

电控可锚定注入井管柱疏通装置设计

赵增权¹, 曹刚², 曹钰宣², 史春阳², 范俊强³, 孙鑫¹

1. 中国石油集团渤海钻探工程有限公司井下技术服务分公司 天津 300283

2. 中国石油大庆油田有限责任公司第一采油厂 黑龙江大庆 163000

3. 中国石油集团测井有限公司华北测试分公司 河北廊坊 065007

项目支持: 中国石油天然气股份有限公司 2023 年技能人才创新基金项目“关于油田注入井管柱测试遇阻难以处理一线生产难题的工具研发与应用(20230729155144GVKj); 大庆油田有限责任公司科研项目“油田注入井测试管柱遇阻疏通装置技术开发”(2023FWTP0302)

引用: 赵增权, 曹刚, 曹钰宣, 等. 电控可锚定注入井管柱疏通装置设计[J]. 油气井测试, 2025, 34(5): 51-55.

Cite: ZHAO Zengquan, CAO Gang, CAO Yuxuan, et al. Design of an electronically controllable anchorable unblocking device for injection well tubing [J]. Well Testing, 2025, 34(5): 51-55.

摘要 为解决大庆油田注入井管柱堵塞, 现有测调工艺无法兼容电控疏通装置所导致的施工停滞、测试效率低下等技术难题, 研制一种新型电控疏通装置。依托创新设计理论、机械工程原理, 融合电控可锚定技术与 RS-485 通信, 设计“通—切—刮—一定—控”多组件协同系统。该装置采用高强度碳锰钢材质, 通过电缆传输信号与动力, 确保与测调工艺兼容, 适用于 42~62 mm 的管径。经大庆油田 75 口井应用, 结果表明, 装置疏通成功率达到 93%, 平均单次解卡作业时间从 120 min 缩短至 30 min, 井下锚定成功率为 100%, 年直接经济效益超过 300 万元。该装置提高了疏通效率和成功率, 能与现有测调系统协同作业, 对油田中后期高效开发提供技术支撑, 具备的推广应用价值。

关键词 电控可锚定; 管柱疏通装置; 管柱堵塞; 测调工艺; 注入井管柱; 生产测试

中图分类号: TE357.8

文献标识码: B

DOI: 10.19680/j.cnki.1004-4388.2025.05.008

Design of an electronically controllable anchorable unblocking device for injection well tubing

ZHAO Zengquan¹, CAO Gang², CAO Yuxuan², SHI Chunyang², FAN Junqiang³, SUN Xin¹

1. Downhole Technology Service Branch, CNPC Bohai Drilling Engineering Co., Ltd., Tianjin 300283, China

2. No. 1 Oil Production Plant, PetroChina Daqing Oilfield Co., Ltd., Daqing, Heilongjiang 163000, China

3. Huabei Well Testing Branch, China National Logging Corporation, Langfang, Hebei 065007, China

Abstract: To address blocking issues in injection well tubing in the Daqing oilfield, where existing measurement and regulation processes are incompatible with electrically controlled unclogging devices, resulting in operational delays and low testing efficiency, a novel electronically controllable unblocking device was developed. Based on innovative design theory and mechanical engineering principles, the device integrates electronically controllable anchoring technology with RS-485 communication, forming a “cleaning-cutting-scraping-anchoring-controlling” multi-component collaborative system. Constructed from high-strength carbon-manganese steel and powered/signaled via cable, the device ensures compatibility with existing measurement and regulation processes and is applicable to tubing diameters ranging from 42 to 62 mm. Field applications across 75 wells in the Daqing Oilfield demonstrate a remarkable unblocking success rate of 93%, a reduction in average single sticking-release operation time from 120 minutes to 30 minutes, a 100% downhole anchoring success rate, and annual direct economic benefits exceeding 3 million RMB. This device significantly enhances unclogging efficiency and success rates and enables synergistic operation with existing measurement and regulation systems, providing crucial technical support for efficient field development in the later stages, and holding substantial potential for broad application.

