

龙王庙组气藏高温高压酸性大产量气井完井难点及其对策

李玉飞¹ 余朝毅¹ 刘念念² 张华礼¹ 张 林¹ 朱达江¹

1. 中国石油西南油气田公司工程技术研究院 2. 中国石油川庆钻探工程公司安全环保质量监督检测研究院

李玉飞等. 龙王庙组气藏高温高压酸性大产量气井完井难点及其对策. 天然气工业, 2016, 36(4): 60-64.

摘 要 为了实现对四川盆地安岳气田下寒武统龙王庙组气藏的安全高效开发, 减少因冲蚀、腐蚀、丝扣渗漏和完井工艺不合理等因素所导致的安全屏障失效和环空异常带压等问题, 在分析该气藏完井主要技术难点的基础上, 重点进行了完井方式优选、管柱材质实验评价与优选、管柱丝扣密封性能评价、井下管柱结构优化设计以及管柱抗冲蚀性能评价等方面的研究与现场试验。形成了一套适合于高温、高压、含酸性介质、大产量气井的配套完井技术: ①优选了适合的完井方式、管柱材质和扣型; ②形成了不同配产条件下的管柱结构; ③制订了针对直井和斜井的完井工艺及完井过程施工质量控制措施。现场应用效果表明, 该配套技术有效降低了大产量生产对管柱和井下工具的冲蚀以及射孔作业对生产封隔器密封性能的影响, 提高了完井施工质量, 对于减少后期生产过程中环空异常带压具有较好的效果。可为类似气田的开发提供参考。

关键词 四川盆地 安岳气田 龙王庙组气藏 高温高压 酸性 大产量气井 完井 管柱结构 施工质量控制

DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2016.04.009

Completion difficulties of HPHT and high-flowrate sour gas wells in the Longwangmiao Fm gas reservoir, Sichuan Basin, and corresponding countermeasures

Li Yufei¹, She Chaoyi¹, Liu Niannian², Zhang Hualì¹, Zhang Lin¹, Zhu Dajiang¹

(1. Engineering Technology Research Institute of PetroChina Southwest Oil & Gas Field Company, Guanghan, Sichuan 618300, China; 2. Safety and Environmental Quality Supervision and Inspection Institute of CNPC Chuanqing Drilling Engineering Co., Ltd., Guanghan, Sichuan 618300, China)

NATUR. GAS IND. VOLUME 36, ISSUE 4, pp.60-64, 4/25/2016. (ISSN 1000-0976; In Chinese)

Abstract: For safe and efficient development of the sour gas reservoirs of the Cambrian Longwangmiao Fm in the Anyue Gas Field, Sichuan Basin, and reduction of safety barrier failures and annulus abnormal pressure which are caused by erosion, corrosion, thread leakage and improper well completion operations, a series of studies and field tests were mainly carried out, including optimization of well completion modes, experimental evaluation and optimization of string materials, sealing performance evaluation of string threads, structural optimization design of downhole pipe strings and erosion resistance evaluation of pipe strings, after the technical difficulties related with the well completion in this reservoir were analyzed. And consequently, a set of complete well completion technologies suitable for HTHP (high temperature and high pressure) and high-flowrate gas wells with acidic media was developed as follows. First, optimize well completion modes, pipe string materials and thread types. Second, prepare optimized string structures for different production allocation conditions. And third, formulate well completion process and quality control measures for vertical and inclined wells. Field application results show that the erosion of high-flowrate production on pipe strings and downhole tools and the effect of perforation on the sealing performance of production packers were reduced effectively, well completion quality was improved, and annulus abnormal pressure during the late production was reduced. This research provides a reference for the development of similar gas fields.

Keywords: Sichuan Basin; Anyue Gas Field; Longwangmiao Fm gas reservoir; HPHT; Acidity; High flowrate; Gas well; Well completion; String structure; Completion quality control

基金项目: 国家科技重大专项“四川龙岗地区大型碳酸盐岩气田开发示范工程”(编号: 2011ZX05047-02)、中国石油西南油气田公司博士后工作站科研攻关项目“龙王庙高温高压大产量气井完整性的管柱力学研究”(编号: 20140305-11)。

