

川西致密碎屑岩气藏水力压裂工艺技术进展

青永固*

(中国石化集团西南石油局)

青永固. 川西致密碎屑岩气藏水力压裂工艺技术进展. 天然气工业, 2002; 22(3): 21~ 24

摘 要 对于低渗、致密气藏而言, 水力压裂技术已不仅是增储上产的手段, 更作为一种勘探评价及投产措施在气田开发中起到了举足轻重的作用。针对川西侏罗系气藏普遍存在的低孔渗、致密、强水敏等地质特征, 在大量室内实验和大规模现场试验的基础上, 研究形成了立体、整体压裂两套开发模式及五套独具特色的碎屑岩气藏水力压裂工艺技术, 并在推广应用取得了巨大的经济和社会效益。

主题词 四川盆地 西 致密 碎屑岩 气藏 水力压裂 进展

川西坳陷是指四川盆地介于龙泉山断裂和龙门山深断裂之间的广大地区, 自上而下主要有蓬莱镇、沙溪庙、千佛岩、须家河组 4 个气藏。气藏圈闭类型复杂, 储层致密, 非均质性强, 基质渗透率小于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^3$, 储层孔隙度小于 12%, 有效渗透率在 $(0.08 \sim 2) \times 10^{-3} \mu\text{m}^3$, 上沙溪庙组储层有效渗透率在 $0.01 \times 10^{-3} \mu\text{m}^3$ 左右, 孔喉半径小于 $0.04 \mu\text{m}$, 排驱压力大于 1.39 MPa 。由于气藏复杂的地质特征, 单井自然产能低, 开采效益极为低下。从 1984 年到 1994 年间, 西南石油局天然气产量一直未能得到较大幅度的增长, 整个气田的勘探开发基本上处于徘徊不前的局面。

水力压裂是低渗、致密气藏勘探开发重要的技术手段。针对四川致密碎屑岩的储层改造, 从 70 年代开始, 多家单位(包括美国、加拿大的一些石油公司)进行过多次水力压裂试验, 但在 90 年代中期以前均未取得突破性进展。川西致密碎屑岩储层的勘探开发难度高于陕甘宁盆地及松辽盆地, 属于世界级的难题之一。西南石油局分别于 1984、1990 年对川西地区川孝 96 井、川孝 115 井进行了两次压裂施工, 也未取得增产效果。为此, 我局油气测试中心先后到东北、长庆、陕北等进行了大量的压裂技术调研和服务, 特别是通过认真对比东北、陕北与川西地区的储层条件, 提出了“由浅入深、由易到难”的攻关原则, 并将压裂液和压裂选层作为攻关的突破口。通过大量的前期论证和精心组织施工, 分别于 1995

年、1998 年在川孝 285、川孝 164 井率先取得了新场气田蓬莱镇组、沙溪庙组气藏单井水力压裂技术的突破, 并逐步研究形成了致密碎屑岩气藏水力压裂技术体系(图 1)。

关键核心技术

1. 评井选层

压裂层位的选择直接关系到施工的成败。评井选层一般主要从工程和地质角度结合静、动态资料对井(层)进行全面评估, 从而优选出适合压裂的井层。工程方面主要考虑井身结构是否满足压裂施工的要求; 地质方面则要充分利用气藏静、动态资料进行相关分析论证, 一般主要从地质、录井、测井、测试等资料进行综合考虑。在气藏压裂改造的前期, 可以通过界定适合水力压裂的储层有效厚度、孔隙度、密度、泥质含量、声波时差、含水饱和度等的范围值和最佳值来进行层位的选择, 在后期则可以通过神经网络专家系统来实现(图 2), 其基本原理是选择有代表性的压裂井层, 以压后效果为目标, 分析评价影响压裂效果的因素, 建立学习样本(或采用专家经验), 通过样本学习形成库, 对于有待判别是否适合压裂的井层, 只需输入有关参数, 利用推理分析就可知道该井层适合压裂的程度及其相关参数。

