

水平井裂缝堵水堵剂优化设计

版本:1.0

中国石油大学（北京）

目录

1 软件简介	1
1.1 关于水平井裂缝堵水堵剂优化设计	1
1.2 功能与特点	1
1.3 配置要求	2
2 用户界面	4
2.1 主界面框架	4
3 操作	5
3.1 数据管理	5
3.2 数据查看	6
3.3 井位图	7
3.4 生产曲线	7
3.5 裂缝参数计算	8
3.6 堵剂用量计算	9
3.7 措施效果预测	10
3.8 措施效果评价	11
4 附录	12
4.1 裂缝几何参数计算	12
4.2 设计堵剂用量	13
4.3 措施效果计算	14
4.4 措施效果预测	17

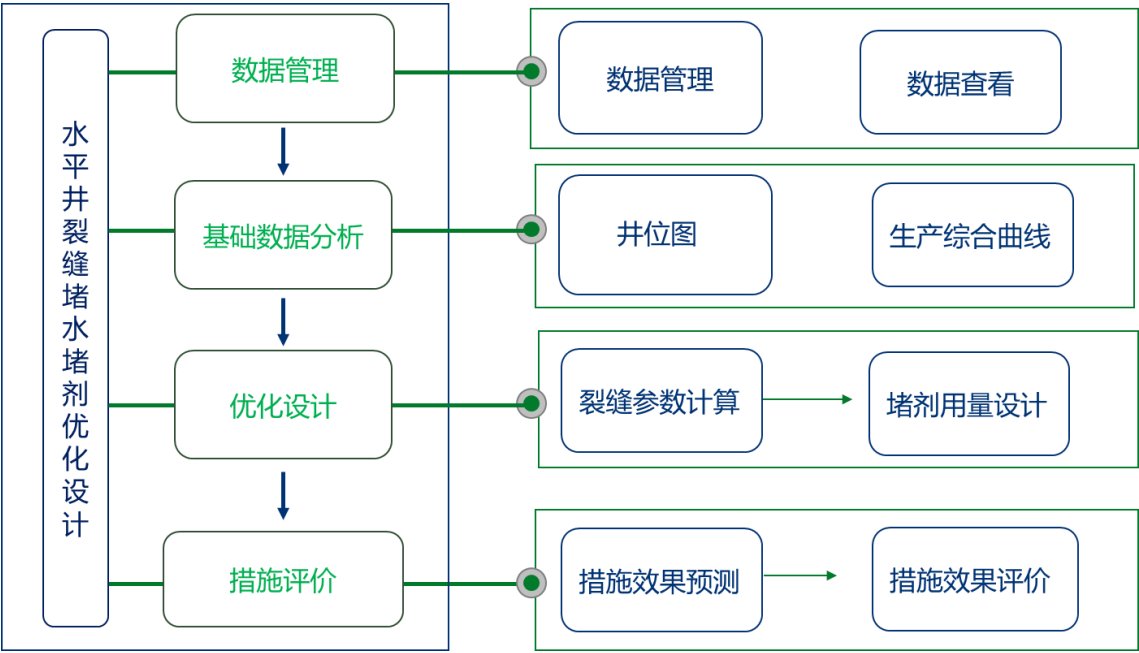
1 软件简介

1.1 关于水平井裂缝堵水堵剂优化设计

水平井裂缝堵水堵剂优化设计是一款集水平井水力裂缝参数计算、堵剂设计优化、措施效果预测、以及措施效果评价和分析于一体的软件。软件以相关石油行业标准和油田工作习惯为依据，首先从基于井位图的平面的参数分布认识潜力井，并结合生产综合曲线对具体井进行生产动态分析，并计算裂缝参数为基础，进行堵剂用量优化设计，同时采用神经网络法预测待措施井的实施效果，最终对已经措施已经实施的措施进行有效评价。该软件通过对措施作业效果进行量化的分析与评价，优化堵剂用量，促使措施无效变有效、有效变高效、高效再提效，从而显著提高油田开发效益。

从系统工程的角度考虑了水平井堵水工作开展流程，较好地实现了潜力井识别、堵剂参数优化、效果预测和评价的一体化。用户的水平井堵水工作在整个软件是可以形成有效闭环，用一套数据体，从合作角度来看可以实现每个环节的无缝衔接，从时间角度来看，可以实现之前工作成果用于指导目前工作，目前工作成果反过来促进前期认识，进而更好指导以后工作。

1.2 功能与特点



① 数据管理

主要是对 Excel 来源的数据进行导入到数据，同时软件支持界面黏贴数据进行计算。

② 数据查看

主要是对数据库已有的数据进行查看。

③ 井位图

主要是对静态参数和动态参数采用等值线和泡泡图形式进行查看。

④ 生产曲线

主要是对潜力井生产综合曲线进行分析。

⑤ 裂缝参数计算

主要经典的 PKN 和 KGD 模型对裂缝参数进行计算。

⑥ 堵剂用量计算

主要根据优化设计中设定的等效压裂模型将压裂后形成的分段缝网简化成主裂缝和高渗基质。同时考虑考虑交联剂和堵剂滤失，计算合理的堵剂用量。

⑦ 措施效果预测

主要采用神经网络法，预测不同影响因素下待实施措施井的增产效果，为措施前评估提供依据。

- 软件提供了先进的措施增油量表征模型，为有效预测待措施井奠定基础；
- 软件采用机器学习方法首先对历史措施数据进行学习，进而对待措施井进行效果预测。

⑧ 措施效果评价

主要是批量计算措施前后日产水平、措施有效期、当年增产量、累积增产量等措施效果指标。

1.3 配置要求

（1）硬件配置要求

- PentiumIV 1.8GHz 或以上处理器；

➤ 建议内存不低于 2G;

➤ 建议独立显卡;

