

气凝胶在船舶管道保冷系统上的应用

施 磊¹, 邓小燕²

(1. 启东中远海运海洋工程有限公司 海工与新能源研发中心, 江苏 启东 226259;

2. 江苏航运职业技术学院 交通工程学院, 江苏 南通 226010)

摘 要:与传统保冷材料相比,气凝胶具有绿色环保、低热导率、高稳定性等优点,在船舶管道保冷中有良好的应用前景。但由于气凝胶造价较高,若保冷层全部用气凝胶,势必会增加船舶建造费用,降低经济效益。根据气凝胶的结构特性,在工程应用中对比分析了纯气凝胶保冷结构和“气凝胶+泡沫玻璃”复合保冷结构两种方案的性能与效果,为船舶管道保冷系统提高保冷效果,减少保冷层厚度、降低资金投入提供借鉴。

关键词:船舶管道;气凝胶;保冷系统;环保节能

中图分类号:U664.84

文献标志码:A

文章编号:1671-9891(2021)2-0064-04

0 引言

液化天然气是气态天然气在常压下通过冷却至 $-162\text{ }^{\circ}\text{C}$ 所凝结成的液体。^[1]液化天然气运输船在装卸和储运过程中,会通过管道壁从环境中吸收热量而导致液化天然气汽化,不仅加剧了冷量的损耗,还会使管道内压力升高,增加储运的危险。影响船舶管道保冷效果的众多因素中,最重要的是保冷材料的热导率和厚度。船舶管道保冷常用的材料有岩棉、泡沫玻璃、硅酸钙、珍珠岩、合成橡胶和气凝胶等,而气凝胶具有绿色环保、低热导率、高稳定性等优点,在船舶管道保冷中有良好的应用前景。但由于气凝胶造价较高,若保冷层全部使用气凝胶,势必会增加船舶建造费用,降低经济效益。在船舶设计制造过程中探索气凝胶和其他保冷材料组成的复合保冷结构,对于提高管道保冷效果,降低保冷层厚度,减少资金投入,具有很高的应用价值。

1 气凝胶的结构特性

气凝胶最早在 1931 年由美国太平洋大学的 Kistler 成功制备得到^[2],但由于制备气凝胶的生产成本太高而没有得到广泛应用,直到 20 世纪 80 年代,气凝胶作为一种高效的保温隔热材料才引起各国专家学者的重视^[3]。气凝胶是由纳米孔洞与纳米骨架组成的三维连续多孔材料,其结构如图 1 所示^[4]。气凝胶外表呈固体状,空间网状结构中充满气体,独特的结构使其具有许多常规材料无可比拟的特性。

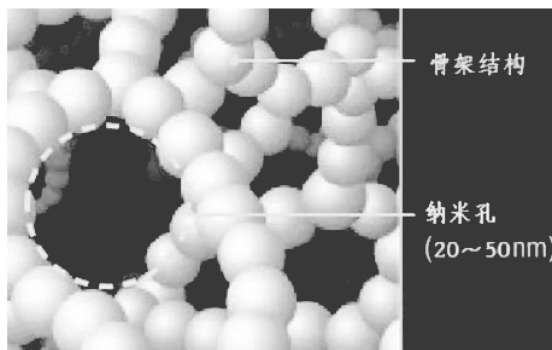


图 1 气凝胶材料纳米结构

(1)导热系数极低。气凝胶中的固体为纳米二氧化硅骨架,仅占总体积的 10%左右。二氧化硅本身即为

收稿日期:2021-01-19

基金项目:南通市科技计划项目(MSZ20073);江苏省大学生创新训练计划项目(202012703006Y)

