

# 页岩气井无限级固井滑套压裂技术

王伟佳

中石化江汉石油工程有限公司页岩气开采技术服务公司 湖北武汉 430074

通讯作者:Email:weijia07@163.com

引用:王伟佳. 页岩气井无限级固井滑套压裂技术[J]. 油气井测试, 2018, 27(5):37-41.

Cite: WANG Weijia. Infinite-stage cementing sleeve fracturing technology for shale gas wells [J]. Well Testing, 2018, 27(5):37-41.

**摘要** 传统的页岩气井多级桥塞射孔联作压裂无法保证压裂液和支撑剂的去向,压裂效果差。无限级固井滑套压裂技术井下工具由趾端滑套、固井滑套及滑套开关工具组成,根据国内页岩气地质情况优化开关滑套及压裂施工程序,针对施工井况制定应急处置措施,在涪陵页岩气田进行了实际应用。实际应用中出现因固井质量差滑套的开启难以满足预期、连续油管外压裂时对管材易冲蚀、封隔器附近易发生砂堵、施工排量限制较多、封隔器不容易通过滑套、连续油管水平段延伸困难等多种问题。该工艺对埋藏深、水平段长、井眼轨迹复杂、压裂改造规模较大的页岩气井还未完全适用,还需继续探索。

**关键词** 页岩气;水平井;压裂;固井;滑套;连续油管

**中图分类号**:TE353 **文献标识码**:B **DOI**:10.19680/j.cnki.1004-4388.2018.05.007

## Infinite-stage cementing sleeve fracturing technology for shale gas wells

WANG Weijia

Shale Gas service Company, SINOPEC Jiangnan Oilfield Service Corporation, Wuhan, Hubei 430074, China

**Abstract:** The traditional multi-stage bridge plug perforation cannot guarantee the direction of fracturing fluid and proppant when fracturing, and the fracturing effect cannot be guaranteed, which leads to a bad the fracturing result. An infinite-stage cementing sliding sleeve fracturing downhole tool was designed by combining the toe-end sliding sleeve, cementing sliding sleeve and sliding sleeve switching tool combination. According to the domestic shale gas geological conditions, this paper optimizes the switch sleeve and the construction procedures of fracturing and formulates emergency treatment measures for the specific well conditions of construction. Finally, the technology has been successfully applied in the Fuling shale gas field. However, a series of problems have arisen in the actual application process. For example, poor cementing quality will cause the opening of the sliding sleeve cannot meet the expectations; the tubing is prone to erosion during fracturing because of has high requirements on the strength of the tubing; sand plugging is easy to occur near the packer; there are many restrictions on construction displacement; packer does not easily pass through the sliding sleeve; and the horizontal section of coiled tubing is difficult to extend. For shale gas wells with deep burial, long horizontal section, complex well trajectory and large scale of fracturing, this technology is not fully applicable, so it is necessary to continue exploring.

**Keywords:** shale gas; horizontal well; fracturing; cementing; sliding sleeve; coiled tubing

目前国内页岩气井压裂普遍采用多级桥塞射孔联作,该方法采取空套管压裂,保证了压裂排量,降低了压裂风险<sup>[1-3]</sup>。该方法多簇同时压裂,无法保证压裂液和支撑剂的去向,据统计有三分之一的层位未实现压裂增产;同时压裂结束后需利用连续油管钻除井筒内桥塞,部分桥塞碎屑无法返出,影响后续施工<sup>[4-5]</sup>。

由于近年来油价持续下滑,为提高产量而进行的压裂过程优化显得尤为重要。其中无限级固井滑套压裂技术是在下套管时预置固井滑套,压裂时采用带底部封隔器的开关工具打开滑套,进行每一

级的压裂<sup>[6-7]</sup>。无限级固井滑套压裂技术以单独定点压裂每一级(相当于多级桥塞射孔联作法的每一簇)为前提,和同时压裂多簇相反,这样支撑剂不会像多级桥塞射孔联作法中都流向了地层磨阻相对少的层位,这种方法也保证了每一层都会达到预期的效果。这种工艺每次只打开一个滑套进行压裂,可以大大降低施工所需水马力,减少施工压裂设备,降低施工成本<sup>[8-9]</sup>。作业完毕后井筒内无残余物,可确保井筒全通径及清洁。

