

低压拱顶罐施工质量控制关键点分析

周强勇

九江检安石化工程有限公司 江西 九江 332000

摘要：低压拱顶罐为石化储运常用微正压设备，运行压力6-20kPa，对密封性、结构形变与安装精度要求极高。本文结合国标施工验收规范，阐述储罐结构特性与施工流程，剖析密封检漏、拱顶焊接变形、基础不均匀沉降、低压气密试验四大质控难点，梳理各分项施工管控要点，总结施工通病成因与防治措施，搭建全过程三级质控体系，并依托工程实例验证方案有效性，可为同类低压储罐标准化施工、质量管控提供技术参考。

关键词：低压拱顶罐；施工质量控制；关键点

引言：低压拱顶罐长期处于循环微正压工况，常规常压储罐施工工艺适配性较差，易出现焊缝微渗漏、罐体垂直度超标、拱顶失稳、基础沉降超限等问题，直接威胁设备运行安全。当前工程施工常忽略低压工况专项质控要求，质量管控体系不完善。为此本文立足储罐全施工周期，结合行业施工标准，拆解工序质控要点，优化通病防治与管理策略，解决现场施工痛点，提升储罐施工质量与长期服役稳定性。

1 低压拱顶罐施工基础理论与质控核心难点

1.1 低压拱顶罐结构特征与施工标准依据

(1) 低压拱顶罐罐体、拱顶、承压附属结构构造特点：罐体为圆柱形筒壁板焊接结构，拱顶采用椭球或球形薄壳瓜皮板组焊而成，承压附属结构包括呼吸阀、安全泄压装置、人孔及接管法兰等，共同构成微正压（通常6~20kPa）运行边界。(2) 低压工况罐体受力、形变核心原理：内压作用下罐壁产生环向拉应力与轴向拉应力，拱顶承受径向膜应力及边缘弯矩；升压与卸压循环易导致罐壁屈曲、拱顶局部失稳及焊缝附加疲劳应力，形变集中在罐壁与拱顶连接转角处。(3) 现行国家施工验收规范与质量验收标准：主要依据GB50128《立式圆筒形钢制焊接储罐施工规范》、NB/T47003.1《钢制焊接压力容器》及SH/T3507《石油化工钢结构工程施工及验收规范》，低压部分需补充气密性试验与微量泄漏检测要求。

1.2 低压拱顶罐整体施工工艺流程

(1) 施工前期筹备与基础施工流程：完成图纸会审、焊接工艺评定、材料复验；基础施工包括测量放线、基坑开挖、环墙钢筋绑扎与混凝土浇筑，预埋地脚螺栓并分层压实沉降观测点。(2) 罐体预制、现场组装、焊接施工流程：底板、壁板、拱顶瓜皮板工厂预制并开坡口；现场采用倒装法或水浮法组装，壁板纵缝与

环缝以自动焊为主，角焊缝手工焊，严格控制焊接顺序与热输入。(3) 拱顶安装、试压防腐与竣工验收流程：拱顶板对称组对并点焊固定，焊接后做充水试压、正压气密试验，合格后进行喷砂除锈、防腐涂装，最终整理交工资料组织验收^[1]。

1.3 施工质量控制核心难点剖析

(1) 低压工况下罐体密封性控制难点：低压时气体分子易穿透微小缝隙，焊缝气孔、未熔合、法兰垫片压缩不均等均造成泄漏，常规煤油检漏灵敏度不足，需采用真空箱法或氦质谱检漏。(2) 拱顶瓜皮板组装变形、焊接形变管控难点：瓜皮板曲率偏差导致错边和局部鼓包，焊接热输入不均引起波浪变形与角变形，须采用反变形胎架、分段退焊、刚性固定及焊后锤击消除残余应力。(3) 罐基础沉降、罐体同轴度精度控制难点：不均匀沉降使罐壁椭圆度超标，同轴度偏差影响拱顶与罐壁对接密封；基础施工须分层压实并设置永久沉降观测点，组装过程中用经纬仪实时校准垂直度。(4) 低压气密试验质量管控难点：升压速度需严格控制在0.1~0.2kPa/min，逐级保压并涂抹检漏液，避免超压导致拱顶失稳；试验温度与压力须做修正计算，安全泄放装置整定值需现场复核。

