

◀试井与开采▶

砾石尺寸评价与优选方法研究

赵东伟, 董长银, 张 琪

(石油大学(华东)石油工程学院, 山东东营 257061)

摘 要: 砾石尺寸的选择是砾石充填防砂的关键步骤之一。较大的砾石尺寸有利于获得较高的产能, 但同时会导致严重的砂侵, 小的砾石尺寸挡砂效果好但对油井产能的影响较大。分析和研究了地层砂侵入砾石层的特性和砾石层压降计算方法, 评价了其挡砂效果及对产能的影响, 建立了砾石尺寸综合评价方法。采用Saucier、Depriester和Schwartz 3种常规选择方法得到3种砾石尺寸结果, 分别对其进行综合评价, 优选出最佳砾石尺寸。

关键词: 砾石充填; 尺寸优选; 防砂

中图分类号: TE358⁻¹ **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-0890 (2004) 04-0063-03

砾石充填防砂设计中, 选择合理的砾石尺寸是防砂成功的关键之一。较大的砾石尺寸有利于获得较高的产能, 但会导致地层砂侵入砾石层; 相反, 较小的砾石尺寸挡砂效果好, 但对油井产能的影响较大^[1-3]。因此, 需要从砂侵和产能两个方面综合考虑, 优选出既能避免严重砂侵, 又能获得较高产能的最佳砾石尺寸。

1 砾石尺寸评价方法

1.1 地层砂侵入特性

砾石充填井中, 砾石层是挡砂的主要屏障。由于地层砂较细, 一般随着生产的继续, 地层砂会不同程度地侵入砾石层, 严重降低砾石层渗透率或直接穿透砾石层导致防砂失效。人们对地层砂侵入砾石层进行了大量的试验研究, 结果表明, 地层砂侵入砾石层的程度与砾砂比GSR (砾石与地层砂的中值之比) 有关^[4]: GSR < 5, 无地层砂侵入; 5 < GSR < 6, 基本无地层砂侵入; 6 < GSR < 8, 地层砂轻微侵入砾石层, 侵入厚度较小; 10 < GSR < 15, 地层砂随油井生产的进行逐渐侵入砾石孔隙, 并在其中运移; 15 < GSR, 地层砂可以自由侵入并通过砾石层, 不起挡砂作用。

仅从挡砂效果的角度考虑, GSR 越小挡砂效果越好。要使砾石层起到挡砂效果, GSR 至少要小于8。

1.2 砾石层压降计算

对于砾石充填井, 射孔炮眼及筛管与套管的环空中填满了砾石。由于近井地带流体流速较高, 炮眼和筛套环空中的砾石层是主要压降区域, 因此砾石充填对油井产能有一定的影响, 这种影响可用砾石层压降或压力梯度来表示, 压降越大, 表示对产能的负面影

响越大, 反之越小。由于流速较高, 压降计算需要考虑非达西流影响。

对于炮眼砾石层, 压降计算公式为^[5]:

$$\Delta p_1 = (q_p \mu / \pi k_g r_p^2 + \beta_g \rho q_p^2 / \pi^2 r_p^4) L_p \quad (1)$$

套管与筛管环空中充满砾石形成环空砾石层, 计算其流动压降和表皮系数时可简化为锥形扩散流动, 其流动压降为^[6]:

$$\Delta p_2 = L [Q_p \mu (1/r_p - 1/R) / \pi k_g + \beta_g \rho Q_p^2 (1/r_p^3 - 1/R^3) / 3\pi^2] / (R - r_p) \quad (2)$$

若射孔相位角等于0°或180°, 则:

$$\begin{cases} R = \sqrt{A_r / \pi h_p D_s} \\ A_r = 2r_s h_p \arccos [(r_s - r_p) / \sqrt{(r_s - r_p)^2 + r_{ci}^2}] \end{cases} \quad (3)$$

