

射孔对产层的损害机理及评价标准

冯跃平 潘迎德

(西南石油学院完井中心)

黄友梅

(华北石油管理局井下作业公司)

内容提要 本文阐述了对射孔损害机理及评价标准研究的重要性。回顾了国外在该方面的研究情况,着重介绍了我国“七·五”期间在此研究工作中所取得的一些成果,并指出了今后发展的方向。

主题词 射孔 损害机理 评价方法 岩心靶 流动效率 压实带

射孔完井方法已有 50 多年历史,因其具独特优点,故在当今世界完井方法中,射孔完井约占 90%。射孔对油井产能影响很大,优质的射孔作业可使油气井产能超过裸眼井,而低劣的射孔作业对油气井产能的降低将比钻井严重得多。搞清楚射孔对产层的影响因素,定性、定量评价其影响大小对于优化射孔设计、指导射孔作业很有必要。

历史和现状

早在 1952 年以前,美国就有采用实际井下实验或者在大气温度、压力条件下的地面实验来进行射孔研究。但由于实际井下条件难于控制,且地面条件与实际情况相差甚远,这种实验不大实用。1952 年,艾克松首先发展了模拟井下条件的可靠性实验方法。1955 年 7 月美国 14 家生产公司和 10 家服务公司开始制定了射孔器的性能测试标准,后来几家公司建立了各自的实验室。1961 年 11 月,美国首次推出了评价射孔器的试行条例 43 号,于 1962 年 10 月出版了 API RP43 标准第一版,接着分别于 1971 年 11 月、1974 年 10 月、1985 年 8 月推出了 API RP43 号第二、三、四版,这些标准中规定了标准岩心及其尺寸,

评价标准等。

1978 年 R·J·Saucier 公布了他用贝雷砂岩靶射孔后沿轴线方向剖开岩心靶来研究射孔损害机理的结果,其损害机理状况如图 1。通过对剖面的特殊观察,得到结论:最靠近

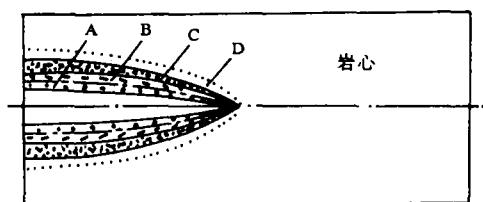


图 1 孔眼周围损害状况

A. 严重破碎带; B. 损害带;
C. 压实带; D. 微压实带

孔眼大约 2.54mm 厚的区域是严重破碎带,其中有大量裂缝,渗透率比原始的高;向外约 2.54~5.08mm 的区域为破碎和压实带,其渗透率比原始的要低一些;再向外 5.08~10.16mm 为严重压实带,此区域的渗透率低得多;再向外岩心状况趋于原始状态。总结为射孔周围大约 12.7mm 厚的区域为压实破碎带,其渗透率大约为原始的 10%左右,它极大地降低了射孔井的产能。也有人认为其渗透率为原始的 10%~20%,20%,10%~

25%等。

关于对射孔效率的评价指标在 1971 年以前都是采用油井流动指数 WFI ($WFI = K_p / K_0$, K_p 为射孔后岩心靶的视渗透率, K_0 为岩心靶的原始渗透率), 后来人们认为 WFI 不科学, 于 1971 年 11 月将 WFI 改为 CFE 即现在通常说的岩心流动效率。除此之外, 对于径向靶还有采用射孔效率 PE 的。

近几年, 国内才逐渐重视对射孔的评价及其机理的研究。目前的情况是大庆油田有一套从美国吉尔哈特公司引进的室内射孔岩心靶装置; 华北油田与牡丹江仪表公司联合研制出了我国第一套自行设计的高温、高压计算机自动控制和测量的射孔岩心靶装置, 并已对射孔损害机理进行了研究。

国内研究成果介绍

华北油田自 1988 年高温、高压实弹射孔岩心靶流动实验装置投入使用以来, 做了一定数量的实验, 并着重对射孔损害机理、损害参数的求法以及射孔参数进行了研究, 并取得了一些成果。

