

# 充填类防砂砾石尺寸设计方法的对比分析

刘春苗<sup>1</sup> 李志芬<sup>2</sup> 董长银<sup>1</sup> 田继东<sup>1</sup> 张晓斌<sup>1</sup>

(1. 中国石油大学(华东)石油工程学院, 山东 青岛 266555;

2. 中国石油大学(华东)期刊社, 山东 东营 257061)

**摘要:** 砾石尺寸设计是砾石充填类防砂设计的关键步骤之一, 砾石尺寸的大小会影响防砂效果和油气井生产动态。对目前国内外的砾石尺寸设计方法进行了综述, 并对这些方法进行了分类和剖析, 得到了 DePriester 和 Schwartz 两种方法的程序化计算步骤, 并给出了部分参数的推荐取值。在此基础上, 结合实例, 对上述设计方法的设计结果进行了对比和分析, 总结了各自的优缺点及适应性。

**关键词:** 防砂; 砾石充填; 砾石尺寸; 优化设计

中图分类号: TE358 文献标识码: B 文章编号: 1008-9446(2011)03-0020-05

## Analysis and Comparison of Present Gravel Size Models for Gravel-Packing Sand Control

LIU Chun-miao<sup>1</sup>, LI Zhi-fen<sup>2</sup>, DONG Chang-yin<sup>1</sup>, TIAN Ji-dong<sup>1</sup>, ZHANG Xiao-bin<sup>1</sup>

(1. College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum, Qingdao 266555, Shandong, China; 2. Journal Office, China University of Petroleum, Dongying 257061, Shandong, China)

**Abstract:** Gravel size greatly affects sand control effect and well performances, and its decision is one of the key step for designing optimization of sand control concerning gravel-packing. In this work, almost all of the gravel size models, which involve Karpoff, Smith, Tausch&Corley, Saucier, DePriester, Schwartz model and the model based gravel pack throats simulation from reference 4<sup>th</sup>, are summarized and re-analyzed. For more convenient usage, the programmable design procedures and the recommended parameter scope for DePriester and Schwartz models are worked out. By a case study, in which all of the models are used to design gravel size by the same formation sand sieved data, the design results of all models are compared and each model's characteristics and adaptabilities are made clear.

**Key words:** sand control; gravel-packing; gravel size; design optimization

砾石充填类防砂是目前主流的防砂工艺, 砾石尺寸设计是砾石充填类防砂设计的关键步骤之一, 砾石尺寸的大小会影响防砂效果和油气井生产动态。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<sup>[1]</sup>; 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。砾石尺寸选择的目标就是选定的砾石不但具有良好的挡砂效果, 而且能够避免砂侵, 从而具有较高的渗透性<sup>[2-4]</sup>。基于这一目的, 国内外学者提出了多种砾石尺寸设计方法。本文将对这些方法分为三类进行综述、分类和剖析, 给出了程序化设计方法以及部分参数的推荐取值。

## 1 第一类砾石尺寸设计方法

为便于叙述, 统一约定如下符号:  $N$  为砾石或地层砂累重半对数筛析曲线上的累重百分比, %;  $d_N$ 、 $D_N$  分别表示地层砂和砾石的累重半对数筛析曲线上的累重百分比所对应的粒径, mm。

收稿日期: 2011-05-10

作者简介: 刘春苗(1986-) 男, 山东费县人, 中国石油大学(华东)油气田开发工程专业在读硕士研究生, 主要从事采油工程理论与技术、油气井防砂等方面的学习和研究工作。

第一类砾石尺寸设计方法设计依据简单,一般仅根据地层砂的某一特征尺寸就可以设计得到应采用的砾石尺寸范围。这些方法主要包括 Karpoff、Smith、Tausch&Corley 以及 Saucier 方法等。

### 1.1 Karpoff 方法

Karpoff 方法是根据地层砂均匀系数  $C_s$  和粒度中值  $d_{50}$  确定砾石尺寸范围<sup>[5]</sup>,公式如下

$$\begin{cases} D_{gmin} = 5 \cdot d_{50} & D_{gmax} = 10 \cdot d_{50} & C_s < 3, \\ D_{gmin} = 4 \cdot d_{50} & D_{gmax} = 8 \cdot d_{50} & C_s \geq 3. \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $D_{gmin}$ 、 $D_{50}$ 、 $D_{gmax}$  分别为砾石的最小粒径、粒度中值和最大粒径, mm。

