89.

[6] 李德江. 浅析使用模拟设备是培养船员的重要途径 [J]. *中国设备工程*, 2022, (06): 26-27.

管路内混合调温，达到指定温度，然后输送至需要做冷却试验的管路，使管路冷却。管路冷却至目标温度（通常 -100℃）后，检查试验管段状态，测量管路收缩位移并报验船东、船检验收。验收完成后，需关注管子升温过程及防止系统超压。

冷却试验准备及实施工程中，通常会遇到以下技术问题：

- (1) 试验过程中低温流体流向。
- (2) 试验管路质量及通径计算。
- (3) 试验过程中低温流体的耗液量。
- (4) 试验过程中低温流体流量及升温选择。

## 2 冷却试验数据计算

试验管路质量及通径的计算。在冷却试验流量控制计算时，我们需要用到试验段管路外径、长度及重量等参数。然而，在实际的试验过程中，我们发现试验管路的直径并不完全相同，同一路管子会存在多处变径。试验管路的长度及重量参数可单独计算后求和。而试验管段外径取不同管径的平均值并不合理。在此，我们引入平均试验外径  $D_e$ 。

根据钢管的每米理论重量计算公式<sup>[3]</sup>：

$$W = \pi/1000 * \rho * S(D-S) \quad (1)$$

式中：

$W$ ----- 钢管理论重量，单位为千克每米 (kg/m)；

$\pi$ ----- 3.14156；

$\rho$ ----- 钢的密度，单位为千克每立方分米 (kg/dm<sup>3</sup>)；

$D$ ----- 钢管的公称外径，单位为毫米 (mm)；

$S$ ----- 钢管的公称壁厚，单位为毫米 (mm)。

根据单米不锈钢管理论重量计算公式，我们可以推导出需要冷却的系统质量  $m_w$  的计算公式如下：

$$m_w = \sum (W_1 L_1 + W_2 L_2 + \dots) \quad (2)$$

我们可以看出，在钢管公称厚度相同时，不锈钢管的理论重量与其外径  $D$  为线性关系。因此，我们可以定义平均试验外径  $D_e$ 。按照下式计算：

$$D_e = \frac{\sum_1^n D_n * L_n}{L} \quad (3)$$

其中  $L = L_1 + L_2 + \dots + L_n$ 。平均试验外径  $D_e$  的引入是为了方便后续低温流体流量的计算。

低温流体耗液量的计算。冷却试验所需的液氮的数量与不锈钢管的质量、比热容及冷却速度有关。冷却试

验时液氮体进入系统吸收热量而汽化。汽化后的低温氮气会进一步吸收系统结构、部件的热量而升温，管路系统则被冷却降温。冷却试验过程中，如果低温氮气与管路系统进行了充分的热交换，则氮气离开管路排出时的温度与管路末端温度相同。此过程充分利用了液氮的汽化热以及低温氮气的显热，因而液氮耗液量最小。在作近似计算时，最小液氮消耗量可以用下式计算<sup>[2]</sup>：

$$\sigma_{min} = \frac{C_e}{C_{pf}} \ln \left[ \frac{1 + \frac{C_{pf}}{\lambda} (T_a - T_s)}{1 + \frac{C_{pf}}{\lambda} (T_e - T_s)} \right] \quad (4)$$

$C_e$ ----- 氮气在  $[T_a, T_e]$  温度范围的平均定压比热容；

$C_{pf}$ ----- 氮气在  $[T_e, T_s]$  温度范围的平均定压比热容；

$\lambda$ ----- 液氮的汽化热；

$T_s$ ----- 氮气的饱和温度；

$T_e$ ----- 管路冷却目标温度；

$T_a$ ----- 初始温度。

如果冷却试验时仅利用液氮的汽化热，而低温氮气的显热未完全利用，此时液氮的耗液量最大。最大液氮耗量计算公式<sup>[1]</sup>：

$$\sigma_{max} = \int_{T_e}^{T_a} \frac{C_{pf}}{\lambda} dT = \frac{1}{\lambda} (H_a - H_e) \quad (5)$$

式中： $H_a$ ----- 被冷却质量在  $T_a$  温度下的热焓；

$H_e$ ----- 被冷却质量在  $T_e$  温度下的热焓。

粗略估算时， $\sigma_{max} = \frac{1}{\lambda} C_e (T_a - T_e)$ <sup>[4]</sup>

根据上式，我们计算得到不同初始温度 (0-50℃) 条件下，不锈钢管路冷却试验，目标温度为 173K (-100℃) 时最小和最大单位比耗液量。比耗液量为液氮消耗质量与被冷却管路质量的比值。

