

天然气田开发

大型整装异常高压气田开采技术研究

——以克拉2气田为例

宋文杰,王振彪,李汝勇,朱忠谦,方珂,王春生,张强,李建明

(中国石油塔里木油田分公司,新疆 库尔勒 841000)

摘要:克拉2气田位于塔里木盆地北缘,该气田具有规模大、整装、气柱高、异常高压、单井产量高和完井工艺难度大等特点。针对克拉2气田的这些特点,研制了一整套高效开采技术,包括:高陡山地构造精细地震解释技术,巨厚砂岩储层精细三维地质建模技术,异常高压高产气藏产能评价技术,异常高压气藏岩石变形特征对开发影响研究技术,巨厚气藏完井工艺技术,山前高陡构造钻井防斜提速技术和高压气井防气窜固井技术。这一技术系统的形成为西气东输主力气田——克拉2气田的开发奠定了基础,对类似的其它高压气田的开发也有借鉴作用。

关键词:异常高压;开采技术;克拉2气田;整装气田

中图分类号:TE3;P631.4⁺4

文献标识码:A

文章编号:1672-1926(2004)04-0331-06

0 引言

克拉2气田位于塔里木盆地北缘库车坳陷北部克拉苏—依奇克里克构造带中西部^[1],克拉苏—依奇克里克构造为一近东西向展布的长轴背斜,东西长18 km,南北宽4 km,由东、西两个高点组成,其中西高点为最高点,圈闭幅度为525 m,圈闭面积47.8 km²,含气面积47 km²。该构造南北翼由一系列近东西向逆断层夹持。气藏属高陡构造,南翼地层倾角16°~20°,北翼19°~23°,东端6°,西端8.7°。气藏主要含气地层包括下第三系白云岩、下第三系砂砾岩、白垩系大套砂岩,砂/地比值达80%以上,其中主力气层为下第三系砂砾岩及白垩系大套砂岩(两者为不整合接触)。气藏埋深在3 500~4 100 m之间,气藏中部温度100℃,压力74.3 MPa,压力系数达2.0以上,属异常高压具有弱边、底水的背斜块状异常高压干气气藏^[2]。由于该气田具有规模大、整装、气柱高、异常高压、单井产量高、高陡山地构造等特点,其对气田高效开发、油井钻井和完井工艺带来很大的难度。为了高效开发好克拉2气田,我们研制了一整套针对该类气田的开采技术。

1 高陡山地构造精细构造解释技术

克拉2构造位于天山南麓库车凹陷的中西部,位于一系列东西向展布的山丘之间。工区内地表高差大,表层结构复杂,地下构造复杂,给三维地震施工带来挑战:①克拉2气田地表沟壑发育、表层岩性变化大,工区内最大地表高差可达1 523 m,悬崖峭壁与山谷沟槽相互交织,这些复杂的岩性导致地震记录上散射干扰及侧面干扰能量强,掩盖了反射信号,严重降低了原始地震资料的信噪比;②工区表层地形复杂,岩性多变,山麓处为巨厚松散砾石和半胶结砾石,潜水面很深,激发能量衰减快,山体部位老地层出露,地层倾角大,岩石坚硬,激发和接收条件较差;③就地下地质条件而言,克拉2气田位于前陆逆冲带,其构造变形强烈,断裂发育,沿广泛分布的塑性盐膏层滑脱作用明显,使得地层重复,构造叠置。针对这些难点,我们研制了以下技术。

1.1 地震资料采集技术

包括:①针对该区复杂的地表条件,大规模使用了基于卫星遥感数据体的三维方法设计,如指导表层调查点、试验点的优化选择,优选炮点和检波点的位置,进行地貌岩性分区,优化不同岩性区激发参

收稿日期:2004-06-14;修回日期:2004-06-28.

