

文章编号:1673-5005(2006)05-0057-05

砾石充填防砂工艺参数优化设计

董长银¹, 张琪¹, 孙炜², 王明³

(1. 中国石油大学 石油工程学院, 山东 东营 257061; 2. 玉门油田公司 采油工艺研究所, 甘肃 玉门 735200;
3. 新疆油田分公司, 新疆 克拉玛依 834000)

摘要:砾石充填防砂已经成为目前主要的防砂工艺, 主要包括管内砾石充填、高压一次充填、涂敷砂人工井壁等防砂方法。砾石尺寸、携砂比、泵注排量等参数的设计是影响此类防砂工艺成败和防砂效果的主要因素。通过砾石层孔喉结构计算机模拟, 以孔喉结构分布曲线与地层砂粒径分布曲线接近且略小的砾石作为最佳挡砂砾石, 研究出一套新的砾石充填并砾石尺寸优选方法, 提出了具体的携砂比、泵注排量、机械筛管尺寸的设计方法。对涩北某气井进行了高压砾石充填设计, 施工后防砂效果较好。

关键词:砾石充填; 砾石尺寸; 孔喉模拟; 临界排量; 携砂比; 优化设计

中图分类号: TE 358.1 **文献标识码:** A

New considerations in optimization design of sand control methods concerning gravel pack

DONG Chang-yin¹, ZHANG Qi¹, SUN Wei², WANG Ming³

(1. College of Petroleum Engineering in China University of Petroleum, Dongying 257061, Shandong Province, China;
2. Research Institute of Production Technology of Yumen Oilfield Company, Yumen 735200, Gansu Province, China;
3. Xinjiang Oilfield Branch Company, Karamay 834000, Xinjiang Uygur Autonomous Region, China)

Abstract: Gravel pack is widely applied to the sand control methods, which concern inside-casing gravel pack, high-rate gravel pack and coated gravel pack. Gravel size, sand concentration and pumping rate are the key factors for the successful job and good sand control effect, and are the main parameters to be focused on the design of the above sand control methods. The gravel pack throats construction was simulated by computer and a new program to optimize gravel size was put forward. The throat diameter distribution curve of the optimum gravel size should be close to or less than the sieved curve of formation sand. The design program for sand concentration, critical pumping rate and mechanical screen parameters was established. The new model was applied to a gas well with sand control method of high-rate gravel pack, and the effect is very well.

Key words: gravel pack; gravel size; throat construction simulation; critical pumping rate; sand concentration; optimization design

砾石充填防砂是指涉及使用砾石、陶砾等固相颗粒充填到并筒或地层中的防砂工艺, 主要包括管内砾石充填、高压一次充填、涂敷砂人工井壁等方法。此类方法具有挡砂效果好、有效期长等优点, 目前已成为国内外疏松砂岩油气田的主流防砂工艺。但上述优点是建立在对工艺参数合理设计的基础之上的。由于此类防砂工艺施工相对复杂、成本较高, 因此对施工工艺参数进行优化设计进而获得好的防

砂效果尤为必要。目前针对此类防砂工艺的参数设计存在一些共性的问题, 如砾石尺寸、携砂比、泵注排量或泵注程序等的优化。这些参数的设计都会直接影响能否顺利施工以及后续的防砂效果。笔者提出一套新的砾石尺寸选择方法和程序, 适用于全部砾石充填类防砂工艺, 并提出携砂比、泵注排量和机械筛管尺寸的设计方法。

收稿日期: 2006-06-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50274055)

作者简介: 董长银(1976-), 男(汉族), 河南卫辉人, 讲师, 博士, 主要从事采油(气)工程、固液两相流、油气井防砂等方面的教学与科研工作。

1 基于孔喉模拟的砾石尺寸优选方法

1.1 现有的砾石尺寸选择方法

砾石尺寸的优化对砾石充填防砂至关重要。挡砂效果与产量是相互矛盾的两个方面,都受砾石尺寸的制约。砾石尺寸过小,虽然能够有效挡砂,但可能导致较高的砾石层压降,从而对产量影响较大^[1];反之虽可获得高产,但挡砂效果不好。目前,国内砾石尺寸的选择主要使用 Saucier 方法^[2],该方法使用的地层砂信息只包括粒度中值,粒度中值只代表了地层砂的大概特征,无法反映粒度范围、分布及均匀性等具体特征。文献[2]中考虑了砾石尺寸对防砂后产量的影响以及地层砂对砾石层的侵入特性,其尺寸选择方法还是使用常规 Saucier、DePister 和 Schwartz 等方法,对这些方法进行对比后选择其一。

