

多层绝热被性能测试及在 LNG 罐箱中的应用

魏 蔚 汪荣顺

(上海交通大学制冷与低温工程研究所)

魏蔚等. 多层绝热被性能测试及在 LNG 罐箱中的应用. 天然气工业, 2007, 27(6): 109-111.

摘 要 高真空多层保温材料是低温液体能够长期储存的关键, 制作成多层绝热被并工业化应用是国际低温行业发展的趋势。液化天然气储存装置尤其是运输用的容器, 由于介质泄放时有燃烧和爆炸的危险性, 更需要良好的绝热效果和稳定的性能。笔者试制出高真空多层绝热被并应用于两种规格的液化天然气罐箱, 同时设计出新结构、大尺寸的工业化量热器, 以测定其性能。量热器的测试结果与产品的性能测试结果比较一致, 证实了工业化量热器在材料性能测试时比理论量热器有更高的准确性, 可为多层绝热被的产业化应用和液化天然气储存装置的设计提供更合理的依据。

主题词 保温材料 量热法 性能试验 液化天然气 储存装置 应用

将多层保温材料复合成为被子, 包裹在需要绝热的低温储存装置外表, 其简化的工艺及在大绝热面积下应用时稳定的性能, 使绝热被成为工业化应用的趋势。继 20 世纪 90 年代俄罗斯将该技术应用于航空航天和低温储运设备之后, 欧美将多层绝热被用于太空船和 LHC(大型强子对撞机)的低温恒温器^[1]。然而该项技术对发展中国家相对封闭, 文献中很难找到其制作的关键技术和工业化应用的范例。

近年来, LNG 储存装置用量逐年增加。合理的高真空多层绝热材料工艺使移动式低温容器绝热工装实现产业化生产。与低温液体罐车相比, 低温液体罐箱规格少、用量大, 更易于流水线生产, 降低产品成本。

笔者经过多年的试验研究, 通过反射层和隔热层材料的优化组合, 试制出高真空多层绝热被, 同时设计出符合工程实际的工业化量热器, 反复测试其性能, 并将绝热被应用于不同支撑结构的 40 ft(1 ft = 254 mm)和 43 ft LNG 罐箱, 利用工业化应用的结果来验证与所用量热器测试结果的一致性。

一、高真空多层绝热的特点与绝热被制作

高真空多层绝热是把高反射率的材料如铝箔、镀铝的涤纶薄膜等一层层地缠绕在需要绝热的储罐外面, 以减少辐射换热。辐射层之间间隔植物纤维

纸、玻璃纤维纸等以减少固体导热。为了减小残余气体导热, 装配多层绝热材料的夹层必须保持优于 5×10^{-3} Pa 的高真空。

影响高真空多层绝热结构低温下性能的因素^[2]与工艺关系很大, 具体包括预处理工艺、层密度、真空度、捆扎的松紧程度等。与高真空多层绝热工艺性能有关的重要参数包括: 层密度、最佳层数、层间压紧力、开孔率与孔径。

层密度是单位厚度内多层绝热辐射屏的数目, 当层密度增大时, 辐射传热将减小, 固体导热增加, 同时层密度越大越不利于层间气体的排出, 导致残余气体增多、性能下降。欧美各国的绝热被根据使用材料的不同, 层密度为 2~4.3 层/mm^[3]。

多层反射屏的数量并非越多越好。在一定的层密度和绝热材料的条件下, 在大型容器规模应用中, 经济合理的层数为 30~50 层。

多层绝热材料层间压紧力越小越有利于绝热, 但过小会造成材料松脱, 失去绝热作用。欧美国家生产高真空多层绝热容器常用机器缠绕法来控制层间压紧力。而在我国, 低温绝热容器产品的多样化及技术条件的限制, 这种方法还没有推广, 采用手工缠绕层间压紧力不均匀。

提高多层绝热的真空度, 特别是降低层间气体压强是改善多层绝热性能的关键技术之一, 给绝热材料开孔改善透气性非常重要。开孔率是反射层开

作者简介: 魏蔚, 女, 1973 年生, 博士研究生, 副教授; 主要从事低温绝热机理和低温液体储运研究。地址: (200240) 上海市东川路 800 号。电话: (021) 34206055, 13918337292。E-mail: weiwei0610@sjtu.edu.cn

孔面积占总面积的比率,开孔率和孔径越大抽空越有利,但会增大反射材料的发射率从而使辐射换热增加。因此存在最佳开孔率与最佳孔径。

多层绝热的性能很大程度上取决于装配的细节。图 1 所示的是美国绝热被的做法^[2]。一组绝热被包括 10~15 层的反射材料和间隔层,可用粘接、销钉等组合的方法。绝热被与绝热被可缝合成大片的面积,以便用于大型设备。

