

低渗透油藏压前不稳定试井数据与压裂效果的关系分析

李超

中国石油大庆油田有限责任公司测试技术服务分公司 黑龙江大庆 163000

通讯作者: Email: bfbz365@sina.com

引用: 李超. 低渗透油藏压前不稳定试井数据与压裂效果的关系分析[J]. 油气井测试, 2023, 32(1): 74-78.

Cite: LI Chao. Relationship between unstable well test data before fracturing and fracturing effect in low permeability reservoir[J]. Well Testing, 2023, 32(1): 74-78.

摘要 为进一步优化低渗透油藏不稳定试井压裂设计方案, 增强压裂措施可行性, 充分了解试井解释结果与压裂措施效果之间的关系, 从统计学角度出发, 分析 X 油田典型的低渗透油藏 B 区 402 口井压裂前不稳定试井数据解释结果, 得出有效渗透率、表皮系数、末点压力等参数与不同压裂方式累积增油之间的关系。分析认为, 单井累计增油量提高概率最大的情况分别为: 平均地层压力增加且有效渗透率降低; 有效渗透率增大且弹性储能系数降低; 关井压力增大且表皮系数下降。该分析为有效制定压裂设计、采取合理压裂措施取得良好的增产效果提供数据支撑。

关键词 低渗透油藏; 不稳定试井; 相关性分析; 平均地层压力; 有效渗透率; 弹性储能系数; 关井压力; 累积增油

中图分类号: TE357 **文献标识码**: B **DOI**: 10.19680/j.cnki.1004-4388.2023.01.013

Relationship between unstable well test data before fracturing and fracturing effect in low permeability reservoir

LI Chao

Well Testing Technology Service Branch of PetroChina Daqing Oilfield Co., Ltd., Daqing, Heilongjiang 163000, China

Abstract: In order to further optimize the unstable well test fracturing design scheme of low permeability reservoir, enhance the feasibility of fracturing measures and improve economic benefits, it is necessary to fully understand the relationship between well test interpretation results and fracturing measures by analyzing the correlation between effective parameters of interpretation results before fracturing and cumulative oil increase after fracturing, so as to provide objective and fair interpretation data support. From the perspective of statistics, this paper analyzes the interpretation results of unstable well test data of 402 wells in Block B, a typical low-permeability reservoir in X oilfield, and summarizes the relationship between effective permeability, skin coefficient, end point pressure and cumulative oil increase of different fracturing methods. It is considered that the maximum probability of increasing cumulative oil increase of a single well is as follows: the average formation pressure increases and the effective permeability decreases; The effective permeability increases and the elastic energy storage coefficient decreases; The shut in pressure increases and the skin factor decreases.

Keywords: low permeability reservoir; unstable well test; correlation analysis; average formation pressure; effective permeability; elastic energy storage coefficient; shut in pressure; cumulative oil increase

随着油田开发的不断深入, 低渗透油藏油层物性变差、近井地带流动能力变差、注采不平衡等问题抑制油井产量, 不利于油田高质高效开发。对低渗透油井实施压裂改造, 可以有效提高储层动用程度, 实现油井稳产。对 X 油田低渗透油藏 B 区 2006 年至 2020 年压裂的 402 口油井增油效果分析时发现, 同层系、同方式压裂的油井增油效果却存在明显差异, 如何能够在压裂设计之初更

好的选择压裂对象、优选压裂种类, 需要对压裂效果与压前地层状况进行深入认识。统计分析压裂井压前 180 d 内不稳定试井解释参数、压裂累积增油量数据, 绘制不同压裂种类累积增油、压裂有效期与不稳定试井解释参数之间的特征曲线, 获取有效渗透率、表皮系数、末点压力等参数与不同压裂方式累积增油之间的关系, 可为有效制定压裂设计、采取合理压裂措施取得良好的增产效果提

供数据支撑。

1 不稳定试井监测情况分析

X油田低渗透油藏B区2006年至2020年压裂油井1100口,其中压裂前进行不稳定试井监测共402井次。低渗透油藏B区油井压裂改造措施逐年增加,监测比例基本稳定,监测井数呈递增趋势。

