

气藏提高采收率技术及其对策

郭 平 景莎莎 彭彩珍

“油气藏地质及开发工程”国家重点实验室·西南石油大学

郭平等.气藏提高采收率技术及其对策.天然气工业,2014,34(2):48-55.

摘 要 虽然 2000 年以来我国的天然气产量排在世界前列,但目前我国的天然气产量却远远不能满足国民经济发展的需要,越来越多的气田已进入开发中后期,且绝大部分气藏属低渗透和水驱气藏,采收率低,如何提高气藏采收率已成为当前亟待解决的问题。关于油藏提高采收率的定义、剩余油描述方法与提高原油采收率(EOR)配套技术已较为成熟,但对气藏提高采收率(EGR)的定义与描述还未建立起来,对气藏剩余气分布规律的描述方法与 EGR 技术还不清楚。为此,在调研大量文献的基础上,对 EGR 进行了定义,提出按剩余气丰度的方法来进行剩余气分布的描述,分析了国内外已开发的 3 种主要类型气藏(低渗透气藏、凝析气藏、边底水气藏)的地质开发特征以及开发过程中遇到的问题,总结分析了提高采收率的相关技术与方法,并对 EGR 技术的发展提出了建议。该成果对气藏提高采收率有重要的借鉴和推广意义。

关键词 天然气 气藏 提高采收率 低渗透气藏 凝析气藏 边底水气藏 技术 对策

DOI:10.3787/j.issn.1000-0976.2014.02.007

Technology and countermeasures for gas recovery enhancement

Guo Ping, Jing Shasha, Peng Caizhen

(State Key Laboratory of Oil & Gas Reservoir Geology and Exploitation // Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China)

NATUR. GAS IND. VOLUME 34, ISSUE 2, pp.48-55, 2/25/2014. (ISSN 1000-0976; In Chinese)

Abstract: Since 2000, China has been ranked as one of the top countries in gas production. Nevertheless, the domestic gas production can hardly satisfy the need of national economic development. Besides, an increasing number of gas fields have come to the middle or late development stages, and most gas reservoirs have low recovery efficiency due to the low permeability and water drive nature. Therefore, gas recovery enhancement has become an urgent issue. At present, the oil recovery enhancement is well defined, and there are methods describing the remaining oil and a complete set of mature EOR (enhanced oil recovery) technologies. However, the definition and description of EGR (enhanced gas recovery) are still undetermined, and the description method for the distribution of residual gas and EGR technologies are almost unavailable. In view of this, by reviewing a wealth of related literatures, we defined EGR and also described the remaining gas distribution based on the remaining gas abundance. In addition, collecting three typical types (low-permeability, condensate and edge/bottom water) of major gas reservoirs developed at home and abroad, we summarized the geological and development characteristics, and found out the obstructions in the development. In response, we concluded and analyzed the relevant technologies and methods for enhancing the gas recovery of such reservoirs, and proposed the suggestions about EGR technology development, which provides a significant reference and popularization basis for EGR measures in fields.

Keywords: natural gas, reservoir, EGR (enhanced gas recovery), low-permeability gas reservoir, condensate reservoir, edge/bottom water drive gas reservoir, technology, countermeasure

基金项目:高等学校博士学科点专项科研基金资助(编号:20115121110002)。

作者简介:郭平,1965 年生,教授,博士生导师,本刊第七届编委会委员;从事油气相态、气田开发、油气藏工程、注气提高采收率等方面的工作。地址:(610500)四川省成都市新都区新都大道 8 号。电话:18628144040。E-mail:guopingswpi@vip.sina.com

1 提高气藏采收率(EGR)的定义

21 世纪是天然气世纪,天然气作为一种更清洁、更优质、更经济的能源和化工原料^[1-2],在国民经济中的地位越来越重要。由于绝大部分气藏属低渗透和水驱气藏,采收率低,此外我国天然气消费量又逐年上升。因此 EGR 有重要的经济和社会价值。EGR(enhanced gas recovery)即提高气藏采收率,指在现有经济技术条件下,在水驱或气驱等天然能量开采的气藏采收率基础上,采用工艺技术和方法,以实现提高气藏采收率的技术、方法或工艺过程。油藏天然能量开发被称为一次采油,注水补充能量开发被称为二次采油,注气或化学驱开发被称为三次采油或 EOR。针对采气来讲,依靠天然能量开发被称为一次采气,水淹复产、注水、注气、注化学剂、堵水等以及提高剩余气采收率或动用程度的技术与方法被称为 EGR。

油藏采收率为驱油效率和波及效率的乘积,EOR 就是围绕提高波及效率(如化学驱)和驱油效率(如气驱)进行工作。针对中、高渗透气藏,只要有井生产,就会产生压力降,因此可认为波及效率为 100%,这种类型的气藏打加密井只能提高采气速度,不能提高采收率;针对低渗透致密气藏,由于压力波及范围较小,打加密井或水平井可以增加波及体积从而提高气藏采收率;针对干气气藏,没有水驱或注入介质,不存在驱气效率问题,采收率较高,剩余气分布与压力成正相关关系,可以用压力分布来描述剩余气分布;针对水驱或注

