

专题情报资料

译85-09

液化气运输船入门

交通部水运科学研究所
情报室

一九八五年六月

液化气运输船入门

作者：惠美洋彦

1. 液化气货物的基本性质

1. 1 液化气货物的种类和动向

液化气船所运输的货物，在常温、常压下是气体。此外，有些液态货物（乙醚、甲基丁二烯、石脑油等）也采用液化气船运输。

归纳起来，液化气货物可分为29种，主要是两种，即为液化天然气（LNG）和液化石油气（LPG），此外还有氮、乙烯、氯化乙烯、丙烯、丁二烯等也都采用液化的方式进行运输。

1981年，液化天然气的海上运输量约为6000万米³，液化石油气为3000万米³，液化氮约580万米³。其他液化气的运量估计有200万米³。

1. 2 液化气的贮藏方式

气体货物采用以下的方式进行贮藏和运输：

（a）把气体溶解在某液体内

（b）将气体压缩

（c）将气体液化

（d）将气体冷冻固体化。

（a）这种方式是对液体货物，即采用化学品运输船运输。

（b）和（d）方式运输不经济。因此一般采用气体液化的方式进行贮藏和运输。气体液化，可采用常温下压缩（压力式）、冷

却后压缩（低温压力式）和常压下冷却（低温式）的方法。

液化气船的形式与上述气体液化方法一样大致上可分为压力式，低温压力式和低温式。详细介绍见2·1节。

1·3 气体和液体的基本性质

(1) 压力的标准

在处理液化气的情况中，压力的标准极易混淆。在理工科方面，一般以绝对压力表示计示压力。例如，把丙烷在温度45℃时蒸气压 15.4 kg/cm^2 称为绝对压力。（计示压力为 14.367 kg/cm^2 ）。为此液化气船油舱设计蒸气压力为 15 kg/cm^2 ，通常也是计示压力。尾部表有A或a的为绝对压力，表有G或g的为计示压力。

(2) 气体和混合体

气体的压力、容积和温度关系以修正的波以尔公式表示：

$$P V = Z n R T$$

P为绝对压力；V为容积；T为绝对温度；n为摩尔数；

R为气体常数；Z为压缩系数。

上公式中，设 $Z=1$ 时为理想气体的公式。液化气船的设计和营运中，把它看作理想气体的状态来考虑。

为了表示气体的容积，必须明确它的温度和压力。在公制单位中，通常以大气压/0℃作为标准状态下的容积 m^3 或 b^3 表示。英制单位中，以大气压/60°F（15.6℃）作为标准状态下的SCF（ ft^3 ）表示。两种容积单位的换算，要考虑到温度改变的修正。

混合气体的组成通常用容积比 (vol %) 表示。气体混合的情况下，以摩尔比 (mol %) 表示更好。液化气的组成通常用摩尔比表示。对于液体物质一般以重量比 (wt %) 表示。摩尔比和重量比之间的关系如下：

$$W_i (\%) = \frac{M_i V_i}{\sum M_i V_i} \times 100 \quad (2)$$

$$U_i (\%) = \frac{W_i / M_i}{\sum W_i / M_i} \times 100 \quad (3)$$

M_i 为每个成分的分子量。

上式中容积比和重量比 换算时，采用比重或密度较好。

容积 V 、温度 T (绝对温度)、压力 π (绝对压力) 和混合气体各成分 i 的分压 P_i 、摩尔数 n_i 有如下关系式。

$$P_i / n_i = R T / V \quad (4)$$

$$P_i = \left(\frac{n_i}{n} \right) \pi = \left(\frac{n_i}{\sum n_i} \right) \pi \quad (5)$$

(5) 式中括弧内的称为摩尔比，这通常也用 X_i 、 Y_i 表示。

如果各成分的分子量 M_i 和摩尔比 X_i 的数知道后，混合的分子量 M' ，可由下式求得。

$$M' = \sum X_i M_i \quad (6)$$

(3) 物质状态的变化, 蒸气压和临界现象

物质状态的变化(气态、液态和固态), 是由于温度和压力的变化而引起的。在研究液化气体中, 就有气化(蒸发)和液化(凝结)的现象。当沸腾时, 液体内部的蒸气压和外部压力相等, 气化从液体内部产生, 出现气泡上升的现象。