统计压裂明显增油井382井次,压前不稳定试井解释结果显示,342井次未出现径向流直线段,不稳定试井解释结果多解性强,呈现为典型的低渗透油藏特征。其中测压时间距压裂时间小于180 d共211井次。不稳定试井解释提供的13项参数,通过参数解释原理及相关关系分析,确定重点分析有效渗透率、弹性储能系数、表皮系数、平均地层压力、井筒储存系数、关井末点压力共6个参数^[1-3]。

2 压裂累积增油量分布

2006年至2020年X油田低渗透油藏B区压前实施压力恢复监测382井次,累积增油量直方图显示400 t以内的井占比最高,其中压前180 d内测压211井次中累积增油400 t以内的井共174井次,占比82.5%。采用压裂种类多样化见图1,主要采用普压、多裂缝+组合、挤酸+压裂组合3种方式,累积增油效果不尽相同^[4-8]。

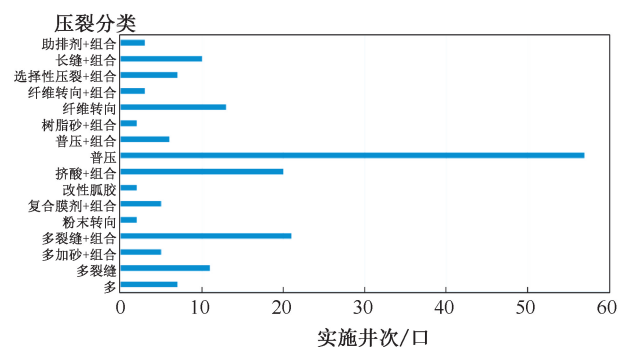


图1 不同压裂方式实施井次柱状图

Fig. 1 histogram of wells with different fracturing methods

3 压裂方式与压前压力恢复数据对应分析

压前180 d内测压211井次中累积增油400 t以内的井共174井次,累积增油量区间为20~1300 t,集中分布1~400 t之间,压裂种类多样,其中主要采用普压、多裂缝+组合、挤酸+组合压裂3种方式

为主^[9-12]。

3.1 压裂方式——不稳定试井解释参数变化范围

通过对3种压裂方式(普压、多裂缝+组合、挤酸+组合)累计实施114井次样本数据统计分析:普压57井次,平均单井累计增油133.14 t、多裂缝+组合21井次,平均单井累计增油189.3 t,挤酸+组合20井次,平均单井累计增油199.68 t。挤酸+组合的单井累计增油变化范围在32.3~390.5 t之间。对比压前测试不稳定试井解释参数变化范围,挤酸+组合压裂方式相较普压、多裂缝+组合两种方式:有效渗透率高,弹性储能系数低,表皮系数低,平均地层压力、关井末点压力相近多裂缝+组合方式,低于普压方式,井筒储存系数居中^[13-16]。

3.2 压裂方式——不稳定试井解释参数的关系图

分别绘制3种压裂方式单井累计增油量与6项不稳定试井解释参数(表皮系数、有效渗透率、弹性储能系数、平均地层压力、井筒储存系数及关井末点压力)之间曲线图,分析同种压裂方式不同累计产油量与压前储层性质包括有效渗透率、表皮系数等之间的关系^[17-20]。

普压样本57井次,单井累计增油量呈三次跳跃式增长(见图2)。其中单井累计增油量小于50 t共16井次,单井累计增油量最大正相关于井筒储存系数(相关系数0.269),最大负相关于表皮系数(-0.291),与其他参数相关范围 $[-0.201, 0.210]$,六个参数之间相关范围在 ± 0.5 之间;单井累计增油量在50~200 t的统计样本19井次,单井累计增油量最大负相关于关井末点压力(相关系数-0.356),与其他参数相关方位 $[-0.22, -0.02]$,六个参数之间相关范围在 $[-0.24, 0.77]$;单井累计增油量200~300 t的统计样本16井次,单井累计增油量最大正相关于平均地层压力(相关系数0.343),最大负相关于有效渗透率(-0.278),与其他参数相关范围 $[-0.15, 0.219]$,六个参数之间相关范围在 $[-0.04, 0.74]$ 。对比分析显示,单井累计增油量大于200 t时,与六个参数之间的相关范围在-0.278~0.343,据相关程度分析当平均地层压力增加且有效渗透率降低的情况下,单井累计增油量提高的可能性最高^[21-22]。

