

# 试油全周期动态评价方法 ——以准噶尔盆地玛中区块玛 X 井为例

张文全<sup>1</sup>, 郝晓波<sup>1</sup>, 李雪彬<sup>2</sup>, 方云贵<sup>1</sup>, 杜连伟<sup>1</sup>, 陈雪茹<sup>1</sup>

1. 中国石油集团西部钻探工程有限公司试油公司 新疆克拉玛依 834000

2. 新疆油田公司勘探事业部 新疆克拉玛依 834000

通讯作者: Email: 1176304255@qq.com

引用: 张文全, 郝晓波, 李雪彬, 等. 试油全周期动态评价方法——以准噶尔盆地玛中区块玛 X 井为例[J]. 油气井测试, 2023, 32(3): 69-73.

Cite: ZHANG Wenquan, HAO Xiaobo, LI Xuebin, et al. Dynamic evaluation method for full cycle of oil testing: A case study of Well Ma X in Mazhong block, Junggar Basin[J]. Well Testing, 2023, 32(3): 69-73.

**摘要** 为了实现快速评价压裂效果、预测压后产能的目的,首次提出基于射孔后破堵、压裂压降数据的试油全周期动态评价方法。针对试油排采时间短、制度变化快、油气水多相流动、流动非稳态等特点,通过生产数据分析,实现了压后返排瞬态产量分析,精确表征压裂裂缝导流能力,结合关井压力资料综合分析,最终形成联合压裂停泵压降解释、生产数据分析、压力恢复测试的试油全周期动态评价方法。该方法应用于准噶尔盆地玛中区块玛 X 井,获取了对储层供液能力及边界范围、裂缝发育情况和基质物性合理的解释结果,为区块油藏储量申报及产能建设提供了有力支撑。

**关键词** 动态评价;压裂效果;产能预测;压裂压降;生产数据;压力恢复测试;瞬态产量;导流能力

中图分类号: TE353

文献标识码: B

DOI: 10.19680/j.cnki.1004-4388.2023.03.013

## Dynamic evaluation method for full cycle of oil testing: A case study of Well Ma X in Mazhongblock, Junggar Basin

ZHANG Wenquan<sup>1</sup>, HAO Xiaobo<sup>1</sup>, LI Xuebin<sup>2</sup>, FANG Yungui<sup>1</sup>, DU Lianwei<sup>1</sup>, CHEN Xueru<sup>1</sup>

1. Well Testing Company of XDEC, Karamay, Xinjiang 834000, China

2. Exploration Division of Xinjiang Oilfield Company, Karamay, Xinjiang 834000, China

**Abstract:** For purpose of rapidly evaluating the fracturing effect and predicting the post-frac productivity, a dynamic evaluation method for the full cycle of oil testing based on the data of plugging breaking and fracturing pressure drop after perforation was proposed for the first time. Considering the characteristics of short oil testing drainage time, rapid system change, oil-gas-water multiphase flow, and unsteady flow, through the analysis of production data, the transient production analysis of flowback after fracturing was realized, and the conductivity of induced fractures was accurately characterized. Combined with the comprehensive analysis of shut-in pressure data, a dynamic evaluation method for the full cycle of oil testing was finally developed by integrating interpretations of fracturing pump shutdown pressure drop, production data analysis, and build-up testing. This method was applied to Well Ma X in the Mazhong block of the Junggar Basin, providing reasonable explanations for reservoir fluid supply capacity, boundary range, fracture development, and matrix properties, effectively supporting reservoir reserve declaration and production capacity construction.

**Keywords:** dynamic evaluation; fracturing effect; productivity prediction; fracturing pressure drop; production data; build-up test; transient production; conductivity

砾岩油藏储层孔隙度、渗透率极低、储层非均质性强<sup>[1-3]</sup>,必须进行压裂改造才能获取储层产能。压裂裂缝监测与效果评价精度直接影响储层产能评价效果和后期开发效果<sup>[4-6]</sup>。近年来诸多学者多采用压裂后某一稳定阶段的试井资料进行跟踪分析来评价压裂效果及储层产能<sup>[7-9]</sup>,导致压

