

化工装置干气密封管道试压安全技术研究

高吉祥¹ 孙洪凯² 赵星¹

1. 潍坊万博工程设计咨询有限公司; 2. 山东应急安全技术服务有限公司潍坊分公司

摘要: 干气密封在化工装置离心压缩机中起着至关重要的作用, 其密封性能直接影响设备的稳定运行。本文研究了干气密封流程管道的试压技术, 探讨了试压步骤、压力控制措施和安全环境保护措施, 为干气密封流程管道的安全可靠运行提供了技术依据。

关键词: 干气密封; 流程管道; 试压技术; 安全措施

干气密封是化工装置中离心压缩机的重要组成部分, 用于防止压缩机轴端气体泄漏。流程管道的压力可靠性直接影响干气密封的密封性能, 因此试压工序十分关键^[1]。通过研究试压工艺与控制措施, 可以有效保障干气密封管道的运行安全。随着化工行业对安全稳定运行要求的不断提高, 如何确保管道的高可靠性, 成为业内关注的重要课题。

因此, 探讨和优化试压技术, 进一步提高干气密封系统的整体运行效率和安全性, 具有重要的现实意义和应用价值^[2]。

1 试压方案与实施

1.1 改造流程概述

某化工园区共有多台离心压缩机采用干气密封作为轴端密封, 其干气密封设计低压氮气供气压力最低为 0.45 MPaG。由于新上空分装置的低压氮气并网后, 原有工业园氮气管网压力降至 0.30 ~ 0.35 MPaG, 不能满足干气密封进口压力的设计要求, 存在较大压力波动风险, 严重时可能导致干气密封二级密封返压失效, 造成

压缩机联锁跳车。园区内中压氮气管网增加 DN25 通径气动调节阀组和旁路阀, 阀组后管道变径为 DN80, 并增设容量为 3.5 m³ 的缓冲罐^[3]。缓冲罐出口与压缩机密封气管线连接, 缓冲罐设置远传压力监控点以实现调节阀自动控制, 维持管道内压力为 0.45 MPaG。缓冲罐配置 DN50 通径安全阀, 起跳压力设定为 0.5 MPaG, 防止超压风险, 并在各压缩机连接点前增加止逆阀防止倒流。

图 1 展示的是化工装置中典型的干气密封系统供气管道流程, 主要用于离心式压缩机的轴端密封系统。图中详细标出了供气路径、过滤系统、压力监控装置、密封气入口、回流出口以及排污路径等关键环节, 体现了干气密封系统中安全、清洁、稳定运行的基本要求。干气密封是当前化工、石化行业广泛应用的一种非接触式密封技术, 其供气系统的合理布置和可靠性直接关系到压缩机是否能长期安全运行。

从结构来看, 主供气源通过过滤器 (如 X101、X102) 和调压装置进入干气密封系统, 以保证清洁、稳定

的密封气体供给。标注的“供气过滤器”前后设有压力变送器和流量检测装置, 用于实时监控密封气体参数, 防止供气异常带来密封失效风险^[4]。

值得注意的是, 在密封气流向进入压缩机前, 还设置有旁路及备用管线, 以实现管道切换和冗余配置, 提高系统可靠性。在密封气出口端, 还设有回流出口、排放出口及排污口, 用于处理通过密封端后的尾气或泄漏气体。这些气体会通过回流管道送回上游处理系统或经安全阀门排入火炬系统进行燃烧, 防止对周围环境造成污染。通过对图中“压力变送器”“调压阀”“放空阀”等节点的布置可以看出, 该系统在设计上兼顾了运行控制与安全连锁的双重需求。

试压过程中, 管线可划分为不同功能段, 依据密封气入口前的阀门可进行分段封堵和气密性检测。管线中若采用氮气或压缩空气试压, 还需结合图中管件材质和焊口类型设定合适的压力等级和持续时间, 避免对管道结构造成破坏。试压点布置与压力表、安全阀、盲板的选型也应依据图中阀组和分支口位置科学设定。总体而言,

