

岩屑浆液回注场地储层容量及影响半径评估

郭朝斌¹, 张可倪¹, 曾繁兴¹, 王笑雨²

(1. 同济大学 机械与能源工程学院, 上海 201804; 2. 北京师范大学 水科学研究院, 北京 100875)

摘要: 在连续定量注入方式下针对影响储层容量及影响半径的两个关键参数即不同地层埋深与注入层渗透率, 采用数值模拟的方法进行参数敏感性分析. 结果表明不同地层埋深及地层渗透率变化对储层容量近似为指数型变化, 对影响半径近似为线性变化. 因此, 在实际工程中对储层容量及影响半径评估时应根据不同的回注量需要综合考虑地层埋深及地层渗透率的影响.

关键词: 宾汉流体; TOUGH2; 浆液回注; 储层容量; 影响半径

中图分类号: P641

文献标志码: A

Assessment of Reservoir Capacity and Influence Range in Slurry Injection

GUO Chaobin¹, ZHANG Keni¹, ZENG Fanxing¹, WANG Xiaoyu²

(1. School of Mechanical and Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: In a slurry reinjection project, the evaluation of reservoir storage capacity and influence range are two important aspects, especially during the process of design and construction. Two key parameters, the formation depth and the formation permeability, were evaluated and their sensitivities were analyzed by using numerical simulation method for the case of injection with constant rate. Our results show that the reservoir storage capacity can be approximated as an exponential function of the injection formation depth and permeability. The influence range is kind of linear function of the two parameters. The results indicate that storage capacity and influence range can be significantly affected by the two parameters. Therefore, in the process of evaluation of reservoir storage capacity and influence range, the influence of formation depth and permeability should be seriously considered.

Key words: Bingham fluid; TOUGH2; slurry injection; reservoir storage capacity; influence range

钻井废弃物的处理技术方法应遵循减量化、资源化和无害化等原则^[1-2]. 浆液回注通常是将钻井废弃物研磨成粉末配比成浆液, 回注到地层中, 该技术在经济性、可行性以及环境绩效方面具有较大的优势^[1], 是钻井废弃物处理的重要技术方法之一. 岩屑浆液(以下简称浆液)回注过程中由于回注到地下深部地层中, 复杂的地质条件及非均质性等使得在回注容量及影响半径等方面无法有效地描述.

在评估地层储量及浆液影响半径时, 地层的埋深及地层渗透率为重要的影响参数, 在很大程度上影响浆液回注的可行性、安全性及经济性. 浆液在注入到地下深部地层过程及在地层中的运移变化涉及到注入率、总储量、压力积聚、液相浆液分布等诸多多相流方面的问题, 涉及到热学、水文地质、力学及化学等方面的耦合, 此时需要数学模型与数值模拟方法, 通过计算机程序综合各种因素耦合运移变化过程来研究浆液回注过程中的问题, 在一定程度上可有效描述浆液在注入到深部地层后的演变等过程. 当前国内外对岩屑浆液回注模拟, 特别是宾汉流体在深部地层中渗流运移过程的相关研究描述较少. 本文基于已有 TOUGH2 软件框架, 结合宾汉流体运移规律, 采用数值模拟方法分析地层埋深与渗透率对浆液回注工程中地层储量及影响半径的影响.

1 研究现状

在油气田开采中使用浆液回注技术可减少环境污染, 提高经济效益. 我国蓬莱 9-3 油田在 1 期开发

收稿日期: 2015-03-18

基金项目: 能源科技发展项目专项(NY20111102-1)

第一作者: 郭朝斌(1989—), 男, 博士生, 主要研究方向为多相流数值模拟. E-mail: cugbgcb@163.com

通讯作者: 张可倪(1964—), 男, 工学博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为多相流数值模拟. E-mail: keniz@hotmail.com

中为避免污染渤海湾的海洋环境,首次在国内油田的开发中使用岩屑回注技术,实现了油基钻井液在海上应用的零排放^[3].美国德克萨斯州东部的一些地区已建成了一定数量的回注井,使用地层破裂的方法进行回注以处理来自墨西哥湾海上平台的钻井废弃物^[4].此外泰国湾,俄罗斯远东海域等地区的海上钻井作业均采用了岩屑回注技术^[5].

浆液回注理论可用以指导浆液回注工程的设计和施工.是在多相流体力学理论上发展而来,主要对浆液在地层中的流动形式进行分析,建立注浆压力、注入方式(定量注入或定压注入)、影响半径等参数以及相互之间的关系^[6].目前浆液回注理论主要有渗透注浆理论,裂隙岩体的注浆理论等^[6].对于渗透注浆理论与实践,郝哲等^[7]总结出4种流体模型,研究有关渗透注浆的裂隙流、裂隙岩体扩散及多孔相互影响等问题.