气驱气藏存在驱气效率问题,此类气藏剩余气分布就不能用压力分布来表示,而应当用剩余气丰度来描述。因为水驱气效率不高,容易形成水封气。因此采收率较低。

笔者系统调研了目前已开发的主力气藏低渗透气藏、凝析气藏、边底水气藏 EGR 技术,结合气藏实例分析,总结了不同类型气藏提高采收率技术对策,并提出 EGR 发展建议。

2 低渗透气藏的 EGR 技术

低渗透气藏产量在我国天然气产量构成中比例逐年上升,业内专家预计我国未来天然气稳产增长将更多地依靠低渗透气田,因此低渗透气田将是我国未来天然气勘探开发的主要对象。低渗透气藏具有非均质性、泥质含量高、低孔渗、高毛细管力、高含水饱和度、气水分布复杂等地质特征。具有自然产能低、压力下降快、产量递减快、开发中后期井筒积液严重等开发特征。如果开采方式不合理,可能导致气藏过早大规模水窜,气藏废弃压力很高,采收率低。低渗透气藏一般需要经过一定增产措施后才能获得有经济价值的气产量,常用的方法是打水平井和对直井进行压裂。

针对低渗透气藏的增产措施已贯穿于从地质研究、钻井、完井、气藏工程等直到气藏停产的整个过程,其主要作用是增大气体在储层段的渗透能力,以增加单井产量、最终采收率,最终提高经济效益。低渗透气藏的 EGR 技术策略总结如表 1 所示。

表 1 适用于低渗透气藏的 EGR 技术策略汇总表

技 术	优 点	实 例
深化对储层地质特征的认识	使地质模型更可靠;降低开发成本;实现经济有效的开发	苏里格气田 ^[3] 的从单井“高配产”到“低配产”决策转变
水平井	穿越气层井段长,控制储量大;显著增大气层渗流面积,大大减小渗流阻力	得克萨斯州Cleveland致密砂岩气藏 ^[4] ;川中磨溪、大牛地等 ^[5] 低渗透气田
气层压裂改造	有利于井网与人工裂缝的合理匹配;改善近井地带的渗流条件,解除近井地带污染	大牛地气田 ^[6] 的大型压裂工艺技术和CO ₂ 泡沫压裂技术;北海南部(SNS)致密气场 ^[7] 的水力压裂;新场沙溪庙组致密气藏 ^[8] 的缓胶压裂液技术;洛带气田遂宁组气藏 ^[9] 的低稠化剂浓度压裂液和低砂比压裂工艺
排水采气	降低井底回压,维持低压低产气井正常生产;延长气井寿命	新场气田 ^[10] 的泡排采气;户部寨气田 ^[11] 的优选管柱、高压气举、柱塞气举排水采气;中坝气田须二段气藏 ^[12] 边部水淹区的潜油电泵排水采气
高低压分输	有效解除高压气井对低压气井正常生产的干扰	四川新场气田蓬莱镇组气藏 ^[13]
增压开采	降低来自生产井排的输入压力,相应地降低气藏的枯竭压力;维持气藏的稳产	四川新场气田蓬莱镇组气藏 ^[14]
气层保护	对低渗透气藏的发现和经济有效开发具有重要意义	川西邛西气田 ^[15] 的欠平衡钻井技术;苏里格气田的全酸溶暂堵完井液体系统(ASS-1)
井网加密	增加波及体积	苏里格气田、大牛地气田

针对我国低渗透砂岩气藏地质与开发特征,借鉴目前致密天然气开发经验,提出以下几点建议:

- 1) 低渗透致密气藏丰度低,非均质严重,要突破富集区优选和储层预测技术,将适合经济开发的有利区域优先开发。
- 2) 致密气藏流动能力差,存在启动压力和应力敏感等问题,传统连续介质渗流理论遇到挑战,有必要发展非连续介质流动理论。
- 3) 国内外应用表明水平井是开发低渗透致密气藏的重要手段,应形成自主知识产权的水平井分段压裂技术和直井多层压裂技术。
- 4) 低渗透致密气藏井数多,控制面积小,井网加密是提高采收率重要手段,研究井网加密技术经济极限很有必要。
- 5) 井下节流技术已在苏里格推广应用,节约了投资,简化了流程,取得很好的应用效果,值得进一步推广。
- 6) 低渗透气藏产能低,效益差,许多气藏处于经济效益开发的边沿,要全过程推行降低成本开发技术。
- 7) 我国水源缺乏,大型水力压裂水源不足,建议推广研究层内爆炸增产技术。

3 凝析气藏的 EGR 技术

凝析气藏是一种特殊、复杂且经济价值很高的气藏。目前我国已发现的凝析气资源大多集中在新疆和海上,尤其是在塔里木盆地,地层气中凝析油含量高、储量大,在全国占绝对优势。我国的凝析气藏多属凝析油含量中偏低的饱和凝析气藏,且多采用衰竭方式开发,采收率低,有的已处于开发中、后期,如何提高凝析气藏气采收率和凝析油采收率已成为关键问题^[16-17]。