蒸气压(也称为饱和蒸气压), 是在一定温度的密闭容器内, 液体停止蒸发(也称为平衡状态)时的压力。丙烷和丁烷的蒸气压曲线如图1所示。在这曲线上方的温度和压力时, 物质以液态存在; 曲线下方的温度和压力时, 以气态存在。

物质在大气压条件下, 蒸气压的温度就是该物质的沸点。

蒸气压和温度的关系式, 如下的 Antoine 式:

$$\log P = A - \frac{B}{c+t} \quad (7)$$

表1 Antoine 式的常数

物质种类	A	B	C
丁烷	6.83029	945.9	240
i-丁烷	6.72466	873.561	238.978
丙烷	6.82973	813.2	243.0
氨	7.3605	926.132	240.17
乙烯	6.74756	585.0	255.0
甲烷	6.61184	389.93	266.0
丙烯	6.81960	813.2	246.0

P 为绝对压力 (mmHg), t 为温度 ($^{\circ}\text{C}$)

A 、 B 和 C 为各种物质的常数, 如表 1 所示。

混合体的蒸气压 π 可由下式求得。

$$\pi = \sum p_i = \sum x_i P_i \quad (8)$$

P_i 为成分 i 的蒸气压; P_i 为成分 i 的混合体的分压。

n_i 为成分 i 的摩尔数; x_i 为成分 i 的溶液摩尔比。

如果知道了混合体的成分和蒸气压, 也可以用(7)和(8)求得饱和温度。

液体蒸发 (或气体凝结) 时吸收 (或放出) 热量叫做蒸发热 (或凝结热), 用千卡/公斤表示。

物质液化过程中, 温度保持不变, 这个温度叫做临界温度, 以 T_c 表示。临界温度时的压力为临界压力 P_c , 密度为临界密度 ρ_c , 这些数被称为临界常数。

物质的种类不同, 温度和压力的变化, 一般以标准的临界常数较多。这时, 温度、压力等用如下的对临界值表示。

$$T_r (\text{对临界温度}) = T / T_c$$

$$P_r (\text{对临界压力}) = P / P_c \quad (9)$$

$$\rho_r (\text{对临界密度}) = \rho / \rho_c$$

T 、 P 、 ρ 为任意状态下的绝对温度、压力、密度。

用混合体的摩尔重量的平均值求得假设临界常数。例如假设临界压力 P_b 可用下式求得:

$$P_b = \sum \rho_{c,i} x_i \quad (10)$$

~ 5 ~

1.4 密度、比重和容积

气体的比重，标准状态（0℃/大气压）的空气比重为1。
液体的比重，标准状态（4℃/大气压）的水比重为1。标准状态的空气和水的密度实际上为0.00129232克/厘米³和0.99973克/厘米³。互相之间可以换算。

饱和液体（液化气）的密度和温度的关系如图2所示。如果已知某一温度的液密度 ρ_{L0} ，其他温度的液密度 ρ_{LA} 可用下式求得：

$$\left(\frac{\rho_{LA} - \rho_{VA}}{\rho_{L0} - \rho_{V0}} \right) \left(1 - \frac{T_0}{T_c} \right)^{\frac{1}{3}} = \left(1 - \frac{T_A}{T_c} \right)^{\frac{1}{3}}$$

T 为绝对温度（K°）， ρ_v 为蒸气密度。

接尾字O、A、C分别为已知温度、任意温度和临界温度。

饱和状态的碳化氢液体的密度用下式求得：

$$V_s = \left(\frac{RT_c}{P_c} \right) Z_{rA} (1.0 + (1.0 - T_r) \times 2/7) \quad (12)$$

V_s 为任意温度下饱和溶液的比容积（ml/g-mol）；

R 为气体常数82.06（ml·atm/g-mol·K）；

T_r 为对临界温度（ T/T_c ： T 为任意温度°K）；

P_c 、 T_c 为临界压力（atm），临界温度°K；

Z_{rA} 可查表得，甲烷为0.2876，乙烷为0.2673，丙烷为0.2763。

混合体的液密度 ρ_{mix} 由摩尔比的平均值求得如下式。

$$P_{mix} = \frac{\sum x_i M_i}{\sum x_i / \rho_i}$$

x_i 摩尔分率, M_i 分子量, ρ_i 液密度。

液化天然气, 可认为受轻质成分的收缩影响, 可得到更精确的计算式。

1.5 气液平衡

气液平衡是关系到互相平衡的气相和液相的组成和平衡压力温度。图3是丙烷、丁烷和乙烷、丙烷的气液平衡曲线。例如： $x_P/x_B = 40/60$ (摩尔比) 的混合液的沸点是一 30°C , 这些蒸气组成 y_P/y_B 为 $81/19$ (P 为丙烷, B 为丁烷)。

