

深水/超深水智能测试循环阀的设计与测试验证

张波涛¹, 尹春雨^{2*}, 王晓禹³, 岳智伟¹

¹中海石油(中国)有限公司海南分公司, 海南 海口

²中海艾普油气测试(天津)有限公司, 天津

³中海油能源发展股份有限公司工程技术深水钻采技术中心, 海南 海口

收稿日期: 2025年11月13日; 录用日期: 2025年12月10日; 发布日期: 2025年12月23日

摘要

为解决深水/超深水油气勘探中智能测试核心工具依赖进口、技术自主可控性不足的问题, 开展深水/超深水智能测试循环阀工具的研发工作。该工具整合循环控制与测试控制双功能, 可适应深水复杂井况下的作业需求。论文围绕工具设计与测试两大核心环节展开, 设计阶段完成整体结构方案规划及循环阀、测试阀、空气室、液压室、电液桥等核心组件的详细设计, 通过尺寸链计算验证运动协调性, 结合强度校核与有限元分析确保组件在极端环境下的结构稳定性; 测试阶段依据行业规范搭建专用试验平台, 针对密封性能、强度特性、动作可靠性及电液协同控制性能开展系统性测试。结果表明, 工具各组件密封性能良好, 动作响应及时, 整体性能满足深水/超深水油气井测试作业要求, 为海洋深水智能测试装备国产化提供技术保障。

关键词

深水/超深水, 智能测试循环阀, 结构设计, 强度校核, 性能测试, 电液联调

Design and Test Verification of Deepwater/Superdeepwater Intelligent Testing Circulation Valve

Botao Zhang¹, Chunyu Yin^{2*}, Xiaoyu Wang³, Zhiwei Yue¹

¹CNOOC (China) Co., Ltd., Hainan Branch, Haikou Hainan

²Zhonghai Aipu Oil and Gas Testing (Tianjin) Co., Ltd., Tianjin

³Engineering Technology Deepwater Drilling and Production Technology Center, CNOOC Energy Development Co., Ltd., Haikou Hainan

Received: November 13, 2025; accepted: December 10, 2025; published: December 23, 2025

*通讯作者。

文章引用: 张波涛, 尹春雨, 王晓禹, 岳智伟. 深水/超深水智能测试循环阀的设计与测试验证[J]. 石油天然气学报, 2025, 47(4): 778-789. DOI: 10.12677/jogt.2025.474087

Abstract

To address the issues of over-reliance on imported core tools for intelligent testing and insufficient independent technological controllability in deepwater/superdeepwater oil and gas exploration, the research and development of an intelligent testing and circulation valve tool for deepwater/superdeepwater was carried out. This tool integrates dual functions of circulation control and test control, and can adapt to the operational requirements under complex deep-water well conditions. The paper focuses on two core links: tool design and testing. In the design phase, the overall structural scheme planning and detailed design of key components such as the circulation valve, test valve, air chamber, hydraulic chamber, and electro-hydraulic bridge were completed. The motion coordination was verified through dimensional chain calculation, and the structural stability of components under extreme environments was ensured by combining strength check and finite element analysis. In the test phase, seven sets of special test platforms were built in accordance with industry standards, and systematic tests were conducted on sealing performance, strength characteristics, operational reliability, and electro-hydraulic cooperative control performance. The results show that each component of the tool has good sealing performance and timely action response, and the overall performance meets the requirements of deepwater/superdeepwater oil and gas well testing operations, providing technical support for the localization of marine deep-water intelligent testing equipment.

Keywords

Deepwater/Superdeepwater, Intelligent Testing Circulation Valve, Structural Design, Strength Check, Performance Test, Electro-Hydraulic Joint Commissioning

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着我国南海深水油气勘探向中深层、复杂井段推进,井下环境呈现高温、高压、多腐蚀性介质等特点,对测试工具的可靠性、适应性提出更高要求。目前,深水智能测试关键工具长期依赖进口,不仅面临采办周期长、作业成本高的问题,在技术服务与维护方面也存在诸多限制,难以充分适配国内深水油气勘探的作业需求[1] [2]。

智能测试循环阀作为深水测试作业的核心装备,需同时实现管柱内外循环调控、井下开关井及压力监测等功能,其性能直接影响测试作业的安全性与效率。针对现有进口工具存在的适配性不足、操作复杂度高等问题,本文研发深水/超深水智能测试循环阀工具,通过优化结构设计、完善测试验证体系,突破进口技术壁垒,形成自主化的工具研发与应用能力,旨在通过关键性能指标的量化对标,实现对进口工具的高效替代。

2. 工具整体设计

2.1. 总体方案规划

智能测试循环阀工具采用模块化、集成化设计思路,从上至下依次布局循环阀组件、测试阀组件、空气室组件、液压室组件、电液桥组件及电控机构,整体结构紧凑,可与常规测试管柱兼容。各模块功