若射孔相位角不等于0°或180°, 则:

$$R = \sqrt{2r_s / D_s} \quad (4)$$

2 砾石尺寸优选方法

2.1 常规砾石尺寸选择^[7]

1) Saucier 方法。该方法建立在完全挡砂机理之上, 它选用砾石的粒度中值为地层砂粒度中值的5~6倍, 即:

收稿日期: 2004-01-13

基金项目: 中石化先导项目“疏松砂岩油藏防砂工艺综合决策系统”的部分研究内容。

作者简介: 赵东伟(1961—), 男, 1990年毕业于西南石油学院采油工程专业, 1997年获石油大学(华东)油田开发工程专业工学硕士学位, 现为石油大学(华东)在读博士, 工程师。

联系电话: (0427)7812586

$$D_{50} = (5 \sim 6) d_{50} \quad (5)$$

2) Depriester 方法。该方法可以有效地防止地层砂侵入砾石充填层。如图1所示,首先在地层砂半对数筛析曲线分别找到 d_{50} 、 d_{90} 的点A、B,然后分别从A、B两点向左侧作水平线,找到点C、D,分别对应砾石筛析曲线中的 D_{50} 和 D_{90} ,条件是 $D_{50} \leq 8d_{50}$, $D_{90} \leq 12d_{90}$ 。最后通过C、D绘制砾石的筛析曲线,满足 $D_{10}/D_{90} \geq 3$,延长砾石分布曲线到累积质量分数为0和100%,覆盖的范围便为砾石的尺寸范围。

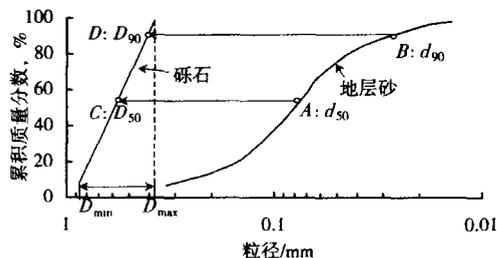


图1 Depriester方法示意图

3) Schwartz方法。该方法用地层砂的均匀程度和流体流速来确定充填砾石的尺寸。它将设计点的砾石直径与地层砂粒径的比值设为6,并作为临界比值,根据均匀系数和流体流速确定设计点。采用Schwartz方法选择砾石尺寸的步骤为:

a. 根据地层砂均匀系数C和通过筛管的流速V,由表1选择设计点和设计准则。

表1 Schwartz方法设计准则

| 选择条件 | 设计点 | 设计准则 |
|--------------------------------------|------------------|--------------------|
| $C < 5, V \leq 0.015\text{m/s}$ | D_{10}, d_{10} | $D_{10} = 6d_{10}$ |
| $10 \geq C < 5, V > 0.015\text{m/s}$ | D_{10}, d_{40} | $D_{30} = 6d_{10}$ |
| $C > 10, V > 0.03\text{m/s}$ | D_{70}, d_{70} | $D_{70} = 6d_{70}$ |

b. 根据设计准则,找到地层砂半对数筛析曲线上 d_{40} (d_{10} 或 d_{70}) 对应的设计点A,如图2所示。

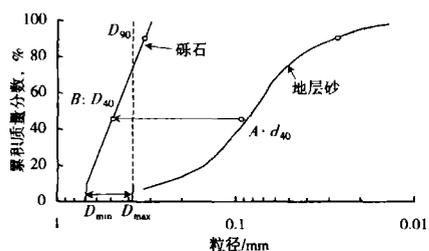


图2 Schwartz方法示意图

c. 平移A点得到6倍于设计点粒径的点B,点B即为砾石的 D_{40} (D_{10} 或 D_{70}),过点B做一条直线,即砾石筛析曲线,使满足其均匀系数即 $D_{40}/D_{90} \leq 1.5$ 。

d. 外推直线至 D_0 和 D_{100} ,得到的直线对应的粒度范围即设计的砾石尺寸范围,如图2所示。

2.2 砾石尺寸的优选

对于给定的地层砂筛析曲线,首先使用3种常用

的砾石尺寸选择方法计算得到3种砾石尺寸,然后分别分析地层砂的侵入特性,并计算油井采用这些砾石后的砾石层压降,满足挡砂效果同时压降较低的砾石尺寸即为最优结果。砾石尺寸优选程序如图3所示。