10/100M 以太网卡。

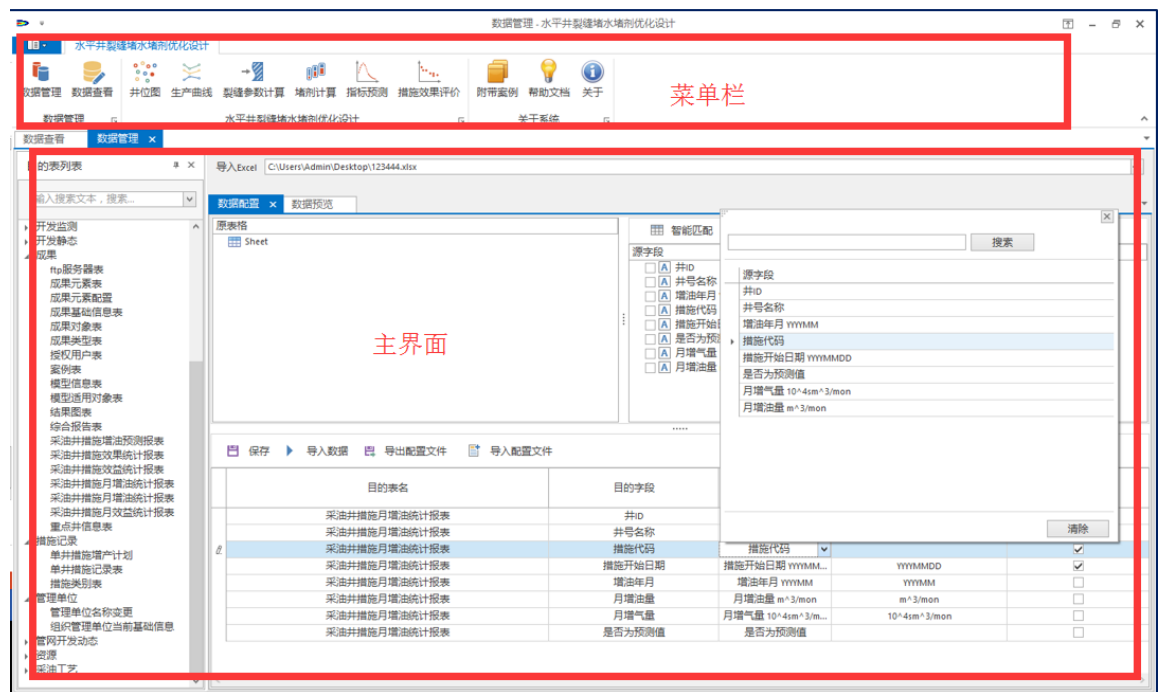
(2) 软件环境要求

➤ Windows2000 / XP / Vista 及 Windows 更高版本操作系统;