1. 压实带存在的检测

a. 颜色显示法。原理: 利用某种特殊溶液的性质, 在多孔介质中单位体积内必须达到一定量的此种溶液才能对一种化学试剂显示颜色。因此, 射孔后就用这种特殊溶液潜驱一段时间, 如果压实带的确存在, 那么它的孔隙度和渗透率一定比未压实的区域小, 其单位体积内的多孔介质中拥有这种溶液的量就小, 这样两个区域在进行化学试剂滴定时, 就会显示出不同的颜色。图 2 中的 a、b、c 分别是对 YGS—30 型射孔弹、山西 89—A 型射孔弹、WS—73 型射孔弹射孔后进行的颜色显示压实带情况。

通过一定数量的岩心靶实验, 采用与孔眼垂直方向横剖的办法, 对不同部位进行显示, YGS—30 型弹入口端平均压实厚度为

18mm; 山西 89—A 型弹入口端平均压实厚度为 14mm; WS—73 型弹入口端平均压实厚度为 15mm, 这三种弹的孔眼尾部、压实带平均值在 7~10mm 之间。这些结论与国外报道压实带厚度大约为 12.7mm 还是基本吻合的。从以上可以看出, 颜色显示法不仅可以证实压实带的存在, 而且还能很直观地看出其厚度有多大。

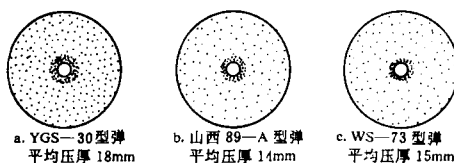


图 2

b. 质量比较法。高能聚流遇到障碍物套管、水泥环和地层时将产生约 30MPa 的压力, 在这样的高温、高压下, 套管、水泥环及地层立即形成一定深度的孔眼, 但是原来孔眼中的物质不会白白消失, 这些物质只有两种可能, 要么成为碎片而沿射流相反方向全部冲到井筒; 要么一部分冲到井筒, 一部分被压实。如果属于前者, 在做实验时, 回收的岩心碎屑量应等于孔容量 (孔眼体积乘以岩石的密度), 实验证明, 回收量比孔容量小得多。表 1 就是关于这方面的数据。

表 1 岩心孔眼质量回收情况

序号	孔深 (mm)	孔径 (mm)	孔容(量) (g)	回收的岩心碎屑 (g)
1	230	8	28.8	7.4
2	180	9	28.6	6.8
3	276	8	34.6	6.2
4	305	8	38.3	8.1
5	152	10	29.83	6.5

从表1中可以看出,岩心的确被压实了。

2. 压实带渗透率的计算

压实带渗透率是一个很难确定的重要参数,用实验方法直接测定在国外也没有解决。我们采用二维数学模型编制了计算压实带渗透率的软件,软件名为TANGST。有实际计算时,要输入

$$CFE = (K_p/K_0)/(K_i/K_0)(K_i/K_0)$$

是根据岩心及孔眼的几何尺寸查API标准

所获),岩心及几何尺寸,通过计算机自动迭代,你可得到一个 K_{∞}/K_0 值(K_{∞} 是压实带渗透率), $K_{\infty} = (K_{\infty}/K_0) \cdot K_0$,表2就是用此软件计算的一些岩心靶的压实带渗透率,从中可以看出:穿透深的弹不一定压实程度就严重,反而89-A比WS-73枪平均压实程度还要小些。以上数据的范围与国外研究结果也是一致的。

表2 不同弹型射孔后的压实程度

靶号	弹型	孔深 (mm)	原始渗透率 K_0 ($10^{-3}\mu\text{m}^2$)	视渗透率 K_p ($10^{-3}\mu\text{m}^2$)	岩心 流动效率 CFE	压实带 厚度 (mm)	压实带 渗透率 ($10^{-3}\mu\text{m}^2$)	压实程度 K_c/K_0
Y ₁	YGS-30	256	34.5	142	1.925	18		
Y ₄	YGS-30	241	56.1	172.8	1.548	18		
Y ₇	89-A	130	49.5	36.9	0.631	15	5.895	0.1191
Y ₁₀	89-A	165	26.7	24.2	0.693	14	4.108	0.1538
Y ₁₁	89-A	223	27.8	42.5	0.654	13	3.514	0.1264
Y ₁₄	73	105	33	22.3	0.6154	15	3.501	0.1061
Y ₁₅	73	110	27	19.0	0.6394	15	2.437	0.0962