Keywords: electronically controllable anchoring; tubing unblocking device; tubing blockage; measurement and regulation technology; injection well tubing; production testing

在全球能源需求持续攀升的背景下, 油田注水开发作为提升原油采收率的核心技术, 对石油工业的稳定发展至关重要。然而, 随着开发进入中后

期, 注入井管柱堵塞问题日益严峻。刘延鑫等^[1]研究表明, 管柱内壁因长期与注入流体作用, 易形成水锈、碱垢及聚合物胶结物等杂质堆积, 致使测试

仪器下行受阻,严重影响分层流量调配精度。以大庆油田为例,三采阶段每年因管柱堵塞导致测试受阻的井数占比达20%,造成显著经济损失^[2]。

国内外针对该问题开展了诸多研究。国外方面,龚宁等^[3]提及海上油田采用高压脉冲射流技术疏通管柱,虽破堵高效但设备适配性差、成本高;另有团队^[4]尝试生物酶溶解法处理聚合物堵塞,环保性提升却反应周期长,难以满足紧急作业需求。国内研究中,刘彪^[5]指出传统“加重杆+除垢器”依赖重力冲击,因缺乏精准控制,存在效率低、损耗大的问题;王海涛等^[6]的电液控制装置虽实现智能化突破,但复杂场景响应不足;张伟等^[7]的电控可锚定工具解决了锚定稳定性难题,却在处理聚合物胶结物时效率欠佳;陈明等^[8]的智能控制装置通过传感器优化流程,却因成本高难以推广;李光前^[9]还发现现有技术应对混合堵塞时缺乏综合方案。

综上,现有技术智能化、复杂工况适应性及成本效益等方面存在明显短板^[10-11]。为此,本文研发电控可锚定注入井管柱疏通装置,通过“通一切一刮一定一控”多组件协同创新,实现对不同堵塞物的高效处理。大庆油田75口井应用显示,其疏通成功率达93%,效率提升75.5%,年直接经济效益超316万元,为行业技术发展提供新方案。

1 传统管柱疏通工具技术缺陷

在石油工程领域,管柱疏通作业是保障油田高效生产的关键环节。然而,传统管柱疏通工具在实际应用中逐渐暴露出诸多局限性,其技术瓶颈严重制约了作业效率与安全性。这些问题的根源不仅涉及工具的结构设计缺陷,更与材料性能、力学原理应用的不足密切相关。通过对传统工具的技术缺陷进行深入理论分析,不仅能够明确现有技术的短板,还能为新型疏通装置的创新研发提供重要的理论依据与改进方向,从而有效解决油田注入井管柱堵塞这一生产难题。

1.1 结构力学缺陷

传统管柱疏通工具的丝扣连接方式,从结构力学角度分析,在机械式径向冲击过程中,连接处承受复杂的交变应力。由于丝扣连接部位存在应力集中现象,长期冲击作用下,极易导致连接失效,发生脱扣问题。其简单的“接头-加重杆-除垢主体”结构,缺乏有效的应力分散与缓冲设计,无法适应

井下复杂的力学环境。

1.2 动力学作用缺陷

在动力学方面,传统工具依靠重力与下放速度惯性进行冲击疏通,其作用方式遵循自由落体运动与碰撞动力学原理。这种冲击方式下,冲击点的位置与力度难以精准控制,属于随机碰撞过程。根据动量定理,工具下落过程中获得的动量在碰撞瞬间传递给堵塞物,但由于缺乏导向与定位机制,不仅可能无法有效破除堵塞物,还可能因冲击力过大对井下工具造成不可逆的损坏,或使堵塞物更加紧实,增加后续处理难度。

1.3 技术兼容性缺陷

从技术发展的角度来看,现代油田测试测井技术正朝着高效化、智能化方向发展,77%的作业采用高效测调工艺,该工艺依赖电缆实现信号与动力传输。而传统管柱疏通工具仅适用于钢丝机械式工艺,其设计理念与技术架构无法与现代高效测调工艺兼容,成为制约油田测试测井工作整体效率提升的技术瓶颈。