➤ Office97-2016 或更高版本。

2 用户界面

2.1 主界面框架

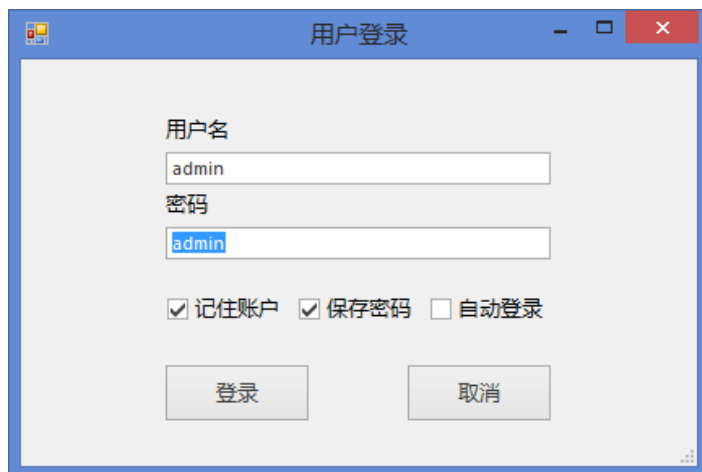


(1) 菜单栏：列举了各执行命令，可以通过鼠标点击菜单栏命令，实现打开功能，弹出对话框等操作。

(2) 主界面：主要用于显示计算结果图形或者表格。


3 操作

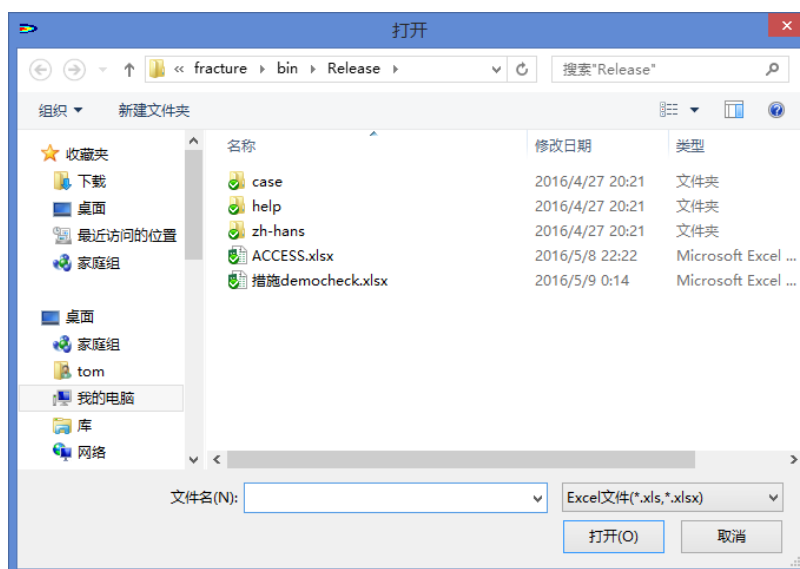
考虑数据安全性，软件采用用户名登入的形式，进行数据和设计方案的权限管理。



3.1 数据管理

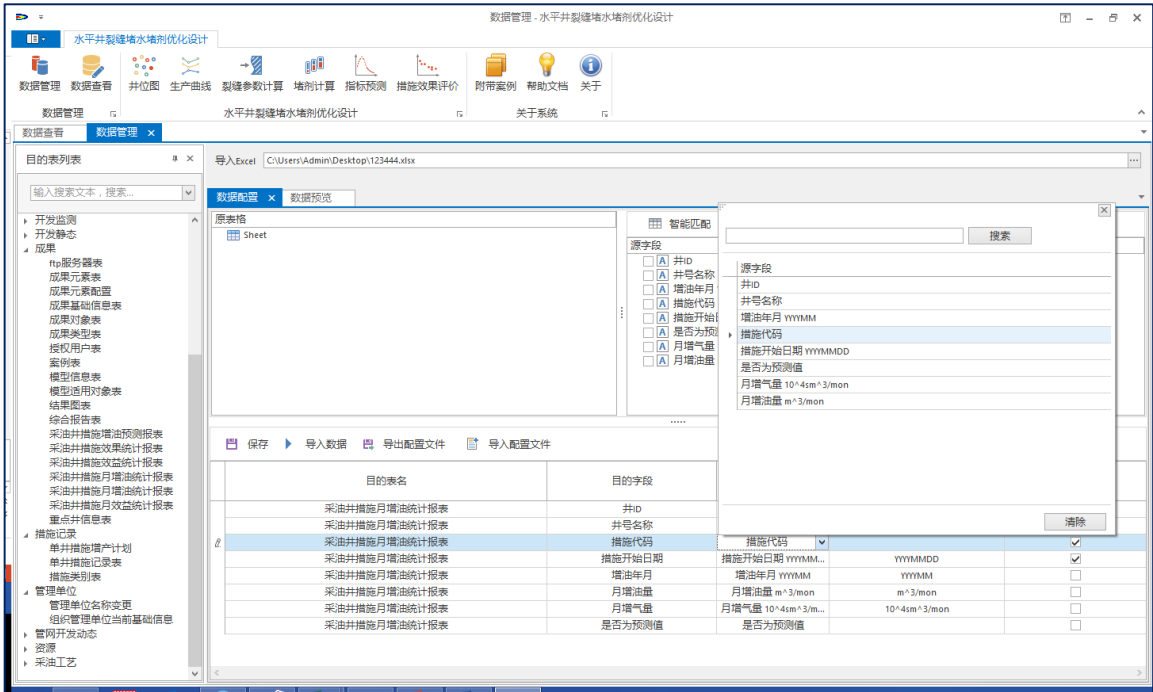
操作步骤：

1. 点开数据管理  数据管理；
2. 选择一个数据导入的 Excel；



3. 在原表格的窗口会出现该 Excel 中所有的 sheet 页，选择需要导入的 sheet 页。
4. 同时考虑到 excel 的字段和软件的字段不一定匹配，因此可以先通过智能匹配，匹配一部分字段，然后再手工选择对应的字段。

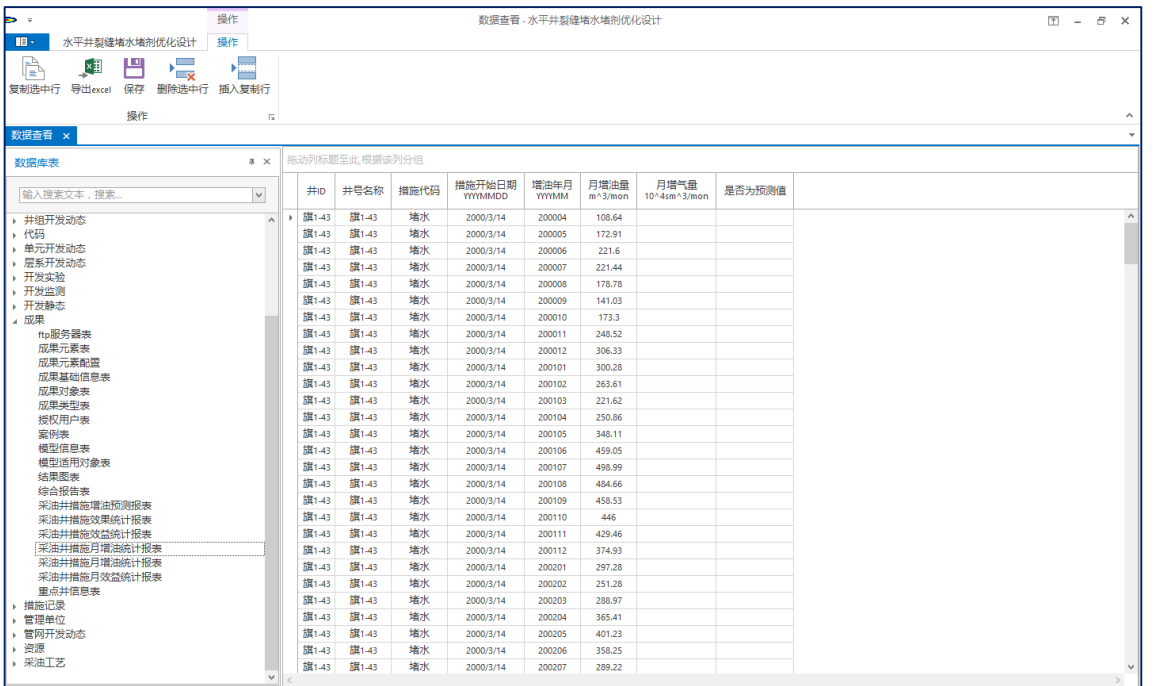
5. 将匹配好的字段导入的数据库中。



3.2 数据查看

操作步骤:

