

# 四川盆地龙王庙组气藏最大化降低表皮系数的储层改造技术

郭建春<sup>1</sup> 卢聪<sup>1</sup> 肖勇<sup>1</sup> 任冀川<sup>1</sup> 余朝毅<sup>2</sup> 桑宇<sup>2</sup>

1.“油气藏地质及开发工程”国家重点实验室·西南石油大学 2.中国石油西南油气田公司采气工程研究院

郭建春等.四川盆地龙王庙组气藏最大化降低表皮系数的储层改造技术.天然气工业,2014,34(3):97-102.

**摘要** 四川盆地乐山—龙女寺古隆起下寒武统龙王庙组非均质碳酸盐岩储层缝洞较为发育且高含硫,钻井液的侵入伤害和完井的不完善导致了不同程度的储层伤害,最大化降低表皮系数是该区进一步获得油气增产的关键。为此,从龙王庙组储层地质特征出发,基于二项式产能公式论证了通过最大化降低表皮系数进一步扩大产能的科学性,并结合目前酸化改造现状分析了钻井液污染、钻完井方式不完善等主要矛盾带来的储层伤害表皮系数。进而论证了表皮系数具有进一步降低的空间;通过储层伤害因素分析,确定了龙王庙组储层总表皮系数主要由钻井表皮和完井方式不完善表皮组成。在优化降低钻、完井表皮系数的同时,针对龙王庙组碳酸盐岩储层的缝洞型特征,提出了有效利用天然裂缝以达到“非径向、网络状”解堵的网络裂缝酸化工艺。

**关键词** 四川盆地 早寒武世 龙王庙组 碳酸盐岩 储集层 缝洞型 表皮系数 网络裂缝酸化

DOI:10.3787/j.issn.1000-0976.2014.01.016

## Reservoir stimulation techniques of minimizing the skin factor of the Longwangmiao Fm gas reservoirs in the Sichuan Basin

Guo Jianchun<sup>1</sup>, Lu Cong<sup>1</sup>, Xiao Yong<sup>1</sup>, Ren Jichuan<sup>1</sup>, She Chaoyi<sup>2</sup>, Sang Yu<sup>2</sup>

(1.State Key Laboratory of Oil & Gas Reservoir Geology and Exploitation // Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China; 2.Gas Production Engineering Research Institute of Southwest Oil & Gasfield Company, PetroChina, Guanghan, Sichuan 618300, China)

NATUR. GAS IND. VOLUME 34, ISSUE 3, pp.97-102, 3/25/2014. (ISSN 1000-0976; In Chinese)

**Abstract:** The Lower Cambrian Longwangmiao Fm carbonate gas reservoirs in the Leshan-Longnusi Paleouplift in the Sichuan Basin are featured by great heterogeneity, well-developed fractures and caverns, and a high content of H<sub>2</sub>S. That is why the reservoir damage will be caused to different degrees by the invasion of drilling fluids or the incompleteness of well completion, so to minimize the reservoir skin factor is the key to achieve a high yield of hydrocarbon resources in this study area. Therefore, based on the geological characteristics of the Longwangmiao reservoirs, the binominal productivity equation was applied to demonstrate the possibility and scientificity of further reducing the skin factor to the largest extent. In view of the current status of reservoir stimulation, we analyzed the overall skin factors of reservoir damage contributed by drilling fluid invasion, the drilling and completion incompleteness, and so on. On this basis, we optimized the drilling and completion skin factors and proposed a fracture-network acidizing technology to achieve the "non-radial & network like" plug-removal by making good use of natural fractures.

