

珠光砂填充工艺对LNG储罐绝热性能的影响分析

杨欣杰

天津辉锐激光科技有限公司 天津 300192

摘要: 珠光砂填充工艺是影响LNG储罐绝热性能的关键环节,本文分析了珠光砂材料特性与绝热机理,阐述了绝热系统构成及填充技术要求,识别填充速度、分层厚度等关键工艺参数,探讨填充密度、均匀性、含水率及沉降效应对绝热性能的影响机理。填充密度存在最佳区间,过低或过高均劣化绝热效果;局部空洞和颗粒偏析造成温度场不均匀;含水率超标显著放大导热系数;长期沉降导致上部空腔形成。本文为珠光砂填充工艺优化与质量控制提供了理论依据。

关键词: 珠光砂填充工艺; LNG 储罐; 绝热性能

引言: LNG储罐的绝热性能直接决定蒸发率与运行安全。珠光砂因密度低、导热系数小、化学稳定等优点,被广泛用作大型LNG全容罐环形空间的填充绝热材料。然而,珠光砂填充并非简单的“倒入”过程,填充密度、均匀性、含水率等工艺参数均会显著影响绝热效果。实际工程中,因填充工艺不当导致的局部过热、蒸发率超标等问题时有发生。本文从珠光砂材料特性出发,系统分析填充工艺对绝热性能的影响机理,为LNG储罐设计施工与运维提供技术参考。

1 珠光砂材料特性与绝热机理

1.1 珠光砂的制备与基本特性

珠光砂是由酸性火山玻璃质熔岩(珍珠岩)经破碎、分级、高温焙烧膨胀而成的多孔颗粒材料。其制备过程为:珍珠岩矿石经破碎筛分至一定粒度后,在800~1000℃高温下瞬时加热,矿石中残留的2%~6%结合水迅速汽化,使软化状态的玻璃质体积骤然膨胀至原来10~30倍,形成内部充满封闭微孔的空心颗粒结构。珠光砂的基本物理特性包括:堆积密度一般为30~150 kg/m³,导热系数在0.022~0.060 W/(m·K)之间,莫氏硬度约5~6,熔点范围1300~1400℃。颗粒形态呈不规则多角形状,粒径主要集中在0.15-1.18mm区间。珠光砂还具有化学惰性强、不燃、无毒、吸湿性较低等优点,能够耐受LNG的超低温环境(-162℃)而不发生脆裂或性能衰减,因此成为LNG储罐绝热填充的首选材料。

1.2 珠光砂的绝热机理

珠光砂的绝热性能源于其独特的“固-气”复合多孔结构。传热过程涉及三种机制的耦合作用:固相导热、气相导热和辐射传热。固相导热通过颗粒之间的接触点传递,由于颗粒为薄壁空心结构,固体路径呈高度曲折状,有效导热路径大幅延长,热阻显著增加。气相导热

发生在颗粒内部封闭孔隙及颗粒间隙中,孔隙内气体分子在有限空间内运动受限,当孔隙尺寸接近或小于气体分子平均自由程时,气体导热被有效抑制,这一现象在真空或减压条件下更为显著^[1]。辐射传热在常温常压下贡献较小,但当温度升高或真空度提高时,辐射占比上升。总体而言,珠光砂的低导热系数主要来源于三个因素:高孔隙率(可超过90%)大幅减少了固体传热路径;微米级封闭孔隙有效限制了气体对流;多层颗粒堆叠形成的多次折射阻碍了辐射传播。三者协同作用使珠光砂成为优异的绝热材料。

1.3 影响珠光砂绝热性能的关键因素

珠光砂绝热性能受多种因素制约,首先是堆积密度:最佳范围内固相与气相导热达到平衡;密度过低则气体对流增强,过高则固体传热路径增多,均导致导热系数上升。其次是粒径级配:合理级配可使小颗粒填充大颗粒间隙,减少内部空隙,但需避免过度密实。第三是含水率:珠光砂具有吸湿性,水分导热系数(约0.6 W/(m·K))远高于空气(约0.026 W/(m·K)),且低温结冰后进一步恶化,严重劣化绝热效果。第四是环境压力:压力降低时气相导热被抑制,绝热性能提升;反之下降。第五是温度:低温下固体导热系数降低,但收缩可能导致颗粒间隙增大,需综合评估。识别并控制上述因素是优化填充工艺的基础。

2 LNG 储罐结构与绝热系统设计

2.1 LNG储罐的结构类型

LNG储罐按安全防护等级分为单容罐、双容罐和全容罐三类。单容罐仅有单一金属内罐,外设防火堤,发生泄漏时液体被堤坝围堵,安全性最低,主要用于中小型储罐。双容罐在内罐基础上增设混凝土外壁,内罐泄漏时外壁可临时盛装液体,安全性有所提升。全容罐是