前期王伟佳等针对固井滑套完井单级定点压裂效果未知的问题,对多级固井滑套完井技术与多

级泵送射孔联作完井技术进行了对比,得出多级固井滑套完井技术压裂效果优于多级泵送射孔联作完井技术<sup>[10]</sup>。杨永青等针对无限级滑套压裂新技术在国内是否适用的问题,进行适用性分析,并举例介绍了其在苏里格低渗油气藏的一次应用,得出其在低渗油气藏具备一定可行性<sup>[11-12]</sup>。

无限级固井滑套压裂技术在全球范围内多应用于页岩气水平井压裂施工,前期未有人将其引进国内页岩气领域应用,对于国内页岩气普遍埋藏较深、压力较高未论证该工艺的适用性。本文主要针对四川盆地页岩气水平井对无限级固井滑套压裂技术在井下工具、开关滑套及压裂施工程序、异常情况处置等方面进行优化,并选择了一口井进行实际应用验证该工艺的适用性。

## 1 无限级固井滑套压裂工艺

无限级固井滑套压裂技术滑套与套管一起连接下入,并固井。其中最底端滑套即趾端滑套为压力延时滑套,为纯压力打开,配有延时机构,可适应全井筒套管试压;其他滑套为压差滑套,利用封隔器隔绝滑套传压孔,再通过打压建立压差打开<sup>[6]</sup>。压裂完成后,直接上提井下工具可以平衡封隔器上下压力,井下工具被上提到下一个滑套并重复以上步骤,直到所有层位压裂完毕。

### 1.1 工艺方案

无限级固井滑套压裂技术采用可重复坐封封隔器,机械式开启固井滑套,可以逐级打开每一级滑套,这个过程不需要泵送桥塞,不需要投球,也不需要钻磨,作业过程安全高效<sup>[5]</sup>。

(1)下入套管预置无限级滑套,进行固井。

(2)压力打开压力延时滑套,进行首段压裂。

(3)下入封隔器到固定位置坐封,环空打压建立压差打开滑套,进行压裂<sup>[6]</sup>。

### 1.2 工艺特点

无限级固井滑套压裂工艺具有以下几个特点:

(1)施工后,套管内全通径;

(2)定点单簇多级压裂,针对性强;

(3)施工装备少,相对泵送桥塞作业,压裂车需求数量减半;

(4)施工效率高,一次入井,无限级压裂作业,不需拆卸井口装置;

(5)简化压裂施工工序、不需要射孔作业及钻磨桥塞;

(6)通过循环通道将产生砂堵的支撑剂快速循环出井口,高效解决砂堵问题;

(7)对套管伤害小,打开滑套就可以直接压裂作业;

(8)减少安全隐患,不需要爆破品,避免了民爆品的储存、运输、及操作风险;

(9)不需要重新起出工具就可以使用备用的喷射短节在未射孔的套管上补孔。

### 1.3 井下工具

无限级固井滑套压裂工艺井下工具主要分为三个部分:压差滑套、固井滑套及滑套开关工具串。

#### 1.3.1 趾端滑套

该工艺随着套管一起下入井内的最底端滑套即趾端滑套是压力延时滑套,为纯压力打开<sup>[13]</sup>,配有延时机构,可适应全井筒套管试压,如图1所示。

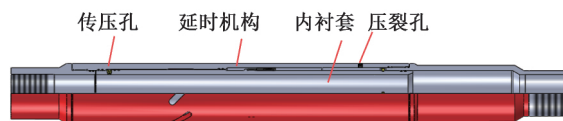


图1 趾端压力滑套示意图

Fig.1 Schematic diagram of toe end pressure sliding sleeve

#### 1.3.2 固井滑套

无限级固井滑套连接在套管上,随套管一起入井,被定位在要压裂的层位上。施工过程中需要打开时,将封隔器坐封于该位置,使其卡瓦抓牢内衬,增加封隔器上部井筒环空压力,封隔器和滑套内衬一起向下推移,从而打开滑套压裂端口,如图2所示。