3. 射孔负压差值的研究

射孔负压差就是射孔液在油层部位产生的回压减去油层压力(回压<地层压力)。聚能射孔时,弹罩的金属只有30%转变为金属喷流,其余部分为碎片以较低的速度跟在喷流后移动,并与套管、水泥环、岩石等碎片一起进入孔眼。如果采用正压射孔,这些物质都将进入孔眼起堵塞作用。当采用负压射孔时,射孔后将产生一个从地层向井筒的压力激动,这种作用将对这些物质进入孔眼起抑制作用。负压增大,这些物质不易进入孔眼,当负压差增到某一值后,孔道可保证完全清洁,如这时再增大负压值对孔眼流动是不起任何作用的,相反,负压值太大就会对井底造成机械损害。负压差受到两种因素控制,地层岩石的强度和渗透率。对于模拟华北油田岔河集

30断块的岩石来说,从国外的经验可知,要使孔眼达到清洁时所使用的最大负压差值还不足以对该断块的地层造成机械损害。因此在研究时,只考虑了岩心的渗透率,没有考虑岩心的强度。图3就是渗透率在 $4.0 \times 10^{-2} \mu\text{m}^2$ 左右的岩心射孔后的 CFE 与负压值的关系曲线。

从图3可以清楚地看到,负压值从1MPa增到5MPa时, CFE 增加明显;当负压差从6.2MPa增到7.8MPa时, CFE 才增加0.026;当负压差从7.8MPa增加到8.7MPa时, CFE 几乎没有增加。由此可知,对于渗透率为 $4.0 \times 10^{-2} \mu\text{m}^2$ 左右的地层,负压值最大取到7.8MPa就足够了,如果有困难可取6.2MPa、6.8MPa等。清洁孔眼的负压值与渗透率有关这是可以理解的,清洁孔眼必须要

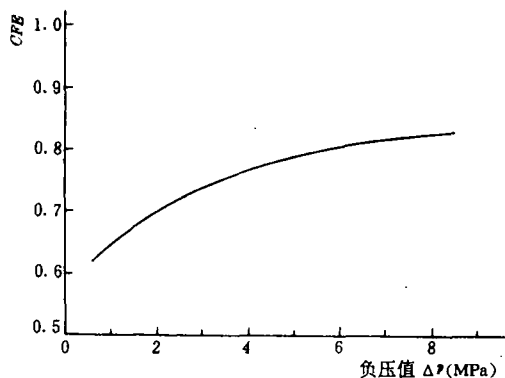


图3 负压值 CFB 关系曲线

有一定的有效负压。渗透率高的地层有效负压近似地等于射孔负压。当渗透率低时,有效负压比射孔负压小得多。因此为了使各种渗透率的地层产生的有效负压基本相当,对低渗透地层要使孔眼清洁,其负压差值必然比高渗透率地层的负压差值大些。

4. 部分实验现象

将射孔后的岩心靶沿孔眼轴线剖开,可以看到以下现象:①孔眼一般不规则,但也有入口大、尾部小的趋势。②多数孔眼的中尾部形成了不同长度、宽度的裂缝,这类孔眼的流动效率比理想孔眼的流动效率大得多。如果这一现象在实际井下射孔中存在,那么可以用来解释目前完井测试中大量出现负表皮系数的现象。但是必须指出:实际井下岩石是受地应力的,而我们做实验时只考虑了孔隙液体压力,而未加轴向应力。因此,此现象还不能轻易地推到实际井中去。③孔道表面有一层相当薄的疏松层,此层用手指轻轻触摸,表层砂粒就会下掉,这可能就是国外学者所指出的严重破碎带。④粉末药型罩的射孔弹射孔一般不产生杆堵,孔道比较干净,残渣很少;紫铜药型罩的射孔弹射孔,多数要产生杆堵,有的孔道虽然形成很好,但由于套管上金属迅速凝结,又将套管上的孔眼堵死,流体不能流出。

(本文收稿 1991-06-20)

新型钻井液处理剂 CT3—7 通过技术鉴定

由四川石油管理局天然气研究所和川西北矿区合作研制的 CT3—7,是一种利用造纸浆废液作基料的新型钻井液处理剂。该产品适用于低、高密度($2.00\text{g}/\text{cm}^3$)膨润土——淡水或盐水钻井液体系,能明显地降低钻井液粘度、切力及改善其流变性能,且具抗钙、抗镁、抗水泥污染能力,抗温可达 150°C ;产品无毒,是一种水溶性好的钻井液稀释剂;于今年 8 月 27 日在川西北矿区顺利通过鉴定,可批量生产,推广应用。

(李时柱)

DRILLING/PRODUCTION TECHNOLOGY AND EQUIPMENT

Yan Tie, Zhang Jianqun; **Three—Dimensional Theoretical Analysis of the Bit—Formation Interaction**, *NGI* 11(6), 1991: 40~46

On the basis of analyzing rock broken mode by bit, the effect of bit and formation anisotropies on borehole trace is comprehensively considered, the drilling rate equation for bit—formation interaction in different rock broken mode is established, and according to this equation, the formula for calculating variable inclination force and variable direction force is obtained.