1.2 砾石层孔喉结构模拟

与现有的砾石尺寸优选方法不同,笔者以砾石层孔喉模拟为基础,考虑砾石层孔喉尺寸分布与地层砂分布的匹配,建立一种新的砾石尺寸选择方法。

砾石层孔喉直径是指砾石层孔隙中能够容纳的最大球形颗粒的直径。对于单一粒径的砾石,通常假设理想密实充填,根据砾石尺寸其孔喉直径可以很容易地通过几何关系计算得到。但实际上,由于砾石颗粒的随机充填,砾石层的孔喉直径并不是均匀的;对于非等粒径的砾石更是如此。这样,砾石沉积形成的砾石层孔喉尺寸具有一定的分布特征。对于阻挡地层砂的砾石层而言,如果孔喉结构分布与地层砂尺寸分布匹配得当,则可以起到很好的挡砂效果(图1)。

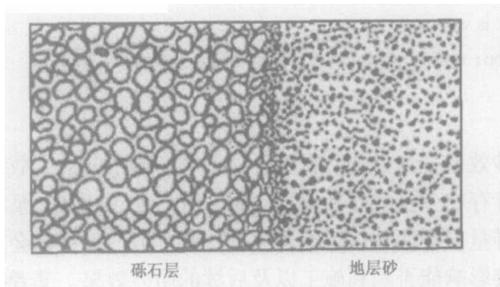


图1 砾石层阻挡地层砂的桥架机理

砾石层孔喉模拟是通过砾石沉降的二维计算机随机模拟手段,模拟砾石沉降过程,得到砾石层的可视化充填结构及其孔喉结构,计算得到其孔喉尺寸的分布情况,进而用于砂侵分析和砾石尺寸的选择^[3]。

1.3 砾石尺寸选择方法

利用计算机孔喉结构模拟,获得砾石层的孔喉

尺寸特征,利用这一手段可以针对给定的地层砂选择合适的砾石尺寸。砾石尺寸设计步骤如下:

- (1)对于给定的地层砂,绘制其质量分数分布曲线。
- (2)根据地层砂的粒度中值,在工业砾石标准中初步选择若干种匹配(砾砂中值比为5~8)的砾石。
- (3)假设砾石粒径服从正态分布,据此确定每种砾石的颗粒尺寸分布规律。
- (4)对每种砾石分别进行计算机孔喉结构模拟,绘制孔喉尺寸分布曲线。
- (5)将每种砾石的孔喉尺寸分布曲线与地层砂筛析曲线绘制在一起。
- (6)选择砾石尺寸,与地层砂尺寸分布曲线相近且小于地层砂筛析曲线的孔喉尺寸曲线所代表的砾石尺寸为最佳。这样保证砾石层孔喉尺寸在整个分布范围内均小于地层砂尺寸。虽然较小尺寸的地层砂粒仍可通过,但由于桥架作用,这些能够通过的地层砂会很少,从而达到较好的挡砂效果。

2 管外充填排量与携砂比的设计

管外砾石充填顺利施工的关键是保证携砂液能够将砾石顺利携带通过水平射孔炮眼,达到管外亏空区域。携砂液在射孔孔眼内的流动属于水平管流,由于固相砾石的沉降特性,砾石颗粒容易在射孔孔眼入口端发生沉降,严重时会造成射孔孔眼,使后续砾石难以被携带到管外地层,如图2所示。