凝析气藏由于在开发过程中会发生复杂的物理化学相变,开发机理十分复杂,开发难度大,因此不可避免地会出现很多影响产能和凝析油采收率的问题,例如:液相伤害、水合物堵塞、井筒积液和气窜。开发好凝析气藏,需要综合考虑凝析气藏的地质条件、气藏类型、凝析油含量和经济指标,编制较好的开发方案。

凝析气藏同时产天然气和凝析油,经济价值很高,但开发机理很复杂,存在着凝析油气体体系的相态变化和反凝析现象。对高含凝析油的凝析气藏,要尽可能地防止地层压力降至露点压力以下,以避免大量凝析油损失在地层中,同时对有边底水的凝析气藏还要防止边底水

的侵入。凝析气藏 EGR 技术策略总结如表 2 所示。

以下是凝析气藏提高采收率的几点建议:

- 1) 保持压力开发是提高凝析油采收率的重要方法,但注干气反蒸发机理的实验与理论与现实有些不符,比如牙哈气田注干气凝析油采收率就比预测的高,有待于进一步研究在线注气蒸发的直接测试技术。
- 2) 注气过程中重力超覆也是近年发现的新现象,理论模型无法描述,这涉及重力分异理论、非平衡相态和非平衡扩散理论,但这些方面理论还未取得明显突破。
- 3) 近年出现一些缝洞型、裂缝性、低渗透凝析气藏,其机理与传统的砂岩相比更为复杂,有必要加强研究提高采收率技术,裂缝凝析气藏单井吞吐不利于提高凝析油采收率。
- 4) 注水开发凝析气藏对相态影响较小,油气比不上升,但大部分气藏水驱会造成波及效率的下降,在高渗透和重力驱的条件下可考虑使用,但使用时要慎重。
- 5) 解除凝析气井污染的新技术研究,将提高凝析油采收率与提高气藏采收率同等对待,改变凝析气藏采收率只重视提高凝析油采收率的传统认识。
- 6) 表 2 中虽然列出了现发表的 EGR 技术,有些还处于评价研究阶段,还未投入现场应用,应用时要针对具体的气藏情况,考虑现有技术和经济条件来确定是否值得实施。

4 边底水气藏的 EGR 技术

我国大多数气藏均属不同程度的水驱气藏,其中边底水活跃的气藏占 40%~50%。国内边底水气藏主要为背斜圈闭,且多有断层发育。大部分该类气藏的孔隙度和渗透率偏低,非均质性较强,为水侵活跃气藏,地层水多以沿裂缝上窜的形式侵入气藏,对气藏采收率影响较高。与气驱气藏相比较,边、底水气藏具有采气速度低、产能递减快、采收率低、水气比上升明显、投资大和成本高等特点。因此,在开发过程中要特别注意气井和气藏的产水动态,加强水的动态监测和治水技术研究。

我国边底水气藏大多数已进入开发中后期阶段,面临水侵现象严重,而采取人工排水采气技术更应注意各种排水工艺的技术特点以及适应条件,以便取得最好的排水效果。通过多年的研究和发展,目前国内、外都已形成了各自的提高边底水气藏采收率的技术。其针对边底水气藏的 EGR 技术策略总结如表 3 所示。

表 2 适用于凝析气藏的 EGR 技术策略汇总表

技术	分 类	优 点	实 例
注 气	注干气	普遍认为干气对反蒸发近井地带凝析油的效果比任何非烃气体好,不用分离处理,没有腐蚀	Sleipnerøst Ty 强水驱气藏 ^[18] ; 迪拜马尔格哈姆(Margham)凝析气田 ^[19]
	注二氧化碳	注二氧化碳驱替反渗吸水的效果优于干气;解除井筒附近凝析油伤害效果优于氮气和甲烷	伊朗裂缝凝析气田 ^[20]
	注氮气	氮气能进入水不能进入的低渗透层段,抽提或携带低渗透带的原油;氮气有良好的可压缩性和膨胀性,在能量释放时具有良好的解堵、助排、驱替和气举等作用	新场气田 ^[21] ; 东安休兹牧场高含凝析油凝析气田 ^[22]
	注空气	高温氧化和低温氧化都已经成功在油藏中实现	胜利油田 ^[23]
	注丙烷	可有效降低反凝析液饱和度	国外实验研究 ^[24]
	自流注气	可以在同一体系中同步开发两个气藏	吉拉克凝析气田 ^[25]
	注富气	大大降低气液界面张力,增加凝析油流动性	俄罗斯乌克蒂尔凝析气田 ^[26]
	注丁烷+戊烷	与凝析液混相,减少流动阻力	数值模拟研究 ^[27]
注液体	注水	注水成本低;水驱流度比合适;促进三相驱替;保持气藏压力;不改变气体的组成和露点压力	扎纳若尔 r III 凝析油气藏 ^[28] ; 板桥废弃凝析气藏 ^[29]
	注甲醇	甲醇的挥发性有利于蒸发带走近井地带的反渗析水,解除水锁;可使气液界面张力降低	Hatter's Pond 油田 ^[30] ; P67 凝析气藏濮 8-12 井 ^[31]
	注柴油+降低界面张力溶剂	能够有效地解除凝析油油墙,提高气的产量	Hatter's Pond 油田 ^[32]
气液共同注入	水气交替注入	能明显地改善注气波及体积,防止气窜;可大幅度提高层状凝析气藏凝析油采收率	美国东安休兹牧场凝析气田实验和数模研究 ^[33]
	注甲醇段塞+干气	甲醇前置段塞解除反凝析油污染和反渗析水锁;干气使地层中的反凝析现象再次减弱	中原油田黄河南地区深层凝析气藏 ^[34]
	注(C ₂ 、C ₃ 、C ₄ 或液化气)段塞+干气顶替的单井吞吐	重新积聚凝析油的剧烈程度小于干气,总体处理效果好于干气	乌克蒂尔凝析气田 ^[35]
改变润湿性	表面活性剂和聚合物	通过改变储层润湿性提高液相流动能力,增加凝析气井产能	阿塞拜疆海上气田 ^[36] ; 东濮气田 ^[37]
水平井	水平井开发	泄油气面积大,生产压差较直井低,产能较高	牙哈凝析气田 ^[38] ; 苏里格气田 ^[39]
稳产开发关键技术	油层保护技术	气井的油层保护非常重要,减小压差,防止油析出,保证气藏产能	均可以考虑
	气层压裂改造技术	改善井底流动条件,降低压差,提高采收率和产量	文南油田凝析气藏 ^[40]
	排液采气技术	排除井底积液,使气井正常生产	白庙凝析气藏 ^[41]

