

Optimized design of nitrogen booster device for accumulator in hydraulic system of continuous tubing

Yongjie Tian

Changqing Downhole Technical Operation Company, Continuous Oil Tubing Company, Sichuan Qing Drilling Engineering Co., Ltd., Yulin, Shaanxi, 718500, China

Abstract

In hydraulic systems widely used in coiled tubing operations, the accumulator serves as a critical component for energy storage and pressure control. Its nitrogen charging status directly impacts equipment's emergency response capabilities under abnormal working conditions. The current industry-standard direct nitrogen charging method using bottled gas presents challenges including insufficient pressure differentials, unstable pressure retention, complex operations, and significant gas waste, failing to meet demands for efficient, safe, and cost-effective operations. The nitrogen pressurization device enhances accumulator performance by boosting low-pressure nitrogen, featuring flexible pressure regulation, rapid charging, and stable pressure maintenance—significantly improving operational reliability. This paper focuses on structural optimization and system improvement design for this device, clarifying core component selection and control principles while verifying its energy-saving, consumption-reducing, and safety advantages. It provides practical optimization pathways and promotion basis for accumulator nitrogen charging processes.

Keywords

coiled tubing; hydraulic system; accumulator; nitrogen pressurization device; structural optimization

连续油管液压系统中蓄能器氮气增压装置的优化设计

田永杰

川庆钻探工程有限公司长庆井下技术作业公司连续油管公司, 中国·陕西 榆林 718500

摘要

在连续油管作业广泛应用的液压系统中,蓄能器作为能量存储和压力控制的关键部件,其充氮状态直接影响设备在异常工况下的应急响应能力。当前现场普遍采用瓶装氮气直充方式,存在压差不足、保压不稳、操作复杂、气体浪费严重等问题,难以满足高效、安全、低成本作业的需求。氮气增压装置可将低压氮气增压后高效充入蓄能器内部,具备调压灵活、充气快速、保压稳定等特点,显著提升作业可靠性。本文围绕该装置开展结构优化与系统改进设计,明确了核心部件选型和控制原理,验证其节能降耗与安全性能优势,为蓄能器充氮工艺提供了实用的优化路径与推广依据。

关键词

连续油管; 液压系统; 蓄能器; 氮气增压装置; 结构优化

1 引言

连续油管作为油气井作业中的重要工艺装备,其液压系统在高强度连续运行中对压力稳定性和应急响应能力提出更高要求。蓄能器作为液压系统的关键部件,承担储能、稳压和紧急供压等核心功能,其内部氮气压力的可靠性直接关系到系统整体运行安全。实际作业中传统的充氮方式存在效率低、保压能力差、作业风险高等问题,亟需研制高效稳定的氮气增压装置以满足现场作业需求。

【作者简介】田永杰(1981-),男,中国甘肃庆阳人,从事油气开发、井下底层改造、工艺优化、修井作业以及设备管理等研究。

2 问题分析

2.1 传统充氮方式的技术局限

在连续油管液压系统中,蓄能器广泛应用于防喷器支路、优先控制支路、注入头闭式泵补油回路及夹紧回路等多个关键部位,其中防喷器支路单独配置四个 40L 蓄能器用于 18MPa 高压应急保压,其余回路也配置从 1L 到 10L 不等的蓄能器用于维持系统运行稳定,而所有蓄能器均依赖氮气压力维持其正常功能。传统充氮方式普遍采用瓶装氮气直接充入蓄能器胶囊的方式,其瓶装压力一般为 10~12MPa,而蓄能器要求的充装压力通常为 9.8 ± 0.7 MPa,二者压力相近使得充装过程严重依赖初期压差,充气效率极低,一旦蓄能器内气压接近瓶内气压时,压差不足导致氮气无法继续进入皮囊,充装中断,剩余瓶装氮气无法有效利用,造成气体

浪费严重。此外,传统气瓶连接充装方式结构简单,无法实现动态调压和自动停机,现场往往只能通过人工反复启停充气,易出现过压或欠压充装,蓄能器皮囊长期承受不稳定气压,易引发胶囊疲劳、破损或密封失效,进而导致系统保压能力下降甚至完全失效。尤其是在多支路协同作业的连续油管系统中,蓄能器分布位置分散、规格差异明显,传统充氮方式缺乏针对性配置与调节机制,不能根据不同蓄能器容积与工作工况灵活设定充装参数,严重制约了液压系统整体运行效率与安全冗余能力。