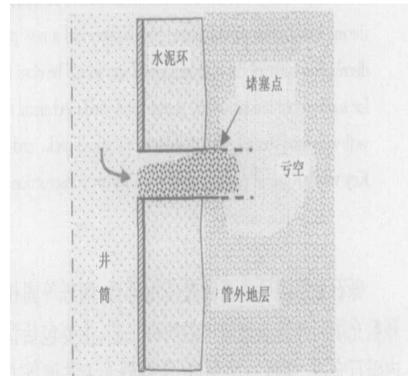


图2 砾石充填孔眼堵塞示意图

为了保证砾石顺利充填到地层中,携砂液必须有足够的砾石携带能力,这取决于流速(充填排量)、携砂比和携砂液粘度,在给定其他参数的条件下,排量越大,越不容易产生堵塞,但充填排量过大也会造成地层介质的二次损害,这样就存在一个不发生堵塞的临界排量。充填排量略高于临界排量即可。

给定砾石与携砂液特性以及携砂比的情况下,

关于充填临界排量目前主要有 3 种计算方法。

(1) 沉降时间法。这种方法考虑砾石颗粒要顺利通过水平射孔孔眼,并保证砾石在沉降到孔眼底部之前已经被携砂液携带到孔眼末端。砾石充填过程中射孔孔眼中不产生沉积堵塞的地面最小临界排量为

$$Q_c = \frac{L_p D_p}{2} H_p S_D \sqrt{\frac{4}{3} \left[\frac{\rho_s}{\rho_l} - 1 \right] g d_g \frac{1}{C_d} (1 - C_s)^m}$$

其中

$$m = \left[2.4 + \frac{2.5}{1 + 5 d_g^2} \right] \left[\frac{C_s}{0.2} \right]^{-0.1}$$

式中, L_p 为射孔孔眼长度, m; D_p 为射孔孔眼直径, m; H_p 为射孔井段长度, m; S_D 为射孔孔眼密度, m^{-1} ; ρ_s 为砾石密度, kg/m^3 ; ρ_l 为携砂液密度, kg/m^3 ; d_g 为砾石平均粒径, mm; C_s 为砾石体积分数; C_d 为阻力系数; Q_c 为充填最小临界排量, m^3/s 。

(2) Durand 方法。该方法通过水平固液两相淤积流动实验得到水平管中不形成沉积砂床的临界流速公式^[4], 可用来预测水平射孔孔眼中的最小临界流速:

$$v_c = F_L \left[2 g d_g \frac{\rho_s - \rho_l}{\rho_l} \right]^{1/2}$$

根据射孔孔眼直径、孔眼密度及井段长度, 对应的地面最小临界充填排量为

$$Q_c = H_p S_D \frac{D_p^2}{4} v_c \quad (1)$$

式中, F_L 是与颗粒直径、体积分数有关的系数, 确定方法见文献[4]; v_c 为炮眼中液体的临界流速, m/s 。

(3) Gruesbeck C 方法。该方法是在水平管中进行固液流动有沉积砂床存在时的平衡试验^[5], 回归得到当沉积砂床高度不变即达到平衡状态时的临界流速的经验关系:

$$v_c^* = 15 v_t \left[\frac{D v_t}{\mu_l} \right]^{0.39} \left[\frac{d_g v_t}{\mu_l} \right]^{-0.73} \times \left[\frac{\rho_s - \rho_l}{\rho_l} \right]^{0.17} (C_g^*)^{0.14} \quad (2)$$

式中, v_t 为砾石颗粒在携砂液中的沉降末速, m/s ; μ_l 为携砂液粘度, $Pa \cdot s$; D 为沉积砂床上部流动空间的当量直径, m; C_g^* 为沉积砂床上部空间的砂体积分分数; v_c^* 为平衡状态下砂床上部空间的平衡流速, m/s 。

式(2)表征的是有沉积砂床存在并达到平衡状态时的砂床顶部空间流速与砂床几何特征及砂的体积分数的关系, 该关系式可用来预测水平射孔孔眼中不产生堵塞所需的最小临界流速。对于砾石充填防砂施工时水平射孔孔眼的情况, 为获得更大的安全系数, 可假设水平孔眼中不产生任何沉积, 砂床高度为零, 此时对应的流动水力直径等于孔眼直径, 即 $D = D_p$, 而孔眼中的砾石颗粒浓度等于地面携砂比, 即 $C_g^* = C_s$ 。

