

LNG 管道保冷材料的应用和发展

程 明¹ 许克军² 蒲黎明¹ 杜 磊¹ 张 平¹

1. 中国石油集团工程设计有限责任公司西南分公司,四川 成都 610041;
2. 昆仑能源湖北黄冈液化天然气有限公司,湖北 黄冈 438000

摘 要:多年来,国内已建大型液化工厂和接收工程的核心技术多依赖进口,LNG 保冷绝热技术及产品被发达国家垄断。为加快我国 LNG 项目关键技术的国产化进程,提升 LNG 管道保冷材料的国产化程度,分析了目前国内 LNG 管道工程常用保冷材料的类型、性能、特点及技术发展现状,提出了 LNG 管道保冷材料性能和要求,进一步对绝热设计提出建议,展望 LNG 保冷材料技术的未来发展趋势。

关键词:低温;保冷材料;绝热设计;LNG;管道

DOI:10.3969/j.issn.1006-5539.2013.05.017

0 前言

液化天然气(LNG)厂站内管道长期低温运行,需采取保冷措施以减少周围环境中的热量传入管道内部,防止管道外壁凝露,经济有效地保护低温管道中的冷量不散失。

保冷采用的绝热方法通常有堆积绝热和真空绝热。堆积绝热是一种传统绝热方法,即在管道外侧敷设多孔型绝热材料,因孔泡中充满常压空气(或其它气体)而实现绝热。真空绝热包括高真空绝热、真空多孔绝热及真空多层绝热三类,其原理是将绝热结构做成密闭的夹层,内部空间抽至一定真空度,以减少热量传入。在绝热效率方面,堆积绝热不及真空绝热,但其结构简单,成本低廉,运行维护方便,因此目前国内外 LNG 管道保冷多采用堆积绝热。

1 低温管道保冷材料

美国国家设备绝缘保温委员会(NMIC)在《绝热设计指南》^[1]中提出五类绝热材料:a)多孔(泡沫)型;b)纤维型;c)薄片型;d)粉末型;e)反射型。低温管道保冷常用多孔(泡沫)型堆积绝热材料,可分为有机材料和无机

材料。

1.1 硬质聚氨酯(PUR)泡沫塑料

PUR 的主要成分为异氰酸酯、聚醚或聚酯多元醇和多种助剂,其生产工艺简便,机械加工性能好^[2]。其缺点是耐候性、耐温性差且易燃,燃烧生成物有毒。20 世纪 60 年代中期,我国开始生产硬质 PUR 泡沫塑料,并将其用于船舶、冷库、石油化工管道的保温等。近年来,为提高其使用性能,国内开展了与 PUR 配套的阻燃剂、催化剂、发泡剂技术研究^[3]。GB 50264《工业设备及管道绝热工程设计规范》将 PUR 推荐使用温度限定为-65~80℃。

1.2 聚异氰脲酸酯(PIR)泡沫塑料

PIR 是以聚醚多元醇、聚合异氰酸酯为主要原材料,经触媒作用后发生反应生成的具有闭孔结构的硬质绝热材料。与 PUR 相比,PIR 的低温适用性更好(最低达到-196℃)、导热系数低、耐热及阻燃性能好。PIR 还可利用添加剂(石墨、膦酸盐、甘油和硅酸盐纳米材料等)大幅提高其机械性能、抗压强度和防火性能^[4]。其主要缺点是生产工艺要求苛刻。20 世纪 90 年代起,国内开始在部分工程项目中使用 PIR 泡沫塑料绝热保冷。2007 年,我国已掌握了性能指标达到 CINI 2.7^[5]要求的 PIR

收稿日期:2013-06-03

基金项目:中国石油天然气集团公司重大科技专项 天然气液化关键技术研究(2009-1805E)

作者简介:程 明(1979-),男,四川射洪人,工程师,学士,主要从事石油天然气管道外防腐、绝热及阴极保护的设计与研究工作。

生产技术。

1.3 酚醛(PF)泡沫塑料

PF是以酚醛树脂为主要原料,在发泡剂的作用下产生蜂窝结构并在固化剂的作用下交联、固化而生成的一种硬质、热固性、闭孔发泡体塑料。它耐化学腐蚀性好,温度适应范围广,阻燃性能优异^[6]。其主要缺点是力学强度受密度影响大,低密度制品强度低、性脆,易粉化。石化标准 SH 3010《石油化工设备和管道绝热工程设计规范》将PF推荐使用温度限定在-100~100℃。我国自20世纪80年代开始开发PF泡沫塑料,21世纪初已将其应用于建筑隔墙、冷库、空调系统、石油化工等行业领域。目前,国内外正在研究PF新的发泡方法以改善机械性能并提高热效率^[6]。

