

LNG储罐珠光砂绝热层失效机理及修复技术研究

杨欣杰

天津英康科技股份有限公司 天津 300110

摘要：液化天然气（LNG）作为清洁能源在全球能源结构转型中占据重要地位，其安全高效储存依赖于低温储罐的绝热性能。珠光砂（膨胀珍珠岩）因其优异的绝热特性、化学稳定性和经济性，被广泛应用于LNG储罐粉末绝热系统中。然而，在长期服役过程中，珠光砂绝热层可能因多种因素发生性能退化甚至失效，严重影响储罐的安全运行与经济性。本文系统阐述了LNG储罐珠光砂绝热层的结构特点与工作原理，深入剖析了其失效机理，包括物理沉降、吸湿劣化、保护气体环境劣化及机械损伤等，并在此基础上，全面梳理和评述了当前主流的修复与维护技术，如原位补充填充、整体更换工艺以及新型憎水改性材料的应用。研究表明，珠光砂绝热层的失效是一个多因素耦合作用下的复杂过程，其有效防护与修复需结合精准的状态监测、科学的维护策略以及材料与工艺的持续创新。本研究旨在为LNG储罐的安全运维提供理论参考和技术支撑。

关键词：LNG储罐；珠光砂；绝热层；失效机理；修复技术；粉末绝热

引言

在全球能源清洁化进程中，液化天然气（LNG）因其高能量密度与低排放特性，成为关键能源载体。LNG需在-162℃超低温下储存运输，对储罐绝热性能要求极高。作为核心基础设施，LNG储罐的绝热效果直接影响日蒸发率（BOG），关乎效率、成本与安全。绝热失效可致热量侵入、压力骤升，引发泄漏甚至爆炸风险。粉末绝热技术因结构简单、性能可靠、成本适中，广泛用于27³的超大型型LNG储罐。其原理是在双层金属壁夹层中填充珠光砂并充入氮气作为保护气体。珠光砂为多孔、轻质、化学稳定且导热系数低的绝热材料，是实现高效保温的关键。然而，在数十年服役期内，珠光砂在深冷、氮气冲压及振动等复杂环境下会逐渐发生物理或化学退化，即“失效”。该过程具有隐蔽性和累积性，初期难以察觉，却持续削弱绝热性能，最终威胁安全或造成经济损失。因此，深入研究珠光砂失效机理，并发展高效修复与维护技术，对保障LNG设施本质安全、延长寿命、降低全生命周期成本具有重要理论与现实意义。

1 LNG 储罐珠光砂绝热层概述

1.1 LNG储罐基本结构

对于大型LNG储罐，其典型结构为外层钢筋混凝土全包容式。外罐为预应力混凝土结构，主要起承重和次层包容作用；内罐直接接触LNG，通常选用具有良好低温韧性的9%镍钢制造，并采用悬挂式（悬浮顶）设计，以承受-162℃的极端低温。内外罐之间形成一个封闭的环形夹层空间，此即绝热层所在区域。除了罐壁，储罐的底部和顶部同样需要绝热处理。罐底通常采用泡沫玻璃

砖作为承重和绝热材料，因其具有极高的抗压强度和优异的绝热性能。罐顶则根据设计不同，可能采用吊顶式结构，其上铺设玻璃棉毡等柔性绝热材料。整个绝热系统的设计目标是最大限度地阻断来自外界环境的热量通过传导、对流和辐射三种方式传递至内罐。

1.2 珠光砂的物理化学特性

珠光砂，学名膨胀珍珠岩，是一种无机非金属矿物材料。其制备过程是将精选的珍珠岩矿砂在垂直立窑中以天然气为热源，于700~1000℃的高温下快速加热。矿砂内部的结晶水瞬间汽化，产生巨大的内应力，使颗粒体积膨胀4~20倍，形成内部充满无数微小、封闭气孔的白色球状颗粒。这种独特的微观结构赋予了它一系列优良的物理化学特性^[1]。其最核心的优势在于极低的导热系数，在常压下约为0.045~0.07 W/(m·K)，而在<v>*<v>氮气冲压<v>*<v>环境下可保持较低水平。此外，其主要成分为SiO₂、Al₂O₃等，化学性质稳定，呈惰性，不与LNG或其他常见工业介质发生化学反应，且耐酸碱腐蚀。珠光砂还具备不燃、无毒、无味的特性，符合工业安全与环保要求。其质轻、多孔的特性使得堆积密度小，通常为45~80 kg/m³，有效减轻了对储罐结构的负荷。同时，良好的流动性和充填性使其便于通过风送等方式均匀填充到复杂的夹层空间中，减少绝热死角。然而，珠光砂也存在一个显著的缺点，即高吸湿性。其多孔结构极易吸附空气中的水分，一旦含水率增加，其导热系数会急剧上升，严重损害绝热性能。