根据上述分析, 将 $D = D_p$, $C_g^* = C_s$ 代入式(2)可得到水平射孔孔眼中不产生沉积砂床(堵塞)的最小临界流速为

$$v_c = 15 v_t \left[\frac{D_p v_t}{\mu_l} \right]^{0.39} \left[\frac{d_g v_t}{\mu_l} \right]^{-0.73} \times \left[\frac{\rho_s - \rho_l}{\rho_l} \right]^{0.17} (C_s)^{0.14} \quad (3)$$

将式(3)代入式(1)可计算对应的地面临界排量。

取涩北气田 10 井次砾石充填防砂施工成功并且效果较好的实际充填参数与上述 3 种方法的设计参数进行对比, 结果见表 1, 方法(1)~(3)计算排量的平均相对误差分别为 12.7%, 21.1%和 27.0%。

表 1 充填排量实际施工值与设计值的对比

井号	射孔井段长 H_p/m	孔眼密度 $S_D/(m^{-1})$	实际施工参数		计算排量 $Q_{is}/(m^3 \cdot min^{-1})$		
			平均砂比 C /%	平均排量 $Q_{av}/(m^3 \cdot min^{-1})$	方法(1)	方法(2)	方法(3)
2-5	10.7	30	10.50	1.40	1.60	1.66	1.74
2-9	17.9	30	9.60	1.50	1.64	1.85	2.00
2-14	11.6	20	10.00	1.46	1.32	1.64	1.64
3-13	10.6	20	17.10	1.27	1.35	1.53	1.85
3-21	9.2	25	8.70	1.50	1.28	1.68	1.51
4-8	17.5	20	10.00	1.45	1.65	1.70	1.89
4-9	8.1	16	15.00	1.50	1.23	1.85	1.02
23	6.3	10	11.25	1.33	1.08	1.60	0.95
25	9.7	16	9.20	1.20	0.97	1.328	1.03
30	9.0	16	12.20	0.82	0.85	1.25	1.22

方法(1)的误差相对较小, 在进行施工排量设计时优先使用。值得注意的是, 上述结论仅是根据某一油气田的情况得到的, 在进行具体的优化设计时, 可

收集本油田成功的设计案例, 使用不同的方法进行对比筛选, 选择最准确的方法进行设计。

对携砂比的设计, 目前基本使用经验法。管外

挤压充填排量推荐使用砂比为 10% ~ 15%, 对于管内循环充填, 一般取 10% 左右的砂比即可。

3 机械筛管设计

3.1 机械筛管缝宽(挡砂精度)设计

机械筛管主要用来支撑砾石层, 同时筛缝提供流体入井的通道, 通常使用的机械筛管主要有绕丝筛管、割缝衬管和金属棉滤砂管。一旦选定了砾石尺寸, 便可确定机械筛管的缝宽或挡砂精度。

绕丝筛管的缝隙尺寸应略低于充填砾石的最小尺寸, 即

$$w_s = \left[\frac{1}{2} \sim \frac{2}{3} \right] d_{gmin}$$

推荐采用 2/3 计算。根据计算结果选择较接近的系列尺寸即可。

对于割缝衬管, 缝宽确定式为

$$w_s = 2 d_{g10}$$

对于金属棉滤砂管, 缝宽确定式为

$$w_s = \left[\frac{1}{3} \sim \frac{1}{2} \right] d_{gmin}$$

式中, d_{gmin} 为砾石最小直径, mm; d_{g10} 为砾石筛析曲线上累积质量百分数为 10 时对应的砾石直径, mm; w_s 为机械筛管的缝宽(挡砂精度), mm。

在具体设计时, 计算出理论值后, 在机械筛管工具系列值中选定最接近的缝宽(挡砂精度)即可。

3.2 机械筛管规格设计

机械筛管的直径也是一个很重要的参数, 筛管

与套管之间的环空厚度对挡砂效果和产量都有影响。但计算表明, 对于砾石充填井, 筛套环空砾石层的流动压降与射孔孔眼砾石层的压降相比非常小^[2], 因此增大环厚度几乎不会对产量造成影响, 反而会提高挡砂效果和充填的稳定性。推荐砾石充填环形空间的径向厚度最小为 20 mm, 应尽可能大, 即绕丝筛管的直径应尽可能小。