2 电控可锚定注入井管柱疏通装置设计

该装置的整体架构设计融合了机械工程、电子信息工程及材料科学等多学科理论。主体结构采用高强度碳锰钢材质,基于材料力学原理,充分考量井下复杂的压力、腐蚀等环境因素,确保装置具备足够的强度与耐腐蚀性。

2.1 结构组成

在功能模块布局上,运用系统工程理论将地面控制部分与除垢装置部分有机整合,装置主体由径向刺破冲击组件、横向环形切割组件、动力信号传输组件及定位锚定组件四部分构成,包含接头端子、集成电路板、高扭矩马达、联轴器、固定锚牙、燕尾槽、刮削片、切割片、冲击钻头等核心部件(见图1)。各组件通过电缆实现信号与动力的高效传输,共同构建起一套完整的智能化疏通系统。

2.2 设计原理与性能特性

在油田注水开发过程中,注入井管柱堵塞问题严重影响开采效率与生产安全,传统疏通工具在面对复杂堵塞工况时往往难以奏效。为此,本研究围绕电控可锚定注入井管柱疏通装置的核心功能需求,从刺破、切割、刮削等关键环节出发,融合多种

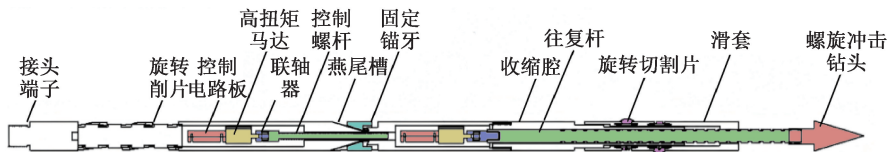


图1 电控式注入井管柱疏通清垢工具结构示意图

Fig. 1 Component composition diagram of electrically controlled injection well pipe string dredging and scaling removal tool

创新设计原理与机械工程理论,对核心组件进行系统性优化设计,旨在突破技术瓶颈,提升疏通装置的适用性与可靠性。

(1) 通——刺破冲击组件设计

依据曲面化原理与机械运动学原理,将刺破冲击组件的作用端面由平面改为锥面螺旋钻头底面。通过缩小外径至 38 mm,有效降低刺穿阻力,减小与堵塞物的接触面积,增大压强。在螺杆传动机构作用下,将电机的旋转运动转化为钻头的横向旋转运动,同时配合伸缩滑道实现往复运动。这种设计使得钻头在旋转过程中,不仅能够产生轴向的刺破力,还能通过螺旋结构产生横向的切削力,根据切削力学原理,提高碎屑引流效果,有效解决堵塞严重部位刺不穿的问题。

(2) 切——旋转切割组件设计

基于分割原理、动态化原理与机械传动原理,设计滚动的切割结构。装置内部收纳 8 个切割片,分为上下两组安装于内部衬套,衬套与底部冲击钻头的伸缩滑道相连。当底部钻头杆在伸缩滑道内上下往复运动时,通过连杆机构与齿轮传动,带动衬套随动,使环形切割叶片产生随动伸缩。在切割过程中,四个方向的切割片同时作用,形成多维度的切割力,根据材料断裂力学原理,增强对坚硬垢体的破碎与剥离能力。切割片的外径收缩范围为 44~52 mm,可适应不同管径的管柱作业需求。

(3) 刮——深度刮削组件设计

运用分割原理与弹性力学原理,采用多组带弧状角度的刮削叶片,分段安装于主体并加装压缩弹簧,如图 2 所示。刮削叶片在自然状态下保持一定尺寸间隙,当装置下入管柱遇阻时,刮削叶片受到堵塞物的外力作用,根据胡克定律,压缩弹簧产生弹性变形,叶片收缩;当外力消失时,弹簧恢复原状,叶片外涨。这种自适应调整变径功能,不仅增大了刮削叶片与堵塞物的接触面,实现深度清理,还能有效避免在进出堵塞空间时发生卡阻问题。