2 低压拱顶罐各分项工程施工质量控制关键点

2.1 前期准备与罐基础施工质量控制

(1) 原材料进场检验、钢材与焊材质量质控要点：钢材须查验质量证明书及炉批号，逐张进行外观、厚度负偏差及冲击韧性复验；焊材核对型号、规格及烘干记录，低氢型焊条烘干后应保温存放，严禁使用药皮破损或受潮焊条，从源头消除氢致裂纹与气孔隐患。(2) 施工测量放线、标高定位精度控制：建立三级测量控制网，基础中心线与方位线闭合差 $\leq \pm 3\text{mm}$ ，基准标高采用永久水准点引测；罐底中心标高偏差控制在 $\pm 5\text{mm}$

内,地脚螺栓相对位置偏差 $\leq 2\text{mm}$,确保后续罐体同轴度满足设计要求^[2]。(3)环墙基础、沥青砂垫层施工质量管控:环墙混凝土抗压强度、抗渗等级及钢筋保护层厚度须100%符合设计,顶面平整度用2m靠尺检查间隙 $\leq 3\text{mm}$;沥青砂垫层分层压实,压实系数 ≥ 0.95 ,表面平整无裂缝,中心坡度符合排水要求,边缘与环墙交接密实无空隙。(4)基础沉降预监测与隐患预处理:基础施工前后及罐体安装前分别设置沉降观测标,预压阶段每级加载后沉降速率 $\leq 5\text{mm}/24\text{h}$;若发现不均匀沉降差 $\geq 20\text{mm}$,应查明原因并采取注浆加固或调整垫层厚度,处理完成后方可进行后续安装。

2.2 罐体预制与现场组装质量控制

(1)罐壁板、罐底板、拱顶瓜皮板下料预制质控:采用数控或半自动切割,壁板长度偏差 $\pm 1\text{mm}$,对角线偏差 $\leq 2\text{mm}$,坡口角度及钝边按焊接工艺卡控制;瓜皮板应用曲样板检查弧长方向间隙 $\leq 2\text{mm}$,预制后标记板位编号,防止混用。(2)罐底板铺设、搭接尺寸与平整度控制:底板中心与基础中心重合,搭接宽度允许偏差 $\pm 5\text{mm}$,搭接缝间隙 $\leq 1\text{mm}$;铺设后局部凹凸度用直尺检查 $\leq 10\text{mm}$,边缘板对接缝垫板必须贴紧无空隙,罐底边缘板外缘整齐。(3)罐壁板组对、垂直度、环缝间隙精度管控:倒装法组装时每带板立缝错边量 $\leq 1\text{mm}$,环缝间隙均匀控制在2~3mm;每层壁板焊后测量垂直度 $\leq 3\text{mm}$,整体罐壁垂直度偏差 $\leq 0.3\%$ 且不大于30mm,椭圆度 $\leq 20\text{mm}$,提升过程设置防偏装置同步控制。(4)拱顶桁架、顶板拼装弧度与同轴度控制:桁架弦杆弯曲矢高 $\leq L/1000$,径向辐条对称安装并点焊固定;瓜皮板拼装时用样板检查局部曲率,相邻板错边量 $\leq 2\text{mm}$,顶板中心与罐底中心同轴度偏差 $\leq 10\text{mm}$,径向焊缝对称施焊以防止拱顶偏斜^[3]。

2.3 焊接施工专项质量控制要点

(1)焊接工艺评定与施焊环境质管控:正式施焊前完成覆盖所有接头形式、材质及厚度的工艺评定,力学性能及金相检验合格;施焊环境风速 $> 8\text{m/s}$ 、相对湿度 $> 90\%$ 或雨雪天气须搭设防护棚并采取预热除湿,确保层间温度符合工艺卡。(2)罐底、罐壁、拱顶焊缝焊接变形防控:罐底采用跳焊、分段退焊及反变形法,先焊短缝后焊长缝;罐壁立缝采用双面不对称坡口并内外交替施焊,环缝由多名焊工对称分段焊接;拱顶板焊前点固并加临时弧撑,控制热输入 $\leq 25\text{kJ/cm}$,每道焊缝测量角变形量。(3)焊缝外观缺陷、内部无损检测质控要求:外观不得有裂纹、气孔、咬边、弧坑,余高 $\leq 1.5\text{mm}$ 且圆滑过渡;罐底T形缝、罐壁纵环缝按设