裂资料利用率低,并且无法全面、快速评价压裂效果及产能特征。

韩凤蕊<sup>[10]</sup>通过压力测试资料反卷积的外推识别地层参数模型和油藏参数,并预测井未来的产能,仅仅依靠关井测试时间点上的常规信息解释,缺少对生产井初期资料的综合分析;陈军等<sup>[11]</sup>结合

Arps 指数递减和翁氏模型提出了产量递减分析方法,该方法可以预测产量,不需要关井测试,不影响油田正常生产,但不能求取地层参数;赵海洋等<sup>[12]</sup>针对复合油藏产能预测,采用两区复合产量递减模型,运用该模型对油田实际生产数据进行了拟合解释,求取了油藏递减期的地层参数,但同样未考虑试油不同时期资料对解释结果的影响。

本文采用试油全周期动态评价方法开展针对破堵、压裂、排采及压力恢复测试的不同时期进行试油跟踪分析,实现了快速评价破堵、压裂效果,高效精确反演基质裂缝参数;将试油井不同周期过程中反映的矛盾点进行比对分析,有利于深入刻画储层物性、裂缝发育及边界特征,大大提高了对油藏的压裂后效果评价及产能预测的准确性。

## 1 方法原理

基于数字滤波破堵、压裂停泵数据反演、生产数据分析等系列方法,开展试油井全周期动态评价,实现了对裂缝及地层参数的实时分析。

### 1.1 破堵、压裂停泵压降数据分析方法原理

前人提出了基于数字滤波破堵、压裂停泵数据反演方法<sup>[13-15]</sup>,首先采用井筒垂直管流方程将变密度和流量的地面压力折算到井底压力,其次采用 FIR 滤波处理停泵后压降数据,消除停泵水锤等噪声干扰,获得反映地层渗流的压降数据,最后采用垂直裂缝井试井分析方法解释滤波后的压降数据,获得地层渗透率、原始地层压力及裂缝半长等重要参数,实现了对裂缝及地层参数的实时分析及评价。

### 1.2 生产数据分析方法原理

建立基质-水力压裂裂缝-裂缝网络系统内的油-水两相物质平衡方程和窜流量方程,使用 Matlab,结合牛顿-拉普森迭代法和有限元的思想进行求解设计和计算,建立引入玻尔兹曼新变量的非均质油藏三相瞬态线性流数学模型,形成了考虑储层非均质性、压力-产量双降、油水多相瞬态渗流等因素的生产数据分析方法,高效精确反演基质裂缝参数。

## 2 实例分析

为了验证该方法的正确性和适用性,选取了玛中 X 井的试油全周期生产数据进行分析。

### 2.1 基本情况

玛 X 井构造位置位于准噶尔盆地中央坳陷玛湖凹陷东斜坡玛中 13 井北断层岩性圈闭,试油层位

为百口泉组二段,试油井段 4 478.0~4 480.0 m,岩性为灰色荧光砂砾岩。钻井至井深 4 478.0 m 发生油气侵;录井气测异常幅度高,油气显示活跃;区域物性较差,测井资料显示井周天然裂缝发育;经电缆带压射孔打开试油井段,通过破堵、压裂等增产改造措施,快速见油。最终经 4.0 mm 油嘴试产,获日产油 201.01 m<sup>3</sup>。

### 2.2 破堵压力与压裂压降数据分析

玛 X 井射孔后用清水破堵,破开压力 46.0 MPa,停泵压力 41.0 MPa。关井压力扩散 80 min,套压 41.0~40.0 MPa;开井退液 2.05 m<sup>3</sup>(压缩量)后不出,压降 0.0 MPa。通过分析破堵过程中套管放入的电子压力计数据(见图 1),折算末点油层中部压力 83.94 MPa,借用压裂压降软件分析破堵压降数据(见图 2),裂缝特征不明显,反映虽然破开了地层,但未能突破污染带。