数学模型在评估浆液回注可行性上具有重要的作用,是设计和实施浆液回注重要的工具之一.国内外已有多个注浆参数的模拟实验及数学模型^[8-10].相关实验研究表明,在裂隙岩体中进行注浆时浆液扩散半径、注浆后试件的抗压强度及渗透系数均受到裂隙宽度、注浆压力及水灰比等因素的影响^[11].在浆液模型及数值计算方面,研究用到的模拟软件有ANSYS-CFX^[12].Kim^[13]使用网格模型的方法,研究了考虑渗滤效应的砂柱注浆模型^[14].目前对于地下灌注标准方面,美国是第一个在法律方面认可地下灌注的国家,美国环保署在1980年颁布地下灌注控制法规,并在1988年补充危险废液回注论证的规定,确保有害废液永久(10 000年内)不得发生泄漏事故.俄罗斯与加拿大等国家也相应开展评估,我国地下灌注技术刚起步,尚未展开正式应用,与之配套法律标准等尚未全面^[15].

2 理论分析及试验验证

2.1 理论分析

模拟软件基于TOUGH2框架,在EOS7模块的基础上开发出浆液模拟模块^[16-18],主要用于非牛顿流体(如宾汉流体)浆液回注过程中流体在地下运移规律.主要描述过程为浆液非牛顿流体(宾汉流体)流动过程,浆液与水的混溶流动过程(满足达西定律,浆液质量分数足够大时进行有效压强梯度修正),浆液与水混溶流体的沉淀与溶解过程.模拟流动系统主要考虑的组分为水和浆液,可存在固液两

种状态.浆液组分在固液两相中通过释水沉淀和吸水溶解转换.

在TOUGH2模拟器中浆液描述为宾汉流体^[19],其描述数学形式为

$$\tau = \eta \cdot (dv/dy) + \tau_0$$

其中, τ 为剪应力; dv/dy 为剪应速度; η 为运动粘性系数; τ_0 为屈服应力(屈服值).

在数值模拟计算中,对宾汉流体的有效压强梯度进行修正比描述其表观粘度有更高的运算效率,因此宾汉流体服从的达西定律为^[20]

$$v = -kk_r/\mu_b \cdot \Delta\Phi_e$$

$$\Phi_e = \begin{cases} \text{sign}(\Phi) \cdot (|\Phi| - G), & |\Phi| \geq G \\ 0, & |\Phi| < G \end{cases}$$

其中: v 表示速度; k 是绝对渗透率; k_r 是相对渗透率; μ_b 是宾汉流体的塑性粘度系数,与浆液质量分数相关; $\Delta\Phi_e$ 是有效压强梯度; G 是使得宾汉流体流动的最小压强梯度,满足^[21]:

$$G = \alpha\tau_0/(kk_r)^{-1/2}$$

其中, α 是经验系数或拟合参数.

2.2 试验验证

通过20 d的浆液回注试验验证模型计算的可靠性.根据实际试验数据建立模型,将压力监测值(井口监测压力加上井口到注入点的静水压力值)与模拟值进行比对,得到图1注入压力模拟值与监测值对比图,图中所示压力为每天最大压力.从图中可以看出,模拟值可较好表述实际压力的变化.导致模拟与监测压力误差的原因之一是在实际注入的过程中,浆液中黄原胶、顶替水等比例变化,但模型中为固定比例,故模拟值与监测值有一定的差别.

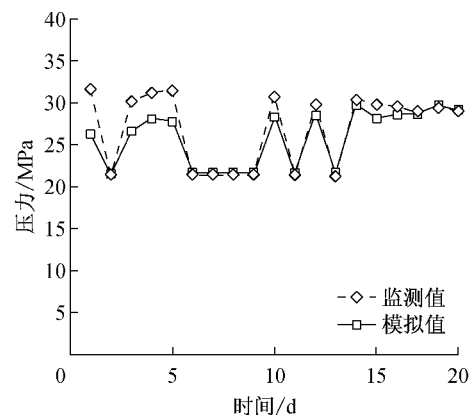


图1 监测压力与模拟压力对比图
Fig. 1 Comparison of the monitored and simulated pressure during the injection period (20 days)

3 地层埋深与渗透率对储层容量及影响半径的影响分析

在判断储层容量时,以连续定量注入方式为例,选择 1.5 倍地层静水平衡压力(以 P_0 表示)作为地层安全压力阈值,即地层中最大压力积聚处达到 1.5 P_0 时,认为地层不能继续注入,此时的注入量作为储层容量. 影响半径的描述以地层中出现浆液作为判断,以浆液饱和度为 0.1 为判断标准,地层中浆液饱和度为 0.1 的最远位置到注入点的距离为影响半径.