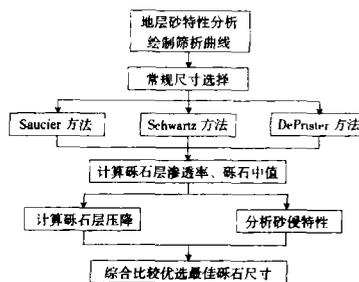


图3 砾石尺寸优选步骤

3 实例计算

孤岛油田某出砂油井采用绕丝筛管砾石充填防砂,首先对地层砂进行筛析分析,得到其 d_{10} 为0.263mm, d_{40} 为0.096mm, d_{50} 为0.08mm, d_{70} 为0.057mm, d_{90} 为0.027mm,分选系数1.634,均匀系数3.591。该井射孔密度16孔/m,孔径14mm,正常生产时液量约30t/d。

采用上述方法进行砾石尺寸优选,结果见表2。

表2 砾石尺寸选择结果对比

| 方法 | 设计点 | 砾石尺寸/mm | 砾石中值/mm | 砾石中值/砂中值 | 砂侵分析 | 砾石层渗透率/ μm^2 | 砾石层压降/MPa |
|------------|------------------|-----------|---------|----------|------|-------------------------|-----------|
| Saucier | d_{50} | 0.40~0.48 | 0.44 | 5.50 | 无入侵 | 85.2 | 2.11 |
| Depriester | d_{50}, d_{90} | 0.30~0.64 | 0.47 | 5.88 | 无入侵 | 91.4 | 2.00 |
| Schwartz | d_{40} | 0.36~0.80 | 0.58 | 7.25 | 轻微入侵 | 110.9 | 1.65 |

由表2可见,Saucier方法得到的砾石最小与最大尺寸非常接近,对砾石尺寸的要求比较苛刻,虽然地层砂难以侵入,挡砂效果较好,但砾石层压降最高,对产能的影响较大。Schwartz方法得到的砾石尺寸压降最小,但地层砂有轻微侵入,挡砂效果不理想。Depriester方法得到的砾石尺寸范围比较合理,既无地层砂的侵入,砾石层压降又适中。

该井最终选择了0.30~0.64mm砾石进行绕丝筛管砾石充填防砂作业。作业后液量保持在27t/d左右,井口含砂量长期保持低于0.3%,防砂效果较好。

4 结论

1) 砾石尺寸的选择必须同时兼顾挡砂效果与油井产能,前者可以通过分析地层砂对砾石层的侵入特性来考虑,砾石尺寸对油井产能的影响则可以用砾石层的压降来表示。考虑上述相互矛盾的两个方面,建立了砾石尺寸的综合评价方法。

2) 对于给定的地层砂筛析曲线,首先使用3种常

用的砾石尺寸选择方法计算得到3种砾石尺寸,然后分别分析其地层砂的侵入特性,并计算油井采用这些砾石后的砾石层压降。综合考虑两个方面进行砾石尺寸的评价与优选。

3) 实例计算表明,文中的砾石尺寸优选方法是可行的。

符号说明

Δp_1 为炮眼砾石层压降, Pa; Δp_2 为筛套环空砾石层压降, Pa; q_p 为单个射孔炮眼中的流量, m^3/s ; Q_p 为油井产量, m^3/s ; μ 为原油粘度, Pa·s; ρ 为原油密度, kg/m^3 ; h_p 为油层射孔段长度, m; k_g 为砾石层渗透率, m^2 ; L_p 为射孔孔眼长度, m; L 为筛套环空砾石层径向厚度, m; r_p 为射孔孔眼半径, m; D_s 为射孔密度, 孔/m; β_g 为炮眼砾石层紊流速度系数, m^{-1} ; R 为筛管上锥形扩散底面圆等效半径, m; r_{ci} 为套管内半径, m; r_s 为筛管半径, m; d_{10} 、 d_{40} 、 d_{50} 、 d_{70} 、 d_{90} 分别为地层砂筛析曲线上累积质量分数 10%、40%、50%、70%、90%对应的地层砂粒径, mm; D_{10} 、 D_{40} 、 D_{50} 、 D_{70} 、 D_{90} 分别为砾石筛析曲线上累积质量分数

