

管道清管器部件脱落及其救援技术研究

农常林

榆林市特种设备检验检测院 陕西 榆林 719000

摘要:管道清管器是保障油气、给排水等长输管道安全高效运行的核心设备, 主要承担管道内杂质清除、腐蚀检测、缺陷定位等关键任务。然而, 在复杂工况下, 清管器部件脱落问题频发, 易引发管道堵塞、输送中断、设备损坏甚至泄漏爆炸等严重事故, 给管道运维带来巨大挑战, 本文明确脱落事故对管道运行安全性、经济性的多重影响, 为管道运维企业优化清管作业流程、提升脱落事故处置能力提供理论支撑, 对保障长输管道运行安全具有重要实践借鉴意义。

关键词:管道清管器; 部件脱落; 成因分析; 预防管控

Study on Part Falling-off of Pipeline Pig and Its Rescue Technology

Changlin Nong

Yulin Special Equipment Inspection and Testing Institute, Yulin, Shaanxi, 719000

Abstract: Pipeline pigs are core equipment for ensuring the safe and efficient operation of long-distance pipelines such as oil and gas pipelines and water supply and drainage pipelines. They mainly undertake key tasks including the removal of impurities in pipelines, corrosion detection, and defect location. However, under complex working conditions, the problem of part falling-off of pipeline pigs occurs frequently, which is likely to cause serious accidents such as pipeline blockage, transportation interruption, equipment damage, and even leakage and explosion, posing great challenges to pipeline operation and maintenance. This paper clarifies the multiple impacts of falling-off accidents on the safety and economy of pipeline operation, provides theoretical support for pipeline operation and maintenance enterprises to optimize pigging operation processes and improve the handling capacity of falling-off accidents, and has important practical reference significance for ensuring the operation safety of long-distance pipelines.

Keywords: Pipeline Pig; Part Falling-Off; Cause Analysis; Prevention and Control

引言

长输管道作为油气、水资源等战略物资输送的“生命线”, 其运行稳定性直接关系到能源安全、民生保障及生态环境安全。管道在长期运行过程中, 内部易积累油污、锈垢、杂质等污染物, 同时可能出现腐蚀、裂纹等缺陷, 严重影响输送效率与运行安全。管道清管器凭借其高效的清管、检测功能, 成为管道运维体系中的关键设备, 广泛应用于石油、天然气、给排水等领域。通过定期清管作业, 可有效清除管道内污染物, 降低腐蚀速率, 延长管道使用寿命, 为管道安全运行提供保障。当前针对管道清管器的研究多集中于清管效率提升、检测精度优化等方面, 对部件脱落的成因分析、精准定位及高效救援技术的系统性研究相对不足。现有救援技术多依赖经验判断, 存在定位精度低、救援周期长、作业风险高等问题。基于此, 本文立足管道清管作业实际, 深入剖析部件脱落的核心成因, 构建科学的检测定位与救援体系, 提出预防管控策略, 为解决清管器部件脱落难题提供切实可行的技术方案。

1. 部件脱落的定义及分类

按脱落部件的功能划分, 可分为密封类部件脱落、支撑类部件脱落、功能类部件脱落及连接类部件脱落。密封类部件脱落主要包括皮碗、密封圈等部件的脱落, 此类部件脱落将导致清管器密封性能下降, 无法有效推动污染物前进, 甚至出现介质泄漏; 支撑类部件脱落包括导向轮、支撑臂、扶正器等部件的脱落, 将导致清管器运行轨迹偏移, 与管道内壁碰撞摩擦, 引发管道损伤; 功能类部件脱落涉及清管刀盘、检测探头、传感器等部件的脱落, 将直接导致清管或检测功能失效, 脱落的刀盘、探头等坚硬部件还可能堵塞管道; 连接类部件脱落包括螺栓、销轴、卡扣等连接构件的脱落, 此类脱落可能引发连锁反应, 导致多个部件相继脱落, 加剧事故危害。

按脱落发生的作业阶段划分, 可分为启动阶段脱落、运行阶段脱落及回收阶段脱落。启动阶段脱落多因清管器启动冲击力过大, 导致连接部件断裂, 常见于大口径管道清管作业; 运行阶段脱落是最常见的类型, 主要由管道内壁不规则、介质压力波动、

部件磨损等因素引发；回收阶段脱落则因回收装置与清管器配合不当，或回收过程中拉力过大导致部件分离。不同阶段的脱落具有不同的特征，需采取差异化的检测与救援策略。

2. 管道清管器部件脱落的成因及影响

2.1 部件脱落的核心成因

设计缺陷是部件脱落的根源性因素。部分清管器设计过程中，未充分考虑管道工况的复杂性，存在结构强度不足、连接方式不合理等问题。例如，小口径清管器的支撑臂设计过细，无法承受管道弯曲处的侧向力，易发生断裂；检测型清管器的传感器与主体连接采用单一螺栓固定，未设置防松结构，在振动环境下易出现螺栓松动脱落。此外，部分清管器的部件选型与管道口径、输送介质不匹配，如在含颗粒介质管道中采用普通橡胶皮碗，易被颗粒划伤导致脱落。