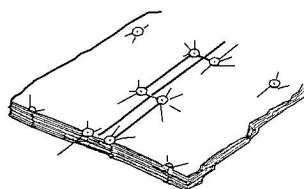


图 1 多层绝热被的做法示意图

本文的量热器和储存容器用的绝热被通过缝制的方法组合,绝热被有效幅宽为 850 mm,长度可根据需要裁剪。绝热被接缝处直接叠合,重叠尺寸在 10~30 mm 之间。接缝处的连接和绝热被的固定用玻璃纤维带捆扎,调节捆扎的松紧,可改变绝热被在圆柱筒体外包扎的周长,从而可以调节绝热材料的层密度。本试验研究和工程应用的绝热被每组合中使用 10 层反射层和 10 层间隔层,反射层材料为双面镀铝涤纶膜(镀层总厚度大于等于 1000 Å,1 Å=10⁻¹⁰ m),间隔层材料为 115 型低温隔热纸。通过 2~5 组合绝热被的性能测试,总层数在 20~50 层之间变化。我们设计制造了专用于绝热被性能测试的工业化量热器,用液氮蒸发法测试绝热被在低温下的比热流和表观热导率,并将数据与 40 ft 和 43 ft LNG 罐箱产品的应用结果相比较(见表 1、2)。

表 1 工业化热器测试多层绝热被不同层数对应的比热流和表观热导率表

反射层 (层数/厚度)	比热流 (W/m ²)	表观热导率 [W/(m·K)]
约 30/15 mm	0.99	6.875×10 ⁻⁵
约 40/20 mm	0.85	7.870×10 ⁻⁵
约 50/25 mm	0.77	8.912×10 ⁻⁵

注:在 293~77 K 条件下。

二、量热器测试多层绝热被性能的试验研究

实验室用量热器基本结构见图 2。主体为一真空绝热双层容器,内容器的上下两段为保护筒,中间

表 2 两种 LNG 罐箱的绝热被比热流和表观热导率表

参 数	40 ft	43 ft
总漏热量(W)	109.4	160.0
支撑结构漏热量(W)	50.2	94.0
管路漏热量(W)	1.5	2.9
绝热被漏热量(W)	57.7	64.7
比热流(W/m ²)	0.76	0.74
表观热导率[W/(m·K)]	8.796×10 ⁻⁵	8.564×10 ⁻⁵

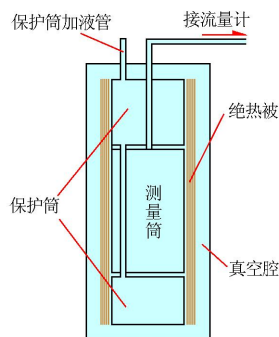


图 2 传统的理论化量热器图

为测量筒,外部包裹多层绝热材料。夹层抽真空后,分别在保护筒和测量筒中加注液氮,静置稳定后,利用流量计测量液氮的蒸发量。根据测量筒内液氮的蒸发量来计算一定时间内外界向容器内的漏热量。根据漏热量和测量筒的外表面尺寸,可计算出多层绝热材料的平均比热流。由于保护筒的作用,测量筒上下端面的传热可忽略不计,热量仅通过圆筒周向传入,传热面积(A)=πdl。多层绝热材料比热流(q)可用下式计算:

$$q = \frac{Q}{A} = \frac{r \cdot \dot{m}}{A} \quad (1)$$

式中:q 的单位为 W/m²;Q 表示量热器总漏热量,W;ṁ 表示标准状态下测量筒氮气质量流量,kg/s;r 表示 77 K 时液氮的气化潜热,r=199 kJ/kg。

根据比热流可计算出绝热被的表观热导率(k):

$$k = \frac{qe}{T_w - T_c} \quad (2)$$

式中:k 的单位为 W/(m·K);e 表示绝热材料厚度,m;T_w 表示热边界温度(293 K);T_c 表示冷边界温度(77 K)。

目前国内外实验室用的多层绝热材料量热器的结构基本同上,其测量筒外径 150 mm 左右,传热面积约 0.1 m²^[1]。文献显示,这种量热器测得的绝热被比热流比工业应用的结果小 10%~15%^[2]。原因是工业应用的特点在该量热器上无法体现。即:①

传统量热器测量筒周长和长度小于绝热被的幅宽,因此无法体现绝热被边缘缝合工艺及固定绑带等对绝热被性能的影响;②传统量热器的测量表面为圆筒状,绝热被可均匀贴附在绝热表面,而在实际工业容器中,除了直边段圆柱筒体外,还包括两端封头以承受工作压力。封头表面是曲面,绝热被的拼接缝处产生的边缘效应及褶皱造成的材料变形,在传统量热器中均无法体现。

