

# 井口套管冷切割打孔装置

鹿召臣

中石化中原石油工程有限公司井下特种作业公司 河南 濮阳 457001

**摘要:** 针对油气田开发中后期取换套管作业中,井口打孔及切割面临的高风险动火隐患、内层套管误伤风险及环境污染问题。研制了一套集水力喷射打孔、环形切割及远程控制于一体的一体化装置。该装置基于高压水射流磨料冷切割原理,通过密封定位系统、可转向喷头系统及远程控制系统,实现了井口不动火作业。现场应用表明,该装置工作压力可达45MPa,打孔时间仅需20-40秒,且能有效调节射流角度避免损伤内衬套管。该技术实现了井口作业的本质安全,将高风险动火作业转变为普通作业,具有显著的安全效益和经济效益。

**关键词:** 套管修复;水力冷切割;带压打孔;高压磨料射流;本质安全

**引言:** 随着油气田进入开发中后期,生产套管损坏井数量日益增多,取换套管成为恢复产能的重要手段。在取换套管工艺中,为释放井口环空圈闭压力或进行套管切割,必须在井口进行打孔或切割作业。传统的作业方式多采用手电钻、钢钎击穿或气焊切割,属于一级动火作业,极易引燃泄漏的油气,引发燃爆事故。虽然文献提出了远程控制钻孔技术,但钻头摩擦仍会产生高温甚至火星,存在安全隐患<sup>[1]</sup>。此外,传统方式缺乏有效的环保控制措施,且劳动强度大。为解决上述问题,本文提出了一种基于高压水射流磨料技术的井口套管水力冷切割与带压打孔一体化技术,实现了从“热作业”到“冷作业”的本质跨越。

## 1 传统井口打孔作业技术现状及问题

### 1.1 传统作业技术现状

当前油气田修井作业中,传统井口套管打孔从手电钻打孔再用榔头敲击钢钎击穿套管到套罐上焊接油管短节连接电钻打孔再到卡箍式液压远程打孔,卡箍式液压远程打孔还被广泛应用。

**人工电钻+钢钎击穿:** 人工电钻钻孔结合钢钎击穿为主,具体流程为:先用钻头将套管钻至剩余1-2mm厚度,再用榔头敲击钢钎,将套管击穿实现环空压力释放。该方法属于明火作业,油气作业施工现场施工具有风险大、劳动强度高的特点。

**焊接短节+电钻:** 套罐上焊接油管短节连接电钻打孔方式,具体流程为:先在打孔的套管上焊接一个73mm的公扣油管短节,手持电钻上加工了一套与支架,电钻在支架里通过对应的弹簧可以往复电钻,支架的前端安装了油管接箍,电钻钻头卡在接箍里,接箍的中后端开孔25mm用钢丝胶管连接到井口外,实现放喷的条件,电钻钻头的最大进尺超过接箍前端20mm,在打孔过程中确保

钻穿套管,打孔时将电钻支架与套管上的油管短节连接后安装电钻打孔。

**卡箍式液压远程打孔:** 卡箍式液压远程打孔是加工了一套液压驱动电钻打孔,通过两个与套管一致的卡箍连接液压驱动电钻,卡箍连接实现了不动火与井口套管连接,远程(30米)用液缸对电钻施加钻压,不用人工加压。

### 1.2 传统井口打孔作业存在的问题

结合现场作业实践,以上方式存在诸多突出问题,严重制约了修井作业的安全高效开展,具体可归纳为以下三个方面。

#### 1.2.1 安全隐患突出,易引发人身伤害与燃爆事故

手电钻打孔再用榔头敲击钢钎击穿套管、套罐上焊接油管短节连接电钻打孔、卡箍式液压远程打孔都属于动火作业,可能引燃环空泄漏的油气,引发燃爆事故,给现场作业安全带来严重威胁。井口动火必须提级管理,属于一级动火,各项安全措施及审批程序要齐全,电钻打孔属于许可类作业。

#### 1.2.2 环保污染严重,不符合绿色修井要求

传统打孔方式缺乏有效的油气流控制措施,钢钎击穿套管后,环空内的油气会直接喷涌而出,不仅造成油气资源浪费,还会污染土壤、水体与大气环境。一旦发生油气流失控,后续环保治理难度大、成本高,同时可能面临环保部门的处罚,给企业带来经济损失与声誉影响。套罐上焊接油管短节连接电钻打孔与卡箍式液压远程打孔通过管线引到放喷罐内,放喷存在气体时,无法实现控制。

## 2 井口套管打孔、切割一体化装置的总体设计

### 2.1 系统组成

该一体化装置主要由六个核心部分组成:包括动力

与射流系统、执行机构（打孔模式）、执行机构（环切模式）、管路系统、安全保护系统<sup>[2]</sup>。

2.1.1 动力与射流系统：主要由高压管线、磨料罐、高压柱塞泵、低压管线、储水罐组成。其中，高压管线一端与高压喷射枪头的高压快速接头连接，另一端分别与磨料罐出口和高压柱塞泵的出水口连接。低压管线两端分别与高压柱塞泵的入水口和储水罐出口连接。启动高压柱塞泵，置于储水罐中的清水经过低压管线进入高压柱塞泵加压，并与磨料罐中的磨料充分预混后，带动磨料经过高压管线、喷射枪头，形成高压磨料射流，喷射至待打孔或待切割套管的预定位置。