2. 压裂材料

(1) 压裂液

压裂液性能及其与地层的配伍性直接关系到压

* 青永固, 1944 年生, 高级工程师; 1969 年毕业于成都地质学院物探系。现任中国石油新星公司西南石油局局长, 从事油气田勘探开发管理工作。地址: 成都市一环北路北四段 116 号。邮编: 610081。电话: (028) 83332305。

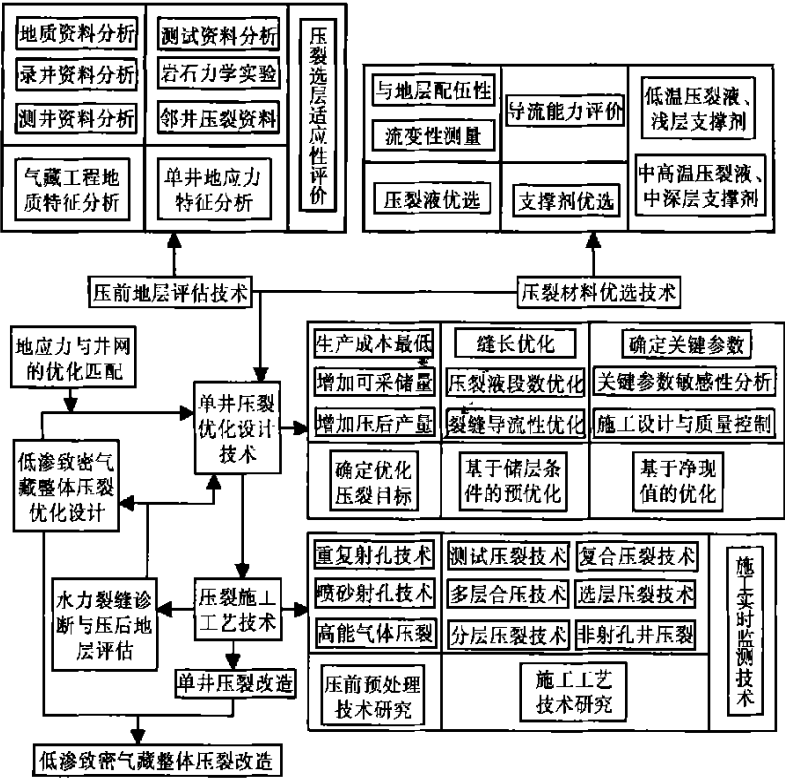


图 1 川西致密碎屑岩气藏水力压裂技术体系

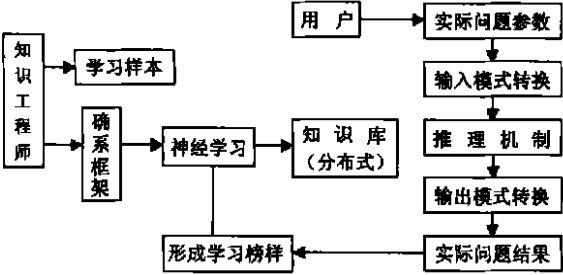


图 2 神经网络专家系统结构框图

裂施工成败及压裂效果, 水力造缝、裂缝在地层中的延伸及支撑剂在裂缝中的运移、铺置和分布均与压裂液性能有着较为密切的关系。一般要求压裂液具有低滤失、低摩阻、携砂能力强、稳定性好、价廉等特点, 今后对压裂液的低成本、低伤害将会提出更高的要求。

目前, 在川西致密碎屑岩气藏储层改造中, 普遍采用以羟丙基胍胶为稠化剂的水基压裂液。研究表明, 水基压裂液, 交联剂和破胶剂是影响伤害程度的关键因素。对于地温低于 100℃左右的地层, 采用有机硼作交联剂、过硫酸胺作破胶剂的压裂液伤害最