表 3 适用于边底水气藏的 EGR 技术策略汇总表

技 术	优 点	实 例
优选管柱排水采气	合理利用地层能量	大牛地气田 ^[42]
泡沫排水采气	施工容易、收效快、成本低、不影响日常生产	涩北气田 ^[43] ; 华北油田 ^[44]
气举排水采气	设计、安装比较简单,易于管理;少投入、多产出	靖边气田 ^[45] ; 文安气田 ^[46]
机抽排水采气	适用于一定产能,产水量大,动液面较高,邻近无高压气源或采取气举法已不经济的水淹井	宋家场气田; 龙头—吊钟坝气藏 ^[47]
电潜泵排水采气	参数可调性好、设计安装及维修方便,适用于水淹井复产和气藏强排水	中坝气田须二段气藏 ^[48] ; 贵州气田太 7 井 ^[49]
射流泵排水采气	适合于处理腐蚀和含砂流体,倾斜井和水平井,高温深井;安装方便,维护费用低;产量范围大,控制灵活方便	纳溪气田 ^[50] ; 宋家场气田 ^[51] ; 徐深气田 ^[52]
电潜泵+毛细管排水采气	可以将起泡剂直接注入工艺设计的位置,起泡效果更好	中国石油西南油气田公司蜀南气矿 ^[53]
涡轮泵排水采气	可靠性高、调节容易、重量轻、体积小、耐高温和抗腐蚀	特尔特—贝尤气田 ^[54]
同心毛细管技术	能够经济有效地解决低压气井积液、油气井防腐、清除盐垢和清蜡等实际生产问题	美国东得克萨斯棉谷气田 ^[55]
天然气连续循环采气	弥补柱塞举升或速度管柱存在的缺点	Qzona 气田 ^[56]
战略治水	在水区强排或在水道上强排,保障气藏免受水侵影响	中坝气田须二段气藏 ^[57]

以下是提高边、底水气藏提高采收率的几点建议:

1) 规范水淹气藏的再生产技术, 加速排水采气, 使储集层压力降低到含水层的影响以下, 当地层压力进一步降低, 圈闭气膨胀进入气井。这个方法已经在美国和苏联的很多气田中获得应用。

2) 利用气水两相渗流阻力阻水, 注非烃气体驱替天然气, 把氮气注入气水之间, 利用氮气与甲烷的比重差, 氮气段塞既隔水又驱替天然气。这个方法已经应用于俄罗斯的梅德维日气田。

3) 开展边、底水气藏数值模拟和物理模拟研究, 建立数值化岩心结合物理模拟、气藏数值模拟技术所特有的仿真模拟属性与排水采气和排水找气相结合的水侵机更有研究新方法。

4) 加强新型排水采气工艺技术研究, 包括组合排水采气、连续油管深井排水采气、超声波排水采气、球塞气举排水采气、气举凡尔技术。

5) 试验底水气藏双完井方式, Armenta 等人提出的一种提高气藏采收率的新方法, 即在井底安装一个有井底水槽的排水系统和注入系统的双完井方式。

6) 通过注入化学剂改变井底储层湿润性, 将气相变成润湿相, 确保出水后气相的渗流能力。

5 结 论

1) EGR 的定义和剩余气描述方式与 EOR 的定义及描述方式都不同, 应用时不能直接套用 EOR 相关方法。

2) 低渗透气藏 EGR 的重要方向是降低废弃压力、增大波及体积。

3) 凝析气藏 EGR 不仅要提高凝析油采收率, 提高天然气采收率也是重要内容。

4) 边底水气藏 EGR 主要方向是治水和用水, 解除水封气, 复杂气藏水侵机理还需加强研究。

5) 我国目前发现的复杂气藏较多, 如低渗透凝析气边底水气藏, 就需要根据气藏的主要矛盾来制定科学合理的 EGR 技术方案。

参 考 文 献

- [1] 张运河, 梁玉国, 张庆. 低碳经济背景下的中国能源结构优化[J]. 价值工程, 2011, 30(11): 1-2.
ZHANG Yunhe, LIANG Yuguo, ZHANG Qing. The optimization of China's energy structure based on low-carbon economy[J]. Value Engineering, 2011, 30(11): 1-2.
- [2] 郭建春, 梁豪, 赵志红. 基于最优支撑剂指数法优化低渗气藏裂缝参数[J]. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2013, 35(1): 93-98.