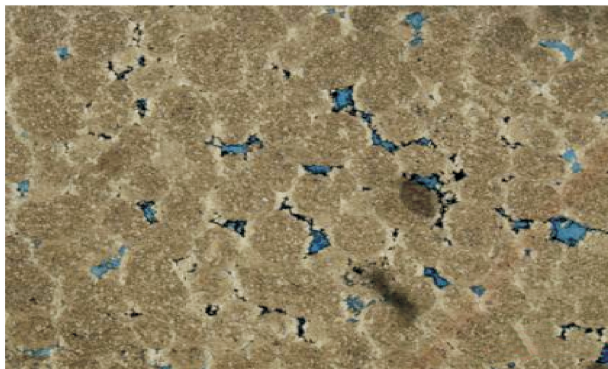
**Keywords:** Sichuan Basin, Early Cambrian, Longwangmiao Fm, skin factor, carbonate reservoir, fracture-network acidizing

**基金项目:**国家科技重大专项“复杂碳酸盐岩气藏开发技术研究”(编号:2011ZX05015-003-005)。

**作者简介:**郭建春,1970年生,教授,博士生导师,博士;主要从事油气藏开采和增产技术方面的研究工作,现任西南石油大学石油与天然气工程学院院长。地址:(610500)四川省成都市新都区新都大道8号。电话:(028)83032442。E-mail:guojianchun@vip.163.com

四川盆地磨溪区块下寒武统龙王庙组气藏位于川中古隆起平缓构造区,是2012年来取得油气重大发现的区域。研究发现储层污染是限制增产的主要矛盾,因此在储层改造方面主要采用酸化解堵方案,其目的是降低储层伤害带来的表皮系数,进一步获得较高的气井产能。

笔者从龙王庙组储层地质特征出发,基于二项式产能公式论证了通过最大化降低表皮系数进一步扩大产能的科学性,并结合目前酸化改造现状分析了钻井液污染、钻完井方式不完善等主要矛盾带来的储层伤害表皮系数。最终针对如何最大化降低表皮系数提出了两个思路:①优化钻完井技术,降低从源头上带来的伤害;②在解堵酸化基础上开展深部酸化研究,利用裂缝网络沟通储层,增大渗透能力。



a. 砂屑白云岩, 粒间溶孔发育



b. 细-粉晶残余砂屑白云岩, 网状缝发育

图1 龙王庙组主要储集岩石缝、洞发育特征图

## 2 增产潜力分析

### 2.1 酸化潜力论证

众所周知,碳酸盐岩储层酸化目的就是解除近井地带污染,降低总表皮系数并增强近井地带渗透能力,达到增产的目的。关于总表皮系数的二项式产能方程为<sup>[1-2]</sup>:

$$p_e^2 - p_{wf}^2 = A Q_g + B Q_g^2 \quad (1)$$

$$\text{其中 } A = \frac{8.48 \times 10^4 \mu_g Z T p_{sc}}{K h T_{sc}} \left( \lg \frac{r_i}{r_w} + 0.434 S \right)$$

$$B = \frac{1.966 \times 10^{-8} \beta \gamma_g Z T p_{sc}^2}{h^2 T_{sc} R} \left( \frac{1}{r_w} - \frac{1}{r_i} \right)$$

$$\beta = 1.873 \times 10^8 \frac{h r_w \mu_g T_{sc} R}{\gamma_g p_{sc} K D}$$

根据龙王庙组的物性特征以及试采分析资料,可以得出当总表皮系数为0时的二项式方程为:

$$p_e^2 - p_{wf}^2 = 3.59 Q_g + 0.004 5 Q_g^2 \quad (2)$$

## 1 储层概况

龙王庙组气藏储层为碳酸盐岩台地沉积环境,受乐山—龙女寺古隆起控制;储集岩主要为砂屑白云岩、残余砂屑白云岩和细一中晶白云岩;岩性物性分析结果表明储层段孔隙度分布在2.0%~8.0%,渗透率分布在0.01~100 mD,储层厚度介于80~110 m,总体表现出低孔、中低渗特征;试井解释储层表现中—高渗透特征;气藏平均压力梯度1.63,温度平均为142℃。储集空间主要为粒间溶孔、晶间溶孔、溶洞,裂缝和喉道为主要渗流通道(图1)。2012年9月, MX8井龙王庙组4 697.5~4 713 m井段射孔酸化后获得 $107.18 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的高产工业气流,同时探明地质储量为 $4 400 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,为我国迄今发现的最大的海相整装气藏。

