

裂缝对气藏储层渗透率及气井产能的贡献

梅丹¹, 胡勇^{2,3}, 王倩¹

(1. 自然资源部油气资源战略研究中心, 北京 100034; 2. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083;
3. 中国石油天然气集团公司天然气成藏与开发重点实验室, 河北廊坊 065007)

摘要: 裂缝是气藏储层渗流的重要通道, 对储层渗透率的贡献十分明显, 但目前难以量化评价。针对这一难题, 综合考虑裂缝尺度(缝高、缝宽和裂缝贯通程度), 通过对岩心进行人工定量造缝后开展气测渗透率实验测试, 分别研究了贯通和非贯通(贯通程度分别为20%, 40%, 60%, 80%) 2种情景下裂缝对岩石渗透率的贡献。结果表明, 贯通和非贯通裂缝对地层岩石渗透率均有贡献。贯通裂缝对岩石渗透率贡献十分明显, 可提高岩石渗透率80%以上, 其作用大小与裂缝开度(缝高×缝宽)密切相关; 非贯通裂缝对岩石渗透率也存在一定的贡献, 对基质起到沟通作用, 改善储层整体的渗流能力, 其作用大小与裂缝贯通程度关系密切。在实验测试的基础上, 以单井为研究对象, 综合考虑裂缝导流能力、裂缝沟通能力和基质供气能力三方面因素, 建立了裂缝对气井产能贡献数学模型, 结合气田实际气井的基础参数评价了裂缝对气井产能的贡献。

关键词: 气藏储层; 裂缝; 渗透率; 气井产能

中图分类号: TE135

文献标识码: A

Experimental study on fracture contribution to gas reservoir permeability and well capacity

MEI Dan¹, HU Yong^{2,3}, WANG Qian¹

(1. Strategic Research Center of Oil and Gas Resources, MNR, Beijing 100034, China;

2. PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Beijing 100083, China;

3. Key Laboratory of Gas Reservoir Formation and Development, PetroChina, Langfang, Hebei 065007, China)

Abstract: Fractures are an important channel for the seepage of reservoir gas. It has an evident contribution to reservoir permeability. However, it is currently difficult to quantitatively evaluate. To solve this problem, an experimental test of gas permeability was carried out after the artificial quantitative fracturing of core. Three factors such as fracture penetration degree, fracture length and width were considered. The contribution of fractures to rock permeability was investigated under two conditions, one where fractures completely penetrate through the rock matrix, and the other in which fractures incompletely penetrate through the rock matrix with penetration degrees of 20%, 40%, 60% and 80%. Both types of fractures contribute to rock permeability. The penetrating fractures increase rock permeability by more than 80%, which is closely related to fracture opening degree (length×width). The nonpenetrating fractures also contribute to rock permeability, by communicating with the matrix and improving reservoir flow. Based on experimental tests, a mathematical model of fracture contribution to single gas well production capacity was established combining three factors: fracture conductivity, fracture communication and matrix gas supply capacity. The fracture contribution to gas well production capacity was estimated using this model together with the basic parameters of actual gas wells.

Key words: gas reservoir; fracture; permeability; gas well production capacity

国内外大量的研究成果表明^[1-12], 裂缝是天然气藏的有效储集空间和重要渗流通道, 对天然气的运移、储集、产出发挥着举足轻重的作用。我国气藏开发实践表明, 多数气藏储层均发育裂缝,

如我国库车深层碎屑岩、四川石炭系碳酸盐岩以及威远震旦系等气藏储层裂缝均十分发育。裂缝系统的存在对于增加地层岩石渗透率十分重要, 对气藏高产的贡献十分明显, 因此, 裂缝研究是气藏高