制造质量不达标加剧了部件脱落风险。零部件加工精度不足，如导向轮轴颈尺寸偏差过大，导致配合间隙过大，运行中出现晃动磨损；材料选用不符合设计要求，如采用普通碳钢替代高强度合金钢制作支撑臂，或使用再生橡胶制作皮碗，导致部件使用寿命缩短，易出现早期失效；装配工艺不规范，如螺栓紧固力矩不足、焊接质量不合格、密封圈安装错位等，均可能导致部件在作业过程中脱落。

运维管理不当是部件脱落的直接诱因。清管作业前未对清管器进行全面检查，未及时发现部件磨损、连接松动等隐患；作业方案制定不合理，如清管速度设置过快、压力控制不当，导致清管器受到过大冲击力；管道预处理不充分，管道内存在遗留的焊渣、杂物等障碍物，清管器通过时与障碍物碰撞，引发部件脱落；作业过程中监控不到位，未及时发现清管器运行异常，错过故障干预时机^[1]。

管道工况复杂是部件脱落的重要外部因素。管道老化导致内壁腐蚀、结垢严重，形成不规则凸起，清管器通过时部件受到不均匀挤压，易发生变形脱落；管道铺设过程中存在的弯头、三通、变径等结构，使清管器运行轨迹突变，产生较大的冲击力与侧向力，导致支撑或连接部件损坏；输送介质的物理化学性质复杂，如含酸性介质的管道易腐蚀金属连接部件，含高粘度介质的管道易导致部件被粘连拉扯脱落；介质压力波动过大，导致清管器受力不稳定，加剧部件磨损与连接松动。

2.2 部件脱落的主要影响

对管道运行安全性的威胁最为突出。脱落部件滞留管道内，易形成堵塞，导致管道内压力急剧升高，超过管道承压极限时引发管道破裂泄漏；对于油气管道，泄漏的油气与空气混合形成爆炸性混合物，遇火源可能引发爆炸事故，造成人员伤亡与环境破坏；脱落的金属部件与管道内壁碰撞摩擦，可能产生火花，同样存在爆炸风险。

对管道运行经济性的影响直接且显著。部件脱落导致清管作业中断，需暂停管道输送进行救援，造成输送量损失，尤其对于油气管道，停机一天可能造成数百万元的经济损失；救援作业需投入大量的人力、设备及物资，如检测设备租赁、救援工具制作、作业人员薪酬等，增加运维成本；若脱落部件造成管道内壁损伤或破裂，管道修复费用高昂，且修复周期长，进一步扩大经济损失；同时，事故可能影响企业声誉，导致客户流失，造成间接经济损失。

对管道运维稳定性的干扰不容忽视。部件脱落打乱正常的清管运维计划，导致后续清管、检测作业无法按预期开展，影响管道运维的连续性；脱落部件若未及时发现，可能与后续投入的清管器或检测设备碰撞，造成设备损坏，增加设备维修成本；救援过程中可能对管道内壁造成二次损伤，如打捞过程中划伤防腐层，给后续运维带来新的挑战；此外，事故处理过程中需协调多方资源，如技术专家、设备供应商、应急救援队伍等，增加运维管理的复杂性。

3. 管道清管器部件脱落的救援技术与实施流程

3.1 主流救援技术及适用场景

机械打捞技术是最常用的救援技术，通过设计专用打捞工具，深入管道内将脱落部件抓取或钩取出来，适用于大多数类型的部件脱落场景，尤其适用于体积较大、重量较重的金属部件。根据脱落部件的形状与状态，常用的打捞工具包括抓斗式打捞器、钩式打捞器、磁吸式打捞器、网篮式打捞器等。

抓斗式打捞器通过液压或机械驱动抓斗开合，抓取脱落部件，适用于形状规则、表面平整的部件，如导向轮、支撑臂等；钩式打捞器通过多个尖锐挂钩钩住部件缝隙或孔洞，适用于带有孔眼、凸起的部件，如检测探头、刀盘等；磁吸式打捞器利用强磁体吸附金属部件，适用于小体积、重量轻的金属部件，如螺栓、销轴等；网篮式打捞器通过金属网篮收集小型、零散的脱落部件，如密封圈碎片、传感器外壳等。机械打捞技术的优势是打捞成功率高，可直接将部件取出，避免二次污染；但需根据部件特点定制打捞工具，作业周期相对较长。

流体反推技术通过反向输送介质，利用介质压力将脱落部件推回管道起点或就近的清管器接收装置，适用于脱落部件体积较小、重量较轻、未完全堵塞管道的场景，如皮碗碎片、小型密封圈等。该技术的核心是通过调整管道进出口阀门，改变介质流向，控制反推压力与流量，确保部件在介质推动下平稳移动，避免因压力过大导致部件卡滞或管道损伤。流体反推技术的优势是无需投入复杂打捞设备，作业成本低、周期短，可在不停机或短时间停机情况下开展；但受部件重量、管道坡度、介质粘度等因素影响，适用范围有限，对于大重量部件或陡坡管道效果不佳^[2]。