Karpoff 方法认为,当地层砂均匀性较好时( $C_s < 3$ ),砾石的粒径可以适当地选择大一些;相反,则选择稍细的砾石。

### 1.2 Smith 方法

Smith 根据自己对水井所进行的研究认为,当砾石-地层砂粒度中值比(Gravel Sand Ratio, GSR) < 4 时,充填层太致密;而当  $GSR \geq 7$  时,地层砂会侵入砾石层,因此,认为砾石-地层砂的最佳匹配粒度中值比应为 5<sup>[5]</sup>,即

$$D_{50} = 5 \cdot d_{50} \quad (2)$$

Smith 方法只给出了砾石的粒度中值,并没有给出尺寸的范围。

### 1.3 Tausch&Corley 方法

Tausch 和 Corley 方法<sup>[5]</sup>是第一类方法中惟一使用  $d_{10}$  作为砾石尺寸设计点的设计方法,建议确定砾石尺寸范围的公式如下

$$\begin{cases} D_{gmin} = 4 \cdot d_{10} \\ D_{gmax} = 6 \cdot d_{10} \end{cases} \quad (3)$$

### 1.4 Saucier 方法

Saucier 的研究建立在完全挡砂机理上,奠定了现代砾石尺寸设计的基础。其选择原则<sup>[5-6]</sup>为

$$D_{50} = (5 \sim 6) \cdot d_{50} \quad (4)$$

建议对于较细或不均匀的地层砂,公式(4)可选择下限;而对于较粗或较均匀的地层砂,可选择其上限。

第一类砾石尺寸设计方法的共同特点是仅仅使用地层砂的某一特征尺寸,设计与使用简单。该方法尤其是 Saucier 方法,在我国疏松砂岩油气藏开发及油气井防砂工作开展的初期,在缺乏丰富的地层砂分析资料时发挥了较大的作用。但任何一种方法都会有其局限性,例如没有利用地层砂筛析曲线更多的信息、没有考虑生产条件等。使用该设计方法后,防砂效果较差的井例也不乏存在。

## 2 第二类砾石尺寸设计方法

第二类砾石尺寸设计方法设计的依据为地层砂的累重半对数筛析曲线以及其它的相关信息,考虑的因素较多,设计过程也相对复杂一些。此类方法主要包括 DePriester 模型和 Schwartz 模型。

### 2.1 DePriester 设计模型

DePriester 砾石尺寸设计方法<sup>[5]</sup>于二十世纪七十年代提出,之后迅速被认可并广泛应用<sup>[3,5]</sup>。DePriester 方法必须依赖地层砂筛析曲线才能使用。其图解法设计步骤在文献[3,5]中有详细叙述。

为了剖析 DePriester 方法的实质并便于计算程序化,对该设计方法进行了重新的推导与剖析,并改进了其中各限制条件之间的矛盾之处,给出了相关参数的推荐取值。

将其设计步骤中的条件分别改为  $D_{50} = A \cdot d_{50}$ 、 $D_{90} = B \cdot d_{90}$ 、 $C_{min} \leq D_{10}/D_{90} \leq C_{max}$ ,其中  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $C_{min}$ 、 $C_{max}$  为相关系数或常数,  $A \leq 8$ ,  $B \leq 12$ 。得到 DePriester 方法的程序化设计步骤如下:

a) 确定相关系数的取值。根据 Saucier 的研究成果<sup>[6]</sup>,推荐  $A$  的取值范围为 5~6,满足 DePriester 方法  $A < 8$  的要求;根据目前标准砾石粒径范围的统计结果,系数  $C_{min}$  可取 1.5,系数  $C_{max}$  可取 3.0。

b) 利用公式(5)计算系数  $B$  的取值范围  $B_{min}$  和  $B_{max}$ 。

$$\begin{cases} B \in [B_{\min}, B_{\max}] \\ B_{\min} = 10 \left[ -\frac{1}{2} \lg C_{\max} - \lg \left( \frac{d_{90}}{d_{50}} \right) + \lg A \right] \\ B_{\max} = 10 \left[ -\frac{1}{2} \lg C_{\min} - \lg \left( \frac{d_{90}}{d_{50}} \right) + \lg A \right] \end{cases} \quad (5)$$

c) 在  $[B_{\min}, B_{\max}]$  中任取一  $B$  值 推荐取  $B = \frac{1}{2}(B_{\min} + B_{\max})$  ,使用式(6) 计算参数  $k$  和  $b$ 。

$$\begin{cases} k = \frac{40}{\lg \frac{B}{A} + \lg \frac{d_{90}}{d_{50}}} \\ b = 50 - k \cdot \lg(A \cdot d_{50}) \end{cases} \quad (6)$$