作者简介:施磊(1982—),男,江苏南通人,启东中远海运海洋工程有限公司海工与新能源研发中心工程师,硕士。

©1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

热的不良导体,形成纳米级骨架结构后,更使热传导的路径延伸至无穷长,因此固体热传导极低。气凝胶中绝大部分的孔洞尺寸小于常温下空气分子平均自由程 70 nm,气体分子被固定在纳米孔内,失去了相互碰撞与宏观迁移能力,不具备对流传热的条件,因此对流传热极小^[5]。气凝胶的纳米孔结构使材料内部形成了近似无穷多的固/气界面,热辐射在每一层界面都会发生反射、吸收、透射和再辐射,相当于在热辐射的传播路径上设置了无穷多的遮热板,因此辐射的热传导也极低。气凝胶的热导率是目前固体材料中热导率最低的,在常温常压下,可低至 $0.013 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。

气凝胶的常温导热系数不超过传统材料导热系数的 $1/3$,温度越高差距越明显。由于具有极低的热导系数,气凝胶在保冷应用时,所需要的厚度可以大大降低,既提高了空间利用率,又降低了运输负荷。气凝胶在实际应用中的厚度与其他材料厚度的对比如图 2 所示。

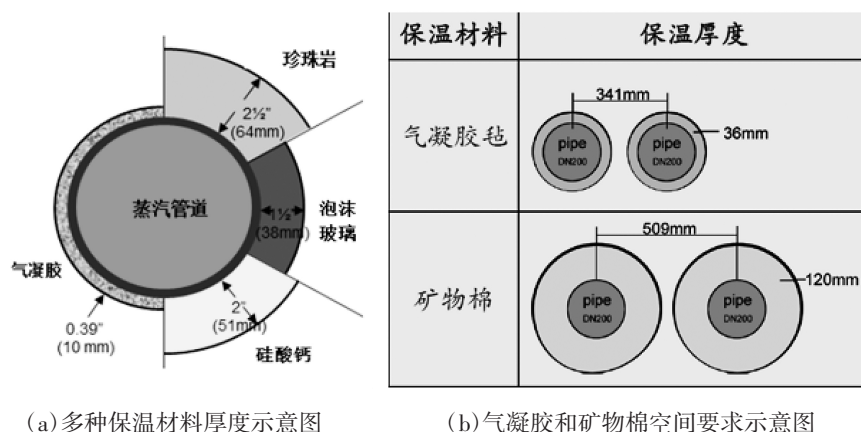


图 2 气凝胶在实际应用中与其他材料的对比

(2) 防水性能好。保冷材料的吸水率会直接影响保冷材料的性能,这是因为在常温下,水的热导率是空气的 24 倍,水分的吸附会极大程度地提高材料的热导率,从而破坏保冷材料的整体保冷效果^[6]。气凝胶的憎水率不低于 98%,体积吸水率则不大于 1%,可见,气凝胶绝对憎水,在运输和施工时无须特别防水,雨水浸泡也不会解体沉降,存储不惧潮湿环境。

(3) 力学性能好。传统保冷材料普遍存在的一大难题就是在低温条件下易变形,这会大大影响保温材料的保冷效果。为了保证在使用过程中保冷材料不易发生形变和断裂,就要求其在常温 and 低温下都具有良好的力学性能。气凝胶绝热材料抗拉强度不小于 200 KPa,其在 60 KPa 压力下的形变不超过 10%,压缩回弹率不小于 95%。所以施工时非常方便并可重复拆装,在长期使用中,不会惧怕踩踏,由于振动不会沉降,保冷性能长期稳定。在低温条件下,气凝胶也不会产生明显的形变,只是表面出现少许霜冻,材料整体柔韧性较好,体积也没有明显收缩。

此外,气凝胶材料可长期应用于 $-196\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 650\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度下绝热保冷。气凝胶在高温下长期使用无熔融,极低温度下不变脆,所以气凝胶可用于冷热交替的工况。气凝胶材料具有完全不燃的防火性,使用更安全,可用于任何需要防火的场合。其成分中无熔滴物,可避免二次燃烧,火场中不会分解有毒气体。同时,气凝胶具有良好的低声速特性,可以作为理想的高温隔音和声学延迟材料。