切割破碎技术适用于脱落部件体积庞大、形状不规则，无法直接打捞或反推的场景，如大型刀盘、支撑臂断裂后形成的不规

则部件,或部件与管道内壁卡紧无法移动的情况。该技术通过将切割工具投入管道内,对脱落部件进行切割破碎,将其分解为小型碎片后,再通过网篮式打捞器或流体反推方式取出。常用的切割工具包括液压切割器、激光切割器、机械切割器等,其中液压切割器适用于金属部件切割,激光切割器切割精度高、效率高,适用于高精度切割场景。切割破碎技术的优势是可解决复杂卡堵问题,扩大救援适用范围;但技术难度大,需专业操作团队,且切割过程中可能产生火花,在油气管道中应用需采取严格的防爆措施。

3.2 救援作业实施流程

为确保救援作业安全高效开展,需遵循“应急响应-方案制定-作业实施-恢复验证”的标准化实施流程,明确各环节的核心任务与安全要求。

应急响应阶段是救援的启动环节,核心任务是快速处置与信息收集。当通过压力流量监测发现部件脱落迹象后,立即启动应急救援预案,暂停清管作业,若存在泄漏风险,需关闭相关阀门切断介质输送,设置警戒区域,防止无关人员进入;组织技术团队开展初步检测,确定脱落区域范围,同时收集管道参数(口径、壁厚、材质、压力等级)、清管器型号、部件参数(类型、尺寸、材质)等基础信息,为方案制定提供数据支撑^[3]。

方案制定阶段是救援的核心环节,需结合检测定位结果与基础信息,制定科学可行的救援方案。组织技术专家、作业人员、设备供应商开展方案论证,明确救援技术选择(打捞、反推、切割或组合技术)、救援设备选型与制作、作业流程、安全保障措施、应急预案等内容;对于复杂场景,如大口径管道、高压管道或油气管道,需进行模拟实验验证方案可行性;同时办理相关作业许可,如动火作业许可、有限空间作业许可等,明确各岗位职责与作业时间节点。

作业实施阶段需严格按照方案执行,强化过程管控。作业前对所有设备进行全面检查,确保设备性能完好;对作业人员进行安全培训与技术交底,明确作业流程与风险防控要点;根据救援技术要求开展作业,如机械打捞作业需缓慢投放打捞工具,通过实时监测工具姿态调整操作,避免与管道内壁碰撞;流体反推作业需缓慢调整压力,实时监测流量变化,防止压力骤升;切割破

碎作业需严格控制切割速度,做好防爆、防火措施;作业过程中安排专人监控管道压力、温度等参数,一旦出现异常立即停止作业,启动应急预案。

恢复验证阶段是救援的收尾环节,确保管道恢复安全运行。救援完成后,通过超声检测、压力测试等方式检查管道内壁是否存在损伤,若存在损伤需及时修复;投入清管器进行试清管作业,验证管道内是否残留部件碎片,同时清除救援过程中产生的杂质;恢复管道介质输送,逐步提升压力与流量,实时监测管道运行参数,确保参数稳定正常;最后整理救援作业资料,包括检测报告、作业记录、设备使用情况等,形成事故案例档案,为后续类似事故处置提供参考^[4]。

4. 结论与展望

管道清管器部件脱落是管道运维中的常见且危害严重的问题,其发生是设计、制造、运维、工况等多因素共同作用的结果,可能导致管道堵塞、泄漏爆炸等安全事故,造成巨大的经济损失。未来,随着管道运维智能化水平的提升,管道清管器部件脱落的防控技术将向以下方向发展:一是智能化检测定位技术进一步升级,通过融合人工智能算法,实现脱落部件的自动识别与精准定位,提升检测效率与精度;二是救援技术向无人化、自动化方向发展,研发管道内无人救援机器人,实现远程操控下的自动化打捞、切割作业,降低人工干预风险;三是预防管控向预测性维护转型,通过大数据与机器学习技术,建立部件失效预测模型,实现部件寿命的精准预测与预防性更换;四是新型环保材料与结构的广泛应用,从根本上提升部件可靠性,减少脱落风险。

参考文献:

- [1] 唐林.管道清管器部件脱落及其救援研究[J].管道保护,2025,2(05):60-65+72.
- [2] 何永垚,陈艺揉,马文礼,等.长输油气管道清管技术与发展趋势[J].石化技术,2025,32(04):42-45.
- [3] 辛建旭.原油管道清管器运动模型研究现状[J].中国石油和化工标准与质量,2025,45(05):129-131.
- [4] 王强,辛佳兴,王安泉,等.高通过性油气管道的变径检测清管器[J].无损检测,2025,47(02):73-78.