作者简介: 李玉飞, 1981年生, 高级工程师, 硕士; 主要从事油气井完井与完整性评价以及修井方面的科研与管理工作。地址: (618300) 四川省广汉市广东路2号。电话: 13909025291。ORCID: 0000-0002-5832-5604。E-mail: l_yf@petrochina.com.cn

近年来,随着深层、高温、高压、含酸性介质的气田开发工作的不断推进,管柱丝扣泄露、封隔器失效和环空异常带压等影响气井安全生产的问题暴露越来越明显,直接影响到了气井能否顺利投产和后期的安全生产^[1-12]。为此本文以四川盆地安岳气田磨溪构造下寒武统龙王庙组气藏为对象,开展了高温高压含酸性介质和大产量气井完井技术攻关和研究,该研究对川渝地区同类气藏安全、经济和高效开发具有重要的意义。

1 完井技术难点

安岳气田龙王庙组气藏埋深在 4 500 m 左右,气藏中部温度介于 140.0~144.9 ℃,压力介于 75.7~76.1 MPa,天然气组分中 H₂S 含量介于 5.70~11.19 g/m³,CO₂ 含量介于 28.87~48.83 g/m³,且单井产量普遍较高,单井最高测试产量 263.47×10⁴ m³/d,具有深层、高温、高压、含酸性介质和大产量等特点。

高温高压含酸性介质和大产量等特点给完井投产造成相当大的困难,主要表现在几个方面:①气藏温度和压力高,对完井工具和井口等都提出了非常高的要求;②天然气中含 H₂S 和 CO₂,对入井管材与丝扣密封性能要求高;③气井产量高,对完井管柱和工具抗冲蚀性能要求高;④储层埋藏深,施工压力高,酸化施工参数控制难度大。

2 完井方式优选

根据龙王庙组气藏的特点,完井方式的优选应遵循以下几个方面的原则:①完井方式选择应考虑井筒的完整性和后期大产量条件下的安全生产。②满足增产改造和采气工艺要求^[12-14]。③施工工艺安全可靠,综合成本低。④利于保护气层,降低对气层的伤害。

根据储层段井筒稳定性分析结果,随着开采时间的不断增加,地层压力逐步降低,当地层压力系数降低到 1.4 左右时,储层将会出现垮塌的情况,结合完井方式选择遵循的原则,推荐龙王庙组气藏采用对井筒有支撑作用的射孔或衬管方式进行完井。

3 完井管柱优化设计

3.1 完井管柱材质优选

安岳气田龙王庙组气藏天然气中 H₂S 和 CO₂ 分

压比值为 3.31,腐蚀类型以 H₂S 腐蚀为主,需选用镍基合金材质油管,才能满足防腐要求。根据 GB/T 20972.3—2008,4d 类材质(如 G3、SM2550)在 149 ℃内使用不受限制,可以满足安岳气田龙王庙组气藏防腐要求;而 4c 类在 132 ℃内使用不受限制,能否满足防腐要求,还应根据气田实际工况开展管材抗腐蚀性能评价^[1-2]。

分别以 MX9 井和 MX11 井地层水为腐蚀介质,对 BG110SS、BG2532 和 BG2830 三种管材进行腐蚀评价实验。从实验结果看,4c 类镍基合金腐蚀速率为 0.000 1~0.003 0 mm/a,且不会发生硫化氢应力腐蚀开裂,如表 1~3 所示。因此,综合考虑生产周期和经济效益的要求,建议安岳气田龙王庙组气藏完井管柱采用 4c 类镍基合金(如 BG2532 和 BG2830 等)。

表 1 MX9 井地层水条件下的腐蚀实验结果表

材质	试件位置	腐蚀速率 / (mm·a ⁻¹)	备注
BG110SS	液相	0.318 8	存在蚀斑
BG2532	液相	0.000 7	均匀腐蚀
BG2830	液相	0.000 1	均匀腐蚀

实验条件: p_{H₂S} = 2.7 MPa, p_{CO₂} = 1.76 MPa, 地层水 pH 值为 5.076, Cl⁻ 含量为 12.08 mg/L, 水型为硫酸钠, 实验温度 140 ℃, 实验时间 72 h

表 2 MX11 井地层水条件下的腐蚀实验结果表

材质	试件位置	腐蚀速率 / (mm·a ⁻¹)	备注
BG110SS	液相	0.322 1	局部腐蚀严重, 腐蚀坑最大面积约 0.85 mm ² 。
BG2532	液相	0.002 0	均匀腐蚀
BG2830	液相	0.003 0	均匀腐蚀