目前大型LNG接收站的主流选择,由9%镍钢内罐、预应力混凝土外罐及二者之间的环形绝热空间构成,即使内罐完全失效,外罐仍能独立盛装全部LNG并保持气密性。全容罐的典型规格从5万立方米到27万立方米不等,高度约30~50米。此外,按建造方式还可分为现场浇筑式和金属薄膜式,其中金属薄膜式主容器采用薄层金属膜,预制绝热板铺设在混凝土外罐内壁上,适用于特定陆罐场景。无论何种类型,绝热系统都是保障安全运行、控制蒸发率的核心组成部分。

2.2 绝热系统的构成与功能

大型LNG全容罐的绝热系统由底部绝热层、环形空间填充层和吊顶绝热层三大部分构成。底部绝热层位于内罐底板与混凝土承台之间,通常采用多层泡沫玻璃砖错缝堆叠,并用沥青或树脂粘接密封,承担支撑内罐重量和阻断基础冷量传导的双重功能,厚度一般为300~600 mm。环形空间是内罐外壁与混凝土外罐内壁之间的径向间隙,宽度约800~1200 mm,全部填充珠光砂,通过重力或气力输送方式装入,压实后形成绝热屏障,阻断径向热流。顶部吊顶绝热层悬挂在内罐顶部的穹顶下方,由玻璃棉或弹性毡铺设在金属吊顶板上方构成,防止顶部热量通过气相空间传入罐内,厚度约400~600 mm。绝热系统还包括各种贯穿件处的局部绝热处理,如泵柱管、仪表管、锚固带等部位的绝热密封设计。三部分绝热层协同工作,将储罐总体日蒸发率控制在0.05%~0.08%的设计范围内。

2.3 珠光砂填充的技术要求

珠光砂填充是环形空间绝热施工的核心工序,现行国家标准和行业规范对其提出了明确技术要求。含水率是最关键的控制指标,要求填充前珠光砂的含水质量分数不大于0.5%,填充过程应避开雨天或高湿度环境,填充完成后环形空间应进行热氮气干燥吹扫。填充密度方面,设计目标值通常为50~70 kg/m³,实际填充后需通过密度检测确认各区段密实度偏差控制在±10%以内。填充过程中需采取分层填充、机械振捣措施,每层填充厚度不超过1.5 m,并采用振动棒或附着式振动器压实,防止局部空洞形成^[2]。除尘要求方面,珠光砂含有一定量细微粉尘,填充作业时应设置除尘装置,避免粉尘堵塞通气通道或污染作业环境。竣工后需进行绝热性能验证,通常采用环形空间多点温度监测或整体蒸发率测试,确保填充质量满足设计要求。这些技术要求是保障填充工艺质量、实现设计绝热性能的基础规范。

3 珠光砂填充工艺参数分析

3.1 填充工艺的主要环节

珠光砂填充施工可分为四个主要环节。第一,材料入场与检验环节。珠光砂由生产厂以编织袋或散装罐车运至现场,需抽样检测堆积密度、含水率、粒径分布及导热系数,合格后方可入库,散装材料还需通过气力输送系统进入现场筒仓存储。第二,干燥处理环节。珠光砂在运输和存储过程中易吸湿,填充前需进行热风干燥,通常采用移动式干燥机,控制热风温度100~120℃,处理至含水率小于0.5%方可使用。第三,填充作业环节。干燥后的珠光砂通过重力溜管或气力输送管道,从储罐顶部环形空间入口注入,自上而下自然下落填充。填充速度通过阀门开度控制,落料高度随填充面逐步提升,每填充一定厚度后进行分层压实。第四,收尾与封闭环节。当珠光砂填充至设计标高(通常低于拱顶底部约500 mm),振捣密实后安装顶部弹性毡封闭层和防沉降板,最终密封环形空间顶部。各环节衔接紧密,任一环节控制不当均可能影响最终绝热效果。

3.2 关键工艺参数识别

填充工艺中存在多个关键参数,需精确识别与控制。填充速度与落料高度是第一类关键参数。填充速度过快时,颗粒在空中及落地时的高速撞击易导致空心珠光砂破裂,细粉含量增加;落料高度过大(超过10 m)同样会加剧破损率。适宜的控制指标为:填充速度1~3 t/h,落料高度不超过5 m,必要时可采用分段布料管。分层填充厚度与振动参数是第二类参数。每层堆积厚度控制在1.0~1.5 m,过厚则底部压实不足,过薄则工效降低。振动频率建议为50~100 Hz,振幅0.5~1.0 mm,振动时间20~30秒,以珠光砂表面不再显著下沉为准。环境条件是第三类参数。填充作业环境温度宜为5~35℃,相对湿度不超过80%,遇大风扬尘、雨天或相对湿度过高时应暂停作业。材料温度与罐体温度的温差应控制在10℃以内,避免温差引起的罐体应力或结露。这些参数之间存在耦合关系,需要综合考虑^[3]。