1.3 粉末绝热的工作原理

粉末绝热技术的绝热效果主要依赖于珠光砂材料本

身的低导热特性和氮气冲压保护环境。在夹层中充入氮气后,由于氮气的导热系数远低于空气,且能有效隔绝氧气和湿气,从而抑制了由气体引起的对流换热和大部分气体导热。与此同时,珠光砂颗粒本身是热的不良导体,且颗粒间为点接触,形成了曲折、细长的固相传热路径,有效降低了固相导热。虽然在低温下辐射换热占比不大,但在夹层中有时会加入少量红外遮光剂(如炭黑),以进一步吸收和散射热辐射。通过上述三重机制——抑制气体传热、降低固相导热和削弱辐射换热,粉末绝热系统能够将外部热量侵入率降至最低,确保LNG储罐的气静态蒸发率控制在合理范围内,满足安全经济运行的要求。

2 珠光砂绝热层的主要失效机理

2.1 物理沉降与压实

这是珠光砂绝热层最常见的失效形式。尽管珠光砂颗粒具有一定的刚性,但在长期重力作用下,尤其是在储罐经历反复的充装、排空循环所引起的轻微振动和热胀冷缩应力作用下,松散堆积的珠光砂颗粒会发生缓慢的位移和重新排列。较小的颗粒会填充到较大颗粒之间的空隙中,导致整体堆积密度增加,宏观上表现为珠光砂层的沉降。沉降的直接后果是在储罐夹层的上部形成空腔。由于氮气的导热系数远高于理想绝热状态下的珠光砂,这个空腔就成为一个显著的热桥,使得该区域的热流密度急剧增加,局部绝热性能严重下降。同时,下部的珠光砂层因被压实,其内部孔隙率减小,固相导热路径变短,导热系数也随之增大。这种上部空腔、下部压实的非均匀分布状态,极大地破坏了绝热层的整体性和有效性。

2.2 吸湿劣化

珠光砂的多孔结构使其具有很强的亲水性。一旦储罐夹层的密封系统出现微小的泄漏,潮湿的空气便会渗入夹层。珠光砂迅速吸附水分,其内部孔隙被液态水填充。水的导热系数(约 $0.6 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$)是干燥空气(约 $0.026 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$)的二十多倍,更是远高于氮气冲压环境下珠光砂的有效导热系数。因此,即使是很低的含水率,也会导致珠光砂的表观导热系数成倍甚至数十倍地增长^[2]。此外,水分的存在还可能加速金属罐壁的腐蚀,进一步威胁储罐的结构完整性。吸湿劣化是一个不可逆或难以完全逆转的过程,对绝热性能的损害是致命的。

2.3 保护气体环境劣化

粉末绝热系统效能高度依赖于稳定的氮气冲压保护环境。任何导致夹层内氮气纯度下降或压力异常的因素都会直接削弱绝热效果。保护气体环境劣化的根本原

因通常是密封失效。储罐夹层的密封是一个复杂的系统工程,涉及大量的焊缝、法兰连接、仪表接口、填充口等。任何一个环节的密封材料老化、安装不当或受到机械损伤,都可能导致空气渗入或氮气泄漏。此外,构成储罐和绝热层的材料可能会缓慢释放出其他气体,影响氮气氛围的纯净度。随着时间推移,如果未能及时补充或置换氮气,夹层内的气体成分将发生变化,导致绝热性能下降。

2.4 机械损伤与异物侵入

在储罐的制造、运输、安装或后期维护过程中,如果操作不当,可能会对珠光砂层造成机械损伤。例如,在通过填充口注入珠光砂时,若风压过大或操作粗暴,可能冲击并破坏内罐外壁的防辐射铝箔或其它保护层^[3]。此外,如果填充的珠光砂中含有杂质、大块颗粒或在填充过程中有异物落入夹层,这些硬物在储罐运行中可能因振动而磨损内罐壁,形成潜在的泄漏点。虽然这种情况相对少见,但一旦发生,后果严重。