多裂缝组合压裂方式统计样本21井次,单井累计增油量呈递增趋势(见图3)。统计显示单井累计增油与六个参数相关范围 $[-0.243, 0.163]$,

六个参数之间相关范围在 ± 0.5 之间。其中单井累计增油量大于 300 t 的样本 7 井次,单井累计增油量最大正相关于有效渗透率(相对系数 0.640),最大负相关于弹性储能系数(相关系数 -0.703)。多裂

缝组合压裂方式累计增油量大于 300 t 时,与六个参数之间相关程度在 $-0.703 \sim 0.640$ 之间,可见,当有效渗透率增大且弹性储能系数降低的情况下,单井累计增油量提高的可能性最高^[23]。

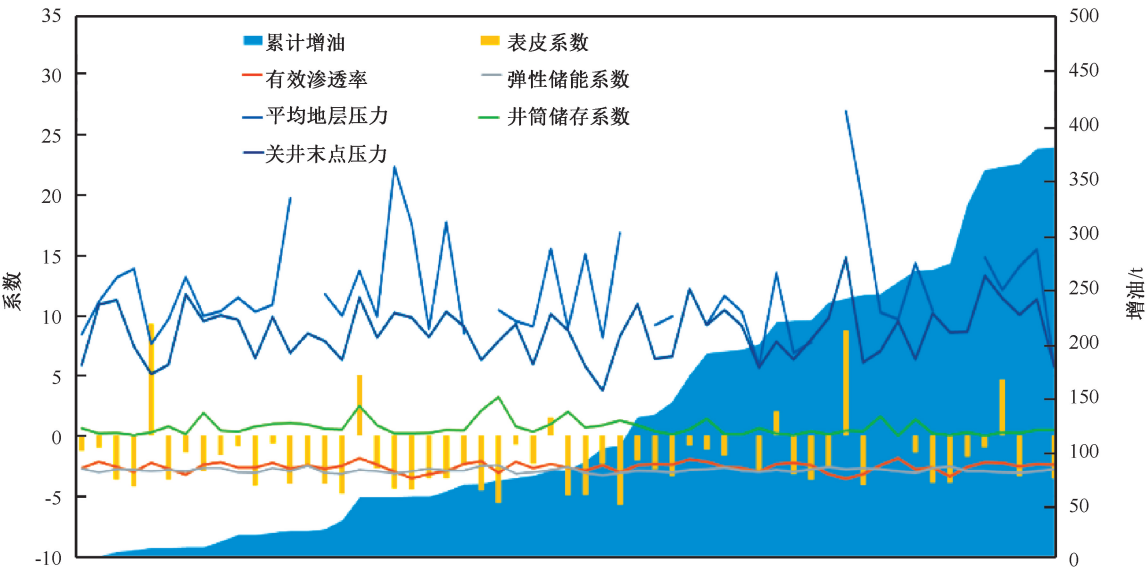


图 2 单井累计增油量与压前不稳定试井参数分布曲线图(普压)
Fig. 2 distribution curve of cumulative oil increase of single well and unstable well test parameters before fracturing (normal pressure)