能分工明确。

循环阀组件：负责实现管柱内外流体的正反循环，满足压井液替置、地层流体返排等作业需求，支持多次开关动作；

测试阀组件：采用球阀式结构，承担井下开关井功能，关井时可圈闭地层压力以获取压力恢复数据，开井时导通地层流体以监测流动压力；

空气室组件：作为液压油存储单元，收纳工具动作过程中排出的液压油，为工具多次动作提供容量保障；

液压室组件：作为动力源单元，存储驱动工具动作的液压油，通过压力传递为循环阀、测试阀动作提供稳定动力；

电液桥组件：集成控制元件，实现电信号向液压信号的转换，精准控制循环阀与测试阀的动作方向；

电控机构：包含电池组、传感器及控制电路板，负责压力信号采集、操作指令发送及动作状态监测，保障工具井下自主作业能力。

2.2. 核心组件设计

2.2.1. 循环阀组件设计

循环阀组件由循环外筒、循环心轴、循环密封及操作心轴等关键部件构成，设计重点在于确保密封可靠性与动作协调性，考虑到循环芯轴往复过循环孔的密封性、过流面积、变径冲蚀、芯轴强度等问题，拟定四种循环孔设计方案进行评定。

1) 循环芯轴和循环外筒上均加工过流孔见图 1

优点：口径内没有变径，流体不会对循环芯轴造成明显冲蚀；

缺点：芯轴线径小，不能加工较大的过流孔，过流面积受到限制；

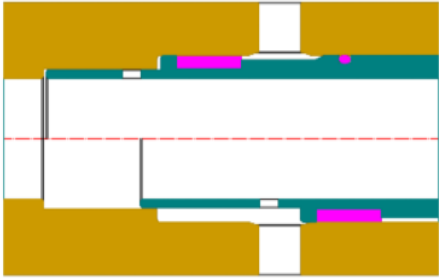


Figure 1. Flow holes machined on both the mandrel and outer cylinder
图 1. 芯轴及外筒均加工过流孔

2) 仅在循环外筒上加工过流孔见图 2

优点：可以加工较大的过流孔，压裂及返排效率高；

缺点：循环密封运动到过流孔下端时，流体会对变径部位造成一定冲蚀；

3) 密封件设计在外筒内孔上见图 3

优点：芯轴上不需要加工密封槽，芯轴壁厚大，强度高；

缺点：内槽中密封件张紧程度较外槽小，动密封中扭转的风险较大；

4) 密封件设计在芯轴外圆上见图 4

优点：外槽中密封件张紧程度大，动密封中扭转的风险小；

缺点：芯轴上需要加工密封槽，对芯轴强度有削弱；

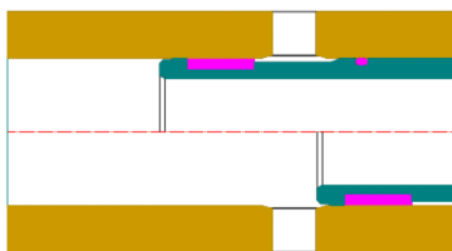


Figure 2. Flow holes machined on the outer cylinder

图 2. 外筒上加工过流孔

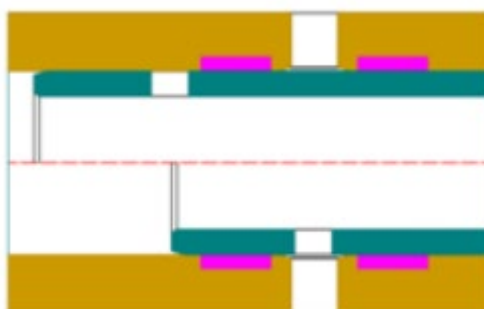


Figure 3. Sealing elements designed on the inner bore of the outer cylinder

图 3. 密封件设计在外筒内孔上

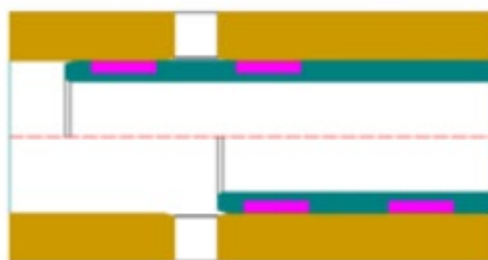


Figure 4. Sealing elements designed on the outer circumference of the mandrel

图 4. 密封件设计在芯轴外圆上

综合分析开关循环孔实现方法，选择在循环外筒上加工过流孔，密封件设计在芯轴外圆上的方案，该方案配合 V 型循环密封设计可提高往复运动的密封件可靠性，过渡结构则可以减轻流体对变径部位的冲蚀[3]。