由产能二项式方程可知,当表皮系数为0时无阻流量达到 $800 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,说明储层具有较大的生产潜力,同时随着表皮系数每降低5数值,无阻流量的增加值在20%以上,这说明通过酸化改造技术进一步降低表皮系数,以达到增产的目的在理论上是可行的(图2)。

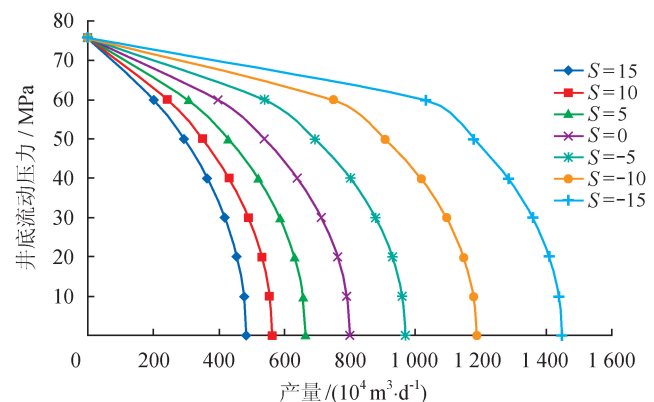


图2 龙王庙组储层在不同表皮系数下的气井产能图

### 2.2 改造现状

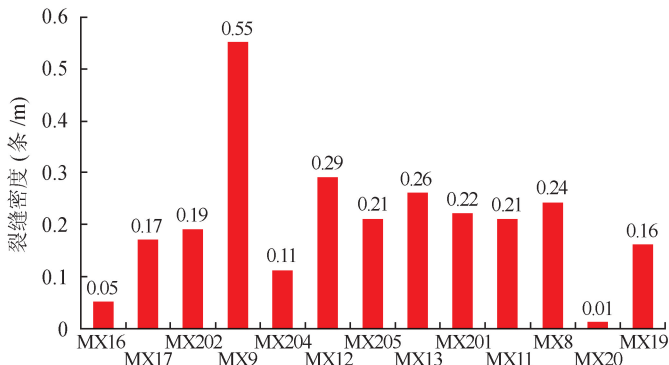
目前该区块主要采用了以转向酸和胶凝酸加投球暂堵为主的酸化工艺,注酸排量在 2~6 m<sup>3</sup>/min,主要集中在 4 m<sup>3</sup>/min,平均用酸强度 10 m<sup>3</sup>/m。部分井酸化增产效果不明显,根据龙王庙酸化后的压力恢复试井可知,酸化后表皮系数在均在 -5 范围内,绝大多数井在 0 左右(表 1)。因此,通过进一步的储层伤害研究以及采用针对性的酸化工艺,使得表皮系数仍然具有很大的降低空间。

表 1 龙王庙组部分单井酸化后表皮系数表

井 号	酸化后表皮系数	截至试井日期产量/ (10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> · d <sup>-1</sup> )
MX8 井(下部)	6.55	28
MX8 井(上部)	-4.70	
MX9 井	-1.91	30
MX10 井	-3.68	
MX11 井(下部)	0.80	61
MX11 井(上部)	-1.10	
MX16 井	0.00	14



a. MX13 井, 4 621.93~4 622.10 m, 溶洞发育



b. 成像测井解释高角度裂缝密度

图 3 龙王庙组储层缝洞发育特征图

的正压差环境,加剧了钻井液深部侵入的可能。

### 3.2 完井方式的不完善

完井方式的不完善包括储层部分打开以及射孔产生的拟表皮系数。其中,储层部分打开拟表皮系数受到打开厚度的控制。同时在射孔过程中,聚能射孔弹受高温、高压冲击形成高速的金属射流,从而穿透套管、水泥环进入地层,套管、水泥环、岩石在射流作用下变形、破碎和压实,在射孔孔道的周围就会形成一个压实损害带<sup>[3,10]</sup>(图 4)。其公式为:

$$S_{PT} = \left( \frac{h}{h_p^{-1}} \right) \left[ \ln \left( \frac{h}{r_w} \right) \left( \frac{K}{K_w} \right)^{1/2} - 2 \right] \quad (5)$$