作者简介:宋文杰(1963-),男,山东栖霞人,教授级高级工程师,博士,主要从事油气田开发方案和开发新技术研究。

数,模拟飞行踏勘,对沟谷、断崖、高大山体等特殊地形精细“踏勘”;②针对复杂地表条件,采用平坦地区使用可控震源和山地地区使用炸药震源等多种震源联合施工方法,有效改善了地震激发条件;③针对地层倾角大、产状变化大等情况,参考基于地下地质模型的地震正演模拟结果,选择了小道距、长排列的观测系统,坚持在地层下倾方向激发;④利用现代化的技术装备,保证垂直构造走向直线施工。

1.2 地震数据处理技术

(1) 叠前去噪技术。针对复杂山地干扰波视速度多变的特点,对其进行分频分域压制。叠前系列相干噪音压制由3部分组成,即内切滤波线性干扰压制、高速线性干扰压制和强振幅干扰的分频压制。模型减去法相干噪音压制是先把某一视速度的噪音从信号中分离出来,再把这些噪音从原始地震中减掉。

(2) 高精度叠加速度场的建立。在利用本区二维资料、VSP井资料分析工区速度场变化规律的基础上,对原始优势频带进行分析,优选了速度分析参数。对形成速度谱的输入数据进行带通滤波、去除部分高频和低频干扰和小时窗均方根增益,使速度谱的输入数据具有较高的信噪比。对地下面元大小、炮检距范围、扫描速度范围与间隔、相关时窗长度、速度谱点解释的密度等参数进行试验。在地震资料信噪比较低的区域,采用常速扫描与变速扫描相结合的方式,确定该区的叠加速度场。

1.3 地震资料解释技术

(1) 地震地质层位综合标定技术。克拉2工区地震地质层位标定使用了两种地层标定方法。以6口井的声波与密度曲线制作的合成地震记录标定为主,以4口井的VSP标定为辅(用于大套地层的控制)。对 T_3 、 T_5 、 T_6 、 T_7 、 T_{7-1} 、 T_8 、 T'_8 、 T_{81} 、 T_{8-1} 和 T'_{8-1} 地震反射层进行了标定。

(2) 综合构造与储层建模技术。依据现代断层

相关褶皱理论,结合地震、地质、测井等资料,通过反复迭代,建立了克拉2气田区构造解释模型。在克拉2构造区,由于下第三系库姆格列木群大套膏泥岩塑变层段的发育,使塑变层上、下构造形变存在很大差异,上下构造层背斜高点、形态、平面位置都相差很大。

(3) 速度建场与变速成图技术。对克拉2工区构造采用两种方法进行了速度模型的研究,第一种方法是层位控制模型法,第二种方法是VP3模型法。VP3建场方法是针对高陡构造区地震勘探的特点设计的一套速度建场方法。其核心思想是在大套标准反射层控制下,建立三维空间的构造模型;然后进行 T_0 反射层偏移,建立起偏移 T_0 图与速度场之间的联系;再用三维模型迭代方法计算层速度。

(4) 综合三维地震解释技术。综合应用层位控制法、VP3八层模型法和三维VP3十二层模型法分别建立了克拉2气田的三维地震速度场。层位控制法和VP3八层模型法两种方法对比表明,用VP3方法能更好地考虑地下速度的各种不同的情况,用 T_8 反射层时深转换的结果为例来对这两种方法进行差异性分析(图1)。

2 巨厚砂岩储层精细三维地质模型建模技术

2.1 波阻抗反演和地层可视化技术运用于储层横向预测

克拉2气藏波阻抗反演的地震数据是目标层段三维纯波数据体。选取了目的层段满足波阻抗反演要求的4个反射地层,即 T_8 、 T_{81} 、 T_{81} 和 T'_{81} ,生成地质模型和约束反演,包括:①子波——提取了克拉2井、克拉201井、克拉203井、克拉204井以及克拉205井各井的雷克(Rick)子波,将其平均后,得到平均雷克子波,其主频范围和子波长度分别为26~

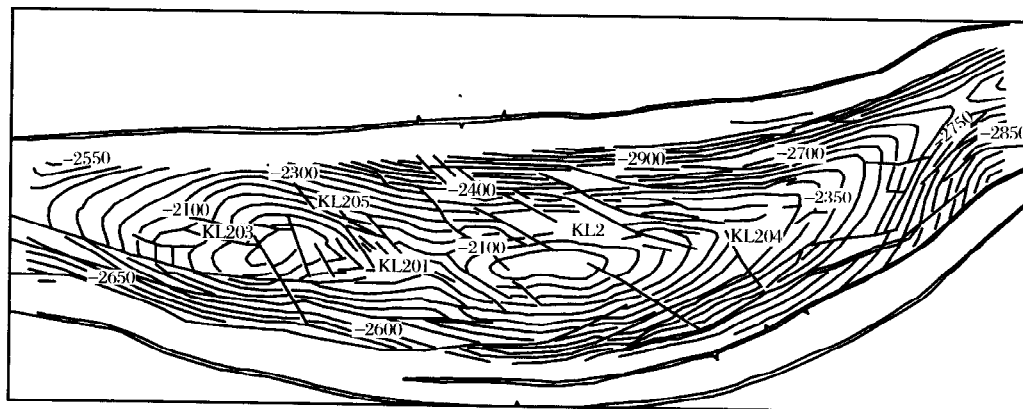


图1 克拉2气田三维解释构造(白云岩段顶面)