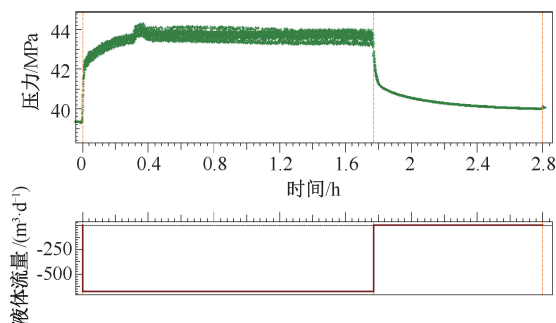


图 1 玛 X 井破堵电子压力计数据

Fig. 1 Electronic Pressure Gauge Data for MaX well

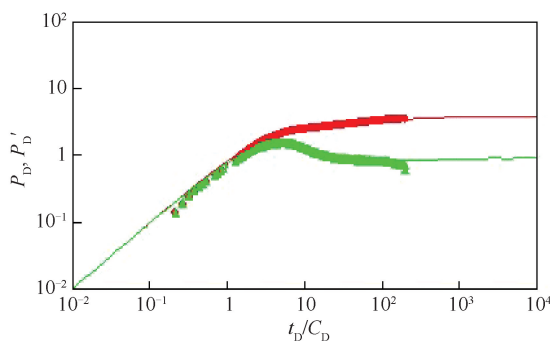


图 2 玛 X 井破堵压降双对数曲线图

Fig. 2 Double logarithmic curve of blockage breaking pressure drop for MaX well

本井套管压裂,共用压裂液 341.0 m<sup>3</sup>、加陶粒 30.0 m<sup>3</sup>,破裂压力 56.0 MPa,泵压 56.0~46.0 MPa,排量 10.5~12.0 m<sup>3</sup>/3 min,停泵套压 44.8 MPa。停泵 30 min 测压降油压 44.8~43.4 MPa;压力扩散 104 min,套压 43.4~43.0 MPa。根据压裂压降双对数曲线分析(见图 3),裂缝特征明显,拟合裂缝半长

90.0 m 左右,试油井段得到了充分改造,压裂造缝明显,解除井周与地层污染带。

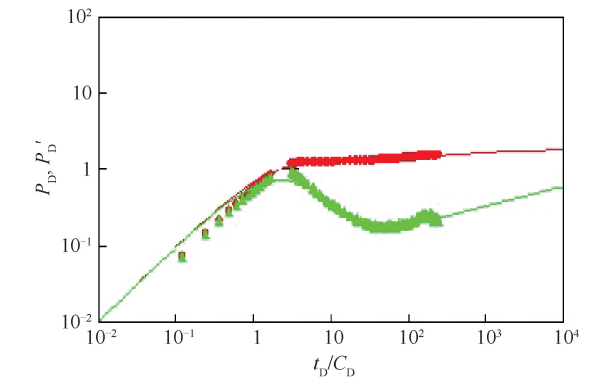


图 3 玛 X 井压裂压降双对数曲线图

Fig. 3 Double logarithmic curve of fracturing pressure drop for MaX well

2.3 退液、试产过程分析

玛 X 井压裂后退液一个井筒容积便快速见油,含油上涨迅速至无明水,反映井周高渗裂缝发育。2.0 mm 油嘴,小时平均压降 0.07 MPa,小时产量呈小台阶平稳下掉;3.0 mm 油嘴,小时平均压降 0.1 MPa,小时产量呈小台阶平稳上升,4.0 mm 油嘴试产,压力和产量下降快,小时平均压降 0.22 MPa,回试 3.0 mm 油嘴,压力和产量均低于前面 3.0 mm 油嘴(见表 1),反映储层存在压力衰竭。

表 1 玛 X 井排采数据表					
Table 1 Drainage and Production Data of Ma X well					
生产时长/ h	制度/ mm	套压/ MPa	流压/ (MPa·d <sup>-1</sup> )	日产油/ (m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> )	递减率/ (MPa·d <sup>-1</sup> )
72	2	43.8	81.905	54.76	0.73
48	3	39.9	77.617	119.37	2.04
48	4	27.6	66.02	201.01	5.23
96	3	21.6	61.30	88.22	1.76

2.4 生产数据分析

玛 X 井井底流压与累产油、流压递减速率与日产油量的关系:由封闭油藏压力与产量的关系式<sup>[16]</sup>(1),可知封闭油藏井底流压与累产量呈现线性关系特征。本井井底流压与累产油(见图 4)、流压递减速率与日产油量(见图 5)均呈线性关系,表明地层有封闭油藏特征。

封闭油藏压力与产量的关系式

$$p_{wf} = p_i - m \left( \log \frac{A}{C_A r_w^2} + 0.351 + 0.87s_i \right) - \frac{4.167 \times 10^{-2} q_0}{NC_i^* t} \quad (1)$$