实验条件: p_{H₂S} = 2.7 MPa, p_{CO₂} = 1.76 MPa, 地层水 pH 值 6.532, Cl⁻ 含量 28 378 mg/L, 水型为氯化钙, 实验温度 140 ℃, 实验时间 72 h

表 3 国产 BG2830 合金 SCC 实验结果表

被检测对象	国产 BG2830 合金油管
实验遵循的标准	GB/T 15970.2-2000 ; ISO 7539-2 : 1989 ; NACE TM0177-2005
实验方法	小四点弯曲
实验条件	实验溶液: 模拟龙岗 6 井气田水溶液 ; 温度为 150±5℃ ; p _{H₂S} 为 6 MPa ; p _{CO₂} 为 5.4 MPa ; 加载应力为 100% AYS = 850 MPa ; 实验周期: 720 h
实验结果	未开裂

3.2 管柱丝扣优选

为检验气密封丝扣在井下复杂环境中的适应性,开展了 VAM-TOP、FOX、BGT1 和 LTC 等国内外常用的气密封扣在交变载荷作用下的气密封试验,主要包括上卸扣、复合载荷气密封试验和电镜扫描等。根据试验结果,金属对金属的气密封丝扣(如 VAM-TOP、BGT1 等),在完井各种复杂工况条件下,上述扣型均可以满足气密封性能要求^[7-9]。

3.3 完井管柱结构优化设计

根据龙王庙组气藏压力高、温度高、含酸性介质和产量高的特点,完井管柱结构须满足以下要求^[10-11]:
①结构尽量简单,满足长期安全生产的要求;②紧急情况下能截断井下气源,实现井下安全控制;③避免套管内部和油管外壁接触酸性气体,保证气井的长期完整性;④满足酸化、测试和生产等作业的需要,并考虑后期井下作业工具坐放方便,最终形成以下完井管柱方案。

1) 直井:气密封扣油管+上流动短节+井下安全阀+下流动短节+气密封扣油管+锚定密封总成+永久式封隔器+磨铣延伸筒+坐放短节+球座+筛管+丢枪接头+射孔枪(图1)。

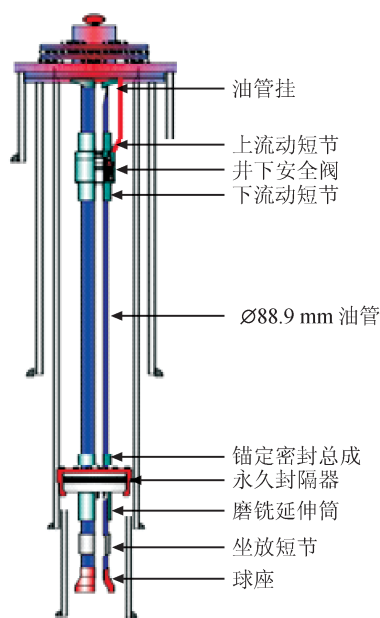


图1 直井完井管柱结构图

2) 大斜度井和水平井:气密封扣油管+上流动短节+井下安全阀+下流动短节+气密封扣油管+锚定密封总成+永久式封隔器+磨铣延伸筒+坐放短节+球座(图2)。

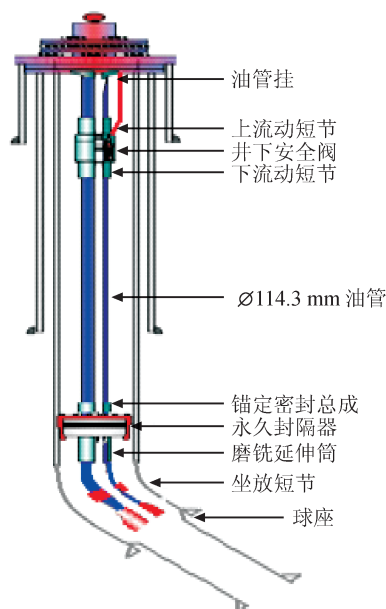


图2 大斜度井和水平井完井管柱结构图

3.4 复杂工况下管柱力学校核

龙王庙组气藏直井、大斜度井和水平井均采用永久式封隔器完井管柱,校核内容主要包括:封隔器坐封、酸压、液氮掏空和生产等作业过程中管柱的抗内压、抗外挤、抗拉和三轴安全系数以及封隔器对管柱的拉伸吨位,并根据校核结果对泵压、环空平衡压力 and 不同生产参数下环空控制压力等参数进行优化设计,从而保障完井管柱在复杂工况条件下的安全。