2.2.2. 测试阀组件设计

测试阀组件以球阀为核心执行元件，配套球阀外筒、球座短节及操作心轴，重点解决高温高压环境下的动作卡顿与密封失效问题，开关机构需满足反复开关井，且要保证密封可靠性的要求，设计初对四种开关井机构进行优缺点对比。

1) 滑阀机构见图 5:

优点：结构简单，制造成本低；

缺点：开井后不通径，流动面积小，密封可靠性低，不能实现投球作业及大排量压裂作业。

2) 平面瓣阀金属密封机构见图 6:

优点：开井状态能实现全通路流动；

缺点：开井状态下金属密封面裸露在管柱内流体的冲蚀通道上，易出现损伤，影响重复密封性，使用寿命低；只能实现单向密封。

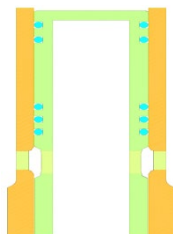


Figure 5. Spool valve mechanism

图 5. 滑阀机构

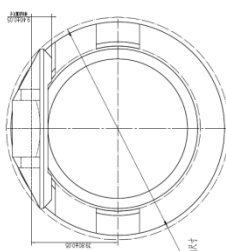


Figure 6. Flat flap valve metal sealing mechanism

图 6. 平面瓣阀金属密封机构

3) 球面瓣阀金属密封机构见图 7：

优点：开井状态能实现全通路流动；密封可靠性更高；

缺点：开井状态下金属密封球面裸露在管柱内流体的冲蚀通道上，密封球面易出现损伤，影响重复密封性，使用寿命低；只能实现单向密封。

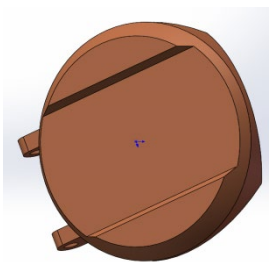


Figure 7. Spherical flap valve metal sealing mechanism

图 7. 球面瓣阀金属密封机构

4) 全球面球阀金属密封机构见图 8：

优点：从关到开状态，球体与球座密封球面始终接触，保护密封球面不被管柱内流体冲蚀；带压开启过程不会出现密封球面刺伤现象；旋转开关行程短，长度短，双向密封；

缺点：旋转开关操作机构较复杂，加工成本较高。

根据对比分析、借鉴以往 APR 工具应用经验和计算模拟，选择方案 4)全球面球阀金属密封机构作为智能阀实现开关井的最佳方案，可以实现双向密封，密封可靠性高，同时开关行程短[4]。



Figure 8. Full-spherical ball valve metal sealing mechanism
图 8. 全球面球阀金属密封机构

2.2.3. 空气室与液压室设计

空气室与液压室采用同轴布局,通过活塞实现液压油与空气的隔离,保障压力传递效率与容积匹配性:
容积计算: 根据工具单次动作的液压油排放量与补充量, 确定空气室与液压室的容积。计算结果表明, 空气室容积可满足循环阀、测试阀多次动作的排液存储需求, 液压室容积可保障多次动作的动力供给; 破裂盘触发后, 液压室油液可完全填充空气室, 实现工具机械重置。
强度分析: 采用有限元建模方法, 对空气室心轴、液压室心轴在高温高压条件下的应力与变形进行分析[5] [6]见图 9、图 10。结果显示, 组件最大应力小于材料屈服强度, 最大变形量较小, 不会影响工具正常功能。