## 3 储层伤害因素分析

储层伤害通过不稳定试井的总表皮系数求得<sup>[3-6]</sup>:

$$S_t = S_d + S_{PT} + S_{PF} + S_\theta + S_b + S_{tu} + S_A \quad (3)$$

其中由钻完井造成的储层伤害( $S_d$ )、储层部分打开拟表皮系数( $S_{PT}$ )、射孔拟表皮系数( $S_{PF}$ )是主要影响因素。

### 3.1 钻井液污染

钻井液侵入油气储层是一个复杂的过程,其侵入程度取决于以下因素<sup>[7-9]</sup>:钻井液柱压力与原始地层压力之间的正压差( $\Delta p$ ),钻井液特性,储层特性、钻井条件和浸泡时间。其中最重要的是储层特征和  $\Delta p$ 。

$$S_d = \left( \frac{K_0}{K} - 1 \right) (\ln L_d - \ln r_w) \quad (4)$$

首先,龙王庙组储层缝、洞发育程度较高(图 3),这为钻井液的侵入提供了良好的渗透条件,使得钻井液中的固相颗粒首先进入高深地带封堵系统的连通通道,同时伴随着泥饼的形成,钻井滤液不断侵入地层,形成钻井液污染带。其次,龙王庙组为高含硫储层,钻井液密度 2.2~2.4 g/cm<sup>3</sup>,为钻井液侵入提供了优良

研究表明,在未穿透污染带的情况下影响射孔拟表皮系数的各射孔参数影响程度排序为:孔深、孔密、

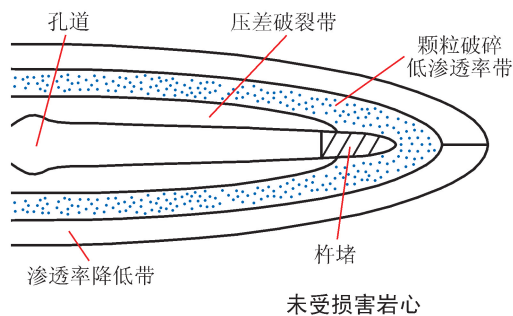


图 4 射孔损害带示意图

相位角、孔径。龙王庙组套管完井采用16孔/m模式进行射孔,未针对单井储层特征以及具体的钻井液侵入程度进行射孔优化,存在加剧储层伤害的可能性。

### 3.3 其他形式的表皮系数

其他形式的表皮系数包括<sup>[5]</sup>:井斜拟表皮系数( $S_0$ )、流度变化拟表皮系数( $S_b$ )、高速非达西拟表皮系数( $S_w$ )和泄流形状拟表皮系数( $S_A$ )。由于这些表皮系数并不是龙王庙组开发的主要矛盾,从酸化策略上也难以实现,故不作为分析的主要因素。

## 4 钻、完井技术优化

适用于龙王庙组储层最大化降低表皮系数的策略有:①从储层污染源头,优化钻完井方式,使酸化前产生的表皮系数更低;②针对单井具体的储层缝、洞发育特征和储层伤害状态,开展“一井一策”的酸化方案优化。

### 4.1 优化钻井技术

1)采用大斜度井和水平井增大单井有效控制面积,降低控制面积形状拟表皮系数。国内外多年来研究表明,水平井和大斜度井是能够有效提高气井单井产量和气藏采收率的,同时龙王庙储层厚度在80~110 m之间,为大斜度井和水平井钻井提供了良好的储层基础。