其中:  $k$ 、 $b$  分别为以对数坐标为横坐标的直角坐标系中砾石尺寸分布直线的斜率与截距。

d) 利用公式(7) 计算给定  $B$  值下的砾石最大、最小尺寸。

$$\begin{cases} D_{g\min} = 10^{\frac{100-b}{k}} \\ D_{g\max} = 10^{-\frac{b}{k}} \end{cases} \quad (7)$$

e) 分别取  $B = B_{\min}$ 、 $B = B_{\max}$  ,分别计算得到砾石最小、最大尺寸的可选范围。

根据推导与剖析 ,DePriester 的原始描述中只要求  $B \leq 12$  ,这显然是不全面的。根据上述步骤 ,只要确定了系数  $A$  和  $k$  ,系数  $B$  的取值范围也就已经确定。

使用 DePriester 砾石尺寸设计方法得到的砾石尺寸范围的结果并不是惟一的。设计结果首先取决于系数  $A$  的取值和系数  $B$  的取值范围。之后设计结果还取决于系数  $B$  的取值。在  $B$  的取值范围内 ,任取一个系数  $B$  的值都可以得到一个砾石尺寸范围。因此 ,DePriester 方法的设计结果是一个推荐范围 ,而不是一个固定的砾石尺寸范围 ,这样为现场应用提供了更大的选择余地。

### 2.2 Schwartz 砾石尺寸设计方法

Schwartz 方法<sup>[3-5]</sup> 同样必须依赖地层砂筛析曲线才能使用 ,它根据地层砂的均匀程度和流体的流速来确定设计点。将半对数地层砂累积重量百分数曲线上砾石 - 地层砂直径比为 6 作为设计准则。

为了便于计算程序化 根据原始文献的描述 ,重新对 Schwartz 砾石尺寸设计模型进行了推导与剖析。为推导和叙述方便 ,将其设计步骤中的限制条件改变为  $C_{\min} \leq C_g = \frac{D_{40}}{D_{90}} \leq C_{\max}$  ,其中  $C_{\min}$ 、 $C_{\max}$  为砾石均匀系数的可取值范围 , $C_g$  为砾石均匀系数 , $C_{\max} = 1.5$  , $C_{\min}$  的取值有待进一步讨论。最后得到 DePriester 方法的程序化设计步骤如下:

a) 选择设计点。在实际应用中建议可不使用流体流速条件 ,只考虑地层砂的均匀性。这样使得设计点的选择条件封闭 ,并且模型可用于气井。

$$\begin{cases} E = 10, C_s < 5, \\ E = 40, 10 > C_s > 5, \\ E = 70, C_s > 10. \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $E$ —设计点对应的累重百分比 ,%。

b) 确定相关系数的取值。  $C_{\max}$  取 1.5; 根据砾石半对数筛析曲线上  $D_{40}$  和  $D_{90}$  的定义 ,必有  $D_{40}/D_{90} > 1.0$  ,即  $C_{\min} \geq 1.0$ 。根据目前标准砾石粒径数据的统计结果 ,建议  $C_{\min}$  取 1.2。

c) 利用公式(9) 计算参数  $k$  的取值范围  $k_{\min}$  和  $k_{\max}$  :

$$\begin{cases} k \in [k_{\min}, k_{\max}] \\ k_{\min} = -\frac{50}{\lg C_{\min}} \\ k_{\max} = -\frac{50}{\lg C_{\max}} \end{cases} \quad (9)$$

d) 在  $[k_{\min}, k_{\max}]$  中任取一  $k$  值, 推荐取  $k = \frac{1}{2}(k_{\min} + k_{\max})$ , 使用式(10) 计算参数  $b$ 。