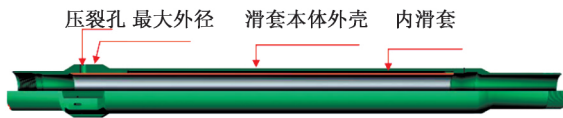


图2 无限级预置固井滑套示意图

Fig.2 A schematic diagram of an infinite stage prepositioned cementing slide

#### 1.3.3 滑套开关工具组合

滑套开关工具组合主要包括独特的可重复坐封封隔器、喷砂射孔总成、滑套定位器、泄压短节等相应部件,如图3所示。



图3 滑套开关工具串示意图

Fig.3 Slide sleeve switch tool string indication

(1)可重复坐封封隔器,具有三个功能:封隔下部层位;机械打开滑套;在压裂或喷砂射孔时固定位置。封隔器通过“J”轨机构,实现换位来进行坐

封和解封。实际操作时,通过上提下放连续油管进行J轨换位来完成封隔器坐封。封隔器配有方便自身排空、冲洗的平衡阀,帮助封隔器解封。

(2)喷砂射孔总成,用来在井内光套管段射孔作业,在必要时可以代替滑套进行射孔压裂。

(3)滑套定位器,具有专门的凹槽机构嵌在滑套的底部,当封隔器总成沿着滑套向上提拉时,机械定位器卡入凹槽,连续油管悬重增加,清楚判断封隔器已进入滑套。

#### 1.4 压裂施工程序

无限级固井滑套工艺一般程序是在钻井完成水平段进尺后,根据电测解释确定的压裂端口位置,进行管柱配长,确定套管滑套位置;进行相应井眼准备即通井程序后,无限级固井滑套随套管一起下入井筒,进行固井作业;压裂施工遵循以下方案:

(1)施工前需进行通井,确保井眼满足封隔器正常起下至目的深度的要求。

(2)套管试压,并打开第一级压差滑套,进行压裂。

(3)从井的底部开始,把连续油管开关滑套工具组合下入到第2个滑套下部,缓慢上提工具,让定位器嵌入滑套下部定位凹槽内,此时坐封封隔器,将下部井筒与上部井筒封隔开。此时,增加上部井筒环空压力,封隔器和滑套内衬一起向下推移,从而打开滑套压裂端口,沟通井筒与地层。通过连续油管指重表及井口地面井口压力变化情况判断滑套开启与否。一旦滑套打开,滑套定位器凹槽归位,工具机械定位器的弹簧键收拢,从而在滑套打开,但地层不进液的情况时提供另一个判断滑套是否打开的验证信号。

(4)压裂液通过油套环空泵入地层,进行压裂施工,同时使用小排量高压射流泵在连续油管内进行补液。连续油管实时监测压裂过程中井底压力变化,并根据井底压力的变化,现场调节泵注排量、液量及砂量。

(5)压裂完成后,上提连续油管解封封隔器;上提连续油管至下一级上一级滑套;重复打开滑套步骤,进行压裂。

(6)压裂结束后,解封封隔器,并依照以上步骤完成压裂。

## 2 存在的问题及对策

多级固井滑套压裂技术要求固井质量较高,部

分固井滑套的开启未能达到要求,连续油管外压裂管材易产生冲蚀影响强度,封隔器附近易堆积压裂砂影响封隔器解封等井下复杂、施工泵压和排量受限缝网延伸范围、封隔器过滑套坐封的阻卡、连续油管水平段延伸困难等多种问题等问题<sup>[15]</sup>。

经过现场应用,相比常规压裂,多级滑套固井压裂施工过程中常见问题及应急处置措施如下:

### 2.1 压裂滑套无法打开应急措施

(1)分析施工压力及连续油管悬重曲线,判断是滑套无法打开或滑套打开、地层压不开。

(2)判断是滑套无法打开时,重新确定滑套开关工具位置,重复定位、坐封封隔器,重复开滑套工序。

(3)若滑套仍无法打开,可以考虑适当提高打开滑套的限压。

(4)重新确定压裂簇位置,对该段进行喷砂射孔后压裂<sup>[14-16]</sup>。

### 2.2 压裂施工出现问题应急预案

(1)若压裂压力高、压不开,建议每层加1~3 m<sup>3</sup>浓度15%盐酸。

(2)如果加砂前期压力突然升高超过3 MPa,或一个砂浓度内压力上升超过4 MPa,但未出现砂堵,则降低加砂浓度,尽量提高排量(不要超过压裂设计的最高排量),观察压力的变化,正常后继续按设计施工。如果在后期出现压力突然升高,则马上进行顶替。