28 Hz和 100 ms,接近零相位,在主频范围内相位为 10~20 度,基本稳定;②低频模型——利用地震层位和时间域的测井资料,将由测井声波和密度合成的时间域波阻抗在层位约束下,利用反距离加权的方法实现空间转换插值,根据地层的接触关系,即可得到波阻抗低频模型。

2.2 孔隙度和渗透率预测

测井储层参数处理结果表明,波阻抗与孔隙度、孔隙度与渗透率的对应关系明确,可以通过波阻抗数据体求得孔隙度数据体,进而根据孔隙度与渗透率的关系,求得渗透率数据体。

2.3 储层沉积相研究与应用

在综合研究储层的沉积环境、沉积相模式、砂体成因基础上,利用野外实测露头、测井资料,研究沉积微相,建立砂体模型、沉积微相模型,应用这些模型对三维骨架模型和属性模型进行校正。

2.4 骨架模型中夹层的处理方法

地层骨架主要是指地层厚度分布变化,地层之间的接触关系等。夹层的准确描述对骨架模型的建立非常重要,对夹层的处理采取了如下办法:①井点夹层按井点实际位置进行设置;②重点夹层按其实际分布预测设置;③井间小夹层则按照统计规律如分布的厚度、密度、频率及物性值进行随机设置,具体设置时,采用统计平均值进行处理;④夹层模拟时按不同的夹层成因,考虑其长宽延伸方向等;⑤利用层序地层学方法进行地层精细对比研究,建立了三向剖面模型。据此对夹层的渗透性、夹层的延伸范围和夹层的位置等对气藏开发效果影响的机理进行研究。

3 异常高压高产气藏产能评价技术

根据仅有的分层测试资料,为了使产能评价准确、可靠,采用了如下技术和做法:①改进测试方法和工艺——为了使测试资料可靠,采用回压产能测试方法和改进等时试井方法;②修正解释模型——由于常规的压力平方法对异常高压气藏解析结果误差大,对其修正为拟压力法,确定克拉2气田产能方程;③充分考虑影响产能的因素,合理优化配产,如出砂、冲蚀、油管大小、合理生产压差、打开程度等;④采用多方法计算无阻流量,根据影响因素进行校正,并建立无阻流量与地层系数的关系,然后把这一关系应用到克拉2气田的属性模型中,预测每一模型点的产能,反过来再用已知点进行校正。

4 异常高压气藏岩石变形特征对开发影响研究和认识

克拉2气田的压力系数高达2以上,属于异常高压气藏,在衰竭式开采过程中,随着气藏的压力下降,异常高压气藏的岩石骨架要承受大得多的净上覆压力,使得岩石发生显著的弹塑性形变,导致岩石渗透率、孔隙度和岩石压缩系数等物性参数减小,从而影响气藏的开发效果。

根据克拉2气田329个上覆压力试验数据,通过对试验资料进行统计分析处理,得出了以下认识:

(1) 岩石渗透率、孔隙度和孔隙压缩系数随着有效压力的增加而减小,并且前期减小剧烈,中期减小变缓,特别是孔隙压缩系数到后期逐渐趋近于一个常数,后期减小更缓(图2)。这表明气藏衰竭式开采时,随着气体的不断采出,地层压力下降,有效压力增加,储层渗透率、孔隙度和孔隙压缩系数变小,使得产能降低,气水分布发生变化和弹性能量减小。