根据复杂工况下管柱力学校核结果,综合考虑完井成本,推荐直井或产量相对较低的气井采用 Ø88.9 mm、δ6.45 mm、110 钢级油管,产量较高的大斜度井和水平井采用 Ø114.3 mm、δ6.88 mm、125 钢级油管。

3.5 井下安全阀抗冲蚀能力分析

水平井或大产量气井,考虑到采用 Ø114.3 mm 井下安全阀时,油层套管及技术套管 0~200 m 井段需扩大一级,降低了气井井筒的完整性,为此,水平井或产量较高的气井推荐采用 Ø114.3 mm 油管、Ø88.9 mm 井下安全阀和 Ø177.8 mm 永久式封隔器,该方案管柱最小内径在 88.9 mm 井下安全阀处(71.5 mm)。因此,本文重点对井下安全阀在不同条件下抗冲蚀性能进行分析。根据井下安全阀抗冲蚀能力计算结果(表4),井口油压 15~60 MPa 时,可满足气井配产介于 $100 \times 10^4 \sim 159 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的抗冲蚀能力要求。

表4 Ø88.9 mm 井下安全阀 (内径 71.5 mm) 抗冲蚀能力
计算结果表

标准	井口压力 / MPa	抗冲蚀能力 / ($10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)
API 14E—1991	7.8	78.1
	10.0	90.1
	20.0	112.4
	25.0	129.2
	30.0	140.4
	40.0	148.4
	50.0	159.2
	60.0	166.1

注：考虑井下安全阀采用 718 材质，且上下有流动短节保护，冲蚀流量计算时 C 值取 200 (C 为取决于腐蚀层组分的常数)

4 完井工艺与施工质量控制

4.1 完井工艺

根据完井管柱方案，针对直井和水平井分别形成了两套完井工艺。直井采用射孔—酸化—测试—投产一体化完井工艺，一方面缩短了完井周期和作业风险，另一方面避免了酸化改造后压井对储层造成的污染和伤害，其作业工序包括：下一体化管柱→换装采气井口→替环空保护液→加压射孔后丢枪→坐封封隔器→放喷→酸化→排液→测试→完井投产。大斜度井和水平井由于不具备丢枪条件，且为了降低射孔振动对封隔器密封性能的影响，采用先射孔后下酸化—测试—投产一体化管柱的完井工艺，其作业工序包括：下射孔管柱→射孔→起射孔管柱→循环压井液观察→下封隔器完井管柱→换装采气井口→替环空保护液→坐封封隔器→放喷→酸化→排液→测试→完井投产。

4.2 完井施工质量控制

根据川渝地区高温高压高酸性气田开发经验，如果完井施工质量控制不好，可能出现管柱丝扣泄漏和封隔器坐封不合格等现象发生，导致后期生产过程中出现环空异常带压现象，严重影响气井安全生产^[12-14]。为了确保不出现因施工质量不合格造成的油套环空异常带压问题，完井施工质量控制措施主要有以下几个方面。

- 1) 制订气密封扣油管关键参数的质量检测标准，逐根检测，合格方可送达现场。
- 2) 严格按照耐蚀合金材质气密封扣油管入井施工作业要求操作，提高施工质量。
- 3) 采用扭矩标定仪对液压钳进行现场标定，确

保气密封丝扣上扣扭矩达到最佳。

4) 采用氦气气密封检测技术对所有入井管柱丝扣进行检测^[3]，检测合格方可入井。

5) 严格控制酸化、封隔器坐封和放喷时油压和环空压力，确保完井管柱安全系数和封隔器所受压差与轴向拉力等均在允许范围内。

5 现场应用

MX009-X1 井是安岳气田龙王庙组气藏的第 1 口开发井，套管层次为 Ø508 mm+Ø339.7 mm+Ø244.5 mm+Ø177.8 mm+Ø127 mm，产层压力系数为 1.68，温度为 143.74 ℃，最大井斜 86.21°，采用尾管射孔方式完井。