$$b = E - k \cdot \lg(6 \cdot d_E) \quad (10)$$

式中:  $d_E$ —设计点地层砂粒径, mm;  $E$ —设计点对应的累重百分比, %。

e) 确定了  $k$  和  $b$  后, 利用公式(11) 计算砾石最大、最小尺寸  $D_{g\max}$  和  $D_{g\min}$ 。

$$\lg D_{g\min} = \frac{100 - [E - k \cdot \lg(6 \cdot d_E)]}{k}$$

$$\lg D_{g\max} = \frac{0 - [E - k \cdot \lg(6 \cdot d_E)]}{k} \quad (11)$$

f) 分别取  $k = k_{\min}$ 、 $k = k_{\max}$ , 计算得到砾石最小、最大尺寸的可选范围。

与 DePriester 方法类似, Schwartz 砾石尺寸设计方法的计算结果也是一个选择范围。该范围的大小首先取决于砾石均匀系数限制条件  $C_{\min}$  和  $C_{\max}$  的取值。

DePriester 与 Schwartz 砾石尺寸设计模型均需要使用地层砂筛析曲线, 要求比较丰富的基础数据信息。由于早期缺乏此类信息或数据, 该类方法应用受到了限制。随着地层砂基础分析等工作的逐步规范化, 此类方法已受到足够的重视。

### 3 基于砾石层孔喉结构模拟的砾石尺寸选择方法

与现有的砾石尺寸优选方法不同, 文献[6]另辟蹊径, 以砾石层孔喉模拟为基础<sup>[7]</sup>, 考虑砾石层孔喉尺寸分布与地层砂分布的匹配, 建立一种全新的砾石尺寸选择方法。

该方法属于一种新型的砾石尺寸选择方法, 手段比较先进, 但问题在于, 如何确定地层砂尺寸分布曲线与砾石层孔喉尺寸分布曲线两者的匹配关系, 才能使防砂效果达到最好。文献[6]提出以“砾石层孔喉尺寸分布曲线接近并小于地层砂筛析曲线”作为选取原则, 但目前这一原则并没有得到更充分的论据支撑。

### 4 各方法的设计结果对比与分析

为了比较各方法的设计结果的差异, 选取某气井的地层砂数据, 使用 DePriester 方法进行砾石尺寸设计, 结果如图 1 所示。该井地层砂为粉细砂, 图 1 中的曲线 D 为其筛析曲线, 经粒度分析,  $d_{10}$  为 0.151 mm,  $d_{40}$  为 0.082 mm,  $d_{50}$  为 0.065 mm,  $d_{70}$  为 0.032 mm,  $d_{90}$  为 0.008 mm, 分选系数为 2.043, 均匀系数为 10.036, 标准偏差系数为 0.231。

设计中的取值为:  $A = 5.5$ ,  $C_{\min} = 1.5$ ,  $C_{\max} = 3.0$ , 计算得到系数  $B$  的取值范围为 25.4 ~ 35.9。图中曲线 A、B 分别为系数  $B$  取最小值和最大值时的砾石尺寸分布曲线; 曲线 C 为系数  $B$  取平均值时得到的砾石尺寸范围曲线。对应的砾石设计尺寸范围为 0.227 ~ 0.560 mm, 匹配的砾石标准为 0.25 ~ 0.42 mm。