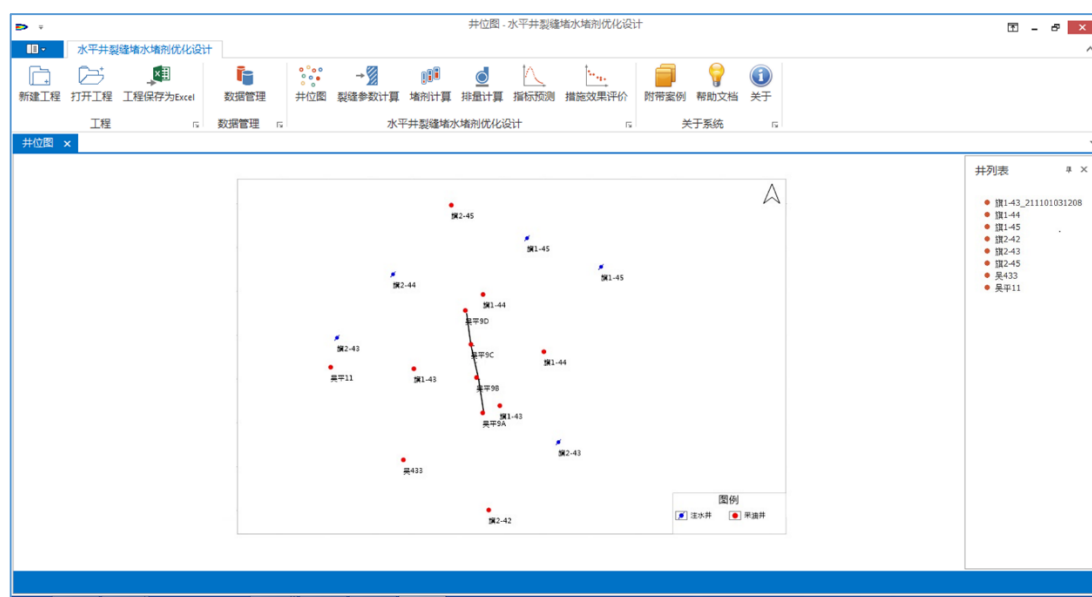
1. 点击需要查看的数据库表
2. 可以进行复制，导出 Excel，保存，删除选中行，和插入复制行。



3.3 井位图

操作步骤：

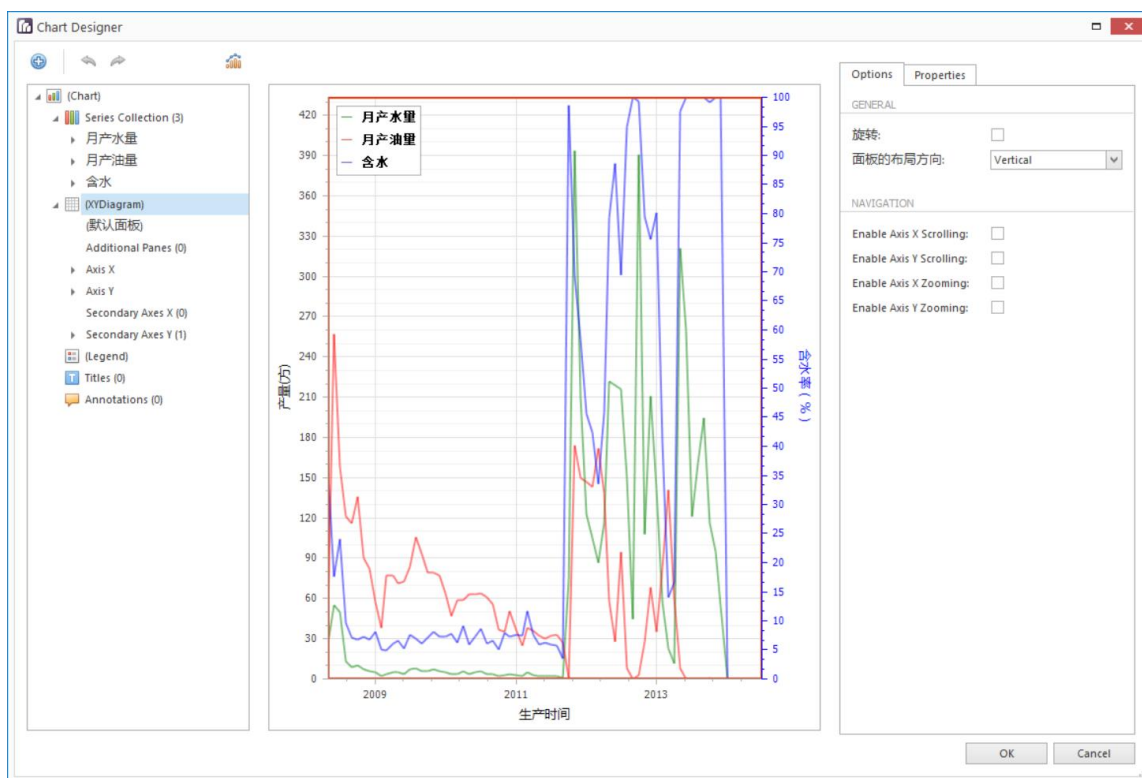
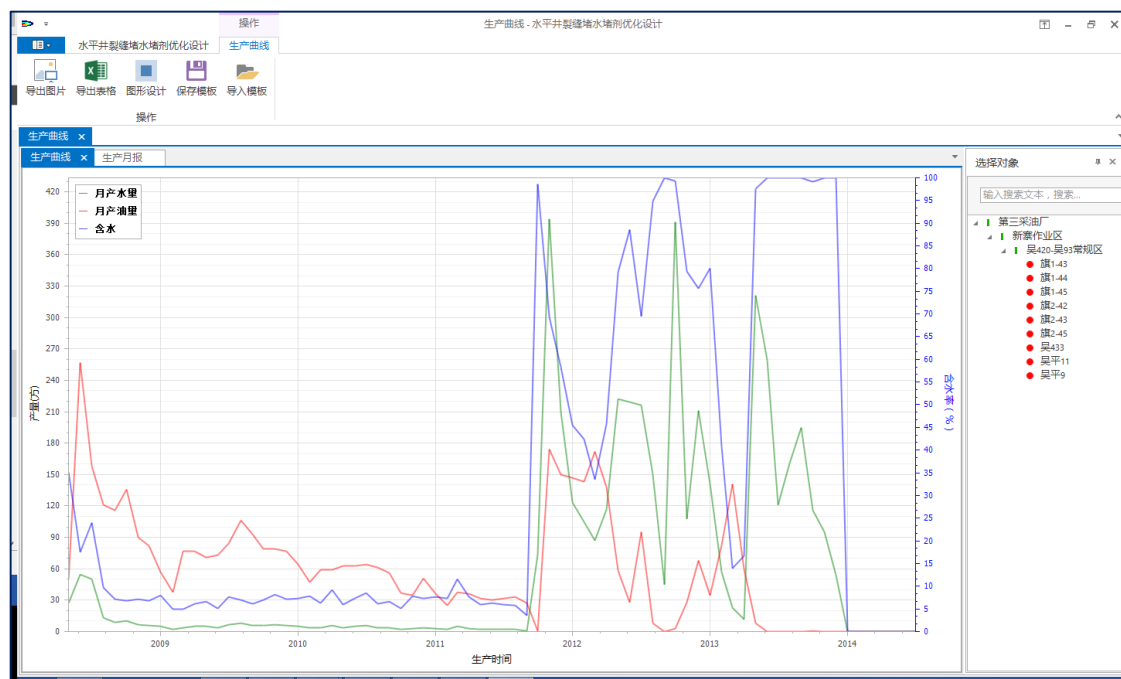
1. 打开功能；
2. 选择具体井；
3. 导出图形模板；
4. 导出图形。