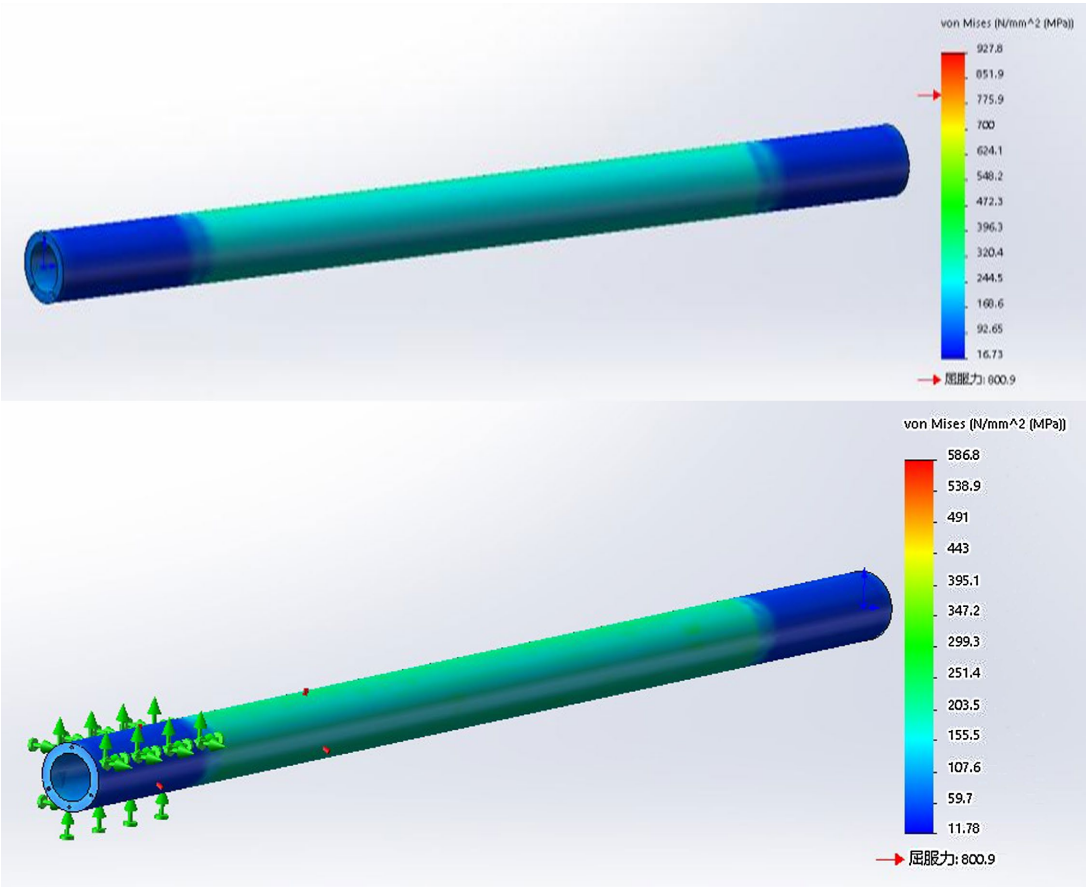


Figure 9. Internal pressure stress and displacement analysis of the air chamber mandrel under 15,000 PSI
图 9. 空气室心轴 15,000 PSI 内压应力与位移分析

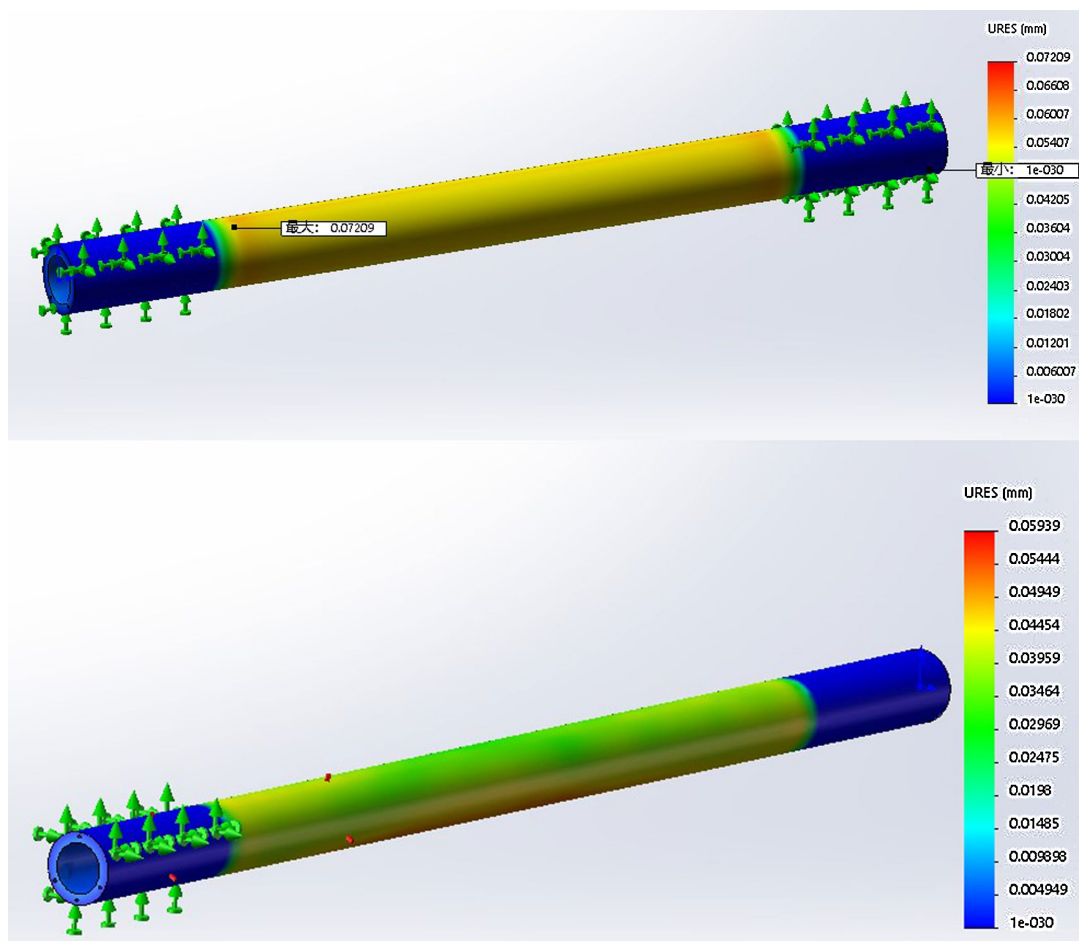


Figure 10. Internal pressure stress and displacement analysis of the hydraulic chamber mandrel under 15,000 PSI
图 10. 液压室心轴 15,000 PSI 内压应力与位移分析

