

◀ 油气开采 ▶

doi:10.3969/j.issn.1001-0890.2014.01.017

水平井缝网压裂裂缝间距的优化

邵尚奇, 田守嵩, 李根生, 贺振国

(油气资源与探测国家重点实验室(中国石油大学(北京)), 北京 102249)

摘 要:为了让致密油气藏分段压裂时形成的水力裂缝和天然裂缝相沟通,形成复杂缝网,提高水力压裂增产效果,采用数值模拟方法研究了水平井缝网压裂的缝间距优化问题。建立了均质、各向同性储层内二维水力裂缝的诱导应力差模型;根据裂缝转向机理,推导出了缝间最大诱导应力公式,确定了最优间距。结合现场数据,计算了泊松比为 0.2~0.5、缝间距为 40~90 m 时的缝间诱导应力。计算结果表明:地层的泊松比越小,裂缝的诱导应力差越大,诱导应力的传播距离越远;随着与裂缝距离的增加,诱导应力差呈现先增大后减小的趋势;当 2 条裂缝之间的距离为最优间距时,缝间的诱导应力差最大。研究表明,优化裂缝之间的缝间距,可以使裂缝之间的诱导应力差达到最大值,形成复杂的裂缝网络,提高油气与井筒之间的连通性。研究结果为低渗透油气藏缝网压裂时的裂缝优化设计提供了参考。

关键词:水平井 低渗透油气藏 缝网压裂 裂缝间距 诱导应力

中图分类号:TE357⁺.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0890(2014)01-0086-05

Fracture Spacing Optimization for Fracture-Network Fracturing in Horizontal Wells

Shao Shangqi, Tian Shouceng, Li Gensheng, He Zhenguo

(State Key Laboratory of Petroleum Resource and Prospecting(China University of Petroleum(Beijing)), Beijing, 102249, China)

Abstract: During the staged fracturing in horizontal wells, in order to form a complex fracture network and improve the post-fracturing performance, a numerical simulation method was used to optimize fracture spacing of “fracture network” in horizontal well. Based on fracture diverting mechanism, homogeneous and isotropic 2D maximum induced stress anisotropy model was built, maximum induced stress equation between fractures was deduced, and the optimal fracture space was worked out. According to field data, The induced stress anisotropy was calculated under Poisson’s ratio of 0.2~0.5 and fracture spacing of 40~90 m. The result showed the lower the Poisson’s ratio, the higher the fracture induced stress difference, the longer the induced stress would propagate, as the distance increased, the induced stress difference first increased and then decreased, when the spacing between two fractures was optimal, the induced stress difference was maximum. The study showed the optimal spacing between fractures could maximize induced stress difference between fractures, facilitating the formation of complex fracture network, and improving the connectivity between oil and gas and wellbore. The study results provided a new approach for fracturing optimization in low permeability oil and gas reservoirs.

Key words: horizontal well; low permeability reservoir; fracture-network fracturing; fracture spacing; induced stress

致密油气藏具有渗透率低、薄层较多、储层分布不均匀等特点^[1-2],采用水平井分段压裂可以有效开发低渗透油气藏^[3-5]。水力压裂在形成主裂缝的同时,会形成一些分支缝,这些分支缝在主裂缝的诱导应力作用下发生转向,沟通主裂缝以及地层中的天然裂缝,形成复杂缝网^[6-8],改善油气向主裂缝流动的通道,提高油气采收率。

国内学者对缝网压裂做过相关研究。Changan

收稿日期:2013-04-07;改回日期:2013-12-25。

作者简介:邵尚奇(1989—),男,安徽石台人,2011年毕业于中国石油大学(北京)地质工程专业,在读硕士研究生,主要从事高压水射流及钻井工程方面的研究。

联系方式:13488779789,shaoshangqi@126.com。

基金项目:国家自然科学基金项目“页岩气藏水平井完井与多级压裂增产的基础研究”(编号:51210006)和国家自然科学基金项目“页岩气开采岩石力学”(编号:51234006)资助。

M. Du 等人^[9]提出采用水力压裂技术在双孔隙页岩气藏中形成人工缝网的方法,利用微地震技术记录“改造体积”并校正;雷群等人^[10]利用储层水平主应力差与裂缝延伸净压力的关系,在远井地带也实现复杂缝网,改善油气流动通道,但以上研究均未考虑地层因素、多裂缝及裂缝间距的影响。笔者基于数值模拟方法和应力叠加原理,建立了多条水力裂缝的最大诱导应力差模型,分析了主裂缝周围分支缝转向的机理,得出了不同地层条件下形成复杂缝网的最优缝间距,并分析了诱导应力差随缝间距的变化规律。