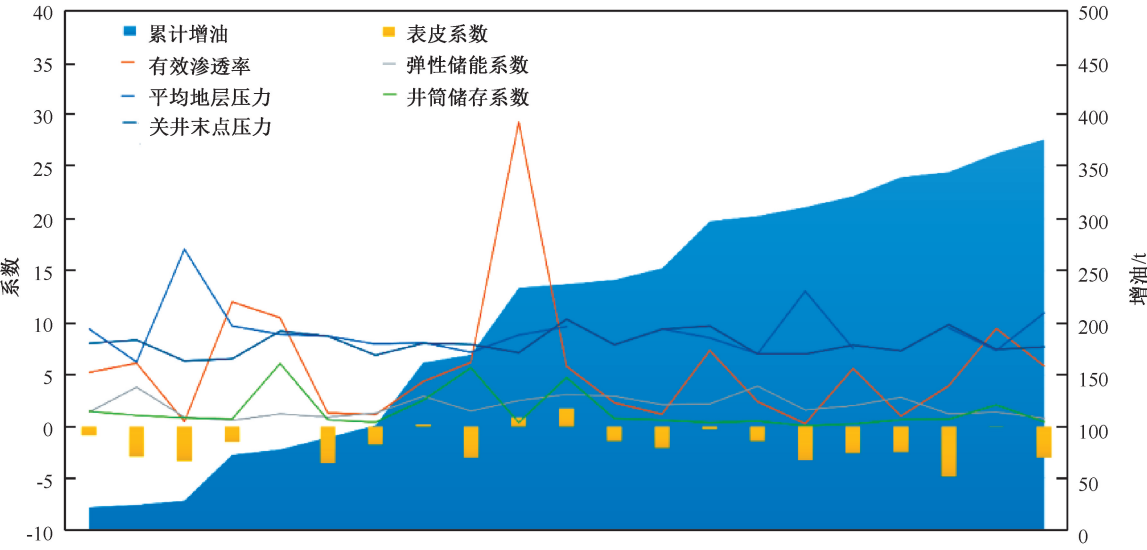


图 3 单井累计增油量与压前不稳定试井参数分布曲线图(多裂缝+组合)
Fig. 3 distribution curve of cumulative oil increase of single well and unstable well test parameters before fracturing (multiple fractures + combination)

挤酸组合压裂方式统计样本 20 井次,单井累计增油量突增一次(见图 4)。统计显示:单井累计增油与六个参数相关范围 $[-0.372, 0.386]$,六个参数之间相关范围在 $[-0.389, 0.499]$ 。其中,单井累计增油量大于 200 t 的样本 8 井次,最大正相关于关井

末点压力(相对系数 0.250),最大负相关于表皮系数(相关系数 -0.359)。单井累计增油量大于 200 t 时,与六个参数之间的相关程度在 $-0.359 \sim 0.250$ 之间,可见,当关井压力增大且表皮系数下降的情况下,单井累计增油量提高的可能性最高。

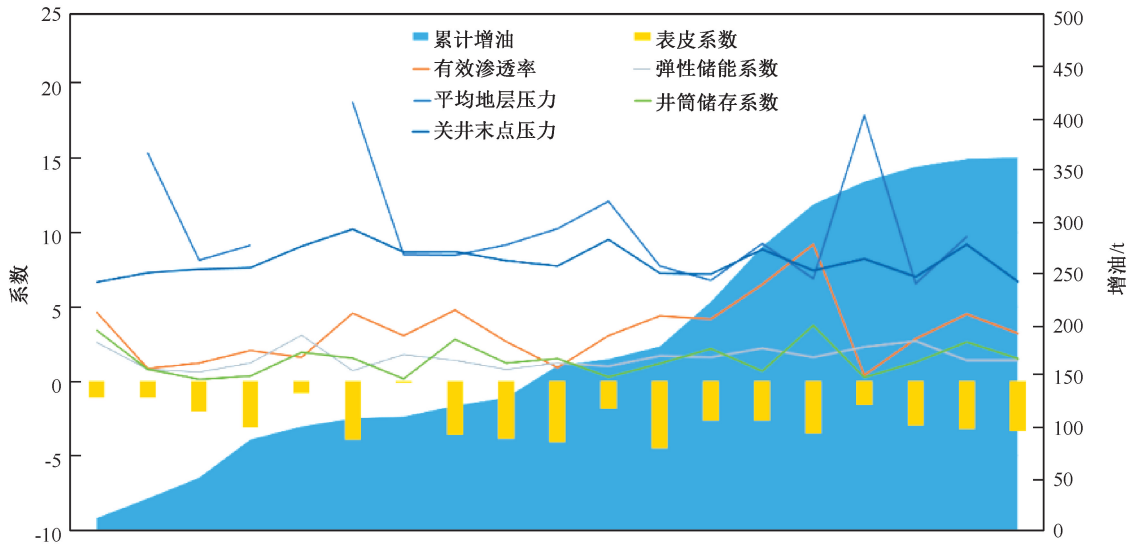


图 4 单井累计增油量与压前不稳定试井参数分布曲线图 (挤酸+组合)
Fig. 4 distribution curve of cumulative oil increase of single well and unstable well test parameters before fracturing (acid squeeze + combination)

4 结论

(1)压裂效果与压前地层状况密切相关,深入剖析其相关性,对于优化压裂设计、实现增油增产具有重要意义;

(2)单井累计增油量在不同阶段与表皮系数、有效渗透率、弹性储能系数、平均地层压力井筒储存系数和关井末点压力呈现不尽相同的相关性。尤其是在增油量出现明显跳跃变化的节点附近,这种相关性的变化更加明显;