2.2.4. 电液桥设计

电液桥本体采用整体锻造工艺成型，集成电磁阀、导向阀及传感器接口，是实现电液协同控制的关键部件。

强度设计：通过三维建模与应力分析，验证电液桥本体在拉伸、挤压及压力差作用下的强度性能，见图 11~14。结果表明，在设计载荷下，本体最大应力低于材料许用应力，可保障井下复杂载荷下的结构稳定性；

密封设计：对电磁阀、导向阀安装孔采用专用密封结构，通过挤压强度校核确保密封可靠性，避免高压流体泄漏影响工具动作[7]。

3. 测试方案与结果

3.1. 测试标准与平台搭建

依据行业相关标准(API Standard 19TT、ISO 13628-7) [3] [7]及工具设计要求，确定测试等级与技术指标，搭建 7 套专用试验装置，涵盖密封性能测试台、强度性能测试台、动作可靠性测试台及电液联调测试台。试验介质包括液压油、模拟海水，温度控制范围覆盖室温至高温区间，压力控制精度与数据采集频率满足测试需求，可精准捕捉试验过程中的压力、温度及动作状态数据。

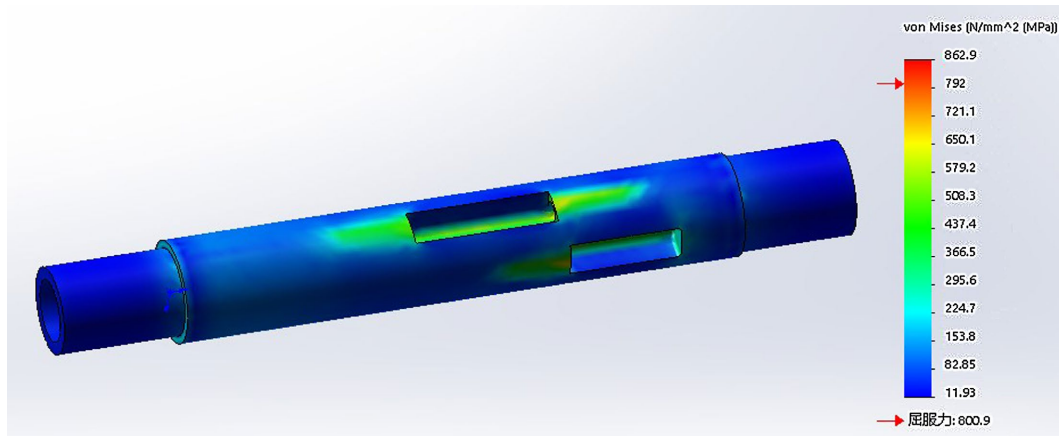


Figure 11. External pressure + external pressure difference stress analysis of the electro-hydraulic bridge body under 21,000 PSI + 15,000 PSI

图 11. 电液桥本体 21,000 PSI 外压 + 15,000 PSI 外压差应力分析

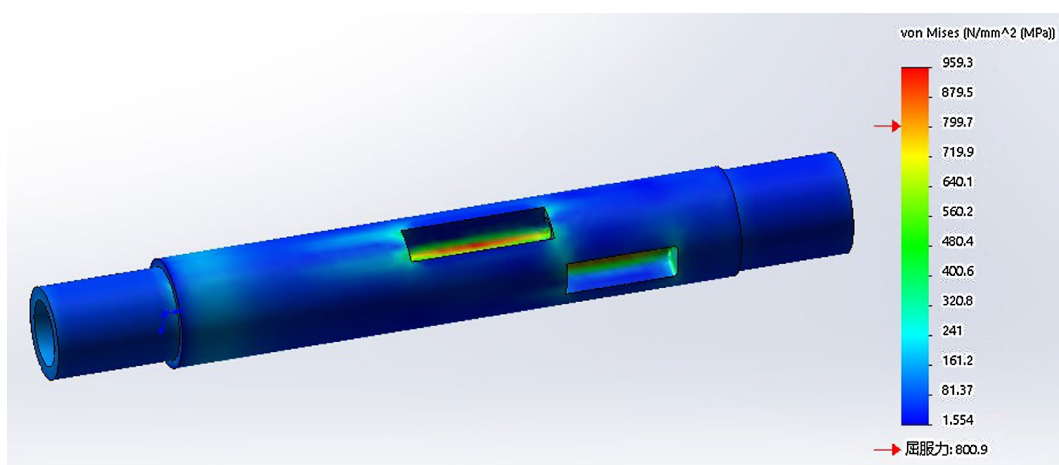


Figure 12. Internal pressure + internal pressure difference stress analysis of the electro-hydraulic bridge body under 21,000 PSI + 15,000 PSI