1 裂缝间距优化模型

1.1 水力裂缝诱导应力

对水平井进行分段压裂时,水力裂缝内部的净压力会产生诱导应力,改变裂缝周围的应力场^[11-13],下一段裂缝会受到上一段已压开裂缝的应力干扰,即应力阴影效应。由于应力干扰主要受缝高的控制^[14],所以选择缝高所在二维平面分析裂缝的诱导应力场。图 1 为水力裂缝二维示意图,图中 z 为缝高方向, x 为缝宽方向, y 为缝长方向,原始地应力分别为 σ_v 、 σ_H 和 σ_h 。

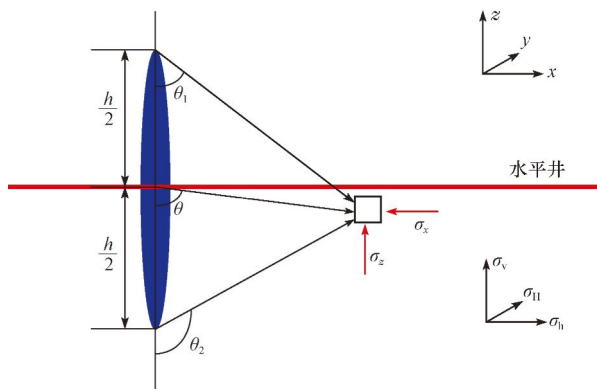


图 1 水平井二维垂直裂缝示意

Fig. 1 2D vertical fractures of a horizontal well

根据 A. E. Green 的解析解^[15],可以得到沿井筒方向二维水力裂缝诱导应力分量的表达式:

$$\frac{\sigma_x}{p} = 1 - \frac{\frac{L}{h}}{\sqrt{\left(\frac{L}{h}\right)^2 + \frac{1}{4}}} + \frac{\frac{L}{h}}{4 \left[\sqrt{\left(\frac{L}{h}\right)^2 + \frac{1}{4}} \right]^3} \quad (1)$$

$$\frac{\sigma_z}{p} = 1 - \frac{\frac{L}{h}}{\sqrt{\left(\frac{L}{h}\right)^2 + \frac{1}{4}}} - \frac{\frac{L}{h}}{4 \left[\sqrt{\left(\frac{L}{h}\right)^2 + \frac{1}{4}} \right]^3} \quad (2)$$

式中: σ_x 和 σ_z 分别为沿水平井井筒方向和缝高方向的

诱导应力, MPa; L 为沿水平井筒方向与裂缝的距离, m; h 为裂缝的半缝高, m; p 为裂缝的净压力, MPa。

根据胡克定律,缝长方向的诱导应力为:

$$\frac{\sigma_y}{p} = \nu \left(\frac{\sigma_x}{p} + \frac{\sigma_z}{p} \right) \quad (3)$$

式中: σ_y 为沿缝长方向的诱导应力, MPa; ν 为地层泊松比。

根据式(1)和式(3),可得缝长和缝宽方向的诱导应力差表达式为:

$$\frac{\sigma_x}{p} - \frac{\sigma_y}{p} = (1 - 2\nu) \cdot \left[1 - \frac{\frac{L}{h}}{\sqrt{\left(\frac{L}{h}\right)^2 + \frac{1}{4}}} \right] + \frac{\frac{L}{h}}{4 \left[\sqrt{\left(\frac{L}{h}\right)^2 + \frac{1}{4}} \right]^3} \quad (4)$$

1.2 裂缝间距优化

当主裂缝的净压力大于 2 个水平主应力差和岩石抗拉强度之和时,就会形成分支裂缝^[16-21]。根据叠加原理,将原地应力和诱导应力进行叠加,则裂缝在原最大水平主应力方向上的应力不大于原最小水平主应力方向上的应力,即 $\sigma_H + \sigma_y \leq \sigma_h + \sigma_x$,可转换为 $\sigma_x - \sigma_y \geq \sigma_H - \sigma_h$ 。当满足上面条件时,分支裂缝就会发生转向,偏离原来的延伸路径,沿着平行于水平井筒的方向延伸,当距离主裂缝一定长度之后,分支裂缝又回到原来的延伸方向上(见图 2)。