轻; 对于中温地层(约 60~120℃), 通过破胶剂的胶囊包裹技术, 可以增加破胶剂的使用浓度和进一步优化破胶剂的加入程序。在大量室内实验和大规模现场试验的基础上, 着力解决了浅层低温生物酶破胶和中、深层压裂液返排的难题, 并研制开发了具有国内先进水平的 DY 压裂液添加剂系列, 在推广应用取得了良好的技术效果。

(2) 支撑剂

为了获取更高的导流能力, 水力压裂中越来越倾向于使用较高强度的支撑剂。支撑剂的选择包括两个方面: 一方面要适合气藏工程的要求, 另一方面则要注意经济方面的考虑。在川西致密碎屑岩气藏的储层改造中, 除了在浅层蓬莱镇组气藏使用石英砂(部分井采用尾追陶粒)外, 在中、深层普遍采用陶粒作为支撑剂。

3. 单井压裂优化设计

水力压裂时裂缝在长度、高度和宽度三个方向上同时扩展延伸。在没有遮挡层(隔层)的情况下, 裂缝可能无限制地向上下延伸; 即使存在遮挡层, 如果没有足够的强度和厚度, 裂缝也可能上窜下跳, 穿入甚至穿透遮挡层。因此为了更真实地体现裂缝延

伸扩展的实际情况,必须采用三维压裂设计模型进行模拟。

根据通过地层条件来确定施工规模和通过施工规模来预测压裂效果两种设计思想,和西南石油学院联合研制开发的三维垂直裂缝压裂优化设计软件,在川西致密碎屑岩储层改造中得到了较为广泛的应用,并取得了良好的技术效果。整个优化过程分两次进行。第一次优化是根据地层渗透率和渗透率转换系数,将压裂层分类,确定前置液和混砂液的段数,以及获得最佳压裂效益的支撑裂缝长度范围和导流能力分布;第二次优化是通过系统考虑井筒温度场压裂液的流变性和滤失性、压力场、流速场等因素,对变排量、变粘度、变压裂液类型、变支撑剂类型和粒径及变砂比的注液工艺进行三维模拟,设计出最佳的施工规模和注液程序。

该软件的特点集中表现在:通过系统考虑温度场的影响,在国内外首次实现了对变排量、变压裂液类型、变支撑剂类型和粒径及变砂比的“四变”注液工艺的三维模拟,在压裂优化设计中体现了专家系统思想。同时,在建立裂缝三维延伸模型时考虑了产层、盖层、底层的岩石力学参数(弹性模量、泊松比、断裂韧性)相互变化,可以模拟多种应力分布模式以及裂缝穿层前后的延伸情况。

4. 整体压裂开发

“整体压裂开发”的提出是近期水力压裂技术研究的重要进展。对于低渗、致密气藏而言,水力压裂技术已不仅是增储上产的手段,更作为一种投产措施在气田开发中起到了举足轻重的作用。因此,为了科学、高效地开发气藏,必须将压裂技术和传统意义的开发方案进行有机结合,压裂设计目标不能仅局限于单井产量的增加,更要着眼于全气藏采气速度和采收率的提高,以满足低渗气藏开发早期最大限度地提高经济效益。

整体开发的实施程序可见图 3 的技术流程,技

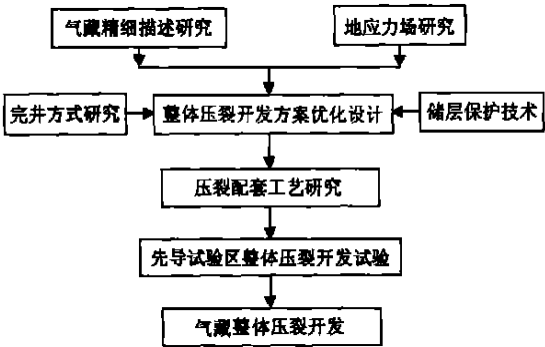


图 3 气藏整体压裂开发程序

术系统主要包括如下子系统: ①压前地层评估研究; ②压裂材料的选择与评估; ③地应力场研究; ④整体压裂优化设计; ⑤压裂开发; ⑥压裂配套工艺; ⑦压后评估。

5. 压裂工艺技术

针对川西侏罗系气藏特征,主要进行的是小规模常规水力压裂。压裂液配方的选择一般基于室内实验评价和工艺要求,支撑剂类型、粒径和用量及压裂液的用量则基于优化设计计算。针对气藏多砂体、多层系,部分井为衬管及裸眼完井等特征,还开展了分层及选层压裂、裸眼井压裂等特殊工艺技术的应用研究。