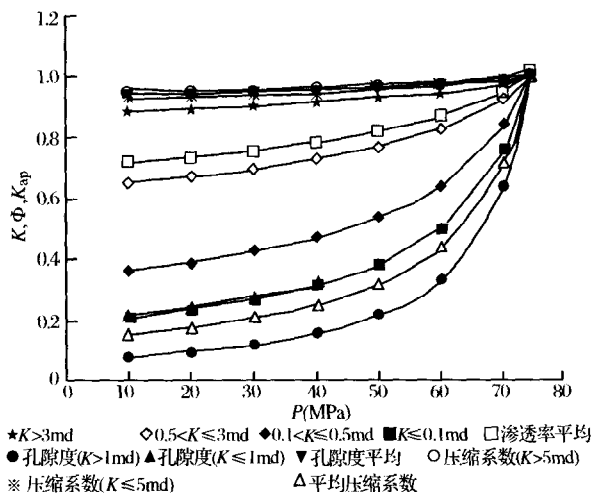


图2 克拉2气田白垩系巴什基奇克组储层物性参数与地层压力的关系

注:1md=0.987×10⁻³ μm²

(2) 储渗类型发生变化,在裂缝—孔隙型或孔隙—裂缝型储层中,由于裂缝体积减小的程度远远超过孔隙体积减小的程度,部分裂缝甚至会完全闭合。因此,在开采早期阶段处于高压状态下原为双重介质渗流的储层,在地层压力降低后可以变为单一孔隙介质储层,改变了储层渗流的基础。

(3) 空隙空间的缩小对气藏的开发具有两方面的影响:一方面释放出的岩石的弹性能量将变成驱使天然气从孔隙中流出的动力,这是气藏开发的有利因素;另一方面空隙体积的缩小,特别是裂缝和喉道的变窄,渗透性和连通性变差,流动阻力增大,从

而导致气井产能降低,甚至使统一的压力系统分割为多个互不连通的压力系统,使气藏开发效益变差,这是对气藏开发的不利因素。

(4) 各种空隙流体启动顺序与地层压力的降低相辅相成,使得复杂气藏衰竭式开采过程具有多阶段性,同时也给气藏动态预测带来困难。在孔隙型气藏中由于孔隙和喉道相对较均匀,因而孔隙流体启动所要求的压差较接近,在气藏投入开发后很快就会引起全气藏的压降。

5 山前高陡构造钻井防斜提速技术

克拉2构造区膏泥岩层上下为2套变形不同的构造层,上为喀桑托开背斜,其构造高点偏南;下为高陡的克拉2背斜,其高点偏北(图3)。同时上部的

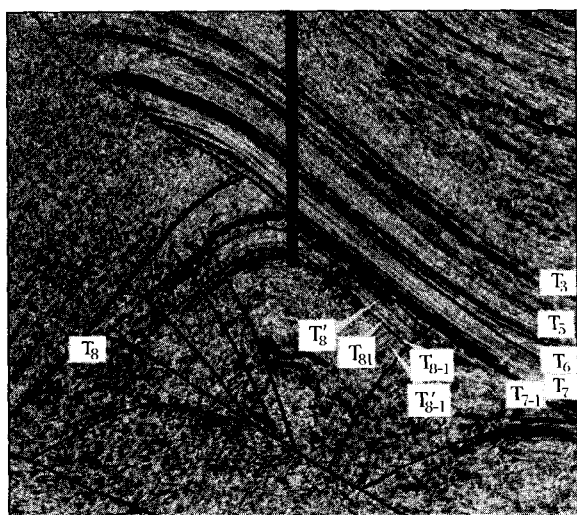


图3 过克拉2井的Inline地震剖面

吉迪克组含有250~450 m非常坚硬的砂砾层,使钻井提速和控制钻井井身质量的难度很大。在克拉2开发井钻井过程中,采用了:①偏轴钻具组合防斜打快技术;②山前高陡构造定向反扣纠斜技术(该项技术的基本原理是用满眼或钟摆钻具组合按正常钻进,当井斜接近超标时,采用定向反扣的方法将井斜降至 $1^{\circ}\sim 2^{\circ}$,形成降斜趋势后,再用满眼或钟摆钻具组合钻进,如此反复,达到防斜打快的目的);③井下动力钻具+PDC钻头防斜打快技术(该技术措施主要利用钻井过程中钻压和转速对井斜的影响和利用井下动力钻具高转速的特性,再加上寿命长、适合于高转速的PDC钻头和配合钟摆钻具转盘钻,构成了目前山前构造防斜打快的最佳方案,也是将来的发展趋势。该措施不但能解决井斜问题,而且可以大幅度提高机械钻速,降低钻井综合费用);④PowerV技术[“PowerV”是一套“全自动化”旋转导向垂直钻进仪器,操作简单效率高,它不需要人员操作也不需要MWD仪器(图4),降低了成本。PowerV在钻进时会自动追踪地心吸力(自动感应井斜),自动设定及调和促动仪器所发动的侧力而打钻使井斜快速返回垂直,这是一个全自动重复的过程。在整个过程中PowerV是100%旋转的]。通过上述技术使吉迪克组钻速提高1~2倍,井身质量得到很大提高,千米水平位移小于15 m。