为了体现不均匀的层密度、材料缝合、绑带的固定等工艺因素带来的影响,我们设计了有别于传统量热器的工业化量热器,其传热面积约为传统量热器的 10 倍(结构见图 3)。该量热器没有下保护筒,其测量筒外表面为圆柱面加一个标准碟形封头。测量筒直边段长度(l)为 475 mm,外径(d)为 446 mm,传热面积为 0.8478 m^2 。

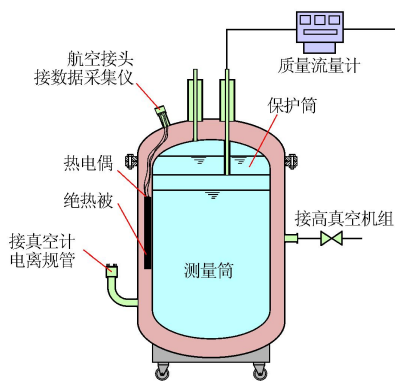


图 3 工业化量热器系统结构原理图

表 1 给出了工业化量热器测试不同反射层层数的绝热被在液氮温度下的比热流和表观热导率。测量过程中,量热器夹层静态真空度在 $(2.2 \sim 3.0) \times 10^{-3} \text{ Pa}$ 之间。结果已换算成标准状态(大气压力 101325 Pa,环境温度 293 K)。

三、多层绝热被在 LNG 罐箱中的应用

为了检验工业化量热器的测试结果与产品应用时的符合程度,用同样的包扎工艺,将同种材料 5 组组合共 50 层反射层的绝热被分别用于 40 ft 和 43 ft LNG 罐箱的制造。

40 ft 和 43 ft 的 LNG 罐箱几何容积分别为 40.6 m^3 和 43.9 m^3 ;包扎绝热被的内容器外表面积分别为 75.51 m^2 和 85.9 m^2 ;前者内支撑结构为轴向两端玻璃钢支撑,后者为径向八点玻璃钢支撑。对该样箱进行低温性能试验。当充满率为 90%、环境温度为 293 K 时,测得的液氮静态日蒸发率前者为

0.16%,后者为 0.245%。通过有限元分析对罐箱支撑结构和管路的漏热量进行了计算,并由此计算出多层绝热被应用于该产品时介质为液氮的比热流和表观热导率(见表 2)。

上述两产品测试结果与工业化量热器 50 层反射层绝热被的测试结果基本一致。根据液氮和液化天然气的物理性质,可换算出当储存介质为 LNG 时绝热被的比热流和表观热导率。

相同型号和支撑结构的 43 ft LNG 罐箱在使用手工缠绕的 50 层进口铝箔与玻璃纤维纸组合的多层材料时,测得的液氮静态日蒸发率为 0.28%。此时手工缠绕进口材料的液氮比热流已经达到 1 W/m^2 以上。

四、结 论

笔者设计的新结构、大尺寸工业化量热器,结构设计更接近工程实际,测试绝热被的数据与大型产品的实测结果比较一致。将多层材料复合成绝热被后,可以通过控制筒体包扎周长的方法控制层密度,且流水线生产的绝热被局部压紧力均匀。用简单的包扎方法可得到均匀的绝热结构和稳定的隔热性能,减少了人为因素对性能的影响。

绝热被的工业化应用是目前国际低温行业发展的趋势,在我国刚起步。LNG 储运容器由于介质泄放的危险性,比其他低温容器更需良好的绝热效果和稳定的性能。绝热被及其工艺能够成功运用于 LNG 罐箱,亦可应用到更多规格的低温容器中。而工业化量热器更接近产品性能的结构,可用于其他材料和组合的多层绝热被性能测试研究,将更多的多层绝热材料和组合结构应用于大型低温容器产品中。

参 考 文 献

- [1] FESMIRE J, AUGUSTYNOWICZ S, DARVE C. Performance characterization of perforated multilayer insulation blankets[C]. Proceedings of the Nineteenth International Cryogenic, 2002:843-846.
- [2] THOMAS M, FLYNN. Cryogenic engineering [M]. New York: Marcel Dekker, 1997.
- [3] MAZZONE L, RATCLIFFE G, RIEUBLAND J M, et al. Measurements of Multi-Layer Insulation at high boundary temperature, using a simple non-calorimetric method[C]. Proceedings of the Nineteenth International Cryogenic, 2002:847-850.

(修改回稿日期 2007-04-09 编辑 赵 勤)