式中:  $p_{wf}$  为井底流动压力,MPa;  $p_i$  为原始地层压力,MPa;  $A$  为层流系数;  $C_A$  为狄茨形状系数;  $s_i$  为表皮系数;  $r_w$  为井底半径,m;  $q_0$  为油井的产量,m<sup>3</sup>/d 或 t/d;  $N$  为油井控制的原始地质储量;  $C_i^*$  为总压缩系数;  $t$  为生产时长,d。

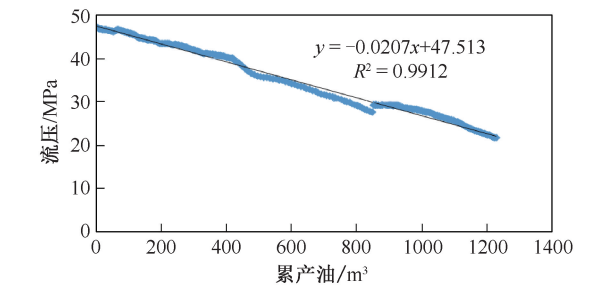


图 4 流压与累产量的关系图

Fig. 4 Relationship between flow pressure and cumulative production

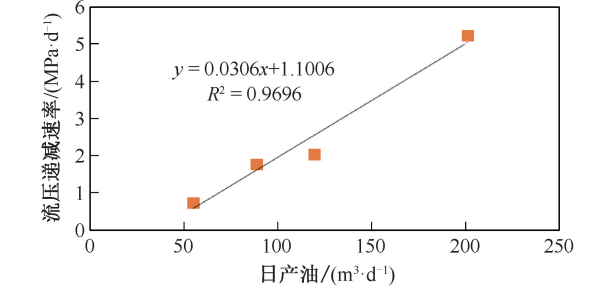


图 5 流压递减率与日产油量的关系图

Fig. 5 Relationship between flow pressure decline rate and daily oil production

将整理得到的井底流压与对应产量的小时生产数据,运用 RTA 生产数据分析软件进行特征线性流分析,反演得到地层物性参数,进而对流动阶段的识别。其前期为斜率 1/2 的裂缝线性流特征,后面出现斜率为 1 的边界流特征,RTA 方法软件分析同样出现边界的封闭油藏特征(见图 6)。

2.5 关井压力恢复资料分析

玛 X 井压力恢复测试关井 378.40 h,关井压力由 61.27 MPa 上升至 73.90 MPa,后期关井压力仍在缓慢上升,关井结束时压力上升速度为 0.177 MPa/d,反映远端储层物性较差。

压力恢复数据双对数导数(见图 7)分析:关井早期是导数曲线斜率为 1 的井筒储集效应;过渡段后出现斜率为 1/2 的无限导流裂缝特征;后出现一段短暂的水平段,表现为径向流特征;晚期导数曲线上翘,斜率 1/2,反映为渠形边界或物性变差的特征,但没有反映出封闭的边界特征,与前期试产反映出“储层存在压力衰竭现象”矛盾。