4 实例分析

涩北气田一口出砂井, 井深 1508 m, 射孔密度 30 m^{-1} 。拟采用高压砾石充填防砂。该井地层砂特征尺寸为 $d_{10} = 0.151 \text{ mm}$, $d_{40} = 0.082 \text{ mm}$, $d_{50} = 0.065 \text{ mm}$, $d_{70} = 0.032 \text{ mm}$, $d_{90} = 0.008 \text{ mm}$, 分选系数为 2.043, 均匀系数为 10.036, 标准偏差系数为 0.231, 地层砂筛析曲线如图 3 所示。

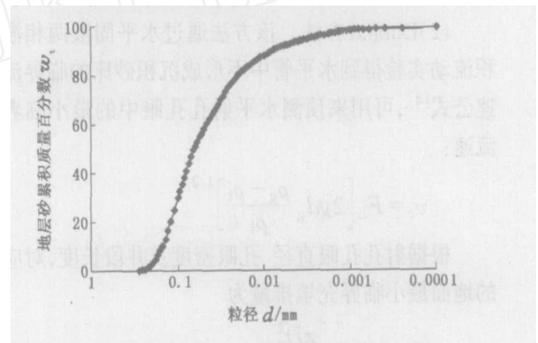


图 3 涩北某井地层砂筛析曲线

根据 1.2 的计算方法, 初步选择 0.25 ~ 0.42 mm, 0.30 ~ 0.42 mm, 0.42 ~ 0.58 mm, 0.4 ~ 0.8 mm 4 种砾石。0.4 ~ 0.8 mm 砾石层孔喉结构模拟图像如图 4 所示。

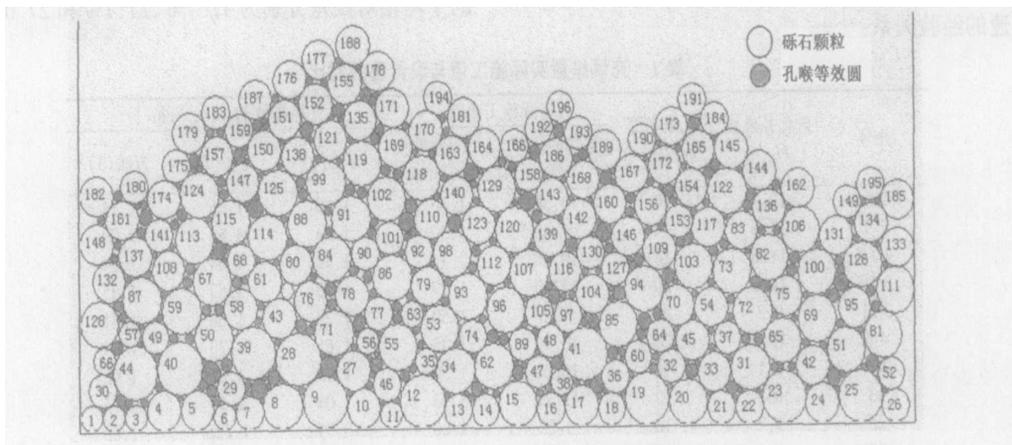


图 4 0.4 ~ 0.8 mm 砾石孔喉结构模拟图像

分别模拟上述其他 3 种砾石的孔喉结构, 并统计孔喉等效圆的粒径与数量分布, 进行类似于筛析

的统计分析, 得到孔喉直径分布曲线。将 4 种砾石的孔喉分布曲线与地层砂的质量分数分布曲线绘制

在一起,如图5所示。0.40~0.80 mm砾石孔喉分布曲线与地层砂曲线非常接近,可作为最佳设计结果。

该井采用淡盐水作为携砂液,砾石采用石英砂,二者密度分别为 1 g/cm^3 和 2.632 g/cm^3 ;携砂液粘度约为 $1.1\text{ mPa}\cdot\text{s}$ 。根据射孔参数,使用临界排量计算方法(1),计算得到的最小临界排量随携砂比的变化曲线如图6所示。