2)优选低伤害钻井液体系,优化钻井液密度,降低固相颗粒对孔喉通道的堵塞,减少钻井滤液对储层的侵入深度,进一步降低储层渗透率的伤害比。

图5通过龙王庙组储层物性特征计算发现,钻井污染引起的渗透率伤害比与表皮系数呈正指数倍变化,渗透率伤害比从20%增加到80%之间无阻流量降低了60%以上。因此,优化钻井技术是最大化降低表皮系数的最有效手段之一。

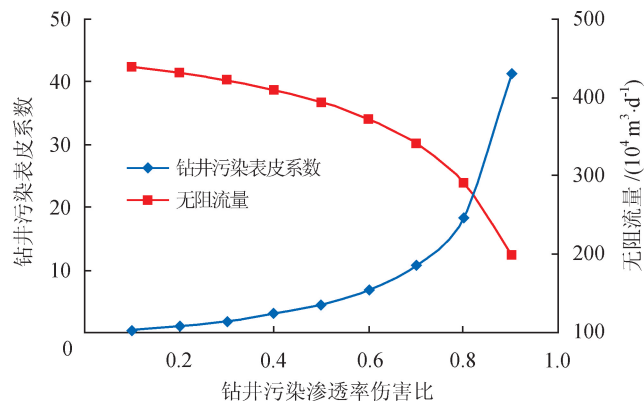


图5 渗透率伤害比与表皮系数和无阻流量的关系图

## 4.2 优化完井方案

1)开展井壁稳定性研究,考虑裸眼完井降低表皮系数:通过地应力室内声发射凯塞尔效应测定试验和井壁稳定椭圆统计回归分析,研究最大主应力方位(井眼趋于最不稳定方向),并结合测井资料进行孔隙压力、坍塌压力、破裂压力分析,论证裸眼完井的可行性。

2)针对单井钻井伤害程度以及储层缝、洞特征,合理优化射孔参数。包括优化射孔厚度<sup>[11]</sup>,降低因打开程度不完善造成的拟表皮系数,也为均匀酸化提供有利条件;根据钻井液侵入深度不同优化射孔深度、孔密等关键参数。

图6根据在不同射孔状态下的储层打开程度研究表明,储层打开程度每增加10%,相应的打开程度拟表皮降低35%,同时无阻流量不断增大,增大的幅度不断降低。因此,优化射孔参数也是最大化降低表皮系数的有效途径之一。

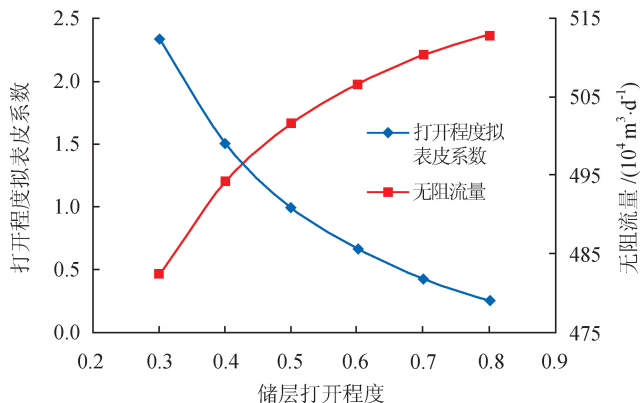


图6 不同打开程度下的拟表皮系数和无阻流量图

## 5 网络裂缝酸化工艺研究

由研究结果可知,基质酸化工艺结合钻完井优化设计能够有效地解除储层近井地带的污染,消除综合表皮系数。而针对于此类缝洞型碳酸盐岩储层,为了完全解放缝洞系统的产能,依旧存在以下两点问题:①天然裂缝发育,钻井漏失量大,普通酸化无法解除地层深部污染;②储层基质致密,地层流动压力梯度较高,非连通缝洞系统难以得到有效的动用。因此,针对此类问题,多采用大型酸压工艺造高导流能力长缝,以沟通低渗碳酸盐岩储层远井储集体。而针对龙王庙组储层,其天然裂缝发育,储层深度较深,施工过程中表现出泵压高、储层吸液能力较强等特性,在 $4 \text{ m}^3/\text{min}$ 的排量下井口压力即超过100 MPa,且没有明显的破裂显示,大型酸压施工难度极大。