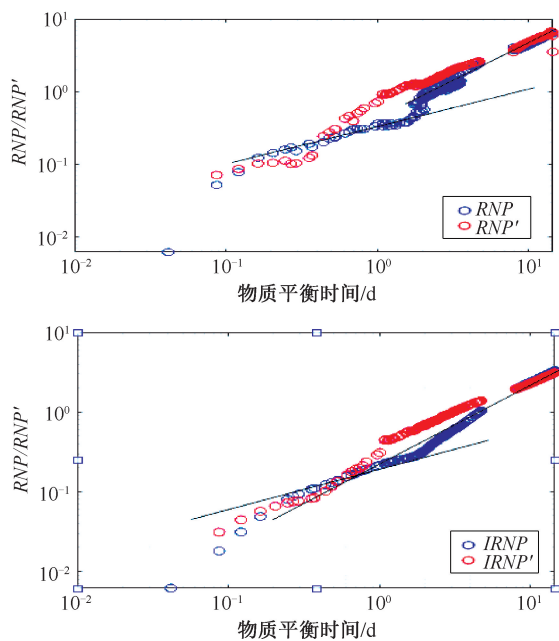


图6 RTA 流动阶段识别图

Fig. 6 RTA Flow Stage Identification Diagram

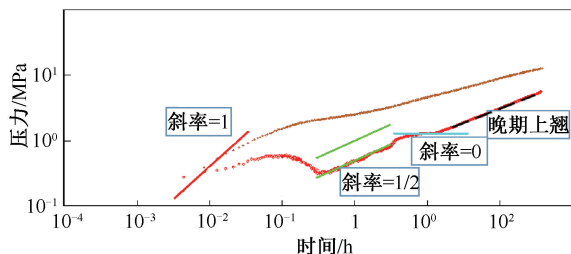


图7 双对数导数诊断图

Fig. 7 Diagnostic Diagram of Double logarithmic derivative

### 3 试油不同周期矛盾点分析

玛 X 井排采过程反映出“储层存在压力衰竭现象”,生产数据分析也能看到地层有封闭油藏特征,与关井压恢数据未反映出封闭边界特征的情况相矛盾。

本井钻井时发生油气侵,成像测井泥浆侵入明显,解释井周发育有高渗的裂缝带;压裂后退液仅一个井筒容积,便快速见油,且含油上涨迅速至无明水,最终获百万高产;印证了井周高渗裂缝发育。本井区域基质孔隙度 6%~8%,平均渗透率 0.14 md,表明远端基质物性差、渗透率低,试产过程中。换大制度 4.0 mm 油嘴试产,压力和产量下降快;回试小制度 3.0 mm 油嘴,压力和产量均明显低于前期 3.0 mm 油嘴试产结果;此外后期压力恢复测试关井 378.40 h,关井末期压力仍在缓慢上升,关井末期压力上升速度为 0.177 MPa/d;同样印证了远端

储层物性较差、渗透率低的特点。

通过综合分析认为井周发育高渗裂缝带,外区为物性差的储集体。当供液流动状态由井周高渗裂缝带转移到外区为物性差的储集体供液时,基质供液跟不上,导致压力和产量明显下掉双降,排采与生产数据分析可能会出现封闭的边界特征的假象。

## 4 结论

(1) 利用破堵、压裂、排采资料进行试油全周期动态分析,实现了快速评价破堵、压裂效果;

(2) 生产数据分析方法能有效识别储层的流动阶段,表征储层动态特征,高效精确反演基质裂缝参数;

(3) 对于井周发育高渗裂缝带,外区为物性差的储集体,其排采与生产数据分析结果可能会出现封闭的边界特征的假象,此时需结合关井压力恢复资料综合判断;

(4) 试油全周期动态评价方法有较好的适用性与时效性,有效解决了压裂资料利用率低,无法全面、快速评价压裂效果及产能特征的难题。对于压裂后储层基质贡献并产出单项流体的井,具有快速评价压裂效果、预测压后产能的重要作用和广阔的应用前景。

致谢:感谢中国石油大学(华东)提供技术支持。

## 参考文献

- [1] 陆建林,李国强,李朝勇,等.低渗透油藏早期试井资料解释方法研究[J].石油勘探与开发,1999,26(2):86-89.  
LU Jianlin, LI Guoqiang, LI Chaoyong, et al. An early well test interpretation method for low permeability reservoir [J]. Petroleum Exploration and Development, 1999, 26 (2): 86-89.
- [2] 陈元千.油气藏工程实用方法[M].石油工业出版社,2000,49(2):45-49.
- [3] 张琪.页岩油气宏观流动模拟及产能分析研究[D].中国石油大学(华东),2018.  
ZHANG Qi. Macro-scale flow simulation and productivity analysis in shale oil and gas reservoirs [D]. China University of Petroleum (East China), 2018.
- [4] 付勇.大港羊二庄油田河流相砂岩油藏剩余油分布研究[D].中国石油大学(华东),2018.  
FU Yong. The remaining oil distribution study of fluvial facies sandstone reservoir in Yangierzhuang Oilfield, Dagang [D]. China University of Petroleum (East China), 2018.
- [5] 孙科,刘慧卿,王腾,等.致密油藏压裂后衰竭开采单井