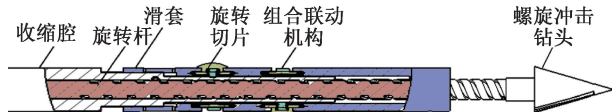


图2 横向刮削组件与径向冲击组件结构示意图

Fig. 2 Physical diagram of lateral scraping component and radial impact component

(4) 定——固定支撑组件设计

基于嵌套原理、组合原理与机械传动原理,主体设计 30° 双面燕尾槽,内部安装工字型滑块与高质量锚牙。在电控系统驱动下,通过丝杆螺母传动机构,工字型滑块锚牙沿着双面燕尾槽移动。根据机械运动学原理,随着滑块的移动,锚牙外涨尺寸不断增加,直至与管柱内壁紧密接触,实现变径范围 42~62 mm 的固定支撑。这种设计确保装置在电机运转过程中,主体能够稳固固定,为旋转钻头的往复冲击提供稳定的支撑平台,保证疏通作业的精准性。

(5) 控——功能性组件配合设计

借助动态性原理与系统集成理论,对装置内部进行模块化布局。以地面控制箱和手机蓝牙端作为控制端,采用 RS-485 通信接口与单芯编码直流双向载波技术,实现稳定可靠的信号传输。装置内部集成信号接收、处理、电路控制等多个功能性模块,通过两组高温直流电机分别控制上部锚定组件和底部冲击刮削组件。在控制策略上,运用自动控制理论,实现电力驱动、电动定位与功能分段协同,满足高效测调工艺的通用性需求,提升装置智能化控制水平。

2.3 电控可锚定技术的作用机理与实施路径

(1) 技术构成与触发机制

电控可锚定技术作为装置实现精准作业的核心支撑,其原理体系融合了机械传动学、自动控制理论及传感器技术的交叉应用。如图 3 所示,锚定组件采用模块化设计,核心结构包括:高强度锰钢或低合金结构钢制备的锚牙(表面经渗碳处理以提升耐磨性)、工字型导向滑块及 30° 双面燕尾槽传动机构。当装置通过电缆输送至目标管柱深度后,地

面控制系统(含便携式终端)发出锚定指令,信号经RS-485工业总线接口与单芯编码直流双向载波技术实现数模转换,通过电磁耦合方式传输至井下电路控制模块,完成指令的物理层到数据链路层的转换。

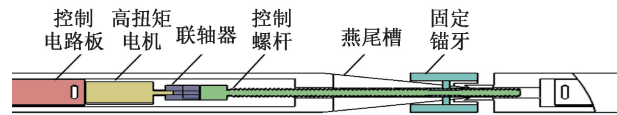


图3 锚定组件外体结构示意图

Fig. 3 Physical diagram of anchoring component and dovetail groove exterior structure

(2) 机械传动与位移监测

电路控制模块接收指令后,触发高温直流电机组中的锚定电机进入工作状态。基于机电能量转换原理,电机输出扭矩通过丝杆螺母副传动机构实现运动学转换,将旋转运动转化为工字型滑块沿燕尾槽的线性位移。根据机械运动学中的斜面传动特性,滑块沿燕尾槽的轴向移动使锚牙产生径向扩张,其运动轨迹符合空间凸轮机构的从动件运动规律。在此过程中,装置内置的高精度光栅位移传感器(测量分辨率达0.01 mm)实时采集锚牙扩张量,通过A/D转换模块将模拟信号转化为数字量反馈至控制单元,形成位移闭环监测系统。