3.4 生产曲线

操作步骤：

1. 选择具体井；
2. 对图形的样式进行调整；
3. 导出图形模板
4. 导出图形。

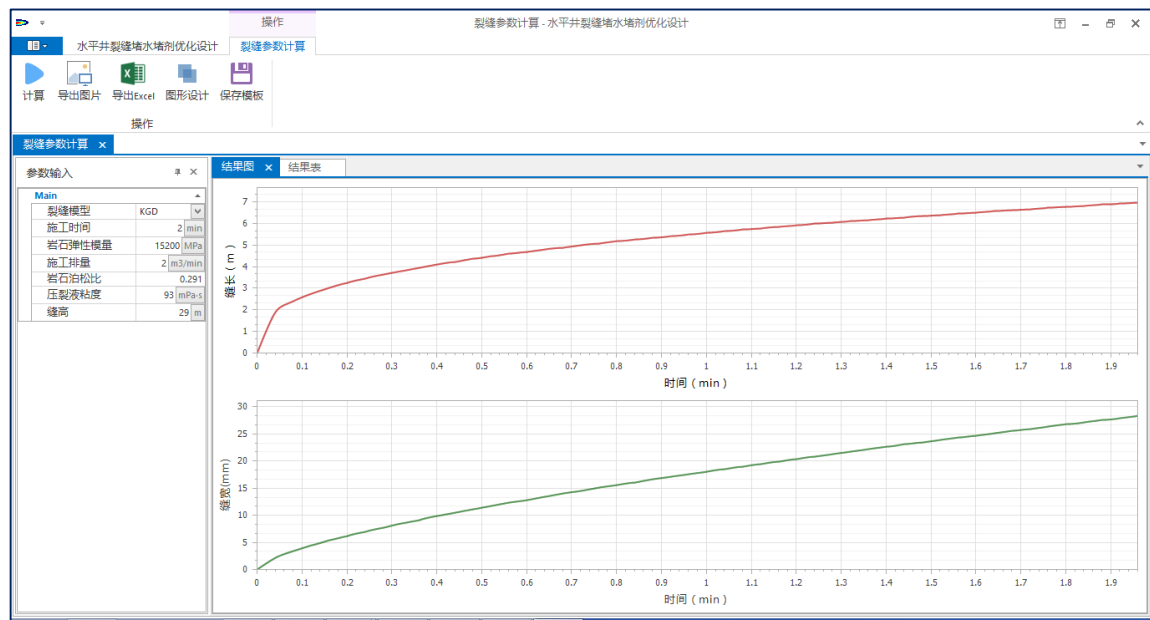


3.5 裂缝参数计算

操作步骤:

1. 需要输入左侧的参数;
2. 点击计算;