(3)根据不稳定试井参数的历年数据统计,总结单井累计增油突变过程中各个参数关系,通过历史数据,实现预测油量变化的解释目的。

致谢:感谢张东芳师傅对该论文细致入微的指导,感谢公司领导和同事在论文修改方面的帮助并同意公开发表。

参考文献

[1] 苑伯超,肖文华,魏浩元,等. 酒泉盆地鸭儿峡地区白垩系下沟组 $K_1g_1^3$ 沉积相及有利储层预测[J]. 岩性油气藏,2017,29(3):52-65.
YUAN Bochao, XIAO Wenhua, WEI Haoyuan, et al. Sedimentary facies and favorable reservoir prediction of cretaceous Xiagou formation $K_1g_1^3$ In Ya' erxia area, Jiuquan Basin [J]. Lithologic Reservoirs, 2017,29(3): 52-65.

[2] 陈建平,陈建军,倪云燕,等. 酒泉盆地酒西坳陷油气成藏控制因素与有利勘探方向[J]. 石油学报,2019,40(11):1311-1330.

CHEN Jianping, CHEN Jianjun, NI Yunyan, et al. Controlling factors of petroleum accumulation and favorable exploration area in the Jiuxi depression, Jiuquan Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2019,40(11):1311-1330.

[3] 陶永富,许瑞,乔梁,等. 应用物质平衡法评价鸭儿峡 M 油藏地层压力[J]. 油气井测试,2019,28(1):72-78.
TAO Yongfu, XU Rui, QIAO Liang, et al. Evaluation of formation pressure in M reservoir of Yaerxia oilfield by material balance method [J]. Well Testing, 2019,28(1): 72-78.

[4] 刘能强,王葳,朱红权. 测试资料在油气田开发中的应用[J]. 油气井测试,2004,13(1):15-18.
LIU Nengqiang, WANG Wei, ZHU Hongquan. Application Of well testing data for oilfield development [J]. Well Testing,2004,13(1):15-18.

[5] 周鹏遥,刘洪涛,杨向同,等. 试井资料与生产数据结合进行措施井效果评价的新方法[J]. 油气井测试,2016,25(5):16-19,23.
ZHOU Pengyao, LIU Hongtao, YANG Xiangtong, et al. A new method of combining well testing data with production data to evaluate the well effect [J]. Well Testing, 2016,25(5):16-19,23.

[6] 缪立南,邸士莹. 利用测试资料评价压裂措施效果[J]. 油气井测试,2017,26(4):33-35.
MIAO Linan, DI Shiyng. Using the data of test to evaluate fracturing effect measures [J]. Well Testing, 2017, 26(4): 33-35.

[7] 李原杰,魏明达,王晶. 利用试井资料快速求取复合型储层气井产能[J]. 油气井测试,2017,26(1):24-26.
LI Yuanjie, WEI Mingda, WANG Jing. Using well test data to quickly get the gas well deliverability of composite reservoir [J]. Well Testing,2017,26(1):24-26.