在此基础上,经过长期的理论研究及现场实践<sup>[11-13]</sup>,在基质酸化的基础上借鉴体积压裂的原理,提出了将酸压过程中由天然裂缝引起的滤失现象转害为利的“网络裂缝酸化”工艺。该工艺以解除“非径向、网络状”污染带为目标,以降阻酸为主体酸,高排量降低摩阻的前提下,加大酸化过程中天然裂缝内的静压力,撑开天然裂缝,使酸液沿裂缝滤失深入储层,依靠其高反应活性溶蚀裂缝中的外来污染物和原生、次生充填矿物,在地层中建立起若干条具有相当导流能力的网状流动通道。其技术特点主要有:①酸液规模大,为了保证酸液有效作用距离足够长,就要大大提高用酸量,使其能到达天然裂缝远端;②裂缝网络酸化工艺推荐采用变排量施工,前置酸采用较低排量,使之尽量充分

与污染带发生反应;主体酸采用较大排量,可增加酸作用距离,确保非径向注酸。

图 7 展现的 3 种酸化改造工艺对改造后储层控制程度可以看出:基质酸化仅仅解除了近井的污染带,沟通了存在于近井地带的缝洞系统;大型酸压工艺则是利用高导流能力长缝对近裂缝带内的缝洞系统达到了有效的控制,但不一定能有效利用被天然裂缝沟通的储集体;而网络裂缝酸化工艺通过大量解放并扩展天然裂缝,达到了充分利用由天然裂缝网络系统连接的缝洞储集体,增加了单井高效沟通面积。单井高效沟通面积大小相对关系为:大型酸压 ≥ 网络裂缝酸化 > 基质酸化。

利用气井多裂缝产能模型<sup>[14-16]</sup>,通过将天然裂缝

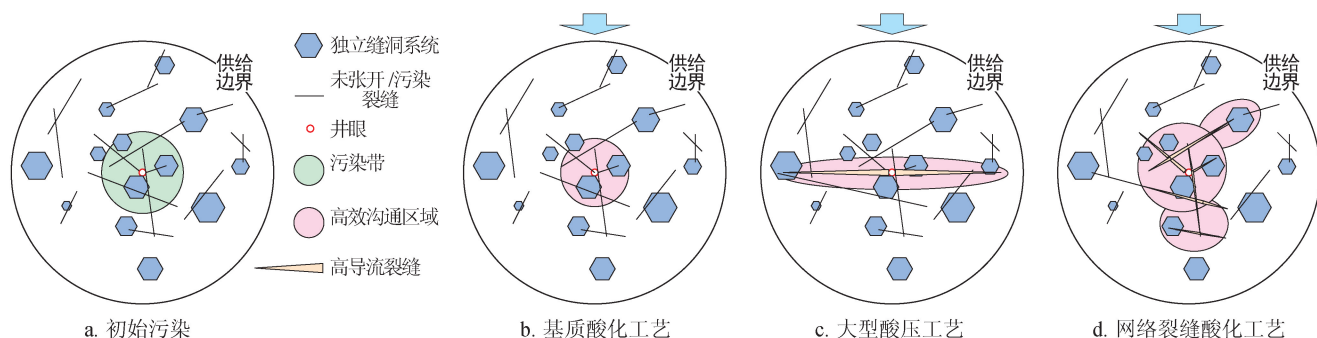


图 7 不同酸化工艺的储层改造效果对比图

网络等效为多条较短的酸压裂缝,计算了不同工艺情况下单井的产能情况(图 8)。在天然裂缝发育情况较差时,其产能较基质酸化工艺提升不大;随着裂缝发育程度的增加,网络裂缝酸化井产能增加幅度较大;当裂缝条数达到 30 条时,其产能接近于酸压井产能,折合表皮系数达到 -8 左右。