1.4 弹性泡沫(FEF)材料

根据国外标准^[7]的定义,FEF是橡胶或包含其他聚合物及添加剂两种混合物制造而成的闭孔弹性泡沫,适用温度-200~175℃。FEF在石化标准 SH 3010中对应为“二烯烃弹性体发泡制品”,推荐使用温度限定为-196~125℃;GB/T 17794《柔性泡沫橡塑绝热制品》中则为“柔性泡沫橡塑”材料,使用温度高于-40℃。FEF具有抗水汽渗透性能优异、施工方便、可有效吸收外力冲击、便于维护、可部分重复利用、防火性能好等优点,其缺点是低温下产品尺寸变化比硬质泡沫塑料大。1954年,欧洲率先发明柔性绝热材料。1994年起,FEF在国外石油化工领域得到规模化应用,2008年进入我国。目前我国已具备FEF生产能力,但其核心技术为国外掌握。

1.5 泡沫玻璃(CG)

根据 ASTM C552^[8]定义,CG是由玻璃加工形成的闭孔结构占主导的硬质泡沫。我国目前对于CG材料,建材行业执行 JC/T 647《泡沫玻璃绝热制品》标准,石化、LNG行业多执行 ASTM C552 标准,后者对产品密度和导热系数要求更高。CG材料充满封闭的玻璃薄膜气孔,具有吸水率小、水蒸气透湿系数极低、不燃烧、线膨胀系数小、安全使用温度范围广等优点,其主要缺点是易脆、耐磨性差、导热系数稍高。1941年,美国匹茨堡康宁公司以碳素作为发泡剂,研制出闭孔结构的泡沫玻璃。我国2007年才掌握了性能指标达到 ASTM C552 标准要求的CG生产技术。

2 LNG管道保冷材料性能和要求

GB/T 22724《液化天然气设备与安装 陆上装置设计》指出,绝热材料的质量和类型应根据易燃度、吸气率、绝热材料对潮气的敏感性、温度梯度、低温性能等几个方面予以考虑。结合国内已建乙烯炼化、LNG气化(液化)厂站的经验,LNG管道保冷材料主要的性能和要求

包括:导热系数、防火性能、吸水及吸湿性能、水蒸气阻隔性、线性收缩、工作温度适应性、机械强度、防止对奥氏体不锈钢应力腐蚀、健康与环保等。

2.1 导热系数

保冷层的厚度取决于保冷材料在介质与环境之间的热传导能力。英国标准 BS 5970 指出,应选用导热系数低的材料,方可达到最佳绝热效果。在给定热损耗的条件下,导热系数低的材料比导热系数高的材料保冷层更薄。

2.2 防火性能

LNG泄漏后会造成可燃气体体积迅速膨胀,LNG工程对厂站内材料的防火性能有较高要求。保冷材料与火相接触,不应引起火势蔓延。GB 50264 对此做出规定:表面温度小于等于100℃时,应选择不低于GB 8624-2006《建筑材料及制品燃烧性能分级》中C级要求的材料,氧指数不小于30%。

在法国进行的绝热材料防火实验中,通过模拟火灾,得到有机绝热材料和保冷结构燃烧试验燃烧后的情景,见图1~2。

2.3 吸水及吸湿性能



图1 有机绝热材料燃烧试验



图2 燃烧试验后的保冷结构

吸水率、吸湿率对保冷材料的密度、导热系数、机械强度影响很大。材料吸附水分后,材料内的空气间隙减少,而常温下水的导热系数是空气导热系数的 24 倍,且水在蒸发时要吸收大量热量,使材料导热系数大大提高。GB/T 22724《液化天然气设备与安装 陆上装置设计》指出,如材料中存在 1%(φ)湿气,保冷效率将降低 20%~30%。