1.6 其他物理性质

热容量为物质温度上升需要的热量单位质量所需的热量称为分子热或摩尔比热。对于气体, 可分为定压比热 c_p 和定容比热 c_v 。

比热比 (或绝对热系数), 定压比热和定容比热之比 ($k = c_p/c_v$)。

粘度 (或动粘度) 是关系到热的传导, 油舱设计和货物装卸的重要物理性质。

1.7 液化气的危险性

液化气油舱的危险性包括易燃性、毒性、腐蚀性、反应性、低温和高压等。概述如下:

(1) 易燃性

由于液化气比石油制品更易蒸发、燃烧危险性较大。一旦发生燃烧, 就会造成较大的火灾。通常在装卸中, 必须在非燃烧条

件下进行。下面是易燃性的主要参数：

引火点，物质发生燃烧的最低温度；

爆发范围，以大气压下可燃性气体的浓度表示；

LEL/UEL，爆发范围的下限/上限；

临界的氧气浓度，引起燃烧、爆发的氧气浓度；

自燃温度，引起自燃的温度；

最小发火能，爆发范围内，发火的最小能，火焰蔓延的临界值，以mm表示。

(2) 毒性

允许浓度 (TLV)；

TLV-TWA表示8小时工作制，每周40小时，所允许的货物气体浓度；

TLV-STEL 15分钟内对身体组织的最大允许浓度；

TLV-C为瞬时的浓度。

(3) 低温和高压

低温对设备的影响，液舱设计中必须考虑的重要问题。

高压，泄漏时高压喷射的影响和引起爆炸的危险。

例如，密闭容器中满载状态时温度上升1℃时压力上升20 kg/cm²。为了防止过压，装卸时需要留有适当的气相部分。

(4) 反应性

液化气容易和其他物质发生反应，应尽量避免混合和接触。

(5) 其他危险性

液化气中含有水份会引起结冰堵塞管道。

氯化物、硫化物在含有水气的空气中对金属材料有腐蚀作用，

材料应选用耐腐蚀性的。

2. 液化气船的概要

2.1 液化气的类型和动向

根据液化气贮藏的状态液化气船可分为三种类型。图4表示了各种液化气货物的蒸气压曲线和货物液舱的最低设计温度和设计蒸气压的关系。

压力式液化气船，控制温度压力，在常温下压力等于货物的蒸气压使货物保持液化的状态。最低设计温度为 0°C 。例如图4的B就是压力式的，主要用于液化天然气船和氨运输船。这类船舶货物液舱的设计蒸气压为 $18\text{ kg/cm}^2\text{ G}$ ($19.03\text{ kg/cm}^2\text{ A}$) 因此只能运输符合 45°C 蒸气压在 $19.03\text{ kg/cm}^2\text{ A}$ 以下的物质。图中丙烯和它下方的物质都可采用这种方式。

低温压力式液化气船，比常温(45°C)更低的温度条件下，压力大于蒸气压，使货物保持液化状态。液舱需要隔热，还要设置制冷装置。图4中A船的一个例子就是温度为 -33°C ，压力为 $20\text{ kg/cm}^2\text{ A}$ 条件下运输乙烷的船。C船也是低温压力式，运输氯化乙烯和丁烷，这种方式贮藏运输的用途较广。

低温式液化气船，压力接近大气压，温度控制在货物饱和温度以下进行运输。最低设计温度约等于沸点温度。图中的D船和E船就是低温式的运输LPG、LNG和液化氨的船。货物液舱必须有良好的隔热。

液化气船的类型、舱容(m^3)，如表2所示。括弧内的数，为液化天然气船。

表2. 各种液化气船的船型和吨位 (1983年)