将全部 7 种方法的设计结果汇

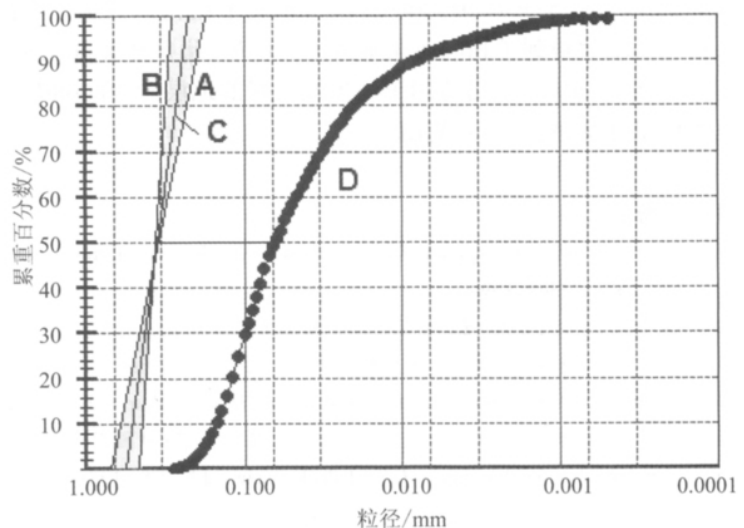


图1 DePriester方法设计砾石尺寸结果

总 如表 1 所示。

表 1 全部方法的设计结果汇总

设计模型	设计点	设计的砾石尺寸/mm	砾石中值/mm	GSR	匹配的标准砾石尺寸/mm
Schwartz	$d_{70}$	0.160 ~ 0.300	0.230	3.53	0.21 ~ 0.25
Smith	$d_{50}$	0.264 ~ 0.388	0.326	5.01	0.25 ~ 0.30
Karpoff	$d_{50}$	0.259 ~ 0.518	0.389	5.92	0.25 ~ 0.42
Saucier	$d_{50}$	0.324 ~ 0.389	0.357	5.50	0.25 ~ 0.42
DePriester	$d_{50}$	0.227 ~ 0.560	0.394	6.05	0.25 ~ 0.42
孔喉结构模拟法	无	0.25 ~ 0.420	0.335	5.15	0.25 ~ 0.42
Tausch&Corly	$d_{10}$	0.604 ~ 0.907	0.756	11.63	0.42 ~ 0.84

分析表 1 得出: 1) 7 种设计方法得到的砾石尺寸各不相同, 经匹配的标准砾石尺寸也不尽相同。2) Schwartz 方法设计的砾石尺寸最小, Tausch&Corly 方法设计的砾石尺寸最大, 并且远大于其它方法的结果; 其余方法的设计结果相同或比较接近。3) Karpoff、Saucier、DePriester、孔喉结构模拟法得到的结果比较相近, 经过标准砾石尺寸匹配后得到了相同的结果; Smith 方法的结果虽然与之不同, 但也非常地接近。此五种方法用于砾石尺寸设计是可靠的。4) Schwartz 方法设计的砾石-地层砂粒度中值比 GSR 仅为 3.53, 砾石尺寸偏小, 显然比较保守。本例选用的地层砂为极不均匀粉细砂, 如果假设其均匀性较好, 设计点强制选  $d_{40}$ , 则相应的设计结果为 0.309 ~ 0.667 mm, 匹配的标准砾石尺寸为 0.30 ~ 0.42 mm, 该结果与 3) 中的结果非常接近, 这表明 Schwartz 方法更适用于均匀性较好的地层砂。5) 文献 [1] 的孔喉结构模拟法选择以“砾石层孔喉尺寸分布曲线接近并小于地层砂筛析曲线”作为最优砾石尺寸的选取原则是合理的, 至少在本例中没有得到相反的结果。6) Tausch&Corly 方法的设计点选取  $d_{10}$  得到的 GSR 为 11.63, 此种情况下地层砂会比较严重地侵入砾石层。该方法合理性值得怀疑, 建议不要使用。

## 5 结论与建议

1) 对目前国内外砾石尺寸主要设计方法进行了分类、述评与剖析, 得到了 DePriester 和 Schwartz 两种方法的程序化计算步骤, 并给出了部分参数的推荐取值。并通过实例对 7 种设计方法的结果进行了对比和分析, 经匹配标准砾石尺寸后, 7 种设计方法的结果不尽相同。

2) Karpoff、Saucier、DePriester、Smith、孔喉结构模拟法等 5 种方法得到的结果比较相近, 经过标准砾石尺寸匹配后得到了相同或非常接近的结果, 此 5 种砾石尺寸设计方法是可靠的。

3) Schwartz 方法更适用于均匀性较好的地层砂; Tausch&Corly 方法设计的砾石尺寸严重偏大, 其合理性值得怀疑, 建议不要使用。

### 参考文献:

- [1] Oyenyin MB. Investigation of pore - blocking mechanism in gravel packs in the management and control of fines migration [J]. SPE 27342, 1994.
- [2] 董长银, 张琪, 孙炜, 等. 砾石充填防砂工艺参数优化设计方法 [J]. 中国石油大学学报, 2006, 30(5): 57 - 61.
- [3] 赵东伟, 董长银, 张琪. 砾石充填防砂砾石尺寸优选方法 [J]. 石油钻探技术, 2004, 32(4): 28 - 32.
- [4] Schwartz DH. Successful Sand Control Design in High Rate Oil and Water Wells [J]. JPT, 1969, 21(5): 1193 - 1198.
- [5] 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.
- [6] Saucier RJ. Consideration in Gravel Pack Design [J]. JPT, 1974, 26(2): 205 - 206.
- [7] 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.