计要求进行射线或超声检测,一级焊缝合格率100%,二级焊缝抽检 $\geq 20\%$,底片由Ⅱ级及以上人员评定,超标缺陷必须返修并重新检测^[4]。(4)低压储罐密封焊缝防渗、抗裂专项管控:所有介质接触的角焊缝及搭接缝除目视外增加真空箱检漏或煤油渗漏试验;异种钢或厚薄板对接处采用过渡坡口及预堆边焊,焊后24h进行渗透检测,延迟裂纹应彻底清除后重焊,返修次数不超过两次。

2.4 试压、防腐及附属构件施工质控

(1)罐体充水试验、低压气密性试验质量控制:充水按25%、50%、75%、100%分级静置,每级监测沉降及泄漏,罐壁及焊缝无渗漏;气密试验升压速度 $\leq 0.1\text{kPa}/\text{min}$,逐级保压(6kPa、10kPa、设计压力),涂抹检漏液或采用电子检漏仪,压降 $\leq 0.5\%/h$ 且无气泡为合格。(2)罐体内外防腐、涂层施工厚度与附着力管控:喷砂除锈达Sa2.5级,粗糙度40~70 μm ;环境温度5~35 $^{\circ}\text{C}$,相对湿度 $\leq 85\%$;干膜厚度按90-10原则控制,每道涂后湿膜及干膜抽检,附着力划格法或拉开法达到规定值($\geq 5\text{MPa}$),针孔检测仪全面检查无漏点。(3)人孔、呼吸阀、液位计等附属配件安装质控:法兰密封面无划伤,垫片对中且螺栓均匀紧固(扭矩按设计值);呼吸阀定压值现场校验与铭牌一致,液位计导向管垂直度偏差 $\leq 2\text{mm}/\text{m}$,所有接管与罐体连接角焊缝做渗透或磁粉检测,气密试验时同步检查附件密封性。

3 低压拱顶罐施工质量通病防治与全过程质控优化对策

3.1 工程常见施工质量通病及成因分析

(1)拱顶弧度偏移、罐体垂直度超标问题及诱因:拱顶瓜皮板预制曲率不准确或现场拼装时强制组对,导致局部凹陷或鼓包;罐壁板立缝焊接收缩不平衡、倒装提升不同步,引起垂直度偏差超过0.3%H,直接削弱低压工况下拱顶与罐壁的承载稳定性。(2)焊缝气孔、夹渣、渗漏缺陷核心成因:焊材未按规定烘干、坡口表面油锈未清理干净或施焊环境湿度过大产生气孔;多层多道焊层间清渣不彻底形成夹渣;低压密封性要求高的角焊缝由于未采用小规范、短弧焊造成未熔合及微裂纹,在气密试验时发生渗漏。(3)基础不均匀沉降、防腐层脱落质量通病:地基处理压实度不足或环墙混凝土养护不到位,充水试压阶段差异沉降超过50mm;防腐涂装前表面除锈等级低于Sa2.5、粗糙度不足或环境温度过低,涂层附着力下降起皮脱落,尤其罐底板边缘与沥青砂接触处易发生。