- GUO Jianchun, LIANG Hao, ZHAO Zhihong. Optimizing the fracture parameters of low permeability gas reservoirs [J]. Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition, 2013, 35(1): 93-98.
- [3] 冯曦, 钟兵, 刘义成, 等. 优化气井配产的多因素耦合分析方法及其应用[J]. 天然气工业, 2012, 32(1): 53-56.
FENG Xi, ZHONG Bing, LIU Yicheng, et al. Multi-factor coupling analysis of optimized gas-well production allocation [J]. Natural Gas Industry, 2012, 32(1): 53-56.
- [4] SAMUELSON M L, AKIMWANDE T, CONNELL R, et al. Optimizing horizontal completions in the Cleveland tight gas sand [C] // paper 113487-MS presented at the CIPC/SPE Gas Technology Symposium 2008 Joint Conference, 16-19 June 2008, Alberta, Calgary Canada. New York: SPE, 2008.
- [5] 朱斌, 熊燕莉, 王庆. 水平井提高五百梯气田石炭系气藏低渗储量采收率可行性论证[J]. 钻采工艺, 2008, 31(5): 70-72.
ZHU Bin, XIONG Yanli, WANG Qing. Feasibility argumentation of horizontal wells to improve low permeability reserve recovery of Carboniferous gas reservoir in Wubaiti Gas Field [J]. Drilling & Production Technology, 2008, 31(5): 70-72.
- [6] 朱洪涛, 陈冬林, 刘华杰, 等. CO₂ 泡沫压裂工艺技术在川西低渗致密气藏的应用[J]. 钻采工艺, 2009, 32(1): 53-54.
ZHU Hongtao, CHEN Donglin, LIU Huajie, et al. Application of CO₂ foam fracturing technology in low permeability and tight gas reservoir of western Sichuan [J]. Drilling & Production Technology, 2009, 32(1): 53-54.
- [7] VOS B, SHAOUL J, DE KONING K. Southern north sea tight gas field development planning using hydraulic fracturing [C] // paper 121680-MS presented at the 2009 SPE EUROPEC/EAGE Annual Conference and Exhibition, 8-11 June 2009, Amsterdam, the Netherlands. New York: SPE, 2009.
- [8] 李小刚, 何骁, 杨兆中, 等. 川西低效砂岩气藏水力压裂难点及对策探讨[J]. 钻采工艺, 2010, 33(6): 49-51.
LI Xiaogang, HE Xiao, YANG Zhaozhong, et al. Difficulties and countermeasures of hydraulic fracturing of the inefficient sandstone gas reservoir in western Sichuan [J]. Drilling & Production Technology, 2010, 33(6): 49-51.
- [9] 任山, 王世泽, 林永茂, 等. 洛带气田遂宁组气藏压裂优化设计[J]. 钻采工艺, 2007, 30(2): 65-67.
REN Shan, WANG Shize, LIN Yongmao, et al. Optimization design of gas pool fracturing in Suining Group of Luo-dai Gas Field [J]. Drilling & Production Technology, 2007, 30(2): 65-67.
- [10] 陈瑜, 王勋. 新场气田泡沫排水采气工艺应用研究[J]. 钻