3.3 工艺缺陷的类型与成因

珠光砂填充工艺缺陷可分为四大类型。第一类为填充不均匀,包括颗粒偏析和局部空洞。颗粒偏析是指细颗粒集中在某区域、粗颗粒集中在另一区域的现象,成因是落料高度过大或填充速度过快导致颗粒按粒径分选沉积。局部空洞则是填充死角(如管道贯穿件附近)未得到有效填充,或振动压实不足所致。第二类为填充密度不足或超限。密度不足时颗粒间隙过大,气体对流增强;密度超限则颗粒过度挤压甚至破裂,固相传热增加。成因包括填料计量不准、振动参数不当或沉降预留空间计算错误。第三类为含水率超标,成因包括入场检

验不严、干燥处理不彻底、填充过程遇湿或存储期过长吸湿。水分对绝热性能的劣化作用极其显著,且低温环境下结冰后可能造成体积膨胀破坏结构。第四类为粉尘聚集与堵塞。珠光砂中固有的细微粉尘在填充过程中逸散,可能堵塞环形空间底部的通气筛网或压力平衡管道,影响后续干燥吹扫和压力平衡。上述缺陷需通过工艺优化和质量控制予以规避。

4 填充工艺对绝热性能影响机理分析

4.1 填充密度对导热系数的影响

填充密度与导热系数呈“U型”曲线关系,存在最佳区间。密度过低($< 40 \text{ kg/m}^3$)时,颗粒间隙过大导致气体通道贯通,对流传热增强,总导热系数偏高。密度升至 $50\sim 70 \text{ kg/m}^3$ 最佳区间时,颗粒堆积紧密,气体被分割为微小孔隙而运动受限,同时固体接触点虽增但路径曲折,二者平衡使导热系数降至最低($< 0.035 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$)。密度超标($> 80 \text{ kg/m}^3$)则颗粒挤压破裂,空心结构破坏,固相与气相导热双双反弹。因此控制原则是“适度密实”,不足可补填加强振捣,超限则难以补救。

4.2 填充均匀性对温度场分布的影响

填充均匀性直接决定温度场是否平稳。理想条件下热流沿径向连续梯度递减,等温面呈同轴圆柱面。一旦出现局部空洞,该区域热阻锐减,形成 $2\sim 5^\circ\text{C}$ 升温的“热点”,长期运行可能诱发结构疲劳。颗粒偏析同样危险:粗颗粒区间隙大、导热高,细颗粒区过度密实、固相导热增。贯穿件、焊缝等突变处更易形成热桥。环形空间多点温度监测中,若测点温差超过 5°C ,即提示填充不均。解决之道在于分层压实、优化填充路径与振动参数。

4.3 含水率对绝热性能的劣化

水分是珠光砂绝热的最大威胁,其破坏分三个层次。物理上,水(导热系数 0.6)取代空气(0.026), 1% 含水率即可使导热系数翻倍;低温结冰后(2.2)恶化更剧。化学上,水分与可溶性盐反应腐蚀颗粒,产生细粉并可能结块堵塞孔隙。工程上,高含水率珠光砂低温膨

胀会挤压罐壁,且水分一旦进入环形空间极难排出,热氮干燥也难以根除深层吸附水。因此含水率控制必须贯穿生产、储运、填充全链条,入场检验、干燥处理、湿度监测缺一不可^[4]。

4.4 沉降效应对长期绝热性能的影响

珠光砂填充后呈松散堆积,运行中承受两类动载荷:温度交变载荷(充排液引起的温差变化)和振动载荷(地震、设备振动、输送泵机械振动)。长期作用下,颗粒逐渐向下迁移密实,上部形成空腔,绝热高度降低。初始填充越密实,后期间隙越小,沉降越有限;反之沉降显著。运行 $5\sim 10$ 年后,上部空腔可达 $0.5\sim 2.0$ 米,该区域依赖静止空气绝热,大空间内容易产生自然对流,效果远不及珠光砂。设计中通常预留 $5\%\sim 10\%$ 沉降高度,部分储罐设顶部补填口,运行中通过监测上部温度异常判断沉降程度并适时补充。

结束语

本文系统分析了珠光砂填充工艺对LNG储罐绝热性能的影响机理。研究表明,填充密度、均匀性、含水率及沉降效应是决定绝热性能的核心因素:填充密度存在最佳区间,偏离该区间均会劣化绝热效果;局部空洞与颗粒偏析导致温度场畸变;含水率超标会大幅提高导热系数并引发低温风险;长期沉降造成上部空腔,削弱绝热能力。未来可进一步开展实验验证与数值仿真,开发智能化填充监测与沉降补偿技术,提升LNG储罐长期运行可靠性。

参考文献

- [1]吴福龙,李苏澄. LNG储罐低温绝热性能的研究[J]. 中国设备工程,2023(3):103-106.
- [2]刘中华. 液化天然气储罐绝热材料性能优化与应用研究[J]. 工程建设与发展,2025,4(4):19-21.
- [3]张蓬菲,王康,刘志乾,等. LNG储罐绝热系统设计及经济性分析[J]. 机电信息,2023(9):66-69.
- [4]张正雄. LNG三壁金属全容储罐绝热施工技术应用分析[J]. 石油化工建设,2023,45(4):25-28.