通过项目攻关,在川西主要气藏研究形成了五类有针对性的压裂工艺技术。

6. 压后评估

压后评估的目的一方面是检验水力压裂是否达到或满足了设计要求,另一方面则是评估水力压裂自身对储层的改造效果及经济效益。前者主要是检验压后支撑裂缝、导流能力及产量等是否达到优化设计的预期结果,这可以通过压后不稳定试井分析与油藏拟生产历史拟合等方法,并结合压后压降分析及水力裂缝诊断等进行综合评估;后者主要是通过经济评价手段分析单井和气藏的整体压裂效果。

推广应用成果及效益

在单井水力压裂技术突破的基础上,以新场气田为载体,系统地开展了气藏开采历程的剖析、室内机理研究、国内外气藏研究方法的整理和筛选,在建立三维定量地质模型的基础上,运用数值模拟技术等手段进行了上百种开发方案的设计、论证和优选,提出了“立体开发、总体设计、分层压裂、协同开采”的多层系气藏立体压裂开发模式,有效促进了新场气田蓬莱镇组低渗气藏的规模化开发,实现了沙溪庙组气藏压裂开发的历史性突破和数百亿储量的全面动用。

在气藏精细描述、地应力测量与天然裂缝预测、压裂完井设计、储层保护技术研究等基础上,在新场沙溪庙组气藏设立了先导性试验区,首次在国内实现了低渗透致密碎屑岩气藏的整体压裂改造开发,并研究提出了以“优化井网、整体改造、储层保护、合理开采”为核心的整体压裂开发模式。由于整体压裂技术的成功实施,与 1997 年相比,新增探明储量 $188.54 \times 10^8 \text{ m}^3$, 新增控制储量 $292.63 \times 10^8 \text{ m}^3$, 且探明储量的动用程度提高到了 80% 左右。同时,整体

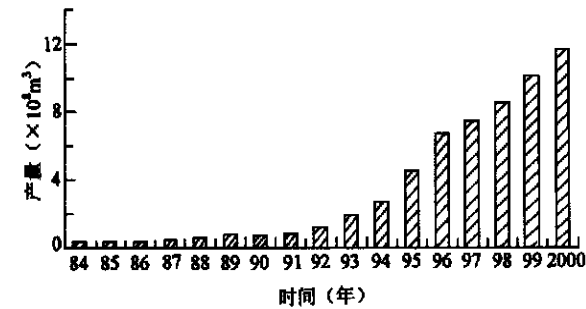
改造开发技术为气藏最终采收率的提高创造了条件,数值模拟表明其 30 年未的采出程度可达 53%,较之 1997 年 unico 公司的评估结果气藏采收率提高了 4 倍以上。

截止 2000 年 12 月,已在川西侏罗系气藏的勘探开发中进行了 454 井次的压裂,施工成功率 96%,绝对无阻流量由压前的 $103.3 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 增加到

$492.6 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,平均单井增加绝对无阻流量 $0.85 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,平均增产 10 倍以上。“九五”期间,由于卓有成效的水力压裂技术攻关,新增天然气探明加控制储量 $949.11 \times 10^8 \text{ m}^3$,新增商品天然气产量 $48.72 \times 10^8 \text{ m}^3$,新增产值 24.3 亿元,取得了良好的技术经济效益和社会效益(表 1,图 4)。