- 采工艺, 2008, 31(4): 82-84.
- CHEN Yu, WANG Xun. Application and study on gas production technology of foam drainage in Xinchang Gas Field[J]. Drilling & Production Technology, 2008, 31(4): 82-84.
- [11] 蒲仁瑞, 刘唯贤, 姜青梅, 等. 完善采气工艺提高卫 79-9 井采收率[J]. 天然气工业, 2001, 21(4): 81-83.
- PU Renrui, LIU Weixian, JIANG Qingmei, et al. Perfect gas production processes to improve Wei 79-9 recovery [J]. Natural Gas Industry, 2001, 21(4): 81-83.
- [12] 黄桢, 王锐, 杜娟. 中坝气田须二气藏排水采气效果分析 [J]. 钻采工艺, 2012, 35(6): 51-54.
- HUANG Zhen, WANG Rui, DU Juan. Effect analysis of drainage gas recovery in Xujiahe 2 Gas Reservoir of Zhongba Gas Field[J]. Drilling & Production Technology, 2012, 35(6): 51-54.
- [13] 廖晓蓉, 孟庆华, 杨宇, 等. 新场气田运用高低压分输技术提高气田采收率[J]. 天然气与石油, 2003, 21(2): 18-19.
- LIAO Xiaorong, MENG Qinghua, YANG Yu, et al. Using high voltage sub-transmission technology to increase gas recovery in Xinchang Gas Field[J]. Natural Gas and Oil, 2003, 21(2): 18-19.
- [14] 王雨生. 新场气田蓬莱镇组气藏整体增压开采方案研究 [J]. 西南石油学院学报, 2005, 27(5): 40-43.
- WANG Yusheng. Research on pressure boost to exploit project in Penglaizhen gas reservoir of Xinchang Gas Field [J]. Journal of Southwest Petroleum University, 2005, 27(5): 40-43.
- [15] 王茂林. 适合于川西地区提速的欠平衡钻井工艺技术研究 [D]. 北京: 中国石油大学, 2011.
- WANG Maolin. Research on speed underbalanced drilling technology suitable for the western area[D]. Beijing: China University of Petroleum, 2011.
- [16] 李骞, 李相方, 李艳静, 等. 凝析气藏不同开发阶段的合理生产压差探讨[J]. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2012, 34(1): 121-126.
- LI Qian, LI Xiangfang, LI Yanjing, et al. Research of reasonable producing pressure drop of gas condensate reservoir on different period[J]. Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition, 2012, 34(1): 121-126.
- [17] 廖发明, 苗继军, 陈文龙, 等. 凝析气井产能和储量计算新方法[J]. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2012, 34(4): 100-104.
- LIAO Faming, MIAO Jijun, CHEN Wenlong, et al. New calculation method of condensate gas well production and reservoirs[J]. Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition, 2012, 34(4): 100-104.
- [18] HUERTA QUINONES V, LANCHIMBA A, COLONOS P. Gas/condensate field development plan by means of numerical compositional simulation[C]// paper 138886-MS presented at the SPE Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference, 31 November - 3 December 2010, Lima, Perú. New York: SPE, 2010.
- [19] ERNSTER G A, BOLLING J D, GOECKE C R, et al. A reservoir engineering study of the Margham Field, Dubai, UAE[C] // paper 18307 presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 2-5 October 1988, Houston, Texas, USA. New York: SPE, 1988.
- [20] 孙扬. 天然气藏超临界 CO₂ 埋存及提高天然气采收率机理[D]. 成都: 西南石油大学, 2012.
- SUN Yang. Sequestration of supercritical CO₂ in natural gas reservoir and mechanism of enhancing gas recovery [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2012.
- [21] 熊听东, 王世泽, 张国东, 等. 新场气田上沙溪庙气藏水锁效应研究[J]. 钻采工艺, 2007, 30(4): 95-97.
- XIONG Xindong, WANG Shize, ZHANG Guodong, et al. Study on water lock effect in Xinchang Shangsha Gas Reservoir[J]. Drilling & Production Technology, 2007, 30(4): 95-97.
- [22] LEWIS H, COUPLES G D. Production evidence for geological heterogeneities in the Anschutz Ranch East Field, western USA [J]. Geological Society, London, Special Publications, 1993, 73(1): 321-338.
- [23] 黄建东, 孙守港, 陈宗义, 等. 低渗透油田注空气提高采收率技术[J]. 油气地质与采收率, 2001, 8(3): 79-81.
- HUANG Jiandong, SUN Shougang, CHEN Zongyi, et al. IOR by gas injection in low permeability oil reservoir [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2001, 8(3): 79-81.
- [24] ASAR H, HANDY L. Influence of interfacial tension on gas/oil relative permeability in a gas-condensate system [J]. SPE Reservoir Engineering, 1988, 3(1): 257-264.
- [25] 伍轶鸣. 吉拉克凝析气田自流注气提高采收率方案[J]. 天然气工业, 1999, 19(2): 58-62.
- WU Yiming. A research on the plan of enhancing recovery in Jilake Condensate Gas Field by artesian gas injection [J]. Natural Gas Industry, 1999, 19(2): 58-62.
- [26] 李士伦, 郭平, 孙雷, 等. 拓展新思路, 提高气田开发水平和效益[J]. 天然气工业, 2006, 26(2): 1-5.
- LI Shilun, GUO Ping, SUN Lei, et al. Expanding new ideas and improving level and benefits of gas field development[J]. Natural Gas Industry, 2006, 26(2): 1-5.
- [27] 李敬松, 李相方, 唐恩高. 注烃提高凝析气井产能方法研究 [J]. 油气地质与采收率, 2004, 11(2): 51-53.
- LI Jingsong, LI Xiangfang, TANG Engao. Study on ap-