Subject Headings: anisotropy, borehole trace, breaking mode, penetration rate.

Xia Qibiao, Zhang Xianpu; **Finite—Element Calculation Result of Three—Cone Bit of Type $\varnothing 215.9$ XHP5—4 and Its Experimental Verification**, *NGI* 11(6), 1991: 47~50

In this paper, it is described that, under the conditions of placing the bit of type $\varnothing 215.9$ XHP5—4 at the steel borehole bottom and bringing maximum weight on bit, the strain values at the particular points on the surface of the cone bit leg and cone shell are actually measured by using the electrically measuring technique with strain gauge, and compared with the calculation result obtained by using finite—element static calculation under the same conditions to verify the error in theoretical calculation.

Subject Headings: three cone bit, strain testing, finite—element calculation, verification, strength design.

Ran Qiquan, Lu Guoxiang; **Estimating Geological Reserve of Oil and Gas by Universal Kriging Technique**, *NGI* 11(6), 1991: 51~56

Referring to the oil and gas reservoir as a "Volume Unitized" geological system, the geological reserve of oil and gas is estimated by using Universal Kriging technique in this paper. This method is better than the others and not only can correctly describe the reserve parameters, but also estimate the geological reserve of oil and gas and really reflect the distribution of oil and gas reserve, favoring the development design and performance analysis.

Subject Headings: reserve calculation, volume unitized, Universal Kriging technique, drift model, semivariable function.

Feng Yueping, Pan Yingde and Huang Younei; **Mechanism of Perforation Damage to Productive Formation and Its Evaluation Criteria**, *NGI* 11(6), 1991: 57~60

This paper describes the importance of Studying the mechanism of perforation damage and its evaluation criteria, reviews the aspect researched in abroad, emphatically introduces some results obtained in this study during the Seventh Five—Year Plan of our country, points out the trend in future.

Subject Headings: perforation, mechanism of damage, evaluation method, core target, flow efficien-

cy, compacted zone.

STORAGE/TRANSPORTATION/SURFACE CONSTRUCTION

Liu Xiantao; **Techno—Economical Analysis of Short—Distance Gas Transportation Pipeline Design**, *NGI* 11(6), 1991: 61~63

Starting from the view point of lowest investment, this paper expounds the change relationship between the investment of short—distance gas transportation pipeline and its diameter, and gives the calculation formula for optimum technical parameters (diameter and wall thickness).

Subject Headings: short—distance gas transportation pipeline, metal consumption, investment, techno—economical analysis.

GAS PROCESSING AND UTILIZATION

Chen Gengliang; **Commenting on Oxidation-Reduction Desulfuration Method**, *NGI* 11(6), 1991: 64~74

This paper comments on the general situation of the development of oxidation—reduction desulfuration method and the technique characteristics of various methods at home and abroad in recent years, expounds the theoretical base of this kind of desulfuration method from thermodynamics and kinetics, and introduces the typical technological process and operation situation taking improved A. D. A method as a represent.

Subject Headings: gas desulfuration, oxidation—reduction reaction, technology—technique, development trend.

Wang Xuezin; **Discussion on the Method of Solving for Compression Coefficient by Use of GDSRK Equation**, *NGI* 11(6)1991: 75~81

With the aid of GDSRK state equation, this paper exhaustively analyses the change situation of compression coefficient with the variation of reduced pressure p_r and reduced temperature T_r , summarizes the method of differently taking values to solve for Z under different conditions, and draws up a distribution chart of the values of compression coefficient Z by using computer. The chart has a certain reference value for lighter hydrocarbons recovery, especially for the technological calculation of cryogenic equipment. The author considers the liquid phase compression coefficient Z may be higher than the critical one.

Subject Headings: compression coefficient, calculation method, GDSRK state equation, lighter hydrocarbon recovery.

ENVIRONMENT PROTECTION OF GAS FIELD