2.4 水蒸气阻隔性

一般采用材料的水蒸气渗透性(即水蒸气透过系数)和水蒸气透过来评价保冷材料的水蒸气阻隔性。若材料的水蒸气阻隔性不佳,进入保冷结构的水分将不断向管道壁积聚,使保冷材料受潮、积水或冻结,降低保冷效果并发生冻结膨胀,导致保冷结构破裂。某石化工厂保冷结构由于水蒸气渗透发生表面结冰,卧式容器和阀门表面结冰情形见图 3~4。

水蒸气的渗透扩散基本遵循 Fick 定律^[9],其中水蒸气分压是渗透扩散的推动力。若低温装置基材表面的水

蒸气分压低于外界环境的水蒸气分压,其压差会促使水蒸气从外界环境向保冷层内部扩散,从而提高保冷材料的导热系数,保冷效果下降。

2.5 线性收缩

设备及管道材质为金属材料,正常工况下,保冷材料的使用温度应在其对应标准推荐的使用温度范围内。但为了避免极端工况下出现过度收缩、脆化及疏松,保冷材料的选取应考虑吹扫及除霜时的偶尔加热和极端最高、最低温度。因此 LNG 管道绝热需尽可能选用线性收缩系数与管材线性收缩系数相近的绝热材料。

2.6 工作温度适应性

英国标准 BS 5970 指出,正常工况下,保冷材料的使用温度应在其对应标准推荐的使用温度范围内。但为了避免极端工况下出现过度收缩、脆化及疏松,保冷材料的选取应考虑吹扫及除霜时的偶尔加热和极端最高、最低温度。LNG 厂站内管道保冷工况多样,通常把运行温度最低的 LNG 管道温度($-162\text{ }^{\circ}\text{C}$)作为保冷材料的使用温度来进行选材。

2.7 机械强度

硬质绝热材料机械强度与加工工艺、材料气孔率有密切关系。材料气孔率大、裂纹多时,抗压强度也低,在施工过程中易因踩踏而被损坏。因此需根据施工条件要求,选择具有一定机械强度的材料。

2.8 防止对奥氏体不锈钢应力腐蚀

LNG 厂站内使用了大量奥氏体不锈钢管道。绝热材料中的无机离子随浸出液转移到金属表面,可能对奥氏体不锈钢产生应力腐蚀。为防止产生这种不利影响,绝热材料的氯化物、氟化物、硅酸根、钠离子的含量应符合 GB/T 17393-2008《覆盖奥氏体不锈钢用绝热材料规范》的规定。

2.9 健康与环保

据第 162 号国际劳工公约《安全使用石棉公约》,绝热材料中不应含有石棉。根据联合国 1987 年通过的《蒙特利尔议定书》的规定,我国于 2010 年 1 月 1 日起全面禁用氟利昂类物质,故有机泡沫绝热材料的制造过程中不应使用氟氯碳化物。

3 绝热设计选材

3.1 LNG 管道保冷材料常用技术标准

工程实践中,材料的产品性能评判应以相关技术规范或标准为基准。工业绝热材料的技术性能要求高于建筑保温材料的要求。与发达国家相比,我国尚未建立齐全的工业绝热材料标准体系,目前工程设计中管道保冷材料的技术性能指标多参照执行国外标准。LNG 管道保冷常用材料技术标准见表 1。



图 3 卧式容器表面结冰



图 4 阀门表面结冰

表1 LNG管道保冷常用材料技术标准

材料名称	国内标准	国外标准	备注
硬质聚氨酯泡沫塑料(PUR)	JC/T 998 GB 50264 SH 3010	CINI 2.7 BS EN 14308	
聚异氰脲酸酯泡沫塑料(PIR)	GB/T 25997 GB 50264 SH 3010	CINI 2.7 ASTM C591 BS EN 14308	CINI2.7 为当前业内普遍认可的材料标准
酚醛泡沫塑料(PF)	GB/T 20974 SH 3010	BS EN 14314 ASTM C1126	
弹性泡沫材料(FEF)	GB/T 17794 GB 50264SH 3010	ASTM C534 BS EN 14304 CINI 2.3	
泡沫玻璃(CG)	GB 50264 JC/T 647 SH 3010	CINI 2.9 ASTM C552 BS EN 14305	ASTM C552 为当前业内普遍认可的材料标准