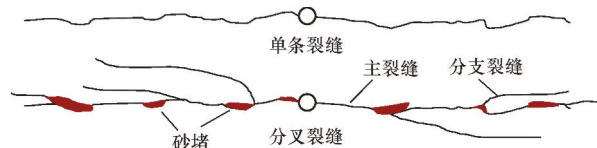


图 2 单条裂缝和复杂裂缝对比

Fig. 2 Comparison of single fracture and complex fractures

利用分段压裂形成复杂缝网的机理为:1)水平井分段压裂在地层中形成多条主裂缝,主裂缝形成的诱导应力改变周围的应力场;2)对主裂缝间距进行优化,使裂缝间的诱导应力尽可能大,从而让分支裂缝发生转向,增强和主裂缝、天然裂缝的连通性(见图 3),改善油气向主裂缝流动的通道结构,最终实现提高油气井产能的目的。图 3 中水平井筒位于储层的中间位置,绿色的粗线表示主裂缝,在主裂缝周围存在较多的分支裂缝和天然裂缝,红色曲线表示分支裂缝,黑线曲线表示地层中的天然裂缝。

对式(4)进行求导,可得到诱导应力差达到最大值时和裂缝距离的关系式:

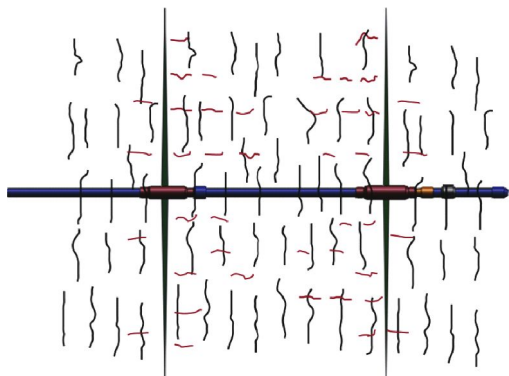


图3 分段缝网压裂示意

Fig. 3 Multistage fractured network

$$L = h \sqrt{\frac{\nu}{2(3-\nu)}} \quad (5)$$

将式(5)代入式(4),得到裂缝最大诱导应力差的表达式为:

$$\left(\frac{\sigma_x}{p} - \frac{\sigma_y}{p} \right)_{\max} = (1-2\nu) \cdot \left[1 - \frac{\sqrt{\frac{\nu}{2(3-\nu)}}}{\sqrt{\frac{\nu}{2(3-\nu)}} + \frac{1}{4}} \right] + \frac{\sqrt{\frac{\nu}{2(3-\nu)}}}{4 \left(\sqrt{\frac{\nu}{2(3-\nu)}} + \frac{1}{4} \right)^3} \quad (6)$$

从式(5)可以看出,距离 L 与净压力无关,只与缝高和地层的泊松比有关。那么,图3中的2条主裂缝当其诱导应力差达到最大时,与裂缝距离的关系式分别为:

$$L_1 = h_1 \sqrt{\frac{\nu}{2(3-\nu)}} \quad (7)$$

$$L_2 = h_2 \sqrt{\frac{\nu}{2(3-\nu)}} \quad (8)$$

式中: L_1 和 L_2 分别为第一条裂缝和第二条裂缝诱导应力差最大时与裂缝的距离,m; h_1 和 h_2 分别为第一条裂缝和第二条裂缝的半缝高,m。

以上研究可知,当2条裂缝之间的缝间距为 $L_1 + L_2$ 时,缝间的诱导应力差最大,主裂缝周围分支裂缝转向的可能性最大,沟通更多的天然裂缝,形成复杂的缝网。根据式(7)和(8),可得裂缝之间的最优缝间距表达式为:

$$L_1 + L_2 = (h_1 + h_2) \sqrt{\frac{\nu}{2(3-\nu)}} \quad (9)$$

2 数值计算结果与分析

2.1 假设条件

水平井分段压裂要形成缝网,受到地质构造、压

裂施工等多种因素的制约,为了单独考虑裂缝间距和地层泊松比对诱导应力的影响,假设地层条件如下:1)为线弹性、各向均质地层;2)施工过程中的排量保持稳定,裂缝的滤失系数相等,且缝长、缝高保持定值;3)缝内流体压力恒定,且隔层的弹性模量比储层的弹性模量大很多,裂缝只在储层内延伸。以某油田的一口油井为例进行数值模拟计算,缝间距优化模型参数依次为:储层弹性模量 20.7 GPa,隔层弹性模量 50.3 GPa,缝内流体压力 53.0 MPa,最大、最小水平主应力分别为 56.0、45.0 MPa,裂缝的半缝高和半缝长分别为 50.0 和 160.0 m。