3. 可以导出结果表；
4. 同时可以修改结果样式；
5. 可以对结果和输入参数，进行统计分析。



3.6 堵剂用量计算

操作步骤：

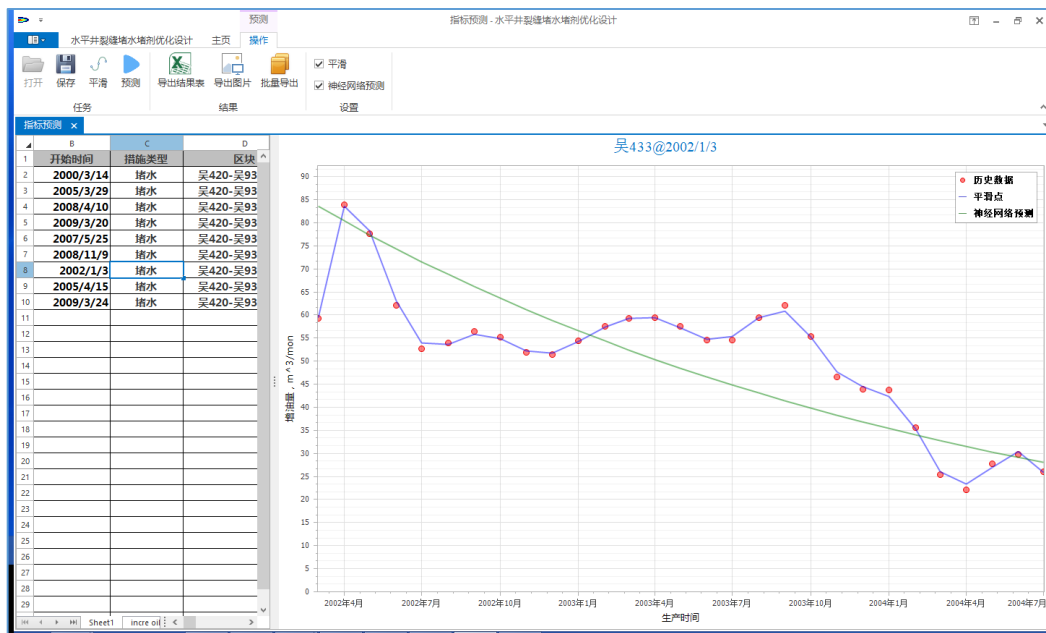
1. 需要输入左侧的参数；
2. 点击计算；
3. 可以导出结果表；
4. 同时可以修改结果样式；
5. 可以对结果和输入参数，进行统计分析。



3.7 措施效果预测

操作步骤:

1. 打开数据源；
2. 对数据进行平滑；
3. 对措施效果进行预测；
4. 双击某个具体措施，既可查看预测结果和实际增油量的对应关系；
5. 导出结果图形。

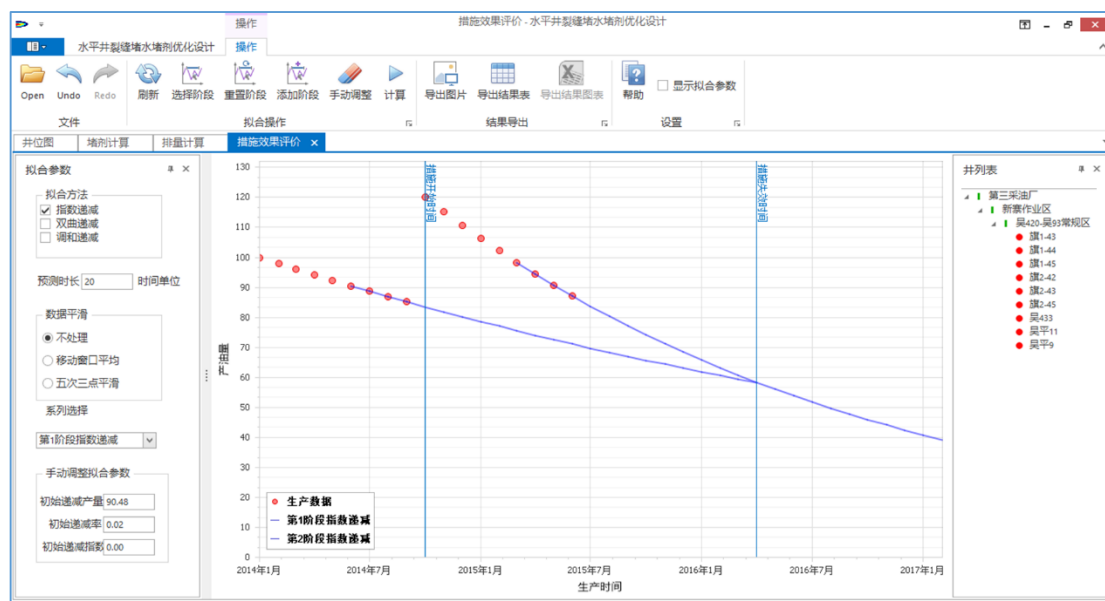


3.8 措施效果评价

主要是批量计算措施前后日产水平、措施有效期、当年增产量、累积增产量等措施效果指标。

操作步骤:

1. 选择具体井;
2. 选择对需要评价的措施的措施前后阶段进行拟合
3. 点击运算。



4 附录

4.1 裂缝几何参数计算

常用的裂缝几何参数计算经典模型是 PK 模型、PKN 模型和 KGD 模型^[112]。与 PKN 或 KGD 模型相比，PK 模型没有考虑压裂液的滤失问题。在模型选择上，可以依据岩石力学或实验效果，考虑使用哪种模型计算裂缝尺寸。如果严格按照岩石力学考虑，KGD 模型适用于缝高远大于缝长的裂缝参数估算，适用于浅井裂缝；而 PKN 模型适用于缝长远大于缝高的裂缝参数估算，适用于深层裂缝。