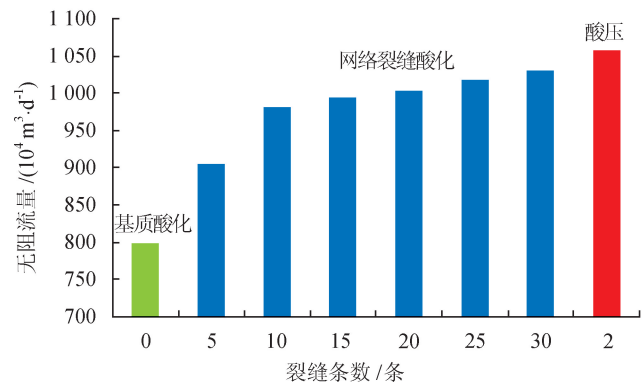


图 8 不同酸化工艺单井产能对比图

因此,针对龙王庙组缝、洞型碳酸盐岩储层,在天然裂缝发育的情况下,推荐采用网络裂缝酸化工艺技

术进行改造。

## 6 结论

1) 龙王庙组碳酸盐岩储层具有较强的增产潜能,其中最大化降低表皮系数是进一步获得油气增产的关键所在。

2) 储层伤害的综合表皮系数主要由钻井液伤害表皮和完井方式不完善表皮构成,通过优化钻、完井技术是最大化降低表皮系数的有效途径之一。

3) 利用天然裂缝以达到“非径向、网络状”解堵的网络裂缝酸化工艺,是龙王庙组缝洞型储层最大化降低表皮系数的关键酸化技术。

### 符 号 说 明

$p_e$ 、 $p_{wf}$ 、 $p_{sc}$  分别为地层压力、井底流压和地面标准压力, MPa;  $r_i$ 、 $r_w$  分别为影响半径和井底半径, m;  $A$ 、 $B$  分别为影响半径下的二项式系数;  $Q_g$  为气井产量,  $10^4$  m<sup>3</sup>/d;  $\mu_g$  为天然气黏度, mPa·s;  $Z$  为天然气偏差系数;  $T$ 、 $T_{sc}$  分别为地层温度和地面标准温度, K;  $K$ 、 $K_c$  分别为地层渗透率、钻井液污染渗透率, mD;  $h$  为储层厚度, m;  $S$  为总表皮系数;  $\gamma_g$  为天然气相对密度;  $\beta$  为在影响半径内的惯性阻力系数;  $L_d$  为侵入深度, m;