### 2.3 压裂砂堵时应急预案

(1)压裂砂堵发生时,保证连续油管补液泵车正常工作。

(2)倒正循环流程,控制回压,从连续油管内部大排量正洗冲砂。

### 2.4 工具串坐封/解封风险及预案

(1)砂卡影响坐封时,用排量0.5 m<sup>3</sup>/min洗井,在工具解封条件下,可从环空和连续油管同时注液冲洗。

(2)工具原因影响坐封时,将工具串上提到直井段,尝试坐封,能够坐封/验封,说明工具正常;如果不能正常坐封,上提或下放连续油管至其他井段尝试坐封;如果多次坐封不成功,则起出工具串检查。

### 2.5 其他注意事项

(1)压裂施工泵压高,排量大,易对连续油管冲蚀产生破坏。要求在连续油管选型时,外径至少50.8 mm以上,屈服强度至少75.8 MPa<sup>[17]</sup>。

(2)当地层破裂压力较高,需要泵注盐酸时,酸液对连续油管腐蚀性较强。要求连续油管加装在线检测装置,每段对起出注入头部分连续油管进行检测评估,在高压状态下持续工作时间累计一定时间,或累计泵注酸液量超额时,起出全井连续油管进行检测评估;同时优选优质高温缓蚀剂,泵注酸液前后使用。

(3)施工压力高,地面高压区域施工工序较多,安全风险大。尽量从环空施工,减小开关阀门频率,同时多采用远程液控阀,降低地面施工风险。

### 3 应用实例

在四川盆地的一口页岩气井进行了连续油管无限级固井滑套压裂施工,该井人工井底 5270.0 m,水平段长 1835.0 m,该井历经 31 d 完成了 31 级固井滑套压裂施工,其中通井、洗井 4 d;连续油管在线检测并评估 9 d;压裂施工时间 18 d,该井次作业没有充分发挥连续油管无限级滑套压裂高时效性的优点。

该井地层破裂压力 64.98~86.20 MPa,压裂施工泵压 25.06~88.65 MPa,停泵压力 19.88~46.56 MPa;停泵测压降 46.56~26.34 MPa,压裂入井总施工液量 22751.9 m<sup>3</sup>,入井总砂量 620.4 m<sup>3</sup>,其中第  $x$  段连续油管及压裂施工曲线如图 4~6。

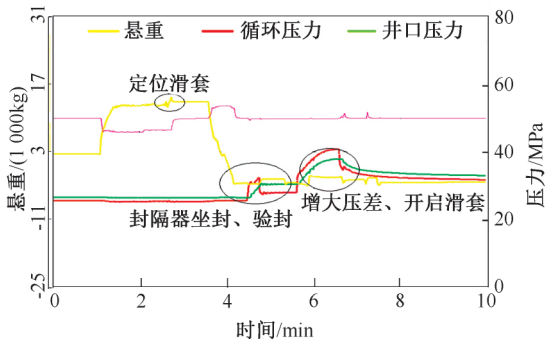


图4 第  $x$  段定位滑套,封隔器坐封、打开滑套曲线图  
Fig.4  $x$  section positioning sliding sleeve, packer seal and open sleeve curve

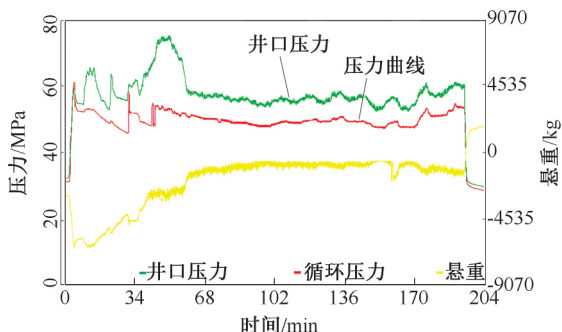


图5 第  $x$  段连续油管施工曲线图

Fig.5 Construction curve of  $x$  section continuous tubing

该井每段压裂施工耗时较多的工序为替酸试挤阶段(120 min);第 21~22、23~24、25~26、28~29、30~31 首段采用定位滑套、环空挤酸、开启滑套、压裂施工工艺,次段在首段压裂结束后继续替酸至滑套以上 10 m 处,解封封隔器、开启下级滑套、压裂施工工艺,次段替酸节约时间 1 h,整体作业时效性明显优于第一段。