MX009-X1 井采用先射孔后下酸化—测试—投产一体化管柱的完井工艺，完井管柱结构为：Ø114.3 mm 油管+Ø88.9 mm 井下安全阀+Ø114.3 mm 油管+Ø177.8 mm 永久式封隔器总成+Ø88.9 mm 油管+球座。在下完井管柱过程中，严格按照施工质量控制措施要求执行；在封隔器坐封、排液和酸化过程中，严格控制施工泵压和环空平衡压力。另外，为了达到均匀布酸的目的，采用了转向酸和暂堵球工艺，测试获气产量 $263.47 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。2014 年 1 月完井以来，油压和油套环空压力平稳，未出现异常带压现象（图 3），说明井下管柱丝扣和封隔器均起到了较好的密封作用，完井施工质量控制较好。

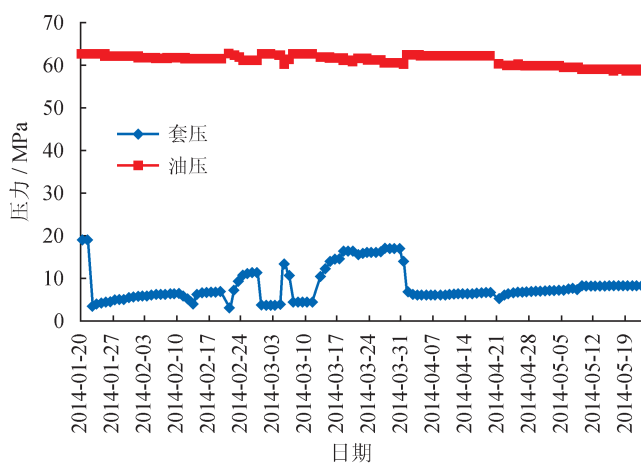


图3 MX009-X1 井环空压力情况图

6 结论与认识

1) 安岳气田寒武系龙王庙组气藏除了具有高温、高压、含酸性介质外，还具有单井产量高的特点，完

井管柱设计不但要考虑防腐和强度要求,还应分析不同条件下管柱和井下工具的抗冲蚀能力,避免因冲蚀造成井下工具和管柱损坏。

2) 为了减少射孔作业过程中管柱振动对永久式封隔器密封性能的影响,龙王庙组气藏生产井完井采用先射孔再坐封封隔器、酸化、投产的完井工艺,与龙岗气田投产同期相比,生产井环空异常的现象明显减少。

3) 由于高温高压大产量气井完井作业时井下工况的复杂性,建议该类气井完井管柱设计和井下工具选择等应充分考虑管柱材质、丝扣密封性能、复杂工况下管柱强度以及抗冲蚀性能等各种因素的影响,确保管柱在完井作业和后期生产过程中安全可靠。