$D$  为湍流系数。

### 参 考 文 献

- [1] 何自新,郝玉鸿.渗透率对气井产能方程及无阻流量的影响分析[J].石油勘探与开发,2001,28(5):46-48.  
HE Zixin, HAO Yuhong. Analysis of effects of permeability on gas well productivity equation and open flow capacity[J]. Petroleum Exploration and Development, 2001, 28(5): 46-48.
- [2] 罗天雨,郭建春,赵金洲,等.求取压裂气井无阻流量的新方法[J].新疆石油地质,2005,26(5):96-98.  
LUO Tianyu, GUO Jianchun, ZHAO Jinzhou, et al. New method for absolute open flow of gas wells after fracturing [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2005, 26(5): 96-98.
- [3] 张红霞.表皮系数系统分解研究与应用[D].北京:中国石油大学,2007.  
ZHANG Hongxia. The system decomposition research and application of the skin factor[D]. Beijing: China University of Petroleum, 2007.
- [4] 成绥民,王天顺.表皮系数系统分解方法[J].钻采工艺,1991,14(4):35-40.  
CHENG Suimin, WANG Tianshun. The system decomposition of the skin factor[J]. Oil Drilling & Production Technology, 1991, 14(4): 35-40.
- [5] 陈元千.气井表皮系数分解法[J].新疆石油地质,2004,25(2):160-164.  
CHEN Yuanqian. A decomposition method of skin factor for gas well[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2004, 25(2): 160-164.
- [6] 王新海,张福祥,姜永,等.岩心污染表皮系数的计算[J].天然气工业,2012,32(12):52-54.  
WANG Xinhai, ZHANG Fuxiang, JIANG Yong, et al. Calculation of skin factor of contaminated cores [J]. Natural Gas Industry, 2012, 32(12): 52-54.
- [7] 李建明,吴锡令,赵立新.钻井泥浆对油层污染程度的测井评价方法[J].新疆石油地质,2010,31(3):318-319.  
LI Jianming, WU Xiling, ZHAO Lixin. A well logging method for evaluation effect of drilling mud on formation contamination [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2010, 31(3): 318-319.
- [8] 范翔宇,夏宏泉,陈平,等.钻井泥浆污染储层程度的测井评价方法研究[J].天然气工业,2005,25(10):100-102.  
FAN Xiangyu, XIA Hongquan, CHEN Ping, et al. Logging evaluation mechanism of reservoir pollution level by drilling fluid [J]. Natural Gas Industry, 2005, 25(10): 100-102.
- [9] 范翔宇,王俊瑞,夏宏泉,等.基于灰色系统理论的钻井液污染储层深度预测[J].西南石油大学学报:自然科学版,2013,35(3):98-104.  
FAN Xiangyu, WANG Junrui, XIA Hongquan, et al. Drilling fluid's damage depth prediction method based on the grey system theory [J]. Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition, 2013, 35(3): 98-104.
- [10] 任勇,郭建春,陆灯云,等.射孔参数对射孔一砾石充填井表皮系数的影响分析[J].天然气工业,2006,26(4):65-67.  
REN Yong, GUO Jianchun, LU Dengyun, et al. Influence of perforation parameters on skin factor of perforation gravel pack technology [J]. Natural Gas Industry, 2006, 26(4): 65-67.
- [11] 姚约东,刘艳华.打开不完善井的合理产能评价[J].石油钻探技术,2010,38(2):14-18.  
YAO Yuedong, LIU Yanhua. Productivity evaluations of partial penetrating wells [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2010, 38(2): 14-18.
- [12] 沈建新,周福建,张福祥,等.一种新型高温就地自转向酸在塔里木盆地碳酸盐岩油气藏酸化酸压中的应用[J].天然气工业,2012,32(5):28-30.  
SHEN Jianxin, ZHOU Fujian, ZHANG Fuxiang, et al. Application of a new type of in situ diverting acid system in high temperature acidizing and acid fracturing in the carbonate hydrocarbon reservoirs of the Tarim Basin [J]. Natural Gas Industry, 2012, 32(5): 28-30.
- [13] 李克智,徐兵威,秦玉英,等.致密碳酸盐岩气藏转向酸压技术研究[J].西南石油大学学报:自然科学版,2013,35(2):97-101.  
LI Kezhi, XU Bingwei, QIN Yuying, et al. Study on diversion acid technology in tight carbonatite gas reservoir [J]. Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition, 2013, 35(2): 97-101.
- [14] 曹宝军,李相方.压裂火山岩气井多裂缝产能模型[J].天然气工业,2008,28(8):86-88.  
CAO Baojun, LI Xiangfang. The multiple fractures productivity model for fracturing volcanic rocks gas wells [J]. Natural Gas Industry, 2008, 28(8): 86-88.
- [15] 曲占庆,曲冠政,何利敏,等.压裂水平井裂缝分布对产能影响的电模拟实验[J].天然气工业,2013,33(10):52-58.  
QU Zhanqing, QU Guanzheng, HE Limin, et al. The impact of fracture distribution on the productivity of a fractured horizontal well: A study based on electrolytic analogy experiments [J]. Natural Gas Industry, 2013, 33(10): 52-58.
- [16] 任俊杰,郭平,王绍平,等.考虑变渗透率模量的异常高压气藏产能计算新方法[J].天然气工业,2013,33(7):52-56.  
REN Junjie, GUO Ping, WANG Shaoping, et al. A new method for calculating the productivity of abnormally high-pressure gas reservoirs considering variable permeability modulus [J]. Natural Gas Industry, 2013, 33(7): 52-56.