2.2 地层泊松比与诱导应力差的关系

由于压裂缝长、缝高一定,影响裂缝诱导应力的因素主要是地层泊松比和裂缝间距。诱导应力随与裂缝距离发生改变,根据式(4)进行计算,可得到其变化规律(见图4)。从图4可看出,随着沿水平井筒方向与裂缝距离的增加,裂缝诱导应力差呈先增大后减小的趋势,且地层泊松比越小诱导应力差越大,并且这种趋势随着与裂缝距离的增大保持稳定,说明泊松比越小,诱导应力传播的距离越大,影响范围越广。当沿井筒方向与裂缝的距离超过4倍半缝高时,不同泊松比下的诱导应力之间差别不大,说明诱导应力的影响范围在半缝高的4倍以内。

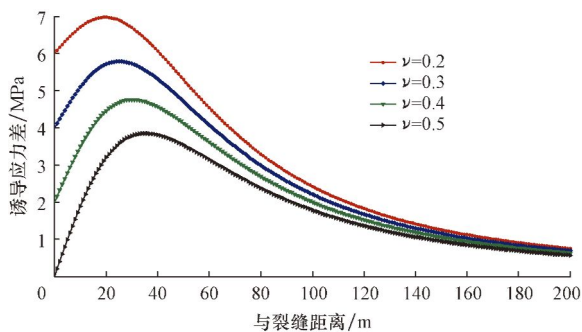


图4 不同泊松比下诱导应力差随与裂缝距离的变化

Fig. 4 Induced stress difference vs. distance under different poisson's ratios

从图4还可以看出,诱导应力达到最大时,和与裂缝的距离及泊松比存在一定的关系。根据式(5)计算不同泊松比条件下诱导应力达到最大时与裂缝的距离,计算结果表明,诱导应力差达到最大时,与裂缝的距离随泊松比的增大而增大(见图5)。

岩石的泊松比一般为 0.2~0.5,因此从图5可以看出,距离裂缝 20~35 m 处的诱导应力差达到最大。泥岩和页岩地层的泊松比较小,诱导应力

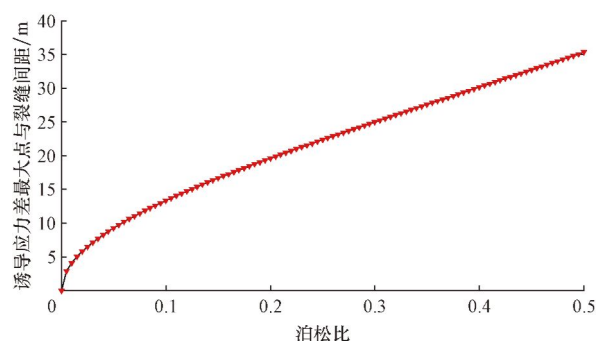


图 5 最大诱导应力差时的裂缝间距与泊松比的关系

Fig. 5 Space of maximum induced stress anisotropy vs. the poisson's ratio

差最大时沿井筒方向距离一般在 20~27 m;砂岩地层的泊松比较大,诱导应力差最大时沿井筒方向距离为 25~32 m。

2.3 缝间距与诱导应力差的关系

裂缝的诱导应力会改变相邻裂缝的应力场,对最优缝间距产生影响,联立式(4)和(9),可计算得到 2 条裂缝之间的最优缝间距,如图 6 所示。从图 6 可以看出,随着缝间距的不断增大,诱导应力差逐渐变小,这是因为随着缝间距的增大,诱导应力迅速减小,当裂缝之间的距离超过一定值后,诱导应力对分支裂缝的影响就比较小。当缝间距小于 70 m 时,主裂缝形成的诱导应力差会超过初始的主应力差,导致分支裂缝转向。当缝间距为 50 m 时,缝间的诱导应力差最大,比初始地应力差约大 0.7 MPa,故裂缝间的最优间距选择 50 m。该计算结果是在特定的排量和地质条件下得到的,在实际的缝间距优化设计中,需要考虑现场实际情况并结合相关公式进行。