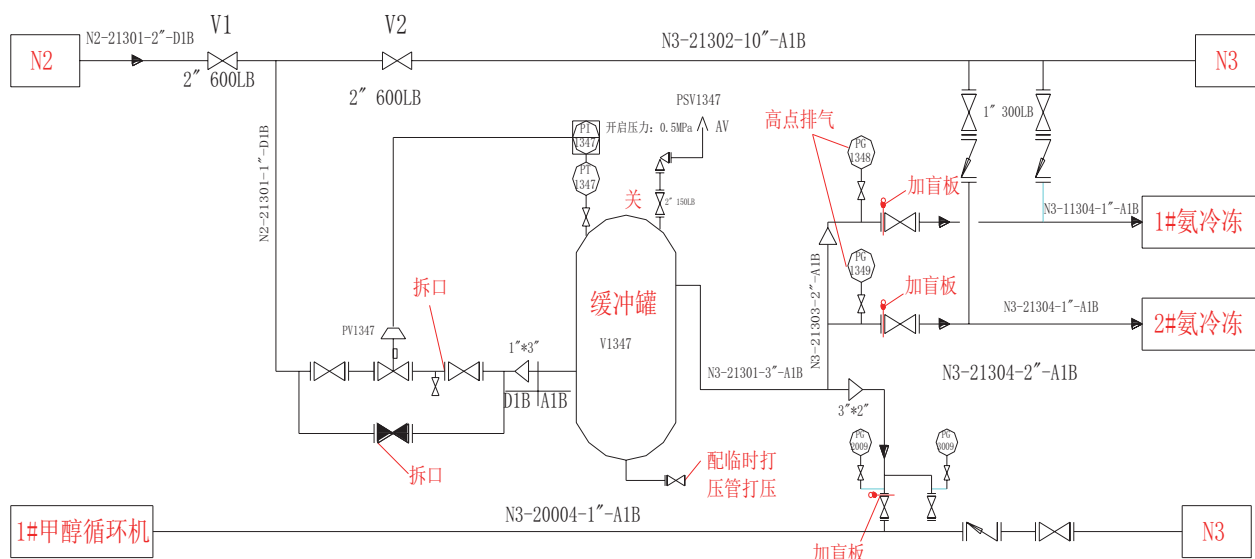


图1 干气密封系统供气管道流程图

干气密封系统的设计、运行和试压安全管理提供了详实的依据，是编制技术方案和试压作业指导书的重要基础。通过图中管道逻辑与设备配置的分析，可以全面掌握干气密封系统的结构完整性与功能路径，为后续的运行保障与事故预防奠定了坚实基础。

1.2 试压前提条件

试压作业人员需经过严格培训，掌握试压技术及安全规范，具备应对紧急情况的能力。管道、阀门的材质及压力等级必须满足设计要求，同时完成材质和等级的现场确认，确保管道系统具备足够的安全裕量。所有管道支撑和连接件须符合相关标准，支撑牢固，并通过相关的验收程序，确保试压作业过程中无安全隐患。提前对试压仪器进行检验校准，确保测量精度满足试验要求^[5]。

1.3 试压步骤

以软水（RW）为试压介质，从缓冲罐底部进行充压，顶部设置排气点，压力通过缓冲罐内远传压力计实时监测，确保充压过程平稳无异常。进行管道系统的有效隔离，确保与运行系统完全分离，防止交叉干扰，同时在各关键隔离点设置盲板，并安

排专人进行记录确认。试压压力确定为设计压力（0.45 MPaG）的1.5倍，即0.7 MPaG，达到试压压力后稳压10 min，再降压至设计压力稳压30 min，无压降和渗漏即为合格。试压完成后，对整个过程数据进行详细记录，以备后续分析。

1.4 压力控制与注意事项

试压过程中需缓慢升压，严格控制充压速度和压力变化趋势，防止超压情况发生。试验过程中，工艺人员应全程监控压力值，发现异常立即停止试验，并采取适当的泄压措施。压力表的安装位置必须合理，能够准确反映试压过程中各管段的实际压力状态。需准备紧急泄压设施和明确泄压流程，确保紧急情况下能够迅速安全地降低管道内压力。

2 安全环保控制

2.1 风险识别

试压作业过程中的主要风险包括管道超压导致的泄漏或破坏风险，以及操作过程中可能产生的砸伤和碰伤。水压试验过程中存在的水介质泄漏风险也需加以关注，避免对现场设备和环境造成次生危害。

2.2 风险控制措施

确保使用管道的材质规格符合压力标准，试压临时管道必须具备高于试验压力的承压等级，并提前进行强度校验。严格落实作业人员的安全防护措施，如佩戴安全帽、防护手套等，进行充分的安全教育和应急演练。作业现场配备急救箱及云南白药等应急药品，以备突发情况。现场还应设立明确的安全警示标识，限制非作业人员进入试压区域。严格控制试压介质的排放，试验完成后妥善处理排放水，避免对环境造成影响。

3 常见试压问题与对策

3.1 管道泄漏与密封失效分析

在干气密封系统的试压过程中，虽然作业流程已较为规范，但仍存在诸多现场风险，尤其以管道泄漏与密封失效最为常见。分析发现，管道泄漏通常发生在法兰连接、焊缝接头、排放支路以及压力表接口等部位。其主要原因包括施工阶段焊接质量不合格、密封垫片选型不当以及螺栓未按规定力矩紧固等。部分临时试压管段未进行专用设计，选材和安装方式不能满足试压压力要求，导致在打压过