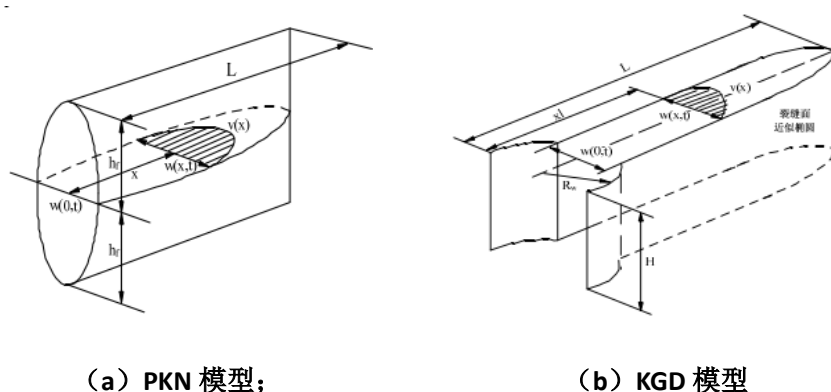


图 6.2 PKN 模型和 KGD 模型裂缝线性扩展示意图

对于 PKN 模型，如已知缝高 H ，将 PKN 缝宽公式与卡特面积公式联立，给定一个缝宽，通过迭代求解缝宽和缝长，计算公式如下：

$$W_{\max}(x) = 2\alpha \left[\left(\frac{1}{60} \right) \frac{(1-\nu^2)Q\mu L}{E} \right]^{1/4} \quad (6-1)$$

$$A(t) = \frac{Qw}{4\pi C^2} \left[e^{x^2} \cdot \operatorname{erfc}(x) + \frac{2x}{\sqrt{\pi}} - 1 \right] \quad (6-2)$$

$$x = \frac{2C\sqrt{\pi t}}{w} \quad L = \frac{A}{2H} \quad (6-3)$$

当 Q 取地面总排量时， $\alpha=1.5$ ，而当 Q 取地面排量之半时， $\alpha=1.26$ 。

$erfc(x)$ 是 x 的误差补偿函数，可查表（数学手册）或用下式近似计：

$$e^{x^2} \cdot erfc(x) = 0.254829592 \cdot Y - 0.284496736 \cdot Y^2 + 1.42143741 \cdot Y^3 - 1.45315202 \cdot Y^4 + 1.06140429 \cdot Y^5 \quad (6-4)$$

$$Y = \frac{1}{1 + 0.3275911 \cdot x} \quad (6-5)$$

对于 KGD 模型，如已知缝高 H 、缝内平均压力和井底压力，则给定一个缝宽，通过迭代求解缝宽和缝长，计算公式如下：

$$W_{\max}(x) = \left[\frac{84(1-\nu)}{\pi} \left(\frac{1}{60} \right) \frac{\mu Q L^2}{GH} \frac{\bar{p}}{p_w} \right]^{1/4} \quad (6-6)$$

$$L = \frac{Q}{32\pi H C^2} (\pi W_{\max} + 8S_p) \left[\frac{2\alpha_L}{\sqrt{\pi}} - 1 + e^{\alpha_L} erfc(\alpha_L) \right] \quad (6-7)$$

$$\alpha_L = \frac{8C\sqrt{\pi t}}{\pi W_{\max} + 8S_p} \quad G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (6-8)$$

实际上，对于任何裂缝，上述模型都只是近似估算裂缝的尺寸。实际地层中由于岩石特性和应力变化多样，当缝长和缝高很大时，裂缝的形状在宽度上相当不规则，在低应力区的软地层缝宽较大，而在高应力区的硬地层则缝宽较小。只要选定了合适的滤失系数，PKN 或 KGD 模型均可用于估算不规则裂缝的参数。

4.2 设计堵剂用量

在进行分段堵水过程中，注入水或地层水往往沿主裂缝突入油井，因此在堵水的过程中主要考虑封堵主裂缝。根据压裂施工设计及微地震监测结果，确定压裂缝的分布及参数，并可根据入地液量反演出压裂形成缝网的缝网带长和带宽。将微地震监测点群的带长认为是该簇裂缝的主裂缝长度 L_f ，带宽认为是压裂形成的分支缝及微裂缝距离主裂缝的分布宽度 w_m ，以储层厚度代表缝高 h_f 。

在设计堵剂用量时，设计了一种简化的等效计算模型，该模型中只包含一条主裂缝，该主裂缝的缝长为 L_f ，缝宽为 w_f ，缝高为 h_f ；将实际压裂形成的分支缝及微裂缝按照裂缝导流能力简化成高渗基质。

主裂缝的体积为：

$$V_f = 2 \cdot w_f \cdot h_f \cdot L_f \quad (6-12)$$

高渗基质的外边界距主裂缝的距离等于有效入地液的带宽 w_m ，基质高度等于缝高 h_f （记为 h_m ），基质宽度等于主裂缝的缝长 L_f （记为 L_m ）。因此高渗基质的体积为：

$$V_m = 2 \cdot w_m \cdot h_m \cdot L_m \quad (6-13)$$

根据矿场经验，低渗砂岩油藏压裂过程中压裂液的滤失量约为 40%~60%，即入地液的体积大概是形成缝网体积的 2 倍。高渗基质的孔隙体积 V_p 等于堵剂有效入地液的体积 V_s 的一半与压裂前低渗基质的孔隙体积 $V_{p'}$ 之和，即：

$$V_p = V_s / 2 + V_{p'} = V_s / 2 + \phi'_m \cdot V_m \quad (6-14)$$

计算堵剂用量时，要求堵剂能够完全填充主裂缝，还要充填部分或者全部高渗基质。假设堵剂从主裂缝向高渗基质中的运移距离是 L_{gel} （ $L_{gel} \leq L_m$ ），则所需堵剂用量为：

$$V_{gel} = V_f \cdot (1 - \phi_{sand}) + V_p \cdot \frac{L_{gel}}{L_m} \quad (6-15)$$

4.3 措施效果计算

措施前月均产油量：油井在措施前 3 个月正常生产情况下的平均月产油量。

措施后月均产油量：油井在措施后 3 个月正常生产情况下的平均月产油量。

措施初期增油量：油井措施后月均产油量与措施前月均产油量之差。

措施有效期：在油田废弃年限内，有措施月产油量大于无措施月产油量的有经济效益的生产天数。

措施累计增油量：在措施开始实施到效果结束，油井累计产油量与无措施预测的同期累计产油量之差。

(1) 无措施月产油量的预测

宜选用以下方法：

a) 递减法

考虑产量自然递减时预测油井无措施月产油量：

$$q_{wt} = q_a [1 + D_a n t]^{(-1/n)}$$

(1)