2.1.2 执行机构（打孔模式）：主要由密封定位系统、可转向射流喷头、泄压系统及沉砂包组成。

密封定位系统靠螺栓固定于待打孔套管上，其一侧固定座设有通孔，内外为连接螺纹。水力喷射打孔系统通过高压管线与固定装置外端的螺纹连接。可转向喷头系统至于密封定位系统空腔内，与其内部的螺纹连接。转向射流喷头安装在密封定位系统的腔体内，喷头在腔体的安装角度为15°，此角度可以确保在打孔过程中不破坏套管内套管。在打孔过程中切割中的水和金刚砂会流入设计的沉砂包内，沉砂包的作用是可以将金刚砂沉淀，防止套管打穿后，套管内的圈闭油气瞬间释放，携带金刚砂堵塞泄压管线。沉砂包上装有压力表，压力表量程35MPa，压力表作用是在打孔完成后检测套管环空内的圈闭油气压力，若有压力要先将环空内压力通过管汇释放，确保压力为0后再拆解打孔装置。沉砂包上油气水出口在本体的上半部，出口为32mm。出口高度设置主要便于沉砂与油气的分离排出，出口直径32mm，此直径能够满足油气水的排放。沉砂包采用9寸5套管制作，容积0.25m<sup>3</sup>。沉砂包进口采用无缝钢管制作，直径32mm，长度350mm，连接管采用弧形设计，主要为了在现场安装时避让套管附近的其他装置，此弧形满足了水、气、油、金刚砂的快速流动。

2.1.3 执行机构（环切模式）：主要由水力环切系统、水平支撑总成及防爆驱动电机组成。

水力环切系统是该执行机构的主要执行部分，主要包括可转向喷头系统、链条总成、行走总成。

可转向喷头系统：主要由喷射枪头、高压快速接头、角度调整杆及固定销组成。喷头在施工中可以任意调整角度与套管的距离，喷头前端为高压喷射水嘴，主要是将高压喷砂射流喷向待切割套管，喷头可拆卸设计，便于喷头的更换与维护，作业人员可根据套管厚度与材质，快速调整喷头角度与套管距离。喷头选用耐高温、耐磨、耐

油腐蚀的材质。喷射枪头尾端与角度调节杆连接，可通过调节杆调整喷射枪头的高度和角度，直至调整枪头合适位置，松开调节杆手柄即可锁紧，最大调整角度为45°，从而消除误操作而导致打穿内衬套的风险。

链条总成主要由链条、链条导轮、链条轨道、链条张紧装置组成。

链条的作用主要是锁紧和提供行驶轨迹，装置运动时，围绕着链条进行圆周运动，链条导轮有两个，导轮直径1.5cm，一个连接防爆电机，依靠电机带动导轮转动，为该装置的主动轮；一个与链条张紧装置连接，为该装置的从动轮。两个导轮与环状链条相互啮合，在电机作用下，两个导轮能够沿环状链条圆周运动。

链条张紧装置主要由调节手轮、调节螺杆、张紧支架组成，张紧支架前端与链条导轮的从动轮通过中轴连接，该装置安装在整个井口套管环切装置一侧，通过调节手轮，可以调整从动轮前后移动，调整链条的松紧度，从而实现链条松紧度适中，确保整个装置在圆周运动时行驶稳定，力度均衡。

行走总成主要由行走小车、行驶轮、轴承套和固定杆组成。

行走小车为平板状，底面安装4个行驶轮，前端两个主动轮和后端两个从动轮，其目的是防止圆周运动时出现跑偏现象。行驶轮主要由4个，装置顺时针行走，行走在前端的为主动轮，后端的为从动轮，行驶轮为橡胶轮，分别用螺栓固定在行走小车底面，行驶轮之间的距离是12cm，在套管直径大于12cm套管上都能实现切割。在行走小车顶面加工一环状轴承套，内部有轴承，电机下端的主动齿轮中轴就安装在轴承套内，其主要作用是确保主动齿轮转动丝滑和稳定。固定杆其作用是固定防爆接线箱，确保接线箱稳固牢靠。

水平支撑总成：主要有2个对称的水平支撑盘、销轴、锁紧手柄及调节丝杠组成。主要为行走小车提高行走辅助平面，确保环切装置行走平稳，保持切割面在同一水平面上。

防爆驱动电机安装在套管环切行走小车上，外有防爆接线箱保护，防爆电机电压220V，电流25A，驱动电机适配井口作业防火防爆的安全要求，避免电机运行过程中产生火花，引燃环空泄漏的油气。电机功率经过精准计算，既能满足不同厚度套管的切割需求，又能实现节能运行，降低能耗。确保了在切割中的施工安全。