由图6可以看出,临界排量随携砂比的增大而增大。设计管外砾石充填平均携砂比为13%,对应的临界排量约为 500 L/min 。根据充填排量略大于最小临界排量的原则,设计施工排量为 $600\sim 1000\text{ L/min}$ 。

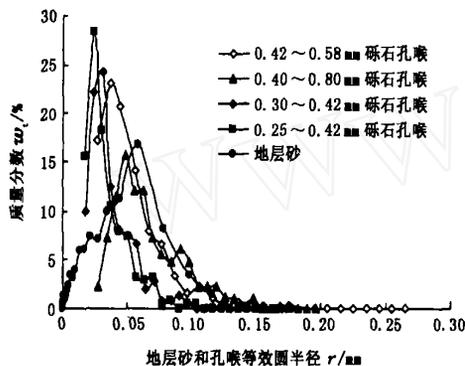


图5 涪北某井以孔喉结构模拟方法选择砾石尺寸

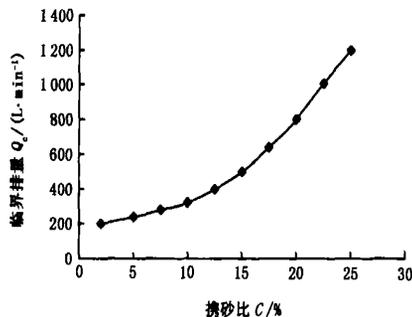


图6 最小临界排量随携砂比的变化曲线

机械筛管选用绕丝筛管,最小砾石直径为 0.4 mm ,计算得到筛管缝宽理论值为 0.267 mm ,根据绕丝筛管缝宽规格系列,标定缝宽为 0.25 mm 。其他参数的设计结果为主体筛管总长 25.6 m ,砾石总用量 16.82 m^3 ,携砂液用量 112 m^3 。按照上述设计参数进行高压砾石充填施工,施工过程顺利。生产条件下,单位生产压差的产气量由防砂前的 $4.173\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 下降为 $3.689\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$,产能降低率为 11.6% ,但允许放大压差生产,产量可提高到 $(4.7\sim 5.0)\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$,防砂效果良好。

5 结论

(1)对于砾石充填防砂,砾石尺寸关系到挡砂效果和防砂后产能,能否顺利施工主要取决于携砂比、充填排量等施工参数的设计。

(2)从挡砂机理出发,充分考虑地层砂及砾石的粒径分布以及随机沉降特征,研究出了一套新的砾石充填并砾石尺寸优选方法。

(3)孔喉结构分布曲线与地层砂粒径分布曲线接近且略小的砾石可作为最佳挡砂砾石。

(4)对于砾石充填防砂的充填排量,存在一个合理值,这个合理值应略高于保持孔眼中不产生堵塞的最小临界排量,但不是越高越好。

参考文献:

- [1] 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.
DONG Chang-yin, ZHANG Qi, QU Zhan-qing, et al. A simplified method for predicting pressure drop across gravel pack[J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 2001, 25(2): 28-30.
- [2] 赵东伟,董长银,张琪. 砾石充填防砂砾石尺寸优选方法[J]. 石油勘探技术,2004,32(4):63-65.
ZHAO Dong-wei, DONG Chang-yin, ZHANG Qi. A new model for gravel size evaluation and the optimization[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2004, 32(4): 63-65.
- [3] 薄启炜,董长银,张琪,等. 砾石充填层孔喉结构可视化模拟[J]. 石油勘探与开发,2003,30(4):108-110.
BO Qi-wei, DONG Chang-yin, ZHANG Qi, et al. Visual simulation of porous structure in packed gravels[J]. Petroleum Exploration and Development, 2003, 30(4): 108-110.
- [4] 李爱芬,付继续,陈月明,等. 垂直井砾石充填防砂最小排量的确定方法[J]. 石油大学学报:自然科学版,2003,27(4):62-65.
LI Ai-fen, FU Ji-tong, CHEN Yue-ming, et al. Determination method for minimum flow rate of gravel pack in vertical well[J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 2003, 27(4): 62-65.
- [5] GRUESBECK C, SALATHIEL W M, ECHOLS E E. Design of gravel packs in deviated wellbores[J]. JPT, 1979, 31(1):109-115.

(编辑 李志芬)