- proach to improve productivity of condensate gas well by hydrocarbon injection[J]. *Oil & Gas Recovery Technology*, 2004, 11(2): 51-53.
- [28] 王惠, 卢渊, 伊向, 等. 扎纳若尔凝析油气田改善开发效果的对策[J]. *新疆石油地质*, 2004, 25(3): 340-343.
- WANG Hui, LU Yuan, YI Xiang, et al. The measures for improving development effect of Zhanazhol Condensate Oil-Gas Field in Kazakhstan[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2004, 25(3): 340-343.
- [29] 程远忠, 刘立平, 李国江, 等. 板桥废弃凝析气藏注水提高采收率研究[J]. *天然气地球科学*, 2003, 14(4): 298-301.
- CHENG Yuanzhong, LIU Liping, LI Guojiang, et al. The research of Banqiao abandoned condensate oil and gas field by water injection[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2003, 14(4): 298-301.
- [30] AL-ANAZI H, WALKER J, POPE G, et al. A successful methanol treatment in a gas-condensate reservoir: Field application[C]// paper 80901 presented at the SPE Production and Operations Symposium, 22-25 March 2003, Oklahoma City, Oklahoma, USA, New York: SPE, 2003.
- [31] 杨建华, 杨苏南. 注甲醇治理反凝析污染技术在濮8-12气井的应用[J]. *清洗世界*, 2010, 26(5): 14-16.
- YANG Jianhua, YANG Sunan. Application of technology of methanol implementation in control of anti-pollution on PU 8-12 gas well[J]. *Cleaning World*, 2010, 26(5): 14-16.
- [32] AL-ANAZI H, SOLARES J R, AL-FAIFI M. The impact of condensate blockage and completion fluids on gas productivity in gas-condensate reservoirs[C]// paper 93210-MS presented at the SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition, 5-7 April 2005, Jakarta, Indonesia, New York: SPE, 2005.
- [33] JONES L G, CULLICK A S, COHEN M F. WAG process promises improved recovery in cycling gas condensate reservoirs: part 1—prototype reservoir simulation studies [C]// paper 19113 presented at the SPE Gas Technology Symposium, 7-9 June 1989, Dallas, Texas, USA, New York: SPE, 1989.
- [34] 赵斌, 张晓蓉, 张坤峰. 中原油田凝析气藏反凝析污染治理技术及其应用[J]. *内江科技*, 2010, 31(8): 106-107.
- ZHAO Bin, ZHANG Xiaorong, ZHANG Kunfeng. The pollution control technology of retrograde condensation and its application in Zhongyuan Oilfield Condensate Gas Reservoir[J]. *Neijiang Science & Technology*, 2010, 31(8): 106-107.
- [35] 李士伦. 气田开发方案设计[M]. 北京: 石油工业出版社, 2006.
- LI Shilun. The development plan design for gas fields[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2006.
- [36] 洪金秀, 张子涵, 李蔚, 等. 阿塞拜疆油田微生物提高油层采收率方法的分析[J]. *国外油田工程*, 2006, 22(6): 6-9.
- HONG Jinxiu, ZHANG Zihan, LI Wei, et al. Analysis of enhancing oil recovery by microorganism in Azerbaijan Oilfield[J]. *Foreign Oilfield Engineering*, 2006, 22(6): 6-9.
- [37] 刘振兴, 王乐之, 肖毅, 等. 渤海湾盆地东濮凹陷桥口凝析气藏油—气相渗对比研究[J]. *石油实验地质*, 2009, 31(1): 105-108.
- LIU Zhenxing, WANG Lezhi, XIAO Yi, et al. Comparison research between oil and gas relative permeabilities of Qiaokou condensate gas reservoir in the Dongpu Depression of the Bohai Bay Basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2009, 31(1): 105-108.
- [38] 尹显林, 焦文东, 张永灵, 等. 牙哈凝析气藏水平井优化设计及开发跟踪研究[J]. *天然气勘探与开发*, 2004, 27(3): 31-34.
- YIN Xianlin, JIAO Wendong, ZHANG Yongling, et al. Horizontal well optimization design & development tracing research of Yaha Gas Condensate Reservoir[J]. *Natural Gas Exploration & Development*, 2004, 27(3): 31-34.
- [39] 余林瑶. 苏里格气田水平井产能评价研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2012.
- YU Linyao. Research on evaluation of horizontal well productivity in Sulige Gas Field[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2012.
- [40] 吕继阁. 文南油田文72断块区凝析气藏稳产技术[J]. *内蒙古石油化工*, 2003, 29(1): 116-118.
- LYU Jige. The stable production technology of gas condensate reservoir in 72 fault-block area of Wennan Oilfield[J]. *Inner Mongolian Petrochemical Industry*, 2003, 29(1): 116-118.
- [41] 王连习, 王伯洪, 耿波, 等. 排液采气技术在白庙气藏的应用研究[J]. *天然气工业*, 2005, 25(7): 84-85.
- WANG Lianxi, WANG Bohong, GENG Bo, et al. Application of drainage gas recovery technology in Baimiao Gas Reservoir[J]. *Natural Gas Industry*, 2005, 25(7): 84-85.
- [42] 张文洪, 龚才喜, 李克智. 大牛地气田采气工艺技术现场应用效果[J]. *天然气技术*, 2009, 3(6): 25-27.
- ZHANG Wenhong, GONG Caixi, LI Kezhi. Field application effects of gas recovery technique in Daniudi Gas Field[J]. *Natural Gas Technology*, 2009, 3(6): 25-27.
- [43] 许吉瑞, 张洪良, 吴学安, 等. 泡沫排水采气工艺技术在涩北气田的应用[J]. *青海油田*, 2008, 26(3): 35-40.
- XU Jirui, ZHANG Hongliang, WU Xue'an, et al. Application of the foam drainage gas technology in Sebei Gas Field[J]. *Qinghai Oilfield*, 2008, 26(3): 35-40.
- [44] 成勇. 华北油田排水采气工艺技术应用研究[D]. 南充: 西南石油学院, 2004.