参 考 文 献

- [1] 薛丽娜,周小虎,严焱诚,范希连,胡大梁. 高温酸性气藏油层套管选材探析——以四川盆地元坝气田为例[J]. 天然气工业, 2013, 33(1): 85-89.
Xue Lina, Zhou Xiaohu, Yan Yancheng, Fan Xilian, Hu Daliang. Material selection of the production casing in high-temperature sour gas reservoirs in the Changxing Formation, Yuanba Gas Field, northeastern Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2013, 33(1): 85-89.
- [2] 姜放. 高酸性气田金属材料的实验室评价方法研究[J]. 天然气工业, 2004, 24(10): 105-107.
Jiang Fang. In-lab evaluation methods of metal materials for high sour gas fields[J]. Natural Gas Industry, 2004, 24(10): 105-107.
- [3] 王建军. 地下储气库注采管柱密封试验研究[J]. 石油机械, 2014, 42(11): 170-173.
Wang Jianjun. Seal test of the injection-production string for underground gas storage[J]. China Petroleum Machinery, 2014, 42(11): 170-173.
- [4] NACE Standard. TM0177-2005 Laboratory testing of metals for resistance to sulfide stress cracking and stress corrosion cracking in H₂S environments[S]. Houston: NACE International, 2005.
- [5] 张智,李炎军,张超,黄熠,郭永宾,罗黎敏,等. 高温含 CO₂ 气井的井筒完整性设计[J]. 天然气工业, 2013, 33(9): 79-86.
Zhang Zhi, Li Yanjun, Zhang Chao, Huang Yi, Guo Yongbin, Luo Limin, et al. Wellbore integrity design of high-temperature gas wells containing CO₂[J]. Natural Gas Industry, 2013, 33(9): 79-86.
- [6] 张智,黄熠,李炎军,张超,曾春珉. 考虑腐蚀的环空带压井生产套管安全评价[J]. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2014, 36(2): 171-177.
Zhang Zhi, Huang Yi, Li Yanjun, Zhang Chao, Zeng Chunmin. Safety evaluation of production casing considering corrosion in gas well with sustained casing pressure[J]. Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition, 2014, 36(2): 171-177.
- [7] 郭建华,马发明. 四川盆地高含硫气井油管螺纹气密封性能评价与应用——以龙岗气田为例[J]. 天然气工业, 2013, 33(1): 128-131.
Guo Jianhua, Ma Faming. Air tightness performance assessment of screw threads of oil tubings in high-sulfur gas wells in the Longgang Gas Field, Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2013, 33(1): 128-131.
- [8] 史交齐,林凯,解学东,罗卫国,乐静,孔寒冰. 提高 API 螺纹油管和套管密封性的措施[J]. 石油机械, 2002, 30(3): 47-49.
Shi Jiaoqi, Lin Kai, Xie Xuedong, Luo Weiguang, Yue Jing, Kong Hanbing. Improvement of API threaded tubing and casing sealing measures[J]. China Petroleum Machinery, 2002, 30(3): 47-49.
- [9] 何银达,秦德友,凌涛,李旭,易飞,何剑锋. 塔里木油田高压气井油管气密封问题探析[J]. 钻采工艺, 2010, 33(3): 36-39.
He Yinda, Qin Deyou, Ling Tao, Li Xu, Yi Fei, He Jianfeng. Analysis of tubing hermetic sealing in high pressure gas well of Tarim oil field[J]. Drilling & Production Technology, 2010, 33(3): 36-39.
- [10] 刘殷韬,雷有为,曹言光,陈勇光,李宗林,于东. 普光气田大湾区块高含硫水平井完井管柱优化设计[J]. 天然气工业, 2012, 32(12): 71-74.
Liu Yintao, Lei Youwei, Cao Yanguang, Chen Yongguang, Li Zonglin, Yu Dong. An optimal design of pipe strings for horizontal sour gas wells at the Dawan Block, Puguang Gas Field[J]. Natural Gas Industry, 2012, 32(12): 71-74.
- [11] 郭建华,余朝毅,唐庚,陈艳,施太和. 高温高压高酸性气井完井管柱优化设计[J]. 天然气工业, 2011, 31(5): 70-72.
Guo Jianhua, She Chaoyi, Tang Geng, Chen Yan, Shi Taihe. Optimal design and application of completion strings in a HTHP sour gas well[J]. Natural Gas Industry, 2011, 31(5): 70-72.
- [12] 刘杰,何治,乐宏,王宁,张平,邓春晓,等. 川渝地区高酸性气井完井投产技术及实践[J]. 天然气工业, 2006, 26(1): 72-75.
Liu Jie, He Ye, Yue Hong, Wang Ning, Zhang Ping, Deng Chunxiao, et al. Technology and practice of well completion and putting into production for gas wells with high sulfur content in Sichuan and Chongqing areas[J]. Natural Gas Industry, 2006, 26(1): 72-75.
- [13] 苏鏢,龙刚,许小强,伍强,丁咚,王毅. 超深高温高压高含硫气井的安全完井投产技术——以四川盆地元坝气田为例[J]. 天然气工业, 2014, 34(7): 60-64.
Su Biao, Long Gang, Xu Xiaoqiang, Wu Qiang, Ding Dong, Wang Yi. Safe completion and production technologies of a gas well with ultra depth, high temperature, high pressure and high H₂S content: A case from the Yuanba Gas Field in the Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(7): 60-64.
- [14] 苏鏢,赵祚培,杨永华. 高温高压高含硫气井完井试气工艺技术与应用[J]. 天然气工业, 2010, 30(12): 53-56.
Su Biao, Zhao Zuopei, Yang Yonghua. Completion and well testing technology in HTHP and high H₂S gas wells of the eastern Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2010, 30(12): 53-56.

(修改回稿日期 2016-01-08 编辑 凌 忠)