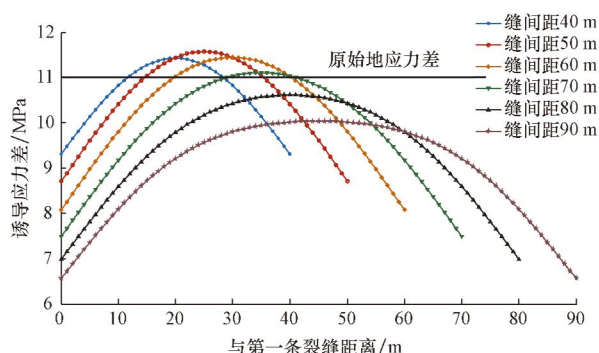


图 6 诱导应力差随缝间距的变化

Fig. 6 Induced stress difference vs. the space between fractures

3 结 论

1) 运用数值方法建立了非常规致密油气藏多

条水力裂缝最大诱导应力差模型,研究了地层条件和缝间距对诱导应力差的影响,推导出了缝网压裂的最优缝间距计算公式。

2) 诱导应力差和地层的泊松比存在负相关关系。泊松比一定时,随着与裂缝距离的增加,诱导应力差呈先增大后减小的趋势,并且缝间的诱导应力差存在最大值,此时所对应的缝间距为缝网压裂的最优间距。

3) 研究结果是在特定排量和地质条件下得到的,在进行具体油藏压裂的缝间距优化设计时,需进一步研究排量等参数对裂缝缝间距的影响。

参 考 文 献

References

- [1] 尹建,郭建春,曾凡辉. 水平井分段压裂射孔间距优化方法[J]. 石油钻探技术, 2012, 40(5): 67-71.
Yin Jian, Guo Jianchun, Zeng Fanhui. Perforation spacing optimization for staged fracturing of horizontal well[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2012, 40(5): 67-71.
- [2] 何东博,贾爱林,冀光,等. 苏里格大型致密砂岩气田开发井型井网技术[J]. 石油勘探与开发, 2013, 40(1): 79-89.
He Dongbo, Jia Ailin, Ji Guang, et al. Well type and pattern optimization technology for large scale tight sand gas, Sulige Gas Field[J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(1): 79-89.
- [3] 陈作,何青,王宝峰,等. 大牛地气田长水平段水平井分段压裂优化设计技术[J]. 石油钻探技术, 2013, 41(6): 82-85.
Chen Zuo, He Qing, Wang Baofeng, et al. Design optimization of staged fracturing for long lateral horizontal wells in Daniudi Gas Field[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2013, 41(6): 82-85.
- [4] 曹阳,陈琛,史雪枝,等. 川西致密气藏裸眼水平井分段压裂技术[J]. 石油钻探技术, 2012, 40(3): 13-17.
Cao Yang, Chen Chen, Shi Xuezi, et al. Multi-stage fracturing techniques for open hole horizontal wells in Western Sichuan tight gas reservoirs[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2012, 40(3): 13-17.
- [5] 张恒,刘洋,李强,等. 水平井裸眼分段压裂完井技术在苏里格气田的应用[J]. 石油钻探技术, 2011, 39(4): 77-80.
Zhang Heng, Liu Yang, Li Qiang, et al. Application of staged fracturing completion technology in horizontal openhole wells in Sulige Gas Field[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2011, 39(4): 77-80.
- [6] East Loyd Jr, Soliman M Y, Augustine Jody. Methods for enhancing far-field complexity in fracturing operations[J]. SPE Production & Operations, 2011, 26(3): 291-303.
- [7] Mayerhofer M J, Lolon E P, Youngblood J E, et al. Integration of microseismic-fracture-mapping results with numerical fracture network production modeling in the Barnett Shale[R]. SPE 102103, 2006.