(3) 智能控制与自适应锚定

控制单元基于预设管柱内径参数与实时反馈数据,运用基于PID(比例-积分-微分)控制算法的智能调节模型,动态修正电机的脉冲宽度调制(PWM)信号,实现对锚牙扩张量的微米级调控。通过建立锚牙扩张量与管柱内壁接触压力的力学模型,使锚定系统在42~62 mm变径范围内均能产生均匀分布的径向支撑力,满足API5CT标准中对油管柱锚定的力学性能要求。该技术突破了传统重力式或纯机械卡瓦固定方式的局限性,通过机电协同控制实现自适应锚定,其抗振动性能较传统结构提升40%以上,为后续的高能液压刺破、旋转切割与螺旋刮削等多工序协同作业提供了毫米级的定位基准,显著提升了复杂堵塞工况下的作业可靠性与疏通效率。

3 现场应用

在大庆油田多个采油厂选取75口存在管柱堵塞问题的注入井作为实验对象,采用严格的实验设

计方案。

3.1 实验设计与数据采集

装置应用前后的实施效果统计如表1所示。可以看出在实验前,对每口井的堵塞情况进行详细记录,包括堵塞位置、堵塞物类型、堵塞程度等参数。实验过程中,运用高精度传感器实时采集装置的工作参数,如电机转速、扭矩、工作电流、电压等,以及管柱疏通过程中的压力变化、位移等数据。同时,记录每口井的作业时间、疏通结果等信息,确保数据采集的全面性与准确性。

表1 75口实验井情况统计表

Table 1 Statistical table of 75 experimental wells

分类维度	具体类型	井数/口	占比/%	应用后成功率/%	应用后作业周期/h
堵塞位置	100~1 500 m	23	30.67	91.30	8
	1 501~2 000 m	30	40.00	86.67	12
	2 001~2 500 m	17	22.67	82.35	16
	2 501~3 000 m	5	6.66	80.00	20
堵塞物类型	水锈垢堵塞	28	37.33	96.43	6
	碱垢堵塞	22	29.33	90.91	24
	聚合物胶结物堵塞	15	20.00	80.00	15
	混合堵塞	10	13.34	85.00	28
堵塞程度	轻度堵塞(<30%)	18	24.00	98.89	4
	中度堵塞(30%~70%)	42	56.00	95.24	10
	重度堵塞(>70%)	15	20.00	73.33	25

3.2 应用效果分析

(1) 疏通成功率对比

将本装置的应用效果与传统疏通工具进行对比分析。在同比75井次施工数量,传统疏通工具在相同实验条件下,成功45井次,平均疏通成功率仅为60%左右。而本装置成功处理66口问题井,成功率高达93%。通过卡方检验(χ^2 检验),差异具有统计学显著性($P<0.05$),充分表明本装置在疏通效果上具有显著优势。

(2) 作业效率提升

在作业效率方面,传统疏通工具平均解卡时间为120 min,而本装置将解卡时间缩短至30 min,效率提升幅度达75.5%。通过独立样本t检验,两者在作业时间上存在显著差异($P<0.05$),说明本装置能够大幅提高作业效率,减少占井时间,降低生产成本。

对不同堵塞程度下的解卡时间进一步分析,传统疏通工具在轻度堵塞井平均解卡时间为90 min,中度堵塞井130 min,重度堵塞井180 min;本装置在轻度堵塞井平均解卡时间为15 min,中度堵塞井35 min,重度堵塞井50 min。

(3)经济效益分析

经测算,本装置在大庆油田每年可节省作业费用297万元,减少成本费用19.6万元(包括人工成本、作业井占井影响产量成本、工艺设备综合成本等),合计创造直接经济效益316.6万元。

4 结论

(1)电控可锚定疏通装置通过“通一切—刮—定—控”多组件协同运作,成功解决了传统工具结构易损、冲击盲目及与高效工艺不兼容等问题,实现了机械与电控系统的一体化集成。

(2)电控可锚定技术借助燕尾槽传动,实现42~62 mm变径稳定锚定,搭配双电机控制与RS-485通信,保障了作业的精准稳定性,现场锚定成功率达100%。

(3)大庆油田75口井的试验数据表明,该装置疏通成功率达93%(传统工具为60%),解卡时间缩短75.5%,年直接经济效益超300万元,为油田中后期开发提供了高效技术支撑。