- [8] 林加恩. 油气井试井资料的价值及作用[J]. 油气井测试, 2016, 25(4): 38-40, 43.
LIN Jia'en. Value and function of oil & gas well testing data [J]. Well Testing, 2016, 25(4): 38-40, 43.
- [9] 张文昌, 罗沛, 郝宁, 等. 试井资料多解性来源的探讨[J]. 断块油气田, 2003, 10(4): 86-88.
ZHANG Wenchang, LUO Pei, HAO Ning, et al. Discussion on more explain character of well test results [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2003, 10(4): 86-88.
- [10] 高绍琨, 王杰. 试井测试曲线异常原因分析[J]. 油气井测试, 2014, 23(6): 22-24.
GAO Shaokun, WANG Jie. Analyzing causes of abnormal well testing curve [J]. Well Testing, 2014, 23(6): 22-24.
- [11] 田新建, 廖伟伟, 补璐璐, 等. 利用“异常”试井曲线分析油水井工程问题[J]. 油气井测试, 2018, 27(4): 67-72.
TIAN Xinjian, LIAO Weiwei, BU Lulu, et al. Utilizing the “abnormal” well test curve to analyze the engineering problems in oil and water wells [J]. Well Testing, 2018, 27(4): 67-72.
- [12] 蒋裕强, 李成勇, 曹成惠, 等. 高产气井试井压力资料异常原因分析[J]. 天然气工业, 2008, 28(7): 90-92.
JIANG Yuqiang, LI Chengyong, CAO Chenghui, et al. Reason analysis on abnormal pressure data from high-productivity gas well testing [J]. Nature Gas Industry, 2008, 28(7): 90-92.
- [13] 宋黎明, 胡宗武, 李新峰, 等. 油气井筒相态分异特征识别及处理[J]. 油气井测试, 2011, 20(2): 20-24.
SONG Liming, HU Zongwu, LI Xinfeng, et al. Feature identification for phase differentiation of oil and gas wellbore and its treatment [J]. Well Testing, 2011, 20(2): 20-24.
- [14] 张家富. 井筒内流体变化对压力恢复资料的影响与修复处理[J]. 新疆石油地质, 2014, 35(4): 434-436.
ZHANG Jiafu. The influence of wellbore fluid changes on pressure buildup date and the processing of date restoration [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2014, 35(4): 434-436.
- [15] 韩凤蕊. ZX165 井压力恢复曲线异常分析与处理[J]. 油气井测试, 2011, 20(4): 27-28.
HAN Fengrui. ZX165 Abnormal pressure buildup curve analysis and processing [J]. Well Testing, 2011, 20(4): 27-28.
- [16] 毕全福, 陈超峰, 胡广军, 等. 克 95 井地层测试中“相态重新分布”现象分析[J]. 石油天然气学报(江汉石油学院学报), 2006, 28(2): 92-93.
BI Quanfu, CHEN Chaofeng, HU Guangjun, et al. The phenomenon analysis of phase state redistribution in K-95 Well by wellbore formation testing [J]. Journal of Oil and Gas (Journal of Jiangnan Petroleum Institute), 2006, 28(2): 92-93.
- [17] 张望明, 韩大匡, 连淇详, 等. 多层油藏试井分析[J]. 石油勘探与开发, 2001, 28(3): 63-66.
ZHANG Wangming, HAN Dakuang, LIAN Qixiang, et al. Well test analysis in multi-layer reservoir [J]. Petroleum Exploration and Development, 2001, 28(3): 63-66.
- [18] 张璐. 多层压裂井试井分析方法研究[D]. 西安: 西安石油大学, 2011.
ZHANG Lu. A study on well testing analysis for fractured well in multilayered reservoir [D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2011.
- [19] 吴明录. 多层油藏流线数值试井解释方法[D]. 北京: 中国石油大学, 2007.
WU Minglu. Streamline numerical well testing interpretation method for layered reservoirs [D]. Beijing: China University Of Petroleum, 2007.
- [20] 王磊. 多层油藏渗流规律研究及其应用[D]. 安徽: 中国科学技术大学, 2008.
WANG Lei. Theory and application on flow in multi-layer reservoir [D]. Anhui: University of Science and Technology of China, 2008.
- [21] 王月杰, 陈晓明. 多层合采试井模型适用性研究及矿场实例分析[J]. 中国海上油气, 2017, 29(2): 78-86.
WANG Yuejie, CHEN Xiaoming. Applicability study and case analysis of multi-layer commingled production well test model [J]. China Offshore Oil and Gas, 2017, 29(2): 78-86.
- [22] 姚志良, 李明忠, 曹飞, 等. 直井多层油藏合采流入动态特性[J]. 油气田地面工程, 2010, 29(4): 22-24.
YAO Zhiliang, LI Mingzhong, CAO Fei, et al. Inflow performance characteristics of combined production in vertical well multi-layer reservoir [J]. Oil-Gas Field Surface Engineering, 2010, 29(4): 22-24.
- [23] 贾英兰. 多层油气藏复杂渗流理论与试井分析方法研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2014.
JIA Yinglan. Research on the theory of complicated porous flow and analysis method of well test for multilayer reservoirs [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2014.

编辑 方志慧

第一作者简介:李超,女,1987年出生,助理工程师,2012年毕业于东北石油大学测控技术与仪器专业,目前从事资料解释与验收工作。电话:15045952211, Email: bfbz365@sina.com。通信地址:黑龙江大庆中国石油大庆油田有限责任公司测试技术服务分公司, 邮政编码:163000