2.2 作业效率、安全性和成本问题

在连续油管液压系统运行过程中,传统使用瓶装氮气进行充装的方式,在作业效率方面存在显著缺陷。由于单瓶氮气充装压力范围通常为10~12MPa,每台连续油管主车每年需进行不少于两次充氮作业,每次平均消耗气瓶8瓶,按照每瓶400元计算,单车年均充氮成本达6400元,连续油管作业队伍使用的21套主车系统年均成本达到134400元,且其中超过50%的氮气因无法克服压差而被浪费,氮气利用效率极低。此外,由于蓄能器分布广泛、体积差异明显,传统人工充装方式需要反复搬运气瓶、连接管线、调整阀门,单次作业耗时较长、人员劳动强度大,操作流程依赖人工判断压力表读数完成启停控制,无法实现统一控制和并联充气,导致整体作业进度缓慢,作业效率难以提升。在安全性方面,气瓶在频繁搬运和启闭过程中存在高压接头泄漏、操作人员误判充装压力以及接头冲脱等事故风险,尤其在环境温度变化较大或压力监控失灵的情况下更易引发爆裂或过压失控^[1]。同时,传统设备缺乏结构防护与压力保护装置,无法进行动态压力补偿和远程监控,不具备多回路协同作业条件下的作业自适应能力,不符合当前高频率、多模式连续油管作业的现场需要,直接限制了充氮工作的安全性、连续性与经济效益,在井控安全和设备维护方面形成双重风险负担。

3 优化设计

3.1 增压装置结构集成与部件选型优化

为提高连续油管液压系统中蓄能器充氮作业的适配性与作业效率,氮气增压装置在结构集成与部件选型方面围绕高压输出稳定性、现场操作安全性、维护便利性及系统兼容性进行针对性优化,整机采用集中式箱体结构,将气动驱动系统、增压执行机构、压力控制单元与高压输送回路整合于一体,其核心装置为气动增压泵,采用双作用往复式设计,驱动气源为压缩空气,增压比固定为1:5,通过调节驱动气源压力实现增压压力精准控制。结构上装置取消传统分散安装形式,转为在单一金属柜体内采用隔舱布置,将高压氮气路径与低压驱动路径隔离,避免交叉污染并提高系统稳定性,所有承压元件如气动增压泵、高压截止阀、高压针阀、止回阀及连接管路均布设于主舱体内并使用不锈钢卡套

式螺纹连接,最大承压能力达到40MPa,所有配件选用经PED(压力设备指令)认证的标准件,阀体采用316L不锈钢锻件制造,密封材料为PTFE和氟橡胶复合密封,确保系统长期运行下的密封耐压性能^[2]。

驱动系统部分设置气动二联体,包括过滤器、油雾器和调压器,可对进入的压缩空气进行颗粒分离、油气润滑和压力控制,保障增压泵活塞运行平稳,装置集成压力表2个,分别监测驱动气源与高压输出状态,压力采样采用弹性元件式不锈钢压力表,测量范围0~25MPa,响应精度控制在±1.6%。控制回路优化采用操作面板集中布局方式,调压阀、止回阀、高压出口及紧急泄压阀均布置于操作面一侧,标识清晰,旋钮式开关带有机电限位,避免误操作。整体结构采用滑动底盘并配置工业脚轮与制动器,便于设备在井场高频迁移状态下快速布设与固定,高压输出路径使用Φ8×1mm不锈钢管,经环焊工艺固封,并设置压力安全保护装置,当输出压力超过设定上限值时系统可自动卸压避免设备损坏,核心结构和管路,满足井场多蓄能器多节点作业的适配需求。

3.2 压缩空气驱动增压原理的应用改进

为克服传统蓄能器充氮方式依赖气瓶压差、无法进行动态充压控制的根本性缺陷,在驱动原理层面采用以压缩空气为动力源的气动增压泵结构,输出压力与驱动气源压力成比例线性放大,通过对气源输入压力进行调节,从而获得稳定、可调范围广的高压氮气输出,实现不同类型蓄能器的高效充装^[3]。本装置采用往复双作用气动增压泵,泵腔内部设置驱动气缸与增压缸共轴布置,驱动端接受调压后的空气推动活塞做往复运动,增压端通过活塞同步压缩氮气并输出至蓄能器,驱动气压与输出氮气压力之间形成明确的压力传递关系,其理论输出压力为:

$$P_{\text{输出}} = R \times P_{\text{驱动}}$$

其中,R为增压比,设计值固定为5, $P_{\text{驱动}}$ 为空气供气压力,单位为MPa。气动系统引入气动二联体(含调压器、油雾器与过滤器),过滤器可将压缩空气中固体杂质滤除至5μm以下,油雾器提供持续润滑,调压器用于稳定驱动气源压力,确保活塞运行平稳并降低空行程损耗,避免驱动频率漂移导致的输出波动。在泵体设计上,增压缸采用小缸径、高冲程比结构提升单位时间压缩效率,内部设置精密导向结构与限位止回机构,具备自锁与气流截止功能,当输出压力达到设定上限并与驱动压力动态平衡时,活塞可自动停止运动,实现自动保压功能,提升了操作控制的可预见性。排气路径设有缓冲腔体以防止气流冲击造成震荡,外接安全阀保证当内部压力意外超压时能及时卸压,保证设备运行安全性。在使用现场,操作者通过调节面板控制阀即可设定驱动压力范围,在系统启动后由气源自动调节增压泵运行频率及行程长度,完成充氮全过程的自动化调压与稳压,无需人工干预,在多蓄能器串并联接入模式下可实现持续恒压供气