- CHENG Yong. The study on application of drainage gas recovery technology in Huabei Oilfield [D]. Chengdu: Southwest Petroleum Institute, 2004.
- [45] 王心敏, 贾浩民, 宁梅, 等. 靖边气田同站高压井气举排水采气工艺流程改造效果分析[J]. 天然气工业, 2013, 33(2): 37-42.
- WANG Xinmin, JIA Haomin, NING Mei, et al. Effectiveness analysis of drainage gas recovery transformation process with gas lift to wells with high-pressure in Jingbian gas reservoir[J]. Natural Gas Industry, 2013, 33(2): 37-42.
- [46] 孙海林, 王风锐, 白田增, 等. 连续油管液氮气举排液技术在文古 3 井的应用[J]. 油气井测试, 2009, 18(5): 64-65.
- SUN Hailin, WANG Fengrui, BAI Tianzeng, et al. Application of technique of gas-lift by liquid nitrogen and unloading with coiled tubing in well Wengu 3[J]. Well Testing, 2009, 18(5): 64-65.
- [47] 黄艳, 余朝毅, 马辉运, 等. 四川盆地气田排水采气工艺技术研究与应用[J]. 钻采工艺, 2008, 31(5): 66-69.
- HUANG Yan, SHE Chaoyi, MA Huiyun, et al. Application and study on drainage gas technology in gas field in Sichuan Basin[J]. Drilling & Production Technology, 2008, 31(5): 66-69.
- [48] 王玉文. 中坝气田须二气藏排水采气开发效果分析及开发前景展望[J]. 天然气工业, 1995, 15(5): 28-31.
- WANG Yuwen. Effectiveness analysis and prospect of drainage gas technology on developing Xu2 gas reservoir in Zhongba Gas Field[J]. Natural Gas Industry, 1995, 15(5): 28-31.
- [49] 李晓军, 齐宁, 张开峰, 等. 小直径电潜泵排水采气技术的研究与应用[J]. 油气地质与采收率, 2008, 15(6): 98-101.
- LI Xiaojun, QI Ning, ZHANG Kaifeng, et al. Study and application of drainage gas technology by small diameter electric submersible pump[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2008, 15(6): 98-101.
- [50] 张霖, 李学康, 刘伟, 等. 水力射流泵排水采气工艺技术及应用[J]. 钻采工艺, 2005, 28(4): 74-76.
- ZHANG Lin, LI Xuekang, LIU Wei, et al. Drainage gas technology by hydraulic jet pump and its application[J]. Drilling & Production Technology, 2005, 28(4): 74-76.
- [51] 张碧波. 宋家场气田顶部区块开发潜力与复产方案论证[D]. 成都: 西南石油大学, 2010.
- ZHANG Bibo. The development potential and resume production program demonstration on the top block of Songjiachang Gas Field[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2010.
- [52] 袁玲. 徐深气田排水采气工艺技术探讨[J]. 黑龙江科技信息, 2011, 16(6): 29.
- YUAN Ling. Discussion on drainage gas technology in Xushen Gas Field[J]. Heilongjiang Science and Technology Information, 2011, 16(6): 29.
- [53] 乐宏, 刘同斌, 张俊杰, 等. 电潜泵+毛细管泡排复合工艺在纳 59 井的应用[J]. 钻采工艺, 2009, 32(2): 81-83.
- LE Hong, LIU Tongbin, ZHANG Junjie, et al. Application of the compound process of electric submersible pump and capillary foam drainage gas technology in Na 59 well[J]. Drilling & Production Technology, 2009, 32(2): 81-83.
- [54] CRONQUIST C. Turtle Bayou 1936 - 1983: Case history of a major gas field in south Louisiana[J]. Journal of Petroleum Technology, 1984, 36(11): 1941-1951.
- [55] AWADZI J, BABBITT J, HOLLAND S, et al. Downhole capillary soap injection improves production[C] // paper 52153 presented at the SPE Mid-Continent Operations Symposium, 28-31 March 1999, Oklahoma City, Oklahoma, USA. New York: SPE, 1999.
- [56] 赵炜. 采用天然气连续循环的方式控制气井积液[J]. 国外油田工程, 1999, 15(10): 24-25.
- ZHAO Wei. Controlling effusion in gas well by continuously cycling natural gas[J]. Foreign Oilfield Engineering, 1999, 15(10): 24-25.
- [57] 刘义成. 中坝气田须二气藏提高采收率研究[J]. 天然气勘探与开发, 2000, 23(3): 12-20.
- LIU Yicheng. Study on enhanced oil recovery in Xu2 gas reservoir in Zhongba Gas Field[J]. Natural Gas Exploration & Development, 2000, 23(3): 12-20.

(修改回稿日期 2013-11-15 编辑 韩晓渝)