- 可采储量预测新方法[J]. 石油学报, 2020, 41(10): 38-47.
- SUN Ke, LIU Huiqing, WANG Teng, et al. A novel method for predicting recoverable reserves of single well through depletion-drive development after fracturing in tight oil reservoirs[J]. Acta Petrolei Sinica, 2020, 41(10): 1238-1247.
- [6] 张月娟. 页岩气水平井多段压裂缝-井筒流动耦合模型研究[D]. 西南石油大学, 2017.
- ZHANG Yuejuan. Study of the coupling model between fracture and multi-fractured horizontal wells of shale gas [D]. Southwest Petroleum University, 2017.
- [7] 贾浩谋, 焦莹, 李琛亮. 基于双重介质模型的裂隙渗流特性研究[J]. 科技风, 2012, (5): 139-140, 144.
- JIA Haomou, JIAO Ying, LI Chenliang. Study on fracture seepage characteristics based on a dual medium model [J]. Technology Wind, 2012, (5): 139-140, 144.
- [8] 同登科, 葛家理. 分形油藏不稳定渗流问题的精确解[J]. 力学学报, 1998, 30(5): 621-626.
- TONG Dengke, GE Jiali. An exact solution for unsteady seepage flow through fractal reservoir [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied, 1998, 30(5): 621-626.
- [9] 陶军. 页岩气分形渗流模型研究[D]. 西南石油大学, 2015.
- TAO Jun. Research on fractal seepage model of shale gas [D]. Southwest Petroleum University, 2015.
- [10] 韩凤蕊, 林加恩, 晁冲, 等. 短期试井资料处理方法及其应用[J]. 重庆石油高等专科学校学报, 2004, 6(4): 23-25.
- HAN Fengrui, LIN Jiaen, CHAO Chong, et al. The method for the data processing of short-term well-testing and its application[J]. Journal of Chongqing University of Science and Technology (Natural Sciences Edition), 2004, 6(4): 23-25.
- [11] 陈军, 徐广鹏, 樊怀才, 等. 一种气藏产量递减复合模型研究[J]. 天然气勘探与开发, 2008, 31(3): 39-41.
- CHEN Jun, XU Guangpeng, FAN Huaicai, et al. Research on a compound production decline model[J]. Natural Gas Exploration and Development, 2008, 31(3): 39-41.
- [12] 赵海洋, 贾永禄, 王东权. 双重-均质复合油藏产量递减模型研究[J]. 新疆石油地质, 2010, 31(1): 63-65.
- ZHAO Haiyang, JIA Yonglu, WANG Dongquan. Study of production decline model for dual porosity-homogeneous composite reservoir [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2010, 31(1): 63-65.
- [13] 张全泽. 致密油藏体积压裂水平井半解析渗流模型分析[J]. 云南化工, 2021, 48(2): 120-122.
- ZHANG Tongze. Semi-analytical seepage model analysis of volume fracturing horizontal wells in tight reservoirs [J]. Yunnan Chemical Technology, 2021, 48(2): 120-122.
- [14] 温杰雄, 田伟, 毕全福, 等. 基于数字滤波的压裂停泵数据反演方法[J]. 中国科学技术大学学报, 2018, 48(5): 392-399.
- WEN Jiexiong, TIAN Wei, BI Quanfu, et al. A new data inversion analysis method based on digital filtered pump-stop data of hydraulic fracturing [J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2018, 48(5): 392-399.
- [15] 郭伟, 张博, 李建勋, 等. 通过小型压裂测试对地层渗透率、储层压力和裂缝性能测定新方法[J]. 辽宁化工, 2014, 43(2): 210-212.
- GUO Wei, ZHANG Bo, LI Jianxun, et al. New method for determination of formation permeability, reservoir pressure and fracture properties from a minifrac test [J]. Liaoning Chemical Industry, 2014, 43(2): 210-212.
- [16] 陈元千. 油井压降曲线拟稳定阶段关系式的推导及判断方法[J]. 新疆石油地质, 1991, 12(2): 150-159.
- CHEN Yuanqian. Derivation of the pseudo-steady-state stage relationship of pressure drawdown curve and its judging methods[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 1991, 12(2): 150-159.

编辑 吴志力

第一作者简介: 张文全, 男, 1993 年出生, 助理工程师, 本科, 2018 年毕业于西南石油大学石油工程专业, 现从事试油测试技术工作。电话: 0990-7567992, 13980773455, Email: 1176304255@qq.com。通信地址: 新疆克拉玛依市克拉玛依区友谊路 115 号试油公司, 邮政编码: 834000。