表 1 不同环境温度最大、最小比耗液量

$T_a$ (K)	$T_e$ (K)	$T_s$ (K)	最小耗液量	最大耗液量
273.00	173.00	77.30	0.24	0.37
278.00	173.00	77.30	0.25	0.39
283.00	173.00	77.30	0.26	0.41
288.00	173.00	77.30	0.27	0.43
293.00	173.00	77.30	0.29	0.45
298.00	173.00	77.30	0.30	0.47
303.00	173.00	77.30	0.31	0.48
308.00	173.00	77.30	0.32	0.50
313.00	173.00	77.30	0.33	0.52
318.00	173.00	77.30	0.34	0.54
323.00	173.00	77.30	0.35	0.56

低温流体流量与温升的计算。在冷却试验过程中，我们通常要求液氮或者低温氮气以一定的流量流过被冷却管路。流量大小的选择及温升的快慢会影响液氮的耗量及低温管的线胀速度。因此，确定其相对关系及选择合适的流量和温升是试验成功的关键因素。简化计算，试验过程中液氮与管路系统间建立了稳态的热平衡。

液氮或低温氮气流经低温管路时吸收的热量  $q$  用下式计算：

$$q = C_p q_m (T_o - T_i) \quad (6)$$

式中：

$C_p$ ----- 流体比定压热容 [J/(kg · K)];

$q_m$ ----- 流体的质量流量 (kg/s);

$T_i$ ----- 蒸气进口温度 (K);

$T_o$ ----- 蒸气出口温度 (K)。

在平衡条件下，根据热流量相等，则冷却试验过程中低温管路吸收的热量  $Q$  用下式计算：

$$Q = KD\pi L \Delta T_m \quad (7)$$

式中：

$K$ ----- 传热系数 [W/(m<sup>2</sup> · K)];

$D$ ----- 测试段的外径 (m);

$L$ ----- 测试段的长度 (m);

$\Delta T_m$ ----- 对数平均温差 (K)。

$$\Delta T_m = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}} = \frac{T_o - T_i}{\ln \frac{T_a - T_i}{T_a - T_o}} \quad (8)$$

其中， $\Delta T_1 = T_a - T_i$ ， $\Delta T_2 = T_a - T_o$

式中：

$T_a$ ----- 环境温度 (K);

$T_i$ ----- 流体进入管段的温度 (K);

$T_o$ ----- 流体流出管段的温度 (K)。

根据能量守恒， $Q = q$ ，即  $KD\pi L \Delta T_m = C_p q_m (T_o - T_i)$ ，可以算出

$$q_m = \frac{KD\pi L \Delta T_m}{C_p (T_o - T_i)} \quad (9)$$

如果忽略绝热材料和不锈钢管壁的温降，总的传热系数可按式计算：

$$\frac{1}{K} = \left(\frac{D}{2\lambda}\right) \ln\left(\frac{D}{d}\right) + \frac{D/d}{h_i} + \frac{1}{h_a} \quad (10)$$

式中：

$\lambda$ ----- 绝热材料的平均导热率 [W/(m · K)];

$D$ ----- 管路内径 (m);

$h_i$ ----- 管内的表面传热系数 [W/(m<sup>2</sup> · K)];

$h_a$ ----- 绝热材料外表与空气的表面传热系数 [W/(m<sup>2</sup> · K)]。

基于上述计算公式，计算环境温度对液氮流量影响。选择条件，进入管段温度  $T_i=133K$ ，温升 50K 条件。环境温度升高 40℃，液氮流量增加 35.8%。

表 2 不同环境温度条件下液氮流量

$T_a$ (K)	$T_i$ (K)	$T_o$ (K)	$q_m$ (Ton/H)
273.00	133.00	183.00	3.43
278.00	133.00	183.00	3.59
283.00	133.00	183.00	3.74
288.00	133.00	183.00	3.89
293.00	133.00	183.00	4.05
298.00	133.00	183.00	4.20
303.00	133.00	183.00	4.35
308.00	133.00	183.00	4.51
313.00	133.00	183.00	4.66

计算进口温度对液氮流量的影响。选择环境温度  $T_a = 25℃$ ，温升 50℃ 条件。进口温度降低 70℃，液氮流量增加 72.4%。

表 3 不同进口温度条件下液氮流量

$T_a$ (K)	$T_i$ (K)	$T_o$ (K)	$q_m$ (Ton/H)
298.00	173.00	223.00	2.97
298.00	168.00	218.00	3.12
298.00	163.00	213.00	3.28
298.00	158.00	208.00	3.43
298.00	153.00	203.00	3.59
298.00	148.00	198.00	3.74
298.00	143.00	193.00	3.89
298.00	138.00	188.00	4.05
298.00	133.00	183.00	4.20
298.00	128.00	178.00	4.35
298.00	123.00	173.00	4.51
298.00	118.00	168.00	4.66
298.00	113.00	163.00	4.81
298.00	108.00	158.00	4.97
298.00	103.00	153.00	5.12

温升对液氮流量的影响，选择环境温度 25℃，进入管