3.2 保冷选材要求

在 LNG 厂站工程设计中,应具体分析工程实际情况,择优选出合适的保冷材料。其重点包括:

a)保冷材料的最低安全使用温度应低于正常操作时的介质最低温度;

b)保冷材料的防火性能应能满足国家现行标准的要求;

c)优先选用抗水蒸气渗透性能优异的保冷材料,以保证材料性能的长期稳定^[10];

d)保冷材料应具备良好的现场切割或裁剪加工性能,施工便捷,简化现场安装难度^[11];

e)优先选用单位综合经济效益高的材料或制品;

f)减少保冷系统投产后的日常维护工程量,提高材料的再利用程度。

4 展望

节能、绿色、环保是当今技术进步追求的主题。科学技术的迅速进步正大力推动新材料产品的问世,包括新型高效的 LNG 管道保冷材料,如美国 Aspen 开发出的高效、综合性能优异的绝热材料——柔性气凝胶(Flexible Aerogel)。该材料导热系数很低,长期稳定性优良,防水透气性俱佳,为不燃无机材料,同时也具备柔韧性,现场安装方便快捷。

合理选用保冷材料是 LNG 管道绝热设计的前提,低温管道保冷效果直接影响到 LNG 项目的总体能耗。多年来,LNG 管道保冷绝热技术及产品被发达国家垄断,国内工程的核心技术依赖进口。随着我国 LNG 工程的大量兴建,技术国产化的需求日趋迫切。2012 年开工建设的“湖北 500×10⁴ m³/d LNG 工厂国产化示范工程”,已拉开了国内 LNG 项目关键技术国产化的序幕,将迅速提升

LNG 管道保冷材料的国产化程度。

参考文献:

- [1] National Mechanical Insulation Committee (NMIC). Mechanical Insulation Design Guide – Materials and Systems [M]. Washington: National Institute of Building Sciences, 2013.
- [2] 翟俊红,田德永. 浅谈 LNG 管道保冷材料的发展和应用[J]. 氮肥技术, 2011, 32(6): 48–50.
Zhai Junhong, Tian Deyong. Development and Application of LNG Piping Cold Insulation Materials [J]. Dan Fei Ji Shu, 2011, 32(6): 48–50.
- [3] 丁雪佳,薛海蛟,李洪波,等. 硬质聚氨酯泡沫塑料研究进展[J]. 化工进展, 2009, 28(2): 278–282.
Ding Xuejia, Xue Haijiao, Li Hongbo, et al. Review of Rigid Polyurethane Foam Plastic [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2009, 28(2): 278–282.
- [4] Hu Xiangming, Wang Deming, Wang Shuailing. Synergistic Effects of Expandable Graphite and Dimethyl Methyl Phosphonate on The Mechanical Properties, Fire Behavior, and Thermal Stability of A Polyisocyanurate–Polyurethane Foam [J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2013, 23(1): 13–20.
- [5] Committee Insulation Netherlands Industry (CINI). Insulation for Industries [S]. Netherlands, 2010.
- [6] Song A Seung, Hyun Ju Oh, Bu Gi Kim, et al. Novel Foaming Methods to Fabricate Activated Carbon Reinforced Microcellular Phenolic Foams [J]. Composites Science and Technology, 2013, 76: 45–51.
- [7] BS EN 14304:2009, Thermal Insulation Products for Building Equipment and Industrial Installations – Factory Made Flexible Elastomeric Foam (FEF) Products – Specification [S].
- [8] ASTM C552 – 12, Standard Specification for Cellular Glass Thermal Insulation [S].
- [9] 贾琦月,刘志伟. LNG 项目的隔热结构设计[J]. 化工设备与管道, 2009, 46(3): 67–69.
Jia Qiyue, Liu Zhiwei. Design of Insulation Structure in LNG Project [J]. Process Equipment & Piping, 2009, 46(3): 67–69.
- [10] 冯若飞,李学新,焦光伟,等. 液化天然气长输管道输送技术[J]. 天然气与石油, 2012, 30(2): 8–10.
Feng Ruofei, Li Xuexin, Jiao Guangwei, et al. Technology for Long-distance Liquefied Natural Gas Pipeline Transportation [J]. Natural Gas and Oil, 2012, 30(2): 8–10.
- [11] 贺耿,王正,包光磊. LNG 槽车装车系统的技术特点[J]. 天然气与石油, 2012, 30(4): 11–14.
He Geng, Wang Zheng, Bao Guanglei. Technical Characteristic of LNG Truck Loading System [J]. Natural Gas and Oil, 2012, 30(4): 11–14.