6 高压气井防气窜固井技术

克拉2气田固井面临的技术难点主要有:如何保证良好的水泥浆体系与隔离液体系;如何提高小

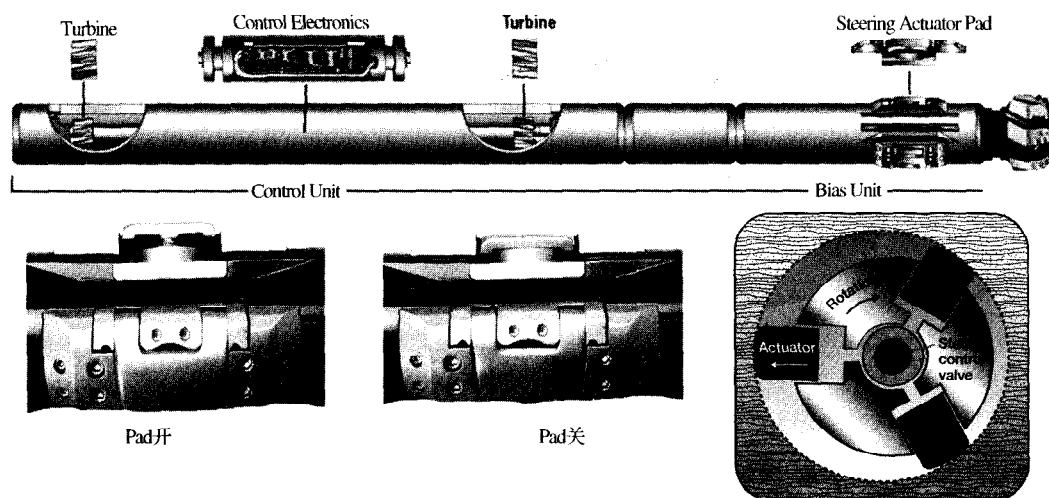


图4 PowerV工具

间隙环空顶替效率;如何防止高压气层环空气窜;如何设计合理的施工技术措施。针对这些难点采用如

下技术:提高钻井工艺技术,保证井身质量;采用平衡压力固井工艺固井;研究和优选具有防气窜能力

的水泥浆体系及配方;提高顶替效率的措施。实践证明这些方法大大提高固井质量,有效地解决了高压气井固井难的技术问题。

7 巨厚高压气藏完井工艺技术

为实现高效开发,延长稳产期,生产期间确保生产管柱25年不动,在完井工艺方面,采取如下最有效的方案和最佳的工艺。

7.1 采用7"油管大管柱,降低了气体流速,解决了冲蚀,实现了单井高产

采用7"油管大管柱生产,在中国油气田开发中是首次。合理油管选择必须满足井口压力、携液和防止冲蚀的要求,满足较长时间开采配产要求,满足目前的钻采工艺要求。克拉2气田有超高压高产的良好条件,巨厚的产层使得常规的摩阻、携液能力已经不是主要问题,影响产量的关键问题是冲蚀问题。克拉2气田为砂岩储层,管柱中的流体如果同时具备固相颗粒、高流速的条件下,就容易被其中的固相不断磨蚀破坏,在流体改变方向的地方破坏最快最严重,在有腐蚀的情况下冲蚀加剧腐蚀。为了防止出砂,主要采取的措施有:①通过控制井口的油压,限制最高流速在35 m/s以内;②时实监测流体出沙情况,确保固相颗粒在 10×10^{-6} 以内,一旦在正常生产阶段发现出沙量超过上述标准,初期通过降低生产压差,后期还应采取防砂措施;③管柱结构尽量实现全通畅,所有工具尺寸包括井下安全阀(SCSSV)的内径尽量接近;④采油树采用Y型整体结构,减轻采油树处冲蚀程度,也减少漏点。