图 12. 电液桥本体 21,000 PSI 内压 + 15,000 PSI 内压差应力分析

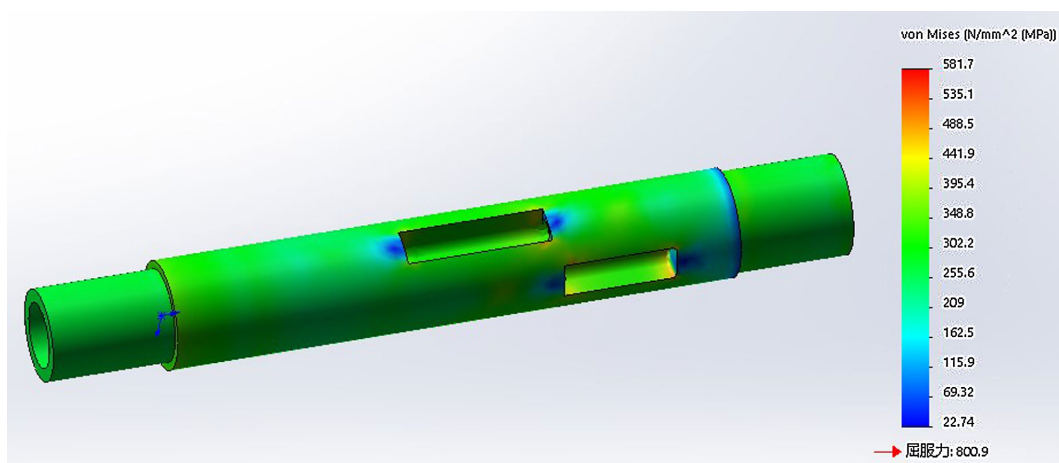


Figure 13. Tensile stress analysis of the electro-hydraulic bridge body under 300,000 Lbs

图 13. 电液桥本体 300,000 Lbs 拉伸应力分析

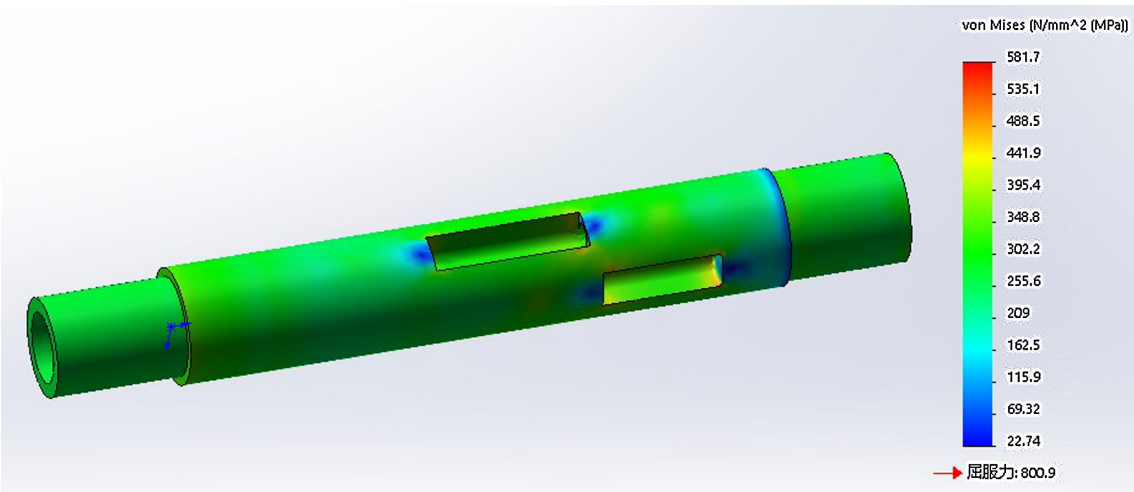


Figure 14. Compressive stress analysis of the electro-hydraulic bridge body under 300,000 Lbs
图 14. 电液桥本体 300,000 Lbs 压缩应力分析

3.2. 核心组件测试

3.2.1. 循环阀测试

测试项目：内外密封压差试验(设计压力与温度条件)、强度试验(设计极限压力与温度)、带压开启操作性能测试，见图 15；

测试结果：在室温与高温条件下，循环阀内、外压差密封试验均无渗漏，压力降符合要求；强度试验中组件无变形、无渗漏；带压开启操作压力在设计范围内，动作顺畅，磨阻小于规定值，满足使用要求。