表 1 川西主要气田压裂效果统计表

气田		新场		洛带		孝泉		马井	东泰	新都	合兴场
气藏(层)		Jp	Js	Jp	Js	Jp	Js	Jp	Jp	Jp	Jp
统计井次()		267	49	71	7	3	4	23	12	10	8
工业气井 成井率 (%)	压前	17.2	20.4	7	—	33.3	0	8.7	16.7	0	0
	压后	79.4	87.7	60.5	—	66.7	75	39.1	41.7	30	12.5
	增加	62.2	67.3	53.5	—	33	75	30.4	27	30	12.5
平均单井绝对 无阻流量 ($10^4 \text{ m}^3/\text{d}$)	压前	0.49	0.84	0.19	0.11	1.99	0.19	0.29	0.31	0.14	0.12
	压后	4.57	8.91	2.90	0.38	6.83	2.16	1.14	1.65	1.24	2.73
	增加	4.08	8.07	2.71	0.26	4.83	1.97	0.49	1.34	1.10	2.30
平均增产倍比		9.32	10.56	15.56	3.36	3.43	11.37	3.88	5.26	8.87	21.90



参 考 文 献

- 1 范学平. 神经网络专家系统及其在压裂酸化决策中的应用研究. 石油勘探与开发, 1998; 25(1)
- 2 蒋阡等.“整体压裂”技术及其在低渗油藏开发中的应用. SPE50910. 第六次国际石油工程会议论文集, 1998

(收稿日期 2001- 01- 11 编辑 黄君权)

图 4 西南石油局年产天然气产量增长图

湖北化研所气净中心又成功出口二种精脱硫剂到美国和英国

湖北省化学研究所气体净化中心经过十多年的努力,开发出具有独立自主产权的十多种无机硫和有机硫的常温精脱硫剂及五个精脱硫新工艺,已占国内约 70% 的市场份额。先后两次参加 1999、2001 年国际氮肥会议并宣读论文,代表我国政府于 1999、2000 年举办两次国际培训班,与一些国外公司、化肥厂等进行技术交流,建立合作关系。继 2000 年出口二批 EAC—6 型硫醇硫醚精脱硫剂到美国和英国、2001 年出口 EH—2 中温耐硫水解催化剂到东南亚后,2002 年 1 月又成功出口了 66 m^3 T703 型特种氧化铁精脱硫剂和 10 m^3 EZ—2 型宽温氧化锌精脱硫剂,在新产品的出口上取得重要进展。

该中心近年来开发的 T703 型精脱硫剂具有硫容高(比同类产品高 3~ 5 倍)、强度好、水煮不粉化的突出优点,已在国内合成氨、甲醇、天然气化工、精细化工和食品 CO_2 等领域广泛应用。经国外公司测定,其硫容高出该公司 2 个对比产品 90% ~ 100%。EZ—2 型宽温氧化锌精脱硫剂的使用温度宽、硫容大、强度好。国家化工催化剂检测中心的测定表明,其硫容高于化工行业标准 20% ~ 30%。国外公司测定其硫容达到该公司氧化锌的指标,认为 EZ—2 在宽的温度范围内(200~ 370℃)是一种好的脱硫剂。

上述产品的出口标志着我国在这一领域的研究开发已达国际先进水平,为进一步进入国际市场打下了良好的基础。

(孔渝华 叶敬东 供稿)

and gas geology and exploration at the former Chengdu College of Technology and received his Doctor's degree in 1998. Now he is working at the postdoctoral mobile station in the Southwest Petroleum Institute. Add: Nanchong, Sichuan (637001), China

.....

PROGRESS IN HYDRAULIC FRACTURING TECHNIQUES USED FOR THE CLASTIC ROCK GAS RESERVOIRS IN WEST SICHUAN

Qing Yonggu (Southwest Petroleum Bureau, Sinopec). *NATURAL GAS IND.* v. 22, no. 3. pp. 21~24, 5/25/2002. (ISSN1000-0976; In Chinese)

ABSTRACT: As regards the low-permeability compact gas reservoirs, the hydraulic fracturing technique is not only the means of increasing reserves and output but also an exploration evaluation and putting into production measure and it plays an important role in gas field development. In light of the geological characteristics, as low permeability, compactness and strong water sensitivity, existing in the Jurassic gas reservoirs in West Sichuan commonly and on the basis of a great number of indoor experiments and large-scale field tests, two sets of development patterns, i.e. cubical fracturing and integral fracturing and five sets of exceptional hydraulic fracturing techniques used for clastic rock gas reservoirs were established through research and enormous economic returns and social effects have been achieved in popularization and application.