收稿日期: 2019-01-11; 修订日期: 2019-08-08。

作者简介: 梅丹(1984—), 女, 本科, 工程师, 从事油气资源战略、规划、开发政策等研究。E-mail: 44122023@qq.com。

通信作者: 胡勇(1978—), 男, 高级工程师, 从事油气开发研究。E-mail: 657440874@qq.com。

基金项目: 国家科技重大专项“致密砂岩气有效开发评价技术”(2011ZX05013-002)资助。

效开发不可缺少的重要工作之一。

目前,关于储层裂缝评价以及对气井产能影响等方面的研究已有大量的报道^[13-17],主要通过气藏工程以及试井分析等方法,在裂缝描述、裂缝储层渗透率评价以及裂缝对气藏产能的贡献等方面均取得了较好认识。但是,如何通过室内岩心实验实现对岩心定量造缝并进行渗透率测试,量化分析裂缝对气藏储层渗透率及气井产能贡献仍是科研工作者面临的难题,也是气藏科学开发工作必须解决的关键技术问题。本文尝试性地采用人工岩心定量造缝的方法,综合考虑裂缝尺度(缝高、缝宽、裂缝贯通程度),对造缝后的岩心模型开展气测渗透率实验测试,分别研究了裂缝贯通和非贯通 2 种情景下对储层渗透率的贡献。在实验测试的基础上,综合考虑裂缝导流能力、裂缝沟通能力及基质供气能力三方面因素,建立了裂缝对岩石渗透率贡献的数学评价模型,实现了裂缝对岩石渗透率贡献的量化评价。研究成果对于认识和评价岩石渗透性具有一定的指导作用。

1 岩心实验

1.1 实验方法

实验所用岩心为人造砂岩岩心,在岩心制作过程中实现定量造缝,然后分别测试基质岩心和裂缝岩心的渗透率,评价裂缝对岩心渗透率的贡献。实验用岩心及裂缝形态特征见表 1。




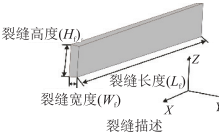

1.2 实验结果与认识

1.2.1 裂缝贯通程度对岩心渗透率的贡献

以渗透率为 $3.76 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的岩心基质为例,实验测试了裂缝贯通程度对岩心渗透率的贡献

表 1 实验用岩心及裂缝形态特征

Table 1 Cores used in experiments and fracture morphological characteristics

岩心描述	岩心直径×长度(cm×cm)	岩心模型
基质岩心	2.5×9.5	
非贯通裂缝岩心	2.5×9.5	
贯通裂缝岩心	2.5×9.5	
裂缝尺度示意		
岩心模型示意		

注:基质岩心渗透率分别为(0.83,3.76,9.44,13.88) $\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;裂缝贯通程度(裂缝长度/岩心长度):20%,40%,60%,100%;裂缝开度=裂缝高度(H) \times 裂缝宽度(W)。

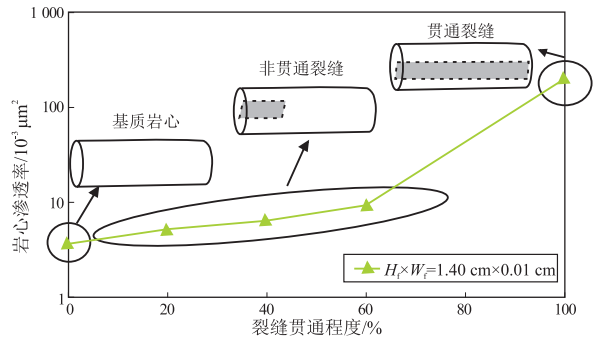


图 1 裂缝贯通程度对岩心渗透率的贡献

Fig.1 Contribution of fracture penetration degree to core permeability

(图 1)。可以看出,相对于岩心基质来讲,非贯通裂缝(贯通程度 20%,40%,60%,80%)对储层渗透率也存在一定的贡献,可以改善储层的整体渗透率,随贯通程度增加对渗透率的贡献也增加,但对储层渗透率的贡献有限,非贯通裂缝岩心渗透率是基质渗透率的 10 倍以内;当岩心存在贯通裂缝(即贯通程度 100%)时,其渗透率是基质岩心的几十上百倍,对储层渗透率贡献一般在 80%以上。

1.2.2 贯通裂缝开度对岩心渗透率的贡献

实验测试了不同贯通裂缝开度对储层渗透率的贡献(图 2)。分析结果可以得出,储层渗透率受贯通裂缝开度的影响较大,随裂缝开度增加而增加,特别是开度大于 0.007 cm^2 的裂缝对储层渗透率贡献可达几十到上百倍,且基质渗透率越低,渗透率增幅越大。