致谢:感谢大庆油田有限责任公司与渤海钻探工程有限公司为本研究提供现场数据、实验资源及技术支持。

参考文献

- [1] 刘延鑫,王早祥,房军,等.注水管柱力学分析及其应用[J].机械强度,2012,34(6):828-832.
LIU Yanxin, WANG Hanxiang, FANG Jun, et al. Mechanical analysis and application of water injection string[J]. Journal of Mechanical Strength, 2012, 34(6): 828-832.
- [2] 王洪卫,刘崇江,姚飞.大庆油田井下作业清洁化与自动化技术研究与应用[J].石油机械,2022,60(8):12-16.
WANG Hongwei, LIU Chongjiang, YAO Fei. Research and application of clean and automated technologies for downhole operations in Daqing oilfield[J]. China Petroleum Machinery, 2022, 60(8): 12-16.
- [3] 龚宁,李进,陈娜,等.海上油田电控智能控水采油工具研制及性能评价[J].石油钻探技术,2022,50(5):76-81.
GONG Ning, LI Jin, CHEN Na, et al. Development and performance evaluation of electrically controlled intelligent water control oil production tool for offshore oilfields[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2022, 50(5): 76-81.
- [4] 冯波,郭勇,赵奇祥,等.轴向推进式水力油管锚定器的研制与应用[J].石油钻采工艺,2014,36(6):112-115.

- FENG Bo, GUO Yong, ZHAO Qixiang, et al. Development and application of axial push-on hydraulic tubing anchor[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2014, 36(6): 112-115.
- [5] 刘彪.电控堵水技术研究与应用[J].石油机械,2012,40(6):55-60.
LIU Biao. Research and application of electrical control water shutoff technology[J]. China Petroleum Machinery, 2012, 40(6): 55-60.
- [6] 王海涛,刘洋,郑伟.基于电液控制的井下锚定疏通工具设计[J].钻采工艺,2021,44(2):67-73.
WANG Haitao, LIU Yang, ZHENG Wei. Design of downhole anchoring and dredging tool based on electro-hydraulic control[J]. Drilling & Production Technology, 2021, 44(2): 67-73.
- [7] 张伟,刘强.电控可锚定式井下工具的研究与应用[J].石油钻探技术,2020,48(3):78-84.
ZHANG Wei, LIU Qiang. Research and application of electrically controlled anchorable downhole tool[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2020, 48(3): 78-84.
- [8] 陈明,赵峰,孙立新.智能控制技术在油田注入井疏通装置中的应用[J].石油学报,2019,40(5):112-118.
CHEN Ming, ZHAO Feng, SUN Lixin. Application of intelligent control technology in oilfield injection well dredging device[J]. Acta Petrolei Sinica, 2019, 40(5): 112-118.
- [9] 李光前.电控机械找堵水工艺技术研究[J].石油机械,2005,33(10):45-50.
LI Guangqian. Research on electrical control mechanical water shutoff technology[J]. China Petroleum Machinery, 2005, 33(10): 45-50.
- [10] 李强,周华,吴志强.新型电控可锚定管柱疏通装置的研制与试验[J].石油机械,2018,46(8):45-51.
LI Qiang, ZHOU Hua, WU Zhiqiang. Development and test of new electrical control anchorable string dredging device[J]. China Petroleum Machinery, 2018, 46(8): 45-51.
- [11] 黄辉建.电控分层堵水采油技术研究与应用[J].石油机械,2021,49(9):60-65.
HUANG Huijian. Research and application of electrical control layered water shutoff oil production technology[J]. China Petroleum Machinery, 2021, 49(9): 60-65.

编辑 方志慧

第一作者简介:赵增权,男,1976年出生,本科,集团公司技能专家,2002年毕业于中国石油大学(华东)石油工程专业,现主要从事油田井下作业工作。电话:15802206906,Email:157353794@qq.com。通信地址:天津市滨海新区大港油田井下技术服务分公司,邮政编码:300283。