式中：

q_{wt} ——第t天无措施月产油量。当 q_{wt} 值低于油井经济极限产油量 q_e 时取值0；

q_a ——措施前月均产油量；

D_a ——措施前递减率，以小数表示， $D_a \geq 0$ ；

n ——递减指数， $0 \leq n \leq 1$ 。

b) 不考虑递减

不考虑措施前递减，直接将措施前的产量作为假设无措施时的产量。

(2) 有措施月产油量的计算

有措施月产油量包括已发生的实际产油量 q_{st} 和未发生的预测产油量 q_{yt} 。已发生的实际产油量就是措施后实际月产油量。根据油井已发生的实际产油量，预测未发生的月产油量，宜选用以下方法：

考虑产量自然递减时预测油井有措施月产油量：

$$q_{yt} = q_b [1 + D_b n (t - t_2)]^{(-1/n)} \quad (2)$$

式中：

t_2 ——措施后已生产时间点；

q_{yt} ——第t月有措施月产油量，当 q_{yt} 值低于油井经济极限产油量 q_e 时取值0；

q_b ——预测措施后月产油量的初始值；

D_b ——措施后递减率，以小数表示， $D_b \geq 0$ 。

(3) 措施有效期的计算

措施有效期为有措施月产油量 q_{st} 或 q_{yt} 大于无措施月产油量 q_{wt} 的生产天数。根据有措施月产油量曲线与无措施月产油量曲线的三种分布情况，如图1所示，有三种措施有效期的计算方法：

a) 当有措施月产油量曲线与无措施日产油曲线相交于 t_3 点($t_3 \leq N$)时：

$$T = t_3 - t_1 \quad (3)$$

T ——措施有效期，单位为天(d)；

t_0 ——措施开始实施时间点；

t_1 ——措施完成实施时间点；

t_2 ——措施后已生产时间点；

t_3 ——有措施月产油量曲线与无措施月产油量曲线相交的时间点。

b) 当有措施月产油量曲线与无措施日产油曲线相交于 t_3 点($t_3 > N$)时：

$$T = N - t_1 \quad (4)$$

N ——油田开发年限废弃时间点。

c) 有措施月产油量曲线与无措施日产油曲线不相交时：

$$T = t_3 - t_1 \quad (5)$$

(4) 措施累计增油量的计算

a) 有效期内措施累计产油量的计算

$$Q_y = \sum_{t_1}^{t_2} q_{st} + \sum_{t_2}^{t_1+T} q_{yt} \quad (6)$$

式中： Q_y ——有效期内措施累计产油量。

b) 无措施累计产油量的计算

$$Q_w = \sum_{t_0}^{t_1+T} q_{wt} \quad (7)$$

式中： Q_w ——无措施累计产油量。

c) 措施累计增油量的计算

$$Q = Q_y - Q_w \quad (8)$$

式中： Q ——措施累计增油量。

4.4 措施效果预测

为了准确地预测措施效果，就要从表征措施效果的参数模型考虑，既要涵盖措施后产量的时点指标，还需要能够表征措施后产量的变化规律以得出措施后有效期及累产的时段指标。

为了预测措施的效果，特别是在一个区间内的产量变化情况，就需要建立产量与时间相关的关系。油井在措施后产量往往存在两种模式：模式一：先是快速上升，通常时间非常短，接着是一段缓慢递减，直至失效。模式二：缓慢递减，直至失效。故可以用描述递减阶段 Arps 递减方程来表征增油量随时间的函数关系。对此引入措施累增油量和措施有效期以及措施初期增油量等概念来表征增油量随时间的函数关系，增油量以指数方程进行拟合。

$$N_p = \int_0^L q_o e^{-D_i t} dt \quad (1)$$

$$q_j = q_o e^{-D_i j} \quad j \in (0, n) \quad (2)$$

N_p 为增产措施累增油量 m^3 ， q_o 为初期增油量 m^3/mon ， D_i 为增油量初始递减率， L 为措施有效期， mon ， j 为措施后的月份。

将上述 3 个参数代入式 (1)，便可以得到增油量初始递减率 D_i ，将 D_i 、 q_o 、 j 等代入式 (2)，便可以得到目标潜力措施后每个月的增油量。对式 (1) 主要采用弦截法 (3) (4) 进行求解。

$$f(D_k) = N_p - \int_0^L q_o e^{-D_k t} dt \quad (3)$$

$$D_{k+1} = D_k - \frac{f(D_k)}{f(D_k) - f(D_{k-1})} (D_k - D_{k-1}) \quad k=1,2,\dots \quad (4)$$

通过对历史措施效果进行分析、学习，便可以得到目标潜力井的增产措施累增油量，初期增油量，措施有效期。对历史措施效果评价如下图所示，措施增油量主要是措施后月产油量与措施前的月产水平做差对时间积分。

$$N_p = \int_0^L q_{ostim}(t) - \overline{q'_{ostim}} dt$$

(1) 式中， q_{ostim} 为措施后实际产量， m^3/mon ； $\overline{q'_{ostim}}$ 为压前措施前的月产水平时产量， m^3/mon 。

措施增产的影响因素可以归结为油藏地质的静态因素、开发的动态因素及施工因素等方面，这些因素的综合作用决定了油井的产能变化情况，但是这些因素对油井产能的变化的影响又不是简单的直接作用，因此描述起来非常困难。

BP 神经网络是一种按误差逆传播算法训练的多层前馈网络。BP 网络能学习和存贮大量的输入-输出模式映射关系，而无需事前揭示描述这种映射关系的数学方程，可用于解决模式分类问题和非线性回归问题。BP 神经网络模型包括节点输出模型、作用函数模型、误差计算模型和自学习模型。