10%、40%、50%、70%、90%对应的砾石粒径, mm; C 为地层砂均匀系数; V 为流体通过筛管的流速, m/s。

参 考 文 献

- [1] 董长银, 张琪, 陈平. 筛管砾石充填油井产能预测研究(1)——基本模型[J]. 石油钻探技术, 2001, 29(1): 43-45.
- [2] 董长银, 张琪, 李志芬, 等. 筛管砾石充填油井产能预测研究(1)——复杂条件下的修正[J]. 石油钻探技术, 2001, 29(2): 54-55.
- [3] 董长银, 李志芬, 张琪. 基于油井流入动志曲线的防砂井产能预测方法[J]. 石油钻探技术, 2001, 29(3): 58-60.
- [4] Oyenyin M B, et al. Investigation of pore-blocking mechanism in gravel packs in the management and control of fines migration[R]. SPE 27342, 1994.
- [5] 董长银, 张琪, 李志芬, 等. 筛管砾石充填井筒附近压降计算方法[J]. 西安石油学院学报(自然科学版), 2002, 17(2): 33-36.
- [6] 董长银, 张琪, 曲占庆, 等. 筛套环空砾石层压降的简化计算模型[J]. 石油大学学报(自然科学版), 2001, 25(2): 28-30.
- [7] 何生厚, 张琪. 油气井防砂理论及其应用[M]. 北京: 中国石化出版社, 2003.

A New Model for Gravel Size Evaluation and the Optimization

Zhao Dongwei, Dong Changyin, Zhang Qi

(College of Petroleum Engineering, University of Petroleum (Huadong), Dongying, Shandong, 257061, China)

Abstract: The gravel size decision is the key step of successful gravel-packing sand control. Coarse gravels are helpful to obtain higher productivity, but it maybe leads to serious formation sand invasion. Fine gravel size can block formation sand well, but it has passive influence on well productivity. The sand blocking effect and Influence on productivity are evaluated by analyzing the invasion characteristic of formation sand into gravel pack and the calculation of pressure drop across gravel pack. Then a new integrated evaluation method for gravel size is evolved. The optimum gravel size is decision by comparing the three gravel size results, which are obtained by three normal gravel size decision methods, that is, Saucier, Depriester and Schwartz.

Key words: gravel pack; gravel size decision; sand control

ProVISION 随钻测井系统

ProVISION 是斯伦贝谢公司的随钻测井系统,其应用范围:根据随钻实时测得的实时渗透率及自由和束缚流体体积进行地质导向;在无放射源的情况下测量孔隙度;在钻井期间做出完井、侧钻或封堵与放弃的决定,以便节省钻机时间;随钻实时指示产能,预测含水量,直接探测油气。

其优点:优化井眼轨迹,使产能尽可能达到最高;准确地识别储集岩和流体类型;改善射孔、油藏强化处理及完井设计;测量分辨率高,可以探测薄层油气,探测深度大;能在恶劣环境下给出测量结果。

其特点:采用大功率涡轮,测量作业对钻井无影响;天线开口为152.4mm,探测直径为355.6mm;可实时传输数据;可以置于钻具组合的任何位置;加速度计与磁力计用于测量具有井底钻具组合的运动特性。

目前该系统已在世界各地成功进行了47次测量,在油基或水基钻井液,软地层和硬地层,油、气或水合物地层等环境条件下进行了核磁共振测量。