- [8] 蒋廷学,贾长贵,王海涛,等.页岩气网络压裂设计方法研究[J].石油钻探技术,2011,39(3):36-40.
Jiang Tingxue, Jia Changgui, Wang Haitao, et al. Study on network fracturing design method in shale gas [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2011, 39(3): 36-40.
- [9] Du Changan M, Zhang Xu, Zhan Lang, et al. A practical approach: estimation of hydraulic fracturing induced fracture networks in shale gas reservoirs[R]. SPE 132180, 2010.
- [10] 雷群,胥云,蒋廷学,等.用于提高低-特低渗透油气藏改造效果的缝网压裂技术[J].石油学报,2009,30(2):237-241.
Lei Qun, Xu Yun, Jiang Tingxue, et al. "Fracture network" fracturing technique for improving post-fracturing performance of low and ultra-low permeability reservoirs[J]. Acta Petrolei Sinica, 2009, 30(2): 237-241.
- [11] 刘飞.水平井压裂设计方法[D].西安:西安石油大学石油工程学院,2011.
Liu Fei. Design method of horizontal well fracturing [D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, College of Petroleum Engineering, 2011.
- [12] Soliman M Y, East Loyd, Adams David. Geomechanics aspects of multiple fracturing of horizontal and vertical wells[R]. SPE 86992, 2004.
- [13] 吕志凯,何顺利,罗富平,等.射孔水平井分段压裂起裂压力理论研究[J].石油钻探技术,2011,39(4):72-76.
Lü Zhikai, He Shunli, Luo Fuping, et al. Study on hydraulic fracture initiation pressure of staged fracturing in perforated horizontal wells[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2011, 39(4): 72-76.
- [14] 袁帅,李春兰,曾保全,等.压裂水平井裂缝参数优化实验[J].石油钻探技术,2010,40(4):99-103.
Yuan Shuai, Li Chunlan, Zeng Baoquan, et al. Experimental study on optimization of fracture parameters in horizontal well fracturing [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2010, 40(4): 99-103.
- [15] Green A E, Sneddon I N. The distribution of stress in the neighbourhood of a flat elliptical crack in an elastic solid[J]. Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society, 1950, 46(1): 159-163.
- [16] McNeil Fraser, van Gijtenbeek Klaas A W, van Domelen Mark. New hydraulic fracturing process enables far-field diversion in unconventional reservoirs[R]. SPE 152704, 2012.
- [17] Zhou Jian, Chen Mian, Jin Yan, et al. Analysis of fracture propagation behavior and fracture geometry using a tri-axial fracturing system in naturally fractured reservoirs[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2008, 45(7): 1143-1152.
- [18] 蒋廷学.页岩油气水平井压裂裂缝复杂性指数研究及应用展望[J].石油钻探技术,2013,41(2):7-12.
Jiang Tingxue. The fracture complexity index of horizontal wells in shale oil and gas reservoir [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2013, 41(2): 7-12.
- [19] 钟森. SF 气田水平井分段压裂关键参数优化设计[J].断块油气田,2013,20(4):525-529,534.
Zhong Sen. Key parameter optimization design of staged fracturing for horizontal well in SF Gas Field [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2013, 20(4): 525-529, 534.
- [20] 顾岱鸿,田冷.低渗油藏裂缝对水平井产能影响的实验研究[J].断块油气田,2005,12(5):31-33,91.
Gu Daihong, Tian Leng. The study on fracture affecting the performance of horizontal well in low permeability reservoir [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2005, 12(5): 31-33, 91.
- [21] Meyer Bruce R, Bazan Lucas W, Jacot R Henry, et al. Optimization of multiple transverse hydraulic fractures in horizontal wellbores[R]. SPE 131732, 2010.

[编辑 滕春鸣]

中原油田研制出抗硫化氢产出剖面组合测井仪

目前国内研制生产的产出剖面测井仪存在抗硫化氢能力差、密封性能低、测量参数少等不足,在酸性气田中不能实现多支仪器组合,无法适应高含硫化氢环境中油、气井的测量。针对这一现状,中原油田测井公司研制了具有自主知识产权的抗硫化氢产出剖面组合测井仪。该抗硫化氢组合测井仪由电缆头、旋转短节、内置电路和传感器及金属壳体组成的测量仪、扶正器、取样器组成,连接部件之间采用耐硫化氢腐蚀材料制作的密封件,可根据施工需要进行组合应用,一次下井可同时测得套管节箍、伽马射线强度、持水率和流量等7个参数8条曲线,同时可对井下液体进行取样,大大提高了测井成功率,能满足高含硫化氢油气井不同测量参数的需要。该测井仪在新清溪1井进行了试验,取得了良好的应用效果。