3 珠光砂绝热层修复技术

3.1 原位补充填充技术

该技术主要适用于因物理沉降导致上部出现空腔的情况。其核心思想是无需完全拆解储罐,而是利用储罐设计时预留的珠光砂填充口,向夹层上部的空腔区域补充新的、干燥的珠光砂。工艺流程通常始于对储罐状态的精确评估,通过测量BOG率、夹层氮气压力及纯度以及红外热成像等手段,确认失效模式为沉降并定位空腔。随后,将待填充的珠光砂在干燥环境中充分烘干,并通过筛分确保粒度均匀。接着,采用专用的风送设备,将干燥的珠光砂通过填充管路缓慢、均匀地注入到目标区域,操作中需密切监控填充压力和流量,避免对内罐造成冲击。填充完成后,对填充口进行严格的密封焊接,并对夹层重新充入氮气至规定压力和纯度。该方法的优点是成本低、工期短、对生产影响小。但其局限性在于无法解决吸湿或保护气体环境劣化的根本问题,且难以保证新旧珠光砂混合后的均匀性。

3.2 整体更换工艺

当珠光砂绝热层出现严重吸湿、大面积板结、氮气冲压系统无法修复或怀疑存在机械损伤时,必须采取更为彻底的措施——整体更换珠光砂。这一工艺极为复杂,首先需要将罐内LNG完全排出,并用惰性气体进行彻底置换以确保作业安全。然后切割储罐顶部或侧壁的特定部位,打开夹层。将受潮、板结的旧珠光砂全部清理干净,这是一个劳动密集型且粉尘污染严重的过程。之后,对暴露出来的内罐外壁进行全面的无损检测,检

查是否有腐蚀、磨损或变形,并进行必要的修复。在严格控制的干燥环境下,将全新的、高质量的珠光砂(优选憎水型)均匀填充至夹层^[4]。最后,将开罐部位复原并焊接密封,然后对整个夹层进行氮气置换和检漏,直至达到设计要求的氮气冲压环境标准。整体更换工艺能从根本上解决问题,恢复储罐的最佳绝热性能。但其缺点也非常明显:成本极其高昂、工期漫长、安全风险高、对正常生产造成重大中断。因此,通常只在万不得已的情况下采用。

3.3 新型憎水珠光砂的应用

这是一种预防性和材料升级的策略。通过对普通珠光砂进行憎水改性处理,可以从根本上提升其抵抗环境湿气的能力。常见的憎水处理方法是在珠光砂颗粒表面喷涂一层有机硅类憎水剂,在高温下固化后形成一层致密的憎水膜。憎水珠光砂的优势在于,即使夹层密封出现微小泄漏,水分也难以被珠光砂吸附,从而有效延缓了因吸湿导致的绝热性能劣化,并提高了珠光砂在潮湿环境下的储存和施工稳定性。在新储罐制造或旧储罐大修时,采用憎水珠光砂替代普通珠光砂,是一种性价比很高的长效解决方案。它虽不能防止沉降和保护气体环境劣化,但能显著增强绝热层的鲁棒性,延长其有效服役寿命。

4 结语

本文系统地探讨了LNG储罐珠光砂绝热层的失效机理及修复技术。研究表明,珠光砂绝热层的失效是一个由物理沉降、吸湿劣化、保护气体环境劣化及机械损伤

等多种因素交织作用的复杂过程。其中,沉降和吸湿是最为普遍和关键的失效模式。针对不同的失效情况,应采取相应的修复策略。原位补充填充技术适用于沉降导致的局部空腔,具有经济高效的优点;整体更换工艺则是应对严重失效的终极手段,虽成本高昂但效果彻底;而推广应用憎水珠光砂,则是从材料源头提升绝热系统可靠性的前瞻性举措。未来的研究方向应聚焦于以下几个方面:第一,发展更精准、更智能的在线状态监测与诊断技术,如基于分布式光纤传感的温度场重构、高灵敏度的氮气压力/湿度传感器网络等,以实现绝热层健康状况的实时感知和早期预警。第二,深化对珠光砂在极端服役环境下长期老化行为的基础研究,建立其性能退化的预测模型。第三,探索新型复合绝热材料或混合绝热结构,例如将珠光砂与气凝胶、纳米多孔材料等结合,以期获得更优的综合性能。通过多学科交叉融合与技术创新,必将进一步提升LNG储运设施的安全性与经济性,为国家能源战略的顺利实施保驾护航。

参考文献

- [1]黄亮,黄勍淼,仲继红,等.LNG三壁金属全容罐的3种绝热结构对比[J].煤气与热力,2021,41(09):16-18+45.
- [2]丁昌,孙浩,王群龙,等.立式低温储罐真空性能研究[J].低温与超导,2023,51(10):75-80.
- [3]郭高峰,杨燕,周州,等.大型空分设备冷箱基础用珠光砂混凝土配合比试验研究[J].河南建材,2020,(02):41-42.
- [4]张蓬菲,王康,刘志乾,等.LNG储罐绝热系统设计与经济性分析[J].机电信息,2023,(09):66-69.