2 储层裂缝对气井产能的贡献

2.1 气井模型

建立气藏储层存在贯通裂缝的直井模型(图 3)。

2.2 储层裂缝对气井产能的贡献

对于裂缝储层直井模型,气井产能(Q)主要由

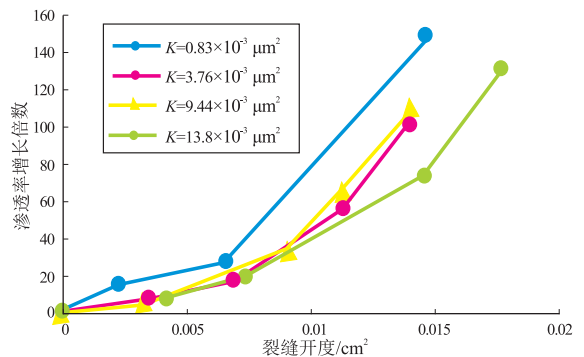


图 2 贯通裂缝开度对岩心渗透率的贡献

Fig.2 Contribution of fracture opening degree to core permeability

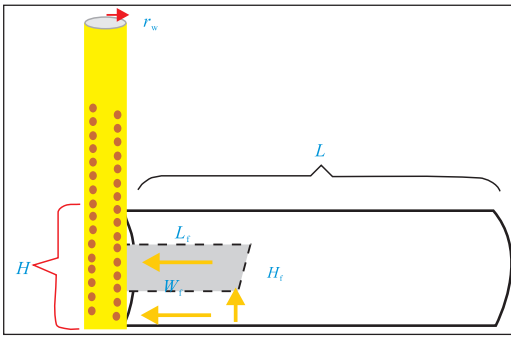


图3 储层有贯通裂缝连通气井的直井模型

r_w 为气井井眼半径,m; L 为井控距离,m; H 为射孔厚度,m;

L_f 为裂缝长度,m; H_f 为裂缝高度,m; W_f 为裂缝宽度,m

Fig.3 Straight well model of gas well with penetrating fractures

基质供气(Q_m)、裂缝供气(Q_f)、基质向裂缝供气(Q_{mf})3个部分组成,即:

$$Q = Q_m + Q_f + Q_{mf} \quad (1)$$

对于单向流直井模型,气井总产能计算方法见公式(2):

$$Q = \frac{T_a}{ZP_a T_f} \cdot \frac{KA(P_e^2 - P_w^2)}{2\mu L} \quad (2)$$

式中: Q 为标准状态下的产气量, m^3/d ; T_a 为标准状态下温度,K; K 为储层综合渗透率, $10^{-3} \mu m^2$; A 为储层向井筒的过气面积, m^2 ; P_e 为边界处的压力,MPa; P_w 为井底流压,MPa。 Z 为气体偏差系数; P_a 为标准状态下压力,MPa; T_f 为气层温度,K; μ 为气体黏度, $mPa \cdot s$; L 为井控距离,m。

其中,基质向井筒供气见公式(3):

$$Q_m = \frac{T_a}{ZP_a T_f} \cdot \frac{K_m A_m (P_e^2 - P_w^2)}{2\mu L} \quad (3)$$

式中: Q_m 为基质供气能力, m^3/d ; K_m 为基质渗透率, $10^{-3} \mu m^2$; $A_m = 2\pi r_w H$,为储层基质向井筒供气面积, m^2 。

裂缝向井筒供气见公式(4):

$$Q_f = \frac{T_a}{ZP_a T_f} \cdot \frac{K_f A_f (P_e^2 - P_w^2)}{2\mu L} \quad (4)$$

式中: Q_f 为裂缝供气能力, m^3/d ; $K_f = K - K_m$,为裂缝渗透率, $10^{-3} \mu m^2$; $A_f = w_f H_f n$,为裂缝向井筒供气面积, m^2 ; n 为裂缝条数。

基质向裂缝供气见公式(5):

$$Q_{mf} = \frac{T_a}{ZP_a T_f} \cdot \frac{K_m A_{mf} (P_e^2 - P_w^2)}{2\mu L} \quad (5)$$