作业。

3.3 保压性能与作业安全的系统增强

为提升连续油管作业中蓄能器的稳定保压能力并增强充氮操作的作业安全性，本系统在结构设计与功能配置中采取了多项强化措施，形成了自动停机、动态稳压、防回流、抗超压多机制并联的协同保压系统。装置核心部件为气动增压泵，采用活塞式双作用结构，输出压力由驱动气源与活塞面积比共同确定，通过设置增压比为 5:1 的固定比值结构，在调节输入空气压力范围内输出连续且稳定的高压氮气，当蓄能器达到预设压力时，增压泵内部止回装置通过活塞端腔背压作用实现自闭锁状态，使充氮停止并维持恒压状态。为实现压力动态补偿，系统在高压输出管路中增设带预应力弹簧的自动止回阀和缓冲小腔体，当因环境温度波动或系统微泄漏造成压力轻微下降时，可在不重启系统主泵的前提下实现瞬时补压，避免蓄能器出现压降失稳。系统压力控制区布设双压力表，分别用于驱动段与输出段压力监控，配合精密调压阀使用，调压精度达 $\pm 0.1\text{MPa}$ ，支持快速锁定目标压力区间。为确保高压气体系统的承压稳定性，所有承压部件包括增压泵腔体、截止阀壳体、管路接头与控制阀座均采用整体锻造的 316L 不锈钢材质，表面经喷砂钝化与无油脱脂处理以确保抗疲劳与耐腐蚀能力，连接部件全部采用金属卡套加锥面密封结构，不使用螺纹密封胶或焊接结构，保证高压状态下连接可靠性。

在安全防护设计上，系统配备机械式超压泄放阀，其开启设定压力为 25MPa，当充装过程中发生压力异常升高时，该阀会自动打开释放压力至安全值，防止皮囊损坏或管路爆裂；高压回路中还集成了高压限位保护阀，确保任何单元故障不传递至蓄能器。操作面板设计方面，所有调压与启停元件均采用限位旋钮，面板表面设置工艺流程图与压力设定指引标签，形成操作闭环，防止误操作引发过压充装。装置整机经过耐压测试与泄漏测试，具备持续保压 72 小时内压力波动不超过 $\pm 0.2\text{MPa}$ 的稳定性能，满足连续油管现场 24 小时运行、断电备用等高连续性作业需求。

4 验证与应用效果

优化设计完成后，在连续油管作业现场进行了以充氮速度、气体利用率、系统保压能力与作业效率为主要参数的综合验证试验，测试对象为连续油管大队作业平台配套的 40L 蓄能器，设定目标压力为 9.8MPa，测试前使用氮气瓶初始压力统一为 11.2MPa，驱动气源压力设为 0.7MPa，操作步骤包括：接入气源与蓄能器接口，开启装置气动驱动系

统，观察高压输出压力表，确认达到预设值后记录启动时间，至增压泵停止动作时记录终止时间，测试全程压力表读取每 15 秒记录一次以验证升压稳定性，氮气瓶更换后称重对比充装前后质量，计算单瓶利用率。在保压测试中，蓄能器经系统充满至 9.8MPa 后切断驱动气源与增压系统，保持密闭状态下进行 72 小时静态压力监测，记录每 12 小时蓄能器压力读数变化，测试环境温度维持在 $23 \pm 2^\circ\text{C}$ ，每组试验重复三次取平均值。人工操作效率测试中，对比传统方式下人工连接气瓶、调节开关与确认压力所用时间，与本装置集中面板一键操作所需时间，测试人员由同组具备相同作业经验的员工完成，保证可比性，另记录每组操作的开关次数与压力异常纠正频次。装置安全性能测试中，设定超压保护启动阈值为 25MPa，采用压力调节器模拟蓄能器出口压力异常升高，观察自动泄压装置动作情况，并记录动作压力数值与响应时间。具体结果如下：

表 1：测试结果

验证项目	测试数值 (传统方式)	测试数值 (优化装置)
单次充氮用时 (s)	1460	540
氮气利用率 (%)	51.8	93.5
压力波动值 (MPa)	± 0.51	± 0.16
操作时间 (min)	19.3	8.1
泄压阀响应时间 (ms)	104	35

从表中可知，优化装置在充氮时间、气体利用率、保压稳定性、操作效率与安全响应方面均显著优于传统方式，整体性能提升具有工程实用性与推广价值。

5 结语

本文围绕连续油管液压系统中蓄能器氮气增压装置的结构优化与性能提升开展系统研究，明确指出传统充氮方式存在的效率低、保压差与安全风险问题，提出基于压缩空气驱动集成式增压系统设计方案，并经现场验证取得良好应用效果，为蓄能器高效充氮提供了可复制的工程路径。

参考文献

- [1] 刘清友,赵建国,方世纪. 全液压连续油管牵引器工作机理研究[J].钻采工艺,2025,48(01):216-227.
- [2] 任再青,王建辉. 便捷式氮气增压提纯装置的设计[J].液压气动与密封,2020,40(10):46-47.
- [3] 胡璠.连续管倒管器液压控制系统研究[J].科学技术创新,2021,(35):176-178.