SUBJECT HEADINGS: Sichuan Basin, West, Compactness, Clastic rock, Gas reservoir, Hydraulic fracturing, Development

Qing Yonggu (*senior engineer*), born in 1944, graduated in geophysical prospecting at the former Chengdu College of Geology in 1969. Now he is the leader of the Southwest Petroleum Bureau of Star Petroleum Corporation, Sinopec and is engaged in the development and management of oil and gas geophysical prospecting at present. Add: No. 116, North Fourth Section, Yihuan Road, Chengdu, Sichuan (610081), China Tel: (028) 83332305

.....

RESEARCH ON LOW-DAMAGE WORKOVER FLUID FOR LOW-PRESSURE GAS WELL

Zhang Shaobin and Ren Shan (Oil and Gas Testing Centre of Southwest Petroleum Bureau, Sinopec). *NATURAL GAS IND.* v. 22, no. 3. pp. 25~28, 5/25/2002. (ISSN1000-0976; In Chinese)

ABSTRACT: Well workover is a work of rescinding faults and improving borehole conditions so as to restore the normal

production of oil and gas wells and reservoir damage occurs because of the mismatch of workover fluids with the fluids and minerals in reservoir and of the oversize filtration of the workover fluids. By taking the well Wei-126 as an example, the optimization of low-damage workover fluids for low-pressure gas wells was studied in detail. In light of the reservoir characteristics, as high temperature, high permeability, strong water sensitivity and strong salt sensitivity, etc., to raise the salinity of workover fluid to 12.5%, a workover fluid formulation TC2-5 with good performance was developed through the filtration screening experiment of organic heat-resisting and salt-resisting filtrate reducer, the experiment of core damage and the evaluation experiment of the surface tension of filtrate of the workover fluid, and it was successfully applied to the workover operation in the well Wei-126 and a good application effect was obtained, i.e. carrying out a balanced pressure workover with low damage.

SUBJECT HEADINGS: Gas well, Completion fluid, Reservoir, Protection, Research

Zhang Shaobin (*Master, engineer*), born in 1973, received his Master's degree in oil & gas field development engineering from the Southwest Petroleum Institute in 1999. Now he is engaged in the research on oil/gas reservoir protection and reservoir stimulation. Add: No. 11, Huaihe Street, Deyang, Sichuan (618000), China Tel: (0838) 2409706

.....

A NOVEL PRODUCTION DECLINE MODEL OF THE FRACTURED WELL

Liu Lin, Xu Xiaoqiang and Wang Baotang (Oil and Gas Testing Centre of Southwest Petroleum Bureau, Sinopec). *NATURAL GAS IND.* v. 22, no. 3. pp. 28~30, 5/25/2002. (ISSN1000-0976; In Chinese)

ABSTRACT: A novel production decline model—corrected Weng cycle model of fractured well is set up in the paper. This model is of the comprehensive characteristics of the Main model, Weng cycle model and Arps model, by which the early and late production decline analysis and prediction of fractured well may be carried out. Through practical application in Xinjiang gas field, it is shown that the model is a satisfactory model of analyzing and predicting the production decline in fractured well.

SUBJECT HEADINGS: Fractured well, Production decline, Corrected Weng cycle model

Liu Lin (*engineer*), born in 1972, received his Master's degree from the Department of Petroleum, the Chengdu University of Technology, in 1999. Now he is engaged in oil and gas field development. Add: No. 11, Huaihe Street, Deyang, Sichuan (618000), China Tel: (0838) 2409132