程中出现局部开裂或密封破坏现象，造成试压中断和介质泄漏。

密封失效问题也不容忽视，在管道系统降压至设计压力稳压阶段，若存在管件热胀冷缩不均或盲板安装应力集中，容易导致二次泄漏，影响试压判定准确性。特别是在干气密封供气管道中，一旦发生密封气外泄，不仅可能导致试验失败，更可能引发安全联锁误动作，影响设备正常运行。因此，必须将泄漏和密封稳定性作为试压风险控制的重点。

3.2 典型问题案例与处置对策

以某化工园区离心压缩机改造工程为例，项目在进行缓冲罐至密封入口段的试压时，发现一处 DN25 供气支管接口出现微小渗漏。经排查，该段为现场临时加设的支管，其连接方式采用螺纹接口，密封剂使用不规范。在泄压后重新拆装并更换为焊接连接结构，同时调整连接方式为柔性接头结构，试压再次进行后无异常，顺利通过。该案例说明，在临时改造与加装部位，若未严格执行试压连接强度标准，极易形成安全隐患。

为减少此类问题发生，应建立试压前“高风险部位识别清单”，对法兰、三通、支管和排放阀等部位进行重点排查和加强密封措施。同时建议在设计阶段对干气密封供气系统实施模块化分段设计，并在关键节点设置常设试压口，方便今后检修和重复试压。对于结构复杂的回流系统和排污支路，可采用分段分压试压方式，降低系统整体应力负荷，增强局部密封稳定性。

4 智能化手段在试压过程中的应用前景

4.1 远程监控与数据采集系统

随着工业自动化与智慧化水平的提升，传统人工操作与目测判断在管道试压过程中逐渐显现出局限性，主

要体现在反应速度慢、数据记录不完整、异常趋势难以识别等方面。

因此，推广使用智能化压力监测系统成为未来试压技术发展的重要方向。通过集成远传压力变送器、温度传感器、流量计等设备，可实现对试压全过程参数的实时采集。系统可将采集数据上传至工业控制主站或远程中控平台，实现压力变化趋势图自动生成、实时波动报警和压力异常点定位。在缓慢升压阶段，系统能够设定预警上下限，避免因操作不当引发过压事故；在稳压阶段，通过系统自带的稳态判定功能，能够判断稳压持续时间与压力变化量，自动判定试压是否合格，从而提升判断客观性与效率。

4.2 智能辅助诊断与风险预警

在未来试压作业中，引入人工智能算法对试压过程中产生的多维数据进行建模和分析，可进一步提高风险识别精度。例如，基于历史试压数据和典型异常样本构建 AI 识别模型，能够在压力上升过程中识别出“异常速率变化”“短时波动异常”“多点不同步异常”等典型异常特征。

通过模型预测机制，可提前对可能存在泄漏点或密封弱点发出预警，指导现场人员提前采取干预措施。智能化系统还可与数字孪生技术相结合，对干气密封供气管网系统进行实时仿真模拟，通过虚拟系统压力分布与真实测量值对比，实现系统完整性检测与结构响应评估。结合 GIS 定位与可视化展示功能，操作人员可以直观掌握关键节点当前状态与风险分布情况，显著提升试压作业的可视化与智能管控水平。

综上所述，智能化试压技术将逐步取代传统经验式操作，通过数据驱动与自动化决策显著提升作业质量、安全水平和应急响应能力，为未来干气密封系统的高效维护与持续稳定运行提供坚实保障。

5 结语

通过对化工装置干气密封流程管道的试压技术研究，明确了试压步骤、压力控制和安全措施，形成了一套系统化的试压方案，可有效保证管道的安全运行和压缩机的稳定工作。本研究提出的优化措施和安全管控要点，能够进一步提高试压作业的安全性和操作效率，对类似化工装置干气密封管道的施工、维护及管理具有较强的借鉴和推广价值。

参考文献：

[1] 张宝臣. 天然气离心式压缩机干气密封失效的原因与解决策略探究 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2024, 44(22): 25-27.

[2] 杨明,张伟凯,刘鹏,等. 输气管道离心压缩机干气密封气回收策略研究 [J]. 中国安全生产科学技术, 2024, 20 (S1): 73-78.

[3] 白兰坤,张琴,邱丹. 离心式压缩机干气密封控制系统的优化设计及应用 [J]. 液压气动与密封, 2024, 44 (11): 29-34.

[4] 潘彪,任俊伟,陈小平,等. 索拉C652型天然气管线压缩机干气密封国产化研制 [J]. 山东化工, 2024, 53 (06): 212-216+223.

[5] 夏永波,宦宣州,李志刚,等. 掺氢天然气干气密封起动特性研究 [J]. 西安交通大学学报, 2024, 58 (03): 82-94.