式中: Q_{mf} 为基质向裂缝供气能力, m^3/d ; $A_{mf} = 2 L_f H_f n$,为基质向裂缝供气面积, m^2 。

裂缝对气井总产能的贡献(γ)见公式(6):

$$\gamma = \frac{Q_m + Q_{mf}}{Q} \times 100\% \quad (6)$$

将公式(2)~(5)代入公式(6)得出公式(7):

$$\gamma = \frac{K_f A_f + K_m A_{mf}}{K_f A_f + K_m A_{mf} + K_m A_m} \times 100\% \quad (7)$$

式中: γ 为裂缝对气井产能的贡献,%。

3 实例计算

以A气田为对象,对6口气井开展裂缝产能贡献评价,气井的基本参数见表2。

将表2中的参数代入公式(7),计算结果见图4,计算6口气井储层裂缝对产能的贡献在82.7%~99.1%之间,平均为94.5%,表明气田储层裂缝对气井高产发挥了重要作用。

4 结论

(1)通过岩心人工定量造缝,实现了量化评价裂缝对岩心渗透率的贡献。实验结果表明,裂缝对

表2 A气田气井基础参数

Table 2 Basic parameters of gas wells in A gas field

井号	H	K	K_m	r_w	W_f	H_f	L_f	n
1#	48.3	1.68	0.090	0.1	0.001	1	15	87
	116.7	1.68	0.090	0.1	0.001	1	15	210
2#	18.9	28.02	0.027	0.1	0.001	1	15	42
	99.7	3.20	0.038	0.1	0.001	1	15	219
3#	63.6	0.34	0.064	0.1	0.001	1	6	16
4#	63.1	1.85	0.066	0.1	0.001	1	28	47
5#	85.3	1.38	0.060	0.1	0.001	1	8	122
6#	66.0	1.78	0.060	0.1	0.001	1	10	20

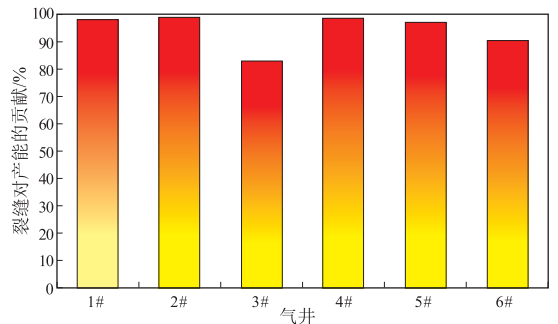


图4 裂缝对气井产能贡献评价

Fig.4 Evaluation of fracture contribution to gas well production capacity

岩心渗透率的贡献分为 2 种情形,一是储层内部存在非贯通裂缝时,相对于岩心基质来讲,非贯通裂缝(贯通程度 20%,40%,60%,80%)对储层渗透率也存在一定贡献,可以改善储层的整体渗透率,随贯通程度增加,对渗透率的贡献也增加,但对储层渗透率的贡献有限,非贯通裂缝岩心渗透率是基质渗透率的 10 倍以内;二是储层存在贯通裂缝(即贯通程度 100%)时,其渗透率是基质岩心的几十到上百倍,对储层渗透率贡献一般在 80%以上,与裂缝的开度关系密切。

(2)建立了储层裂缝对气井产能贡献的数学模型,实现了裂缝对气井产能贡献的量化评价,并以 A 气田为例进行实际计算,6 口气井的储层裂缝对产能的贡献在 82.7%~99.1%之间,平均为 94.5%,这表明气田储层裂缝对气井高产发挥了重要的作用。

参考文献:

- [1] 李熙喆,郭振华,万玉金,等.安岳气田龙王庙组气藏地质特征与开发技术政策[J].石油勘探与开发,2017,44(3):398-406.
LI Xizhe, GUO Zhenhua, WAN Yujin, et al. Geological characteristics and development strategies for Cambrian Longwangmiao Formation gas reservoir in Anyue Gas Field, Sichuan Basin, SW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2017, 44(3):398-406.
- [2] 李熙喆,万玉金,陆家亮,等.复杂气藏开发技术[M].北京:石油工业出版社,2010:28-30.
LI Xizhe, WAN Yujin, LU Jialiang, et al. The development technology of complex gas reservoir[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2010:28-30.
- [3] 胡勇,李熙喆,万玉金,等.致密砂岩气渗流特征物理模拟[J].石油勘探与开发,2013,40(5):580-584.
HU Yong, LI Xizhe, WAN Yujin, et al. Physical simulation on gas percolation in tight sandstone[J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(5):580-584.
- [4] FIROOZABADI A, HAUGE J. Capillary pressure in fractured porous media (includes associated papers 21892 and 22212)[J]. Journal of Petroleum Technology, 1990, 42(6):784-791.
- [5] LORENZ J C, STERLING J L, SCHECHTER D S, et al. Natural fractures in the Spraberry Formation, Midland Basin, Texas: the effects of mechanical stratigraphy on fracture variability and reservoir behavior[J]. AAPG Bulletin, 2002, 86(3):505-524.
- [6] AHMED T. Reservoir engineering handbook[M]. 4th ed. Boston: Gulf Professional Publishing, 2010.
- [7] DATTA-GUPTA A, VASCO D W, LONG J C S. Detailed characterization of a fractured limestone formation by use of stochastic inverse approaches [J]. SPE Formation Evaluation, 1995, 10(3):133-140.
- [8] MCGUIRE W J, SIKORA V J. The effect of vertical fractures on well productivity[J]. Journal of Petroleum Technology, 1960, 12(10):72-74.
- [9] RAYMOND L R, BINDER G G JR. Productivity of wells in vertically fractured, damaged formations[J]. Journal of Petroleum Technology, 1967, 19(1):120-130.
- [10] 韩永新,万玉金,杨希翥.GB/T 26979-2011,天然气藏分类[S].北京:中国标准出版社,2012.
HAN Yongxin, WAN Yujin, YANG Xifei. GB/T 26979-2011, The classification of natural gas pool[S]. Beijing: Standards Press of China, 2012.
- [11] 陈翠雀,罗菊兰,韩焘,等.低渗透率储层裂缝发育程度与储层产能关系研究[J].测井技术,2009,33(5):475-479.
CHEN Cuique, LUO Julan, HAN Tao, et al. Study on relationship between low-permeability reservoir fracture growth and reservoir productivity[J]. Well Logging Technology, 2009, 33(5):475-479.
- [12] 李龙龙,姚军,李阳,等.分段多簇压裂水平井产能计算及其分布规律[J].石油勘探与开发,2014,41(4):457-461.
LI Longlong, YAO Jun, LI Yang, et al. Productivity calculation and distribution of staged multi-cluster fractured horizontal wells[J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 41(4):457-461.
- [13] 杨锋,朱春启,王新海,等.库车前陆盆地低孔裂缝性砂岩产能预测模型[J].石油勘探与开发,2013,40(3):341-345.
YANG Feng, ZHU Chunqi, WANG Xinhai, et al. A capacity prediction model for the low porosity fractured reservoirs in the Kuqa Foreland Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(3):341-345.
- [14] 中华人民共和国质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.GB/T 28912-2012,岩石中两相流体相对渗透率测定方法[S].北京:中国标准出版社,2013.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of China. GB/T 28912-2012, Test method for two phase relative permeability in rock[S]. Beijing: Standards Press of China, 2013.
- [15] 中华人民共和国质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.GB/T 29172-2012,岩心分析方法[S].北京:中国标准出版社,2013.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of China. GB/T 29172-2012, Practices for core analysis[S]. Beijing: Standards Press of China, 2013.
- [16] 国家能源局.SY/T 6385-2016,覆压下岩石孔隙度和渗透率测定方法[S].北京:石油工业出版社,2017.
National Energy Administration. SY/T 6385-2016, The porosity and permeability measurement of core in net confining stress[S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2017.
- [17] 庄惠农.气藏动态描述和试井[M].2版.北京:石油工业出版社,2009:439.
ZHUANG Huinong. Gas reservoir dynamic characterization and well test interpretation[M]. 2nd ed. Beijing: Petroleum Industry Press, 2009:439.