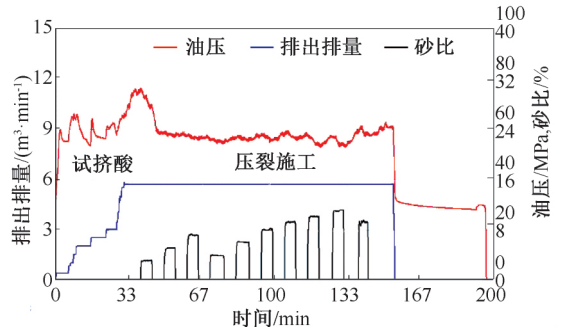


图6 第  $x$  段压裂施工曲线图

Fig.6  $x$  section fractured construction curve

通过对比 5~13、15、17、19 段和 4、14、16、18、20 段可发现,两组正常压裂施工期间数据基本一致,但两组层段在试挤期间压力后者要远远大于前者,且无明显压降,表明连续油管无限级固井滑套压裂工艺受固井水泥环影响较大,对固井质量要求较高。第 15、19 段出现压裂结束上提解封封隔器较困难,通过连续油管循环胶液清除封隔器附近沉沙,多次上提下放成功解封。在施工结束后发现连续油管在经酸浸、砂冲蚀、高压作业后,连续油管表面出现腐蚀、冲蚀点、椭圆度变大。

### 4 结论

(1)页岩气井无限级固井滑套压裂技术不投球,可下入多个滑套,实现定点单簇多级分段压裂,针对性强,压后井眼清洁,不影响后期作业。

(2)该工艺所需施工装备少,入井工具含喷砂射孔工具,需要时可进行喷砂射孔。

(3)井筒与地层没有直接连通,需要压破水泥环后液体才能进入地层,部分井需要泵注盐酸时,酸液对连续油管腐蚀性较强,井控风险较大。大排量压裂对管材强度要求较高,易对连续油管产生冲蚀破坏。

(4)该工艺对埋藏深、长水平段、井眼轨迹复杂、压裂改造规模较大的页岩气开发技术还未完全成熟,还需继续探索。

致谢:本论文在研究过程中得到中石化江汉石油工程公司页岩气开采技术服务公司的大力支持,不仅予以研究条件还寻

求一口井进行试验,并在最终撰写过程中给予细心指导,帮助通过保密审查,在此表示诚挚感谢。

## 参考文献

- [1] 李士伦.天然气工程[M].北京:石油工业出版社,2008:109-117.  
LI Shilun. Natural gas engineering[M]. Beijing: Oil industry press,2008:109-117.
- [2] 张怀文,张继春,胡新玉.水平井压裂工艺技术综述[J].新疆石油科技,2005,15(4):30-33.  
ZHANG Huaiwen, ZHANG Jichun, HU Xinyu. A review on fracturing technology of horizontal wells [J]. Xinjiang Petroleum Science & Technology, 2005, 15(4):30-33.
- [3] 侯洪涛,邹群,段志刚,等.先进的多层压裂技术[J].国外油田工程,2007,23(2):7-10.  
HOU Hongtao, ZOU Qun, DUAN Zhigang, et al. Advanced multilayer fracturing technology [J]. Foreign Oilfield Engineering, 2007, 23(2):7-10.
- [4] 程智远,刘志斌,张鹏,等.水平井裸眼分段压裂工具[J].石油科技论坛,2013,32(4):60-64.  
CHENG Zhiyuan, LIU Zhibin, ZHANG Peng, et al. Open hole fracturing tool for horizontal Wells [J]. Oil Forum, 2013, 32(4):60-64.
- [5] 张鹏,高波,刘江斌,等.苏里格气田气井压裂效果评价方法[J].辽宁化工,2010,39(7):736-738.  
ZHANG Peng, GAO Bo, LIU Jiangbin, et al. Fracturing effect evaluation method of gas well in Sulige gas field [J]. Liaoning Chemical Industry, 2010, 39(7):736-738.
- [6] 朱玉杰,郭朝辉,魏辽,等.套管固井分段压裂滑套关键技术分析[J].石油机械,2013,41(8):102-106.  
ZHU Yujie, GUO Chaohui, WEI Liao, et al. Analysis of key technology of casing cementing staged fracture sliding sleeve [J]. China Petroleum Machinery, 2013, 41(8):102-106.
- [7] MCGREGOR B, COX R, BEST J. Application of coiled tubing technology on a deep underpressured gas reservoir [C]. SPE 38379, 1997.
- [8] 廖开贵,李颖川,杨志,等.产水气藏气液两相管流动态规律研究[J].石油学报,2009,30(4):607-612.  
LIAO Kaigui, LI Yingchuan, YANG Zhi, et al. Study on the dynamic law of gas-liquid two-phase flow in water-producing gas reservoir [J]. Acta Petrolei Sinica, 2009, 30(4):607-612.
- [9] 蔡文斌,李兆敏,张霞林,等.低渗透油藏水平井压裂理论及现场工艺探讨[J].石油勘探与开发,2009,36(1):80-85.  
CAI Wenbin, LI Zhaomin, ZHANG Xialin, et al. Fracturing theory and field technology of horizontal well in low permeability reservoir [J]. Petroleum Exploration and Development, 2009, 36(1):80-85.
- [10] 赵铭,王伟佳.国外页岩气井连续油管固井滑套压裂完井方式研究[J].钻采工艺,2017,40(2):59-62.  
ZHAO Ming, WANG Weijia. Study on well completion