船型 (m³)	压力式		低温压力式		低温式		LPG/兼用船		合计	
	艘	吨客	艘	吨客	艘	吨客	艘	吨客	艘	吨客
499以下	31	9,083	3	1,148	—	—	—	—	34	10,231
500~1,999	222	240,570	38	42,835	12	12,300	9	8,984	281	311,150
2,000~4,999	28	75,807	72	212,885	10	37,231 (4,250)	4	11,795	114	338,129
5,000~9,999	3	18,000	53	210,986	5	22,748 (5,000)	3	21,269	44	273,013
10,000~19,999	—	—	23	294,456	19	282,309	3	38,265	45	615,040
20,000~39,999	—	—	—	—	30	858,851 (210,278)	—	—	30	858,851
40,000~59,999	—	—	—	—	31	1,547,154 (293,190)	—	—	31	1,547,154
60,000~99,999	—	—	—	—	63	4,745,629 (848,662)	—	—	63	4,745,629
100,000以上	—	—	—	—	44	5,519,982 (5,318,782)	—	—	44	5,519,982
合 计	284	343,460	160	768,701	214	13,031,204 (6,680,162)	19	80,314	686	14,224,279

~ 10 ~

2·2 压力式液化气船

压力式液化气船中大部分是液化石油气船，此外还有运输丙烯、氯化乙烯、丁二烯、氨等的多用途船。图5为压力式液化石油气船。

液舱一般为水平纵向设置的园筒形。总舱容 3000 m^3 以上的不采用这种方式，而是采用4~5个球形液舱。液舱上半部高于甲板，一般不需要隔热设施。

货物系统设有泵、压缩机、管道和通风装置。液舱设有过压安全保护装置。

2·3 低温压力式液化气船

低温压力式液化气船可作为专用船也可以作为兼用船。例如装运氨的条件是温度 $0^{\circ}\text{C}\sim 18.9^{\circ}\text{C}$ ，压力 $4.2\sim 8\text{ kg/cm}^2\text{A}$ 的范围，这是一种中温中压式的液化气船。

这种船应用范围较广，如前面图4中的C船，这种船最低设计温度为 -160°C ，比较多的是 $-104^{\circ}\text{C}\sim -49^{\circ}\text{C}$ ，设计蒸气压 $3\sim 8\text{ kg/cm}^2\text{G}$ 。

低温压力式液化气船的例子如图6所示。它是多用途的液化气船。

液舱为压力式容器，采用双筒形的液舱，设有绝热设施。船上设有货物制冷装置，并设有货物加热装置（以适应使低温货物变为常温高压货物）。

2·4 低温式液化气船

(1) 种类

低温式液化气船可分为三类。

低温式LPG船：是指LPG专用船或者以LPG为主兼为氨和氯化乙烯的运输船。货物液舱和其他货物系统相差不大。装运氨和氯化乙烯的船必须考虑材料问题。设计温度在 $-40^{\circ}\text{C}\sim-50^{\circ}\text{C}$ 。结构如图7所示的方形液舱，此外也有的采用压力式薄膜式，半薄膜式和整体式液舱。整体式的适合于最低温度不低于 -10°C 的货物，如丁烷专用船。

低温式乙烯船：可分为乙烯专用船和乙烯、LPG、氨兼用船，设计温度 -104°C 。除了小型的（舱容为 5000m^3 以下）结构形式与LNG船的类似。

LNG船：分为LNG专用船、LNG和LPG兼用船和其他兼用船。前两种都是比较大型的船，后一种较小（舱容为 5000m^3 以下）。结构形式有方形，压力式和薄膜式。船体结构设有双层防壁。图8是较典型的LNG船。

(2) 设备

低温式液化气船，必须设有隔热设施和货物温度压力控制装置。对于LNG船，一般应设有船用燃料控制装置。船上还应设有货物制冷装置。各舱至少设有两台泵，用于货物的装卸作业。

2·5 特殊的液化气船

计划正在研制氨气和乙烯等特殊的专用船、和氧气的低温运输船。此外正在建造液化气和化学品的兼用船。图9是一艘氨气专用船的设计方案。

3. 液化气船布置和液舱结构

3·1 术语

液化气船的布置和液舱的术语有：货物区、危险区、安全区、

货物泵和压缩机室、货物存贮设备、液舱、双层防壁、内壁空间、船舶级别（IG、II G、II P G和III G）、设计蒸气压等等。

液化气船的布置如图10，液舱和船体的支承结构如图11。

图10中所示

- ①危险区：上下方向 $2 \cdot 4$ m，前后方向3 m；
- ②危险区：3 m；
- ③船长 $L/25$ 或者大于 $3 \cdot 05$ m，但不能超过5 m；
- ④船宽B或25 m以上；
- ⑤10 m以上；