3.2 质量通病针对性防治技术措施

(1)罐体组装变形、尺寸偏差整改防控措施:拱顶

拼装采用专用胎架并逐片检查样板间隙 $\leq 2\text{mm}$, 强制组对超标者更换板片; 罐壁每带板设置4~8组激光准直仪监控垂直度, 提升时控制相邻提升点高差 $\leq 10\text{mm}$, 偏差超标即用斜垫铁或倒链校正。(2) 焊接缺陷修复与全过程预控方案: 施焊前执行模拟试板焊接, 确认工艺参数; 气孔、夹渣采用碳弧气刨清除后补焊, 渗漏焊缝必须返修至根部并重新做真空箱检漏; 全过程推行焊工编号与焊缝追踪卡, 每道焊缝均记录电流、电压、层间温度, 实现可追溯。(3) 基础沉降、防腐施工缺陷治理对策: 沉降超标时采用压力注浆抬升或表面自流平砂浆找补, 沉降观测延续至投产后一年; 防腐层脱落部位彻底铲除, 重新喷砂至Sa2.5级, 涂刷环氧富锌底漆+中间漆+面漆, 每层用湿膜卡及附着力拉拔仪复检, 合格后方可下道工序^[5]。

3.3 施工全过程质量管控管理优化策略

(1) 构建事前、事中、事后三级质量管控体系: 事前完成图纸会审、技术交底及样板引路; 事中执行“三检制”(自检、互检、交接检)及停点检查; 事后组织专项验收与质量评估, 建立质量问题台账并闭环销号。

(2) 关键工序旁站监理与质量控制点设置: 设置基础浇筑、壁板组对、拱顶焊接、气密试验等4个见证点(W点)和2个停止点(H点, 即罐底真空试验、最终气密试验); 监理全程旁站并留存影像, 未经签字不得转入下道工序。(3) 施工人员、机械设备质控管理优化方案: 焊工必须持有效资格证并在考试合格项目内施焊, 每半年考核一次; 自动焊机、倒装提升装置、空压机等设备每日点检, 计量器具(压力表、经纬仪)按期检定, 不合格设备挂牌停用。

3.4 工程质控案例应用验证

(1) 项目工程概况与质控重难点梳理: 以某石化公司2座2000m³低压拱顶罐(设计压力12kPa)为例, 罐体直径14.5m, 壁板8带, 拱顶瓜皮板24片。重难点集中在

拱顶曲率保持、罐壁垂直度(要求 $\leq 15\text{mm}$)及0.02MPa气密性。(2) 本文质控要点现场落地应用: 实施3.1~3.4及4.1~4.3措施: 基础环墙预埋沉降标并预压7天; 拱顶板在预制胎架上逐片校验; 焊接采用CO₂气体保护焊打底, 减少气孔; 气密试验按6kPa、9kPa、12kPa分级保压, 涂抹碱性检漏液。(3) 应用效果与质量验收结果分析: 经上述管控, 罐体垂直度最大偏差12mm, 椭圆度18mm, 拱顶样板间隙 $\leq 1.5\text{mm}$; 焊缝无损检测一次合格率98.7%, 真空箱检漏无渗漏; 气密试验压降0.3%/h, 优于规范要求; 基础最终沉降量32mm, 防腐层附着力5.8MPa。工程质量一次验收合格, 投产6个月运行平稳。

结束语

本文围绕低压拱顶罐全施工流程, 明确基础、组装、焊接、试压防腐核心质控要点, 针对性解决罐体形变、焊缝渗漏、基础沉降等通病, 完善事前事中事后全过程管控机制。经实际项目应用可知, 该套质控方案可优化罐体安装精度, 提升焊缝合格率与气密试验达标率, 满足低压运行设计标准。后续可结合智能监测设备优化管控模式, 细化低压试验参数, 进一步缩减施工缺陷, 契合石化工程建设质控需求。

参考文献

- [1]王浩. 低压立式拱顶储罐现场安装施工质量控制技术[J]. 化工设备与管道, 2025, 62(2): 89-94.
- [2]张磊. 化工低压拱顶储罐焊接缺陷成因及施工质量控制对策[J]. 石化技术, 2024, 31(8): 156-158.
- [3]刘思远. 倒装法低压拱顶储罐施工关键工艺与质量风险防控[J]. 工程技术研究, 2023, 8(11): 132-134.
- [4]赵文博. 常压低压钢制拱顶储罐充水试验与密封性质量控制研究[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2023, 43(5): 23-25.
- [5]周嘉诚. 大型低压拱顶储罐预制拼装施工质量要点分析[J]. 现代制造技术与装备, 2022, 58(7): 178-180.