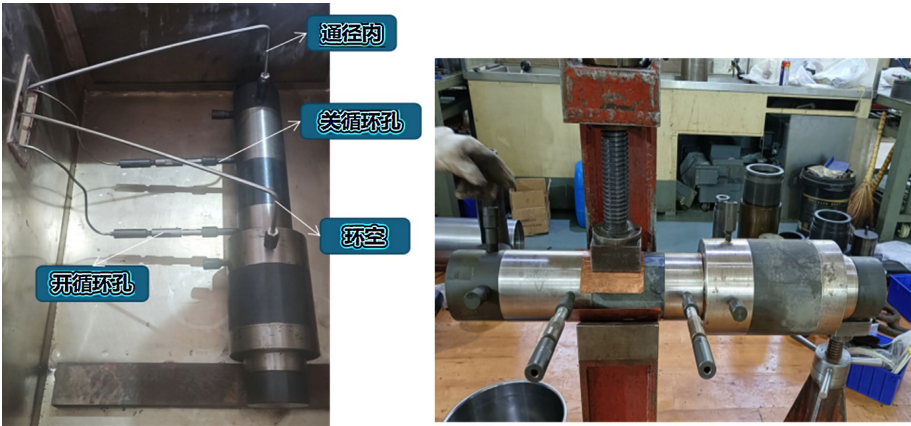


Figure 15. Circulation valve sealing test fixture
图 15. 循环阀密封测试工装

3.2.2. 导向阀测试

针对导向阀阀杆密封方案进行优化验证，对比不同密封结构的性能。

测试过程：对 O 圈密封与组合密封两种方案，在不同压力、温度条件下开展开关动作与密封性能测试，记录动作状态与密封情况，见图 16。

测试结果：O 圈密封方案在较高压力下密封性能不稳定，组合密封方案(优化后)在设计压力与温度范围内，开关动作正常，密封无渗漏，拆开检查密封件无明显损伤，确定为最终采用方案。