method of coiled tubing cementing sliding sleeve fracturing in shale gas well [J]. Drilling & Production Technology, 2017, 40(2):59-62.

- [11] 杨永青,王治华,王磊,等.无限级滑套压裂新工艺在苏里格气田的应用[J].钻采工艺,2015,38(1):62-64.  
YANG Yongqing, WANG Zhihua, WANG Lei, et al. The application of the new fracturing technology of infinite sliding sleeve in Sulige gas field [J]. Drilling & Production Technology, 2015, 38(1):62-64.
- [12] 李建奇,杨志伦,陈启文,等.苏里格气田水平井开发技术[J].天然气工业,2011,31(8):60-64.  
LI Jianqi, YANG Zhilun, CHEN Qiwen, et al. Horizontal well development technology of Sulige gas field [J]. Natural Gas Industry, 2011, 31(8):60-64.
- [13] 韩永亮,刘志斌,程智远,等.水平井分段压裂滑套的研制与应用[J].石油机械,2011,39(2):64-65.  
HAN Yongliang, LIU Zhibin, CHENG Zhiyuan, et al. Development and application of fracturing sliding sleeve for horizontal wells [J]. China Petroleum Machinery, 2011, 39(2):64-65.
- [14] 钱斌,朱炬辉,李建忠.连续油管喷砂射孔套管分段压裂新技术的现场应用[J].天然气工业,2011,31(5):67-69.  
QIAN Bin, ZHU Juhui, LI Jianzhong. Field application of new fracturing technology of continuous tubing sandblasting perforation casing [J]. Natural Gas Industry, 2011, 31(5):67-69.
- [15] 李梅,刘志斌,吕双,等.连续油管喷砂射孔环空分段压裂技术在苏里格气田的应用[J].石油钻采工艺,2013,35(4):82-84.  
LI Mei, LIU Zhibin, LYU Shuang, et al. The application of continuous tubing sandblasting perforation annulus fracturing technology in sulige gas field [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2013, 35(4):82-84.
- [16] 靳宝军,邢景宝,郑锋辉,等.连续油管喷砂射孔环空压裂工艺在大牛地气田的应用[J].钻采工艺,2011,34(2):39-41.  
JIN Baojun, XING Jingbao, ZHENG Fenghui, et al. Application of continuous tubing sandblasting perforation annulus fracturing technology in Daniudi gas field [J]. Drilling & Production Technology, 2011, 34(2):39-41.
- [17] 吕选鹏,周承富,陈辉,等.连续油管技术在页岩气勘探开发中应用前景[J].石油矿场机械,2012,41(2):67-70.  
LYU Xuanpeng, ZHOU Chengfu, CHEN Hui, et al. Application prospect of coiled tubing technology in shale gas exploration and development [J]. Oil Field Equipment, 2012, 41(2):67-70.

编辑 刘述忍

第一作者简介:王伟佳,男,1983年出生,硕士研究生,工程师,2011年6月毕业于西南石油大学石油工程测井专业,现从事连续油管相关作业。电话:13628661695;Email:weijia07@163.com。通信地址:湖北省武汉市洪山区光谷大道61号光谷智慧园,邮政编码:430074。