2 气凝胶在管道保冷中的应用

较传统保冷材料,气凝胶具有极好的保冷效果,但由于其造价较高,保冷层全部采用气凝胶,势必会增加船舶管道保冷工程的费用,经济效益降低。本文在工程实际应用中,对比了纯气凝胶保冷结构和“气凝胶+泡沫玻璃”的复合保冷结构的性能,为船舶保冷系统的设计提供一定的借鉴。

2.1 工况概括

船舶管道内输送的介质温度: $-160\text{ }^{\circ}\text{C}$; 管道外径: 250 mm; 管长度: 1 km; 风速 3 m/s; 当地年平均相对湿度: 70%; 施工当地年平均环境温度: $14.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。所使用的保冷材料参数如表 1 所示。

表 1 气凝胶的参数表

项目	泡沫玻璃	气凝胶	测试标准
密度/ $\text{Kg}\cdot\text{m}^{-3}$	160	200	—
导热系数/ $\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$	0.012(−196 ℃)	0.010(−196 ℃)	GB/T 10295
	0.015(−160 ℃)	0.012(−160 ℃)	
	0.019(−100 ℃)	0.015(−100 ℃)	
	0.024(−50 ℃)	0.017(−50 ℃)	
	0.030(0 ℃)	0.019(0 ℃)	
	0.035(50 ℃)	0.021(50 ℃)	
常温抗压强度 20%/Kpa	700	150	GB/T 17911
吸水率/%	0.2	0.6	GB/T 5480

2.2 气凝胶保冷方案

低温管道的保冷结构由内而外依次为保冷层、防潮层、保护层。保冷层是决定管道保冷效果的关键所在,主要用来维护管道内部介质的温度稳定;防潮层主要用于防潮、防水,可最大限度地保证保冷层的保冷效果;保护层包覆在管道保冷结构的最外面,防止保冷层受到外界环境的破坏,延长保冷层的使用寿命。

根据模拟计算,结合以往经验,设计以下两种保冷方案:方案一为纯气凝胶保冷结构;方案二为气凝胶和泡沫玻璃的复合保冷结构。两种方案使用材料的厚度如表 2 所示,结构示意图如图 3 所示。

表 2 两种方案使用材料的厚度表

材料	方案一	方案二
气凝胶绝热材料	70 mm	40 mm
泡沫玻璃	N/A	70 mm

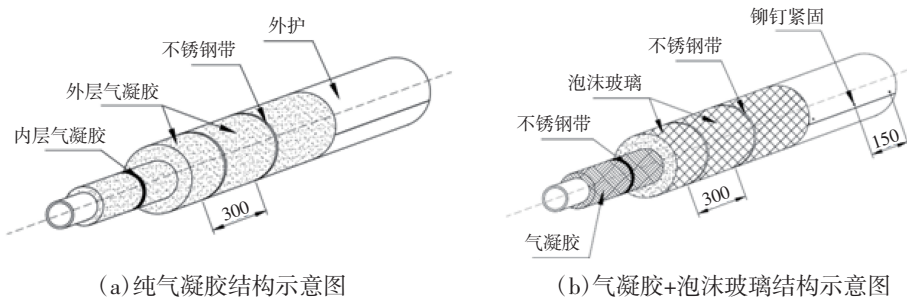


图 3 两种施工方案的结构示意图

2.3 保冷效果

根据 GB50264–1997《工业设备及管道绝热工程设计规范》分别计算两种方案的管道冷损失、节能率及绝缘厚度,计算结果如表 3 所示。

方案一外保护规格小,不仅可以减少管道的占用空间,解决船舶内部空间有限的问题,还可以降低安装施工的难度,运输、安装、后期的维护费用也会降低。同时,方案一的散热损失要低于方案二,同等条件下,采用方案一保冷结构冷介质能够输送的距离最远。此外,纯气凝胶结构结实耐用,能够长期保持良好的保冷效果,不会出现保冷层下塌或是上薄下厚的现象,使用寿命更长。