2.1.4 管路系统：主要由高压软管、低压供水管及泄压管线组成。

2.1.5 远程控制系统：配备20米远程控制手柄，操作

人员可在安全距离外启停设备；井口套管环切装置行走功能，主要通过远程控制手柄控制，操作手柄上有行驶小车开关和行驶小车行驶速度两个功能，行驶速度根据套管的壁厚和喷头与套管的距离进行调节。通过控制开关控制装置的启动和停止，通过旋转转速手柄能够控制装置的行走和行走速度，操作距离可达20米，确保了操作人员的操作安全。

2.1.6 安全保护系统：安全阀、单向阀及压力表。其主要作用是在套管打孔或切割过程中的安全保障。

## 2.2 工作原理

清水经储水罐过滤后，由高压柱塞泵加压，与磨料罐中的金刚砂（60-80目）充分混合，形成高压金刚砂浆射流。射流经高压软管输送至喷头，通过可转向喷头调节角度，对套管进行冷切割或打孔。

打孔模式：将利用密封定位模具固定在套管待打孔的位置，高压射流穿透套管，水砂混合物及环空圈闭压力及流体经导管流入沉砂包进行气液分离与沉淀，然后通过泄压管线回收如罐。

环切模式：将水平支撑总成固定到待切割套管上，再固定安装水力环切系统，利用链条与行走小车在水平支撑总成上行走，驱动喷头即可沿套管圆周运动，实现全断面环切。

## 3 关键技术设计

### 3.1 可转向射流喷头设计

为解决误伤内衬套管的难题，设计了可调节角度的射流喷头。

调节机制：采用顶丝方式，配合角度调整杆和固定销，喷头角度可在 $0^{\circ}$ 至 $45^{\circ}$ 范围内任意调节（打孔时通常设为 $15^{\circ}$ ，环切时设为垂直 $90^{\circ}$ ）。

优势：通过改变射流方向，利用离心力或特定角度避开内层套管，从源头上消除了误操作风险。

### 3.2 密封定位与泄压系统（针对打孔作业）

针对带压打孔需求，设计了专用模具与沉砂包：

模具设计：根据7寸、9.5寸、13.3寸套管加工了三套模具，采用40铬钼丝杠（直径22mm），确保承压安全。

沉砂包：容积 $0.25\text{m}^3$ ，设有压力表监测环空压力，出口位于上半部便于油气水分离，有效防止金刚砂堵塞管线。

## 4 现场应用与故障排查

### 4.1 操作步骤：

（1）将设备置于地面较为平整的地面，安置稳妥，确保进水温度 $0\text{--}50^{\circ}\text{C}$ ，进水压力 $0.1\text{--}3\text{MPa}$ ，进水流量小

于 $15\text{L}/\text{min}$ 。

（2）准备高、低压软管，准备与之相匹配的密封系统，确保进水压力 $0\text{--}3\text{MPa}$ ，流量在 $15\text{L}/\text{min}$ 规定范围，将外部水源与低压软管用接头相连：取下进水阀门处的防尘堵头，将低压软管接头插入，插入卡扣，实现低压软管接头与设备进水阀门处的快速拉杆连接，高压软管的连接将高压软管一端的高压快接插入设备的高压快接插头并拧紧。

（3）把喷头装在高压管上，再把射流喷头安装在密封定位模具上，调整高压角度和距离，联通电源打开水源，即可进行切割打孔。

（4）打孔时根据不同的管径和角度，喷头距离管径的距离来定打孔的时间，时间延时 $2\text{s}$ ，确保在打孔中打穿套罐。因打孔可调角度，在打孔时不会破坏内层套管。

（5）打孔完成后，先关闭磨料控制手柄，再关闭电源：（根据使用高压胶管的长度决定关闭磨料之后多长时间关闭电源，20米胶管12秒，30米胶管20秒，50米胶管35秒）。

## 4.2 现场应用

井口套管冷切割打孔一体化装置研制成功后，在文23储23-32井、文23储23-33井等10口井进行了应用，并取得了显著的效果<sup>[3]</sup>。

## 5 结论

井口套管水力冷切割与带压打孔装置成功实现了油气井修复作业中的“冷切割”，技术上可行，安全上可靠。

该装置通过可转向喷头设计，完美解决了打孔时误伤内衬套管的行业难题。

远程控制系统的运用，保障了操作人员的安全距离，实现了作业过程的智能化与自动化。

该技术具有显著的经济效益和广阔的推广应用前景，特别适用于存在圈闭压力或高含硫等危险井况的套管修复作业。

## 参考文献

[1]田志超.水力内割刀在中国东部海区科学钻探套管卡阻事故处理中的应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(3):75-79.

[2]徐鸿飞,王超,邓贺,等.一种油气井封固套管回收装置及其回收方法:CN202110579451.5[P].2021-10-08.

[3]穆哈马德·阿里·穆萨拉特.多喷嘴磨料水射流在油气平台退役中的应用综述[J].土木工程与建筑,2021,9(6):2062-2076.