船楼标有斜线的区域可布置固定式窗，但不可设门。

3. 2 液舱结构概要

液化气船的类型和液舱结构如表3所示。

〔表3见下页〕

独立型（自承型）：液舱独立于船体，货物重量由液舱支承；形状有方形和压力容器形（即旋转体形）。是否设双层防壁，可由下面的A、B、C的型式所定。

独立型A液舱：主要以方形的深水舱为基础设计的，需要采用双层防壁，如图7的液化气船是这种液舱。

独立型B液舱：方形或压力容器形的结构，要对结构作精确的强度分析、载重计算、精密的结构分析、破坏试验等。需要采用局部的双层防壁，如图12、13所示。

独立型C液舱：以压力容器形的结构。规定最小设计蒸气压。不需要采用双层防壁。图5、6所示的液化气船是采用这种液舱。

非独立型（非自承型液舱）：液舱本身不能承受货物重量，

表3 液化气船的类型或液舱结构

类型	贮藏方式		液 舱 结 构			备注
	温度	压力	结构方式	型式	设计蒸汽压	
压力式	常温	常温时 货物蒸汽压	压力容器形 (旋转体形)	C	45°C时的货物蒸汽压 或者规定的最小值	圆筒形或球形
	任意	任意		C	任意, 或者规定的最 小值	同筒形、双筒 形或球形
				A、E、C、	任意, 或者 C 型时为 规定的最小值	同上
低温式	货物的沸点	大气压	方形	A、B	小于 $0.7 \text{ kg/cm}^2 \text{ G}$	方型
			半薄膜式	(A、B)	小于 $0.25 \text{ kg/cm}^2 \text{ G}$	与船内壳相同
			非独立型	(A)	与船体结构相接近处, 加强到 0.7 kg/cm^2	同上
			整体式	(A)		贮藏温度 $7 \sim 10^\circ\text{C}$

而是通过与船体相接的构件承受，或者是与船体结构成一整体的液舱。原则上必须采用双层防壁。这种液舱有薄膜式、半薄膜式和整体式。此外还有内部防热式液舱，薄膜式液舱如图 1 4 所示。

3 · 3 液舱的隔热和支承结构

低温式和低温压力式液化气船液舱的隔热设施，不仅防止外界热量对液化气货物的影响，同时也保护了船体构件避免低温的影响。设计的环境温度一般考虑下限温度为大气 5℃或海水 0℃、上限温度为大气 45℃或海水 32℃。

隔热材料采用聚氨酯、酚树脂、聚苯乙烯、氯化乙烯等发泡材料，苯间二酚材料，粒状的真珠岩、玻璃纤维等。

液舱支承结构根据液舱的形式而不同，圆筒形液舱采用马鞍形结构；球形液舱采用马鞍形或裙形结构；方形液舱采用底部支承或岛形支承结构。薄膜式及半薄膜式液舱，隔热设施的结构也兼为液舱支承的结构。

3 · 4 液舱的材料

液舱的材料选用如表 4 所示。

〔表 4 见下页〕

表 4 液舱、管路装置的材料

最低设计温度 (°C)	货物液舱、压力容器	管路、阀、泵等其他
0	碳锰钢 (细粒镇静钢, 热处理)	
-55	低温碳锰钢 (细粒镇静钢, 热处理)	
-60	1½%镍钢	2½%镍钢
-65	2½%镍钢	
-70	3½%镍钢	
-90		3½%镍钢
-105	5%镍钢	
-165	9%镍钢, 铝合金, 特殊的不锈钢(SUS), 36%镍钢	

4. 货物系统的设备和其他装置

4.1 货物管路系统 (货物输送设备)

货物输送设备包括液体管路、气体管路、阀、泵、压缩机和其他装置。图 15 是液化石油气船的货物管路系统。这些装置都设置在液舱内或甲板上。货物泵的舱室不能设在甲板以下。

液体、气体管路, 装卸货时用于货物液化气的注入或排出。这些管路系统采用封闭的系统。货物泵采用潜入式的泵, 如

~16~