方案二虽然在外保护规格和保冷效果上稍逊一些,但是考虑到气凝胶成本较高,为了充分发挥其在低温下的保冷优势,在管道内层最低温的位置使用气凝胶保冷层。泡沫玻璃在低温下的保冷效果略低于气凝胶,但是成本低,包裹在气凝胶保冷层的外面。因此,方案二同时兼顾了保温效果和投资成本。

表3 两种方案的参数对比表

计算参数	单位	方案一	方案二
保冷层总厚度	mm	70	110
保冷后直径	mm	380	470
表面温度	℃	10.69	11.27
露点温度	℃	8.3	8.3
表面温度允许值	℃	10.3	10.3
面冷损失	w/m ²	23.84	28.61
线冷损失	w/m	15.29	15.5

3 结束语

相较于岩棉、泡沫玻璃等传统的保温材料,气凝胶具有极低的导热系数,应用于船舶管道保冷系统可有效提升保冷绝热性能,减少冷量损失;在相同的保冷效果下,使用气凝胶可大大降低材料使用量和管道包覆厚度,使管道的排布空间更加充裕。但是气凝胶的造价较高,保温层全部使用气凝胶,会增加保冷工程的费用。“气凝胶+泡沫玻璃”的复合保冷结构,既提高了管道的保冷性能,又减少了保冷层的厚度,同时还保证了保冷工程的经济性。工程实际应用中,可根据保冷效果和投资成本因素,综合考虑船舶管道保冷结构形式。

参考文献:

- [1]刘艳平,吴然,向兵.二氧化硅气凝胶毡复合聚异氰脲酸酯新型保冷结构在 LNG 管线系统的应用研究[J].化学工程与装备,2020(3):49-52.
- [2]刘立威.应用气凝胶材料改善船舶蒸汽管道保温效果的研究[D].大连:大连理工大学,2017.
- [3]周天宇,郜建松,孙智钦,等.气凝胶毡在管道保温中的应用研究[J].石油化工设计,2019(4):64-66.
- [4]SMITH D M,STEIN D,ANDERSON J M,et al.Preparation of low-density xerogels at ambient pressure[J].Journal of Non-Crystalline Solids,1995(Supplement C):104-112.
- [5]LEE O J,LEE K H,YIM T J,et al.Determination of mesopore size of aerogels from thermal conductivity measurements[J].Journal of Non-Crystalline Solids,2002(2): 287-292.
- [6]马佳,沈晓东,崔升,等.纤维增强二氧化硅气凝胶复合材料的制备和低温性能[J].材料导报,2015(10):43-46.

(责任编辑:张 利)

Application of Aerogel in Cold Preservation System of Ship Pipelines

SHI Lei¹, DENG Xiao-yan²

(1. New Energy and Offshore R&D Centre,

Qidong COSCO SHIPPING Ocean Engineering Co., Ltd., Qidong 226259, China;

2. School of Transportation Engineering, Jiangsu Shipping College, Nantong 226010, China)

Abstract: Compared with traditional cold preservation materials, aerogel has the advantages of green environmental protection, low thermal conductivity, high stability, etc., and has good application prospect in the cold preservation of ship pipelines. However, due to the high cost of aerogel, if aerogel is used in all cold preservation layers, it will inevitably increase the cost of ship construction and reduce economic benefits. Based on the structural characteristics of the aerogel, the performance and effect of the pure aerogel cold preservation structure and the “aerogel + foam glass” composite cold preservation structure are compared and analyzed in engineering application, which provides reference for improving cold preservation effect for ship pipelines, reduces the thickness of cold preservation layers as well as capital investment.

Key words: ship pipeline; aerogel; cold preservation system; environmental protection and energy saving