Figure 16. Pilot valve test fixture

图 16. 导向阀测试工装

3.2.3. 空气室测试

测试项目：内外密封压差试验、强度试验、活塞运动磨阻测试，见图 17。

测试结果：各温度、压力条件下，空气室密封无渗漏，压力降符合标准；强度试验中组件结构稳定；活塞运动磨阻在设计范围内，远小于最小操作压力，动作协调性良好。

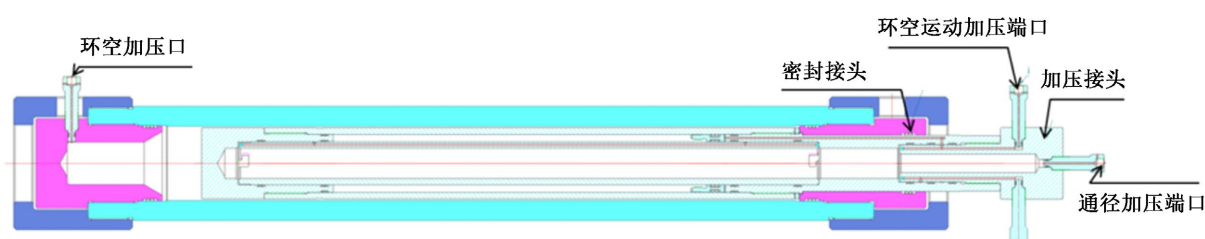


Figure 17. Air chamber test fixture

图 17. 空气室测试工装

3.2.4. 密封塞测试

密封塞用于隔离特定传压通道与环空环境，需适应海水与高温高压环境。

测试项目：过海水密封试验(低温海水环境与设计压力)、额定压力密封试验(室温至高温区间)、极限压力密封试验，见图 18。

测试结果：过海水试验无渗漏；额定压力与极限压力条件下，密封塞密封性能稳定，无位移、无渗漏，满足设计要求。

3.3. 电液联调测试

3.3.1. 电路部分测试

针对电磁阀、传感器、电池组及控制电路开展性能验证。

测试项目：电磁阀激活与密封性能测试(不同压力、温度)、传感器稳定性测试(高温高压环境)、电池带载能力测试(高温条件下连续激活)，见图 19。

测试结果：电磁阀在各测试条件下激活正常，密封无渗漏；传感器数据采集误差小，稳定性良好；电池可支持电磁阀多次连续激活，满足井下作业时长需求。

3.3.2. 液控与电控联调测试

搭建电液联调试验系统，模拟井下压力、温度环境，测试工具整体动作可靠性。



Figure 18. Seal plug test fixture
图 18. 密封塞测试工装

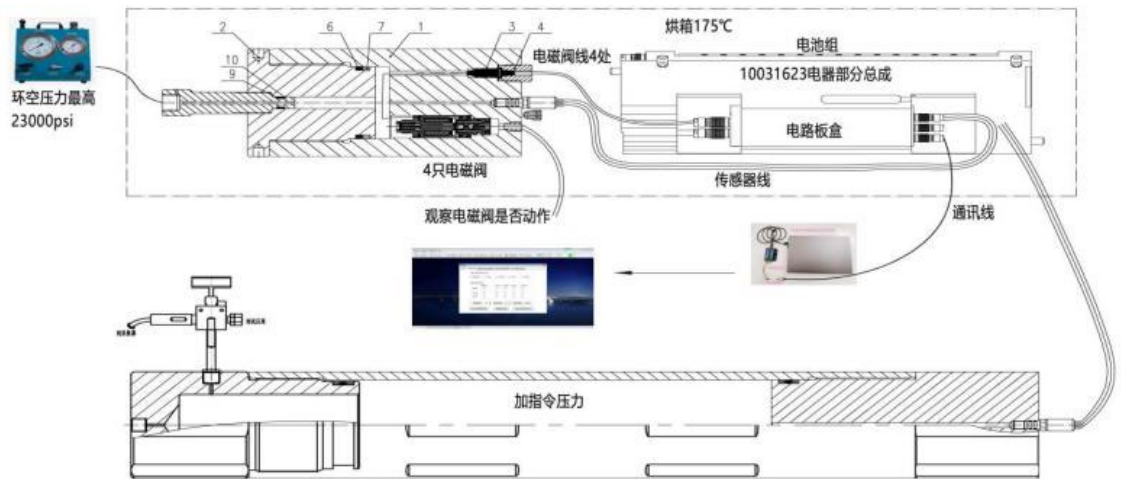


Figure 19. Schematic diagram of electro-hydraulic joint commissioning test
图 19. 电液联调测试示意图



Figure 20. Hydraulic and electronic control joint commissioning test fixture
图 20. 液控与电控联调测试工装

测试项目：内外密封压差试验、强度试验、循环阀与测试阀开关动作测试，见图 20。
测试结果：密封试验无渗漏，强度试验性能达标；循环阀与测试阀各完成规定次数的开关动作，动

作响应及时，无卡顿、无渗漏，整体性能满足设计要求。

4. 结论

研发的深水/超深水智能测试循环阀工具采用模块化集成设计，整合循环与测试双功能，结构紧凑，可与常规测试管柱兼容，适配深水复杂井作业空间要求。

核心组件设计通过尺寸链计算与强度校核，有限元分析结果表明，在设计压力、温度条件下，组件应力与变形均在允许范围内，结构稳定性良好；空气室与液压室容积匹配，支持工具多次动作，满足单次测试作业需求。

基于专用试验平台的测试结果显示，工具各组件密封性能可靠，动作响应及时，电液联调协同性良好，各项性能指标符合设计要求。

Table 1. Performance indicator comparison table

表 1. 性能指标对比表

性能指标	研发工具	Schlumberger XCT	Halliburton EST-V	性能优势说明
耐温等级	177℃	150℃	120℃	优于进口工具水平，适配高温井况
耐压等级	150 MPa	150 MPa	105 MPa	优于中端进口工具，适配高压井况
最大循环排量	≥120 m³/h	105 m³/h	110 m³/h	较进口工具提升 14.3%~15.4%，满足大排量作业
开关次数寿命	≥200 次	180 次	150 次	较进口工具提升 11.1%~33.3%，降低维护频次
压力控制精度	±0.1 MPa	±0.2 MPa	±0.2 MPa	控制精度更高，数据采集更精准
采办周期	3~6 个月	6~12 个月	8~14 个月	较进口工具缩短 50%以上

该工具的研发成功，打破了进口工具技术垄断，实现深水智能测试装备国产化，可缩短采办周期、降低作业成本，为我国南海深水油气勘探提供关键装备支撑，关键性能指标与主流进口工具对比见表 1。

参考文献

[1] 刘书杰, 谢仁军, 周建良. 深水油气井测试技术与装备[M]. 北京: 石油工业出版社, 2021.

[2] 王鹏, 刘书杰, 谢仁军. 深水智能测试工具发展现状与趋势[J]. 石油钻探技术, 2021, 49(3): 1-7.

[3] API Standard 19TT (2020) Downhole Tools for Testing and Sampling. American Petroleum Institute.

[4] 赵金海, 韩洪升, 王尔钧. 高温高压深井测试工具密封技术研究[J]. 天然气工业, 2020, 40(8): 98-105.

[5] 张毅, 李艳明, 刘建林. 深水智能测试循环阀结构设计及仿真分析[J]. 机械工程学报, 2023, 59(12): 156-164.

[6] 王强, 李军, 张勇. 高温高压下智能测试阀球阀密封性能试验研究[J]. 石油机械, 2022, 50(10): 45-51.

[7] ISO 13628-7 (2019) Petroleum and Natural Gas Industries—Design and Operation of Subsea Production Systems—Part 7: Downhole Equipment. International Organization for Standardization.