7.2 优化生产套管、油管管柱结构设计,优选材料和扣型,实现了生产管柱长寿命

主要的设计理念为:①简化油管管柱结构设计,确保生产管柱的密封都为金属对金属密封;②工具和管材材质选择 Super13Cr-110,以适应该气田气井腐蚀介质环境;③生产套管、尾管、油管结构体现全通畅、锥形结构理念,以实现真正的不动管柱进行过油管射孔、下防砂设备、下封隔器、桥塞至尾管段

进行堵水、酸化、压裂等作业。

7.3 采用模块叠加枪射孔工艺,解决了300多米射孔长度的一次射孔、负压作业和安全取枪的射孔难题

该气田的砂岩岩石强度在开发初期分析不会出沙,加上又存在底水,采用射孔方式完井。先下完井管柱,并安装好采油树,再通过钢丝投捞进行过油管射孔作业。为确保作业安全,采用模块叠加枪射孔工艺(图5),点火后自动掉落并相互解脱,并分节打

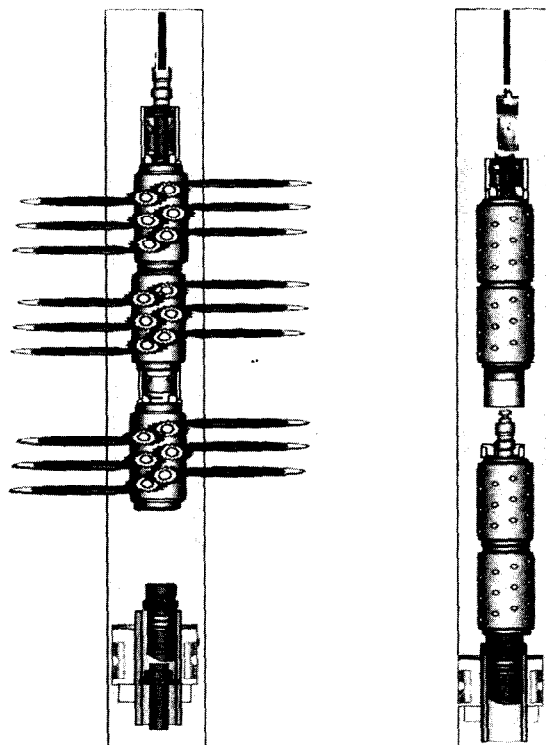


图5 模块叠加枪射孔工艺

捞。完井液采用 1.4 g/cm^3 的有利于储层保护、低腐蚀、环保的无固相有机盐体系,相对的高密度也有利于降低负压作业的风险。

参考文献:

- [1] 康竹林. 中国大中型气田概论[M]. 北京:石油工业出版社, 2000.
- [2] 朱忠谦,王振彪,李汝勇,等. 异常高压气藏岩石变形特征及对开发的影响研究[J]. 天然气地球科学, 2003, 14(1): 60-64.

DEVELOPMENT TECHNOLOGY FOR ABNORMAL HIGH PRESSURE AND LARGE SCALE MONO-BLOCK GAS FIELD: TAKING KELA 2 GAS FIELD AS THE EXAMPLE

SONG Wen-jie, WANG Zhen-biao, LI Ru-yong, ZHU Zhong-qian, FANG Ke,
WANG Chun-sheng, ZHANG Qiang, LI Jian-ming
(Talimu Oil Company of PetroChina, Kuerle 841000, China)

Abstract: Kela 2 gas field is a world level gas field located in the north edge of Tarim basin which is

characterised with large scale, monoblock, high gas column, abnormal high pressure, high well rate, difficulty in well completion and etc. In order to develop Kela 2 gas field with high efficiency, a series of gas field production techniques were formed through research work which include: detailed three-dimensional geologic model forming technology for high steep structure and very thick sandstone reservoir, productivity evaluation technology for abnormal high pressure and large volume gas field, rock transmutation prediction for abnormal high pressure gas reservoir, perforating and completion technology for thick gas reservoir, anti-leaning and increasing drilling speed technology for super high pressure and steep structure gas reservoir, anti gas channeling cement technology for high pressure gas field, gas production technology for large sized tubing string. The achievements of these researches have settled the foundation for the development of Kela 2 gas field which is the main source of west to east gas transmission project, and will be taken as a reference for the development of other similar high pressure gas fields.

Key words: Abnormal high pressure; Technology for production; Kela 2 gas field; Mono-block gas field.