3.1 基本模型建立

3.1.1 模型建立

为研究地层埋深及渗透率对储层容量及影响半径的影响,在实际试验获取地层参数的基础上,简化其他影响因素的影响,建立均质等厚的理想模型(图 2),图中, Q 为注入量, H 为地层厚度, R 为模型半径. 以注入井为中心,平面上选择半径 R 为 10 km 的范围用于模型计算. 径向剖分为 792 个网格,最小半径为 2 m,从井孔向外逐渐变大,最大半径为 15 m. 垂

向上根据注入井测井数据进行简化,主要研究地层厚 H 为 253 m,剖分成 28 层,见表 1. 假设地层均质等厚,水平向各向同性,假设 $k_x = k_y = 10k_z$. 初始条件为静水压力平衡状态,模型顶部地层埋深为 1 500 m,四周为无流量边界条件. 模型中上下边界层为低渗泥岩,起到封盖层的作用,砂岩中间夹层假设为泥岩层,渗透率较低,起到部分封盖作用. 通过分析地层参数及前期预研究,中下部地层适合浆液回注,在模型相应层段进行射孔注入,以 $2 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ 速率连续注入.

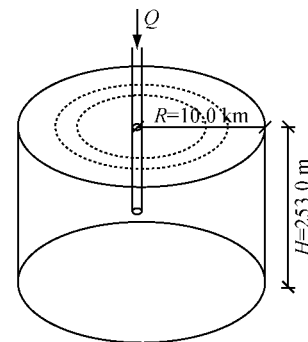


图 2 基本模型示意图

Fig.2 Schematic diagram of basic model

表 1 模型垂向剖分及地层参数

Tab.1 Formation discretization in vertical and parameters

层号	岩性	层厚/m	层数	孔隙度	渗透率 $k_x = k_y = 10k_z / 10^{-15} \text{ m}^2$	套管开孔	相对模型顶部深度/m
1~2	泥岩(上覆层)	50.00	2	0.15	0.01		
3~4	砂岩	10.67	2	0.24	243		
5	泥岩	2.13	1	0.15	40		
6	砂岩	4.57	1	0.24	243		
7	泥岩	3.05	1	0.15	0.2		
8	砂岩	4.88	1	0.24	243		
9~12	泥岩	34.13	4	0.15	0.2		
13~15	砂岩	13.41	3	0.20	95	射孔段	-110
16	泥岩	2.44	1	0.15	0.2		
17~18	砂岩	6.10	2	0.20	95	射孔段	-126
19	泥岩	3.05	1	0.15	0.2		
20	砂岩	2.44	1	0.20	95	射孔段	-135
21~25	泥岩	62.79	5	0.15	0.2		
26	砂岩	3.66	1	0.15	40	射孔段	-201
27~28	泥岩(下伏层)	50.00	2	0.15	0.01		

3.1.2 结果分析

选择距离注入井不同距离的位置点作为监测点分析压力变化,以第 13 层为例,如图 3 所示. 距离注入井不同距离的监测点压力变化趋势相同,其中注入点的压力变化幅度最大,在连续注入到 3 680 d 时,最先达到原始静水压力 P_0 的 1.5 倍,此时认为达到地层安全压力阈值,达到最大注入量.

图 4 为地层达到安全压力阈值时,第 13 层中液

相和固相浆液质量变化图. 由图 4 可知,在连续注入的过程中液相浆液质量大于固相浆液质量,这是因为在连续注入过程中压力梯度保持较大值,大部分浆液以液相形式存在. 图 5 所示为液相浆液质量分数在地层中随时间的变化,在 3 680 d 时影响半径约 145 m. 图 6 为地层中固相浆液饱和度随时间变化图,随着时间的变化,在晕的边缘不断产生沉淀. 从图 6 中可以看出,沉淀主要集中在边缘,少量部分分

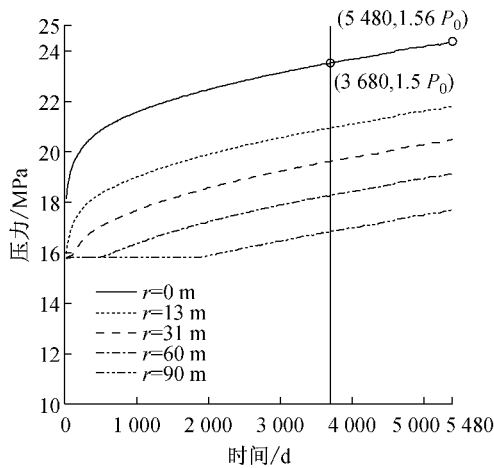


图 3 连续定量注入模型中注入层(第 13 层)地层压力与地层安全注入时间的确定

Fig. 3 Pressure of the injection layer (No. 13) under constant rate injection mode and the determination of injection life

布在地层中. 这是因为晕的边缘处压力梯度较小, 小于宾汉流体描述公式中的屈服值, 根据宾汉流体的性质, 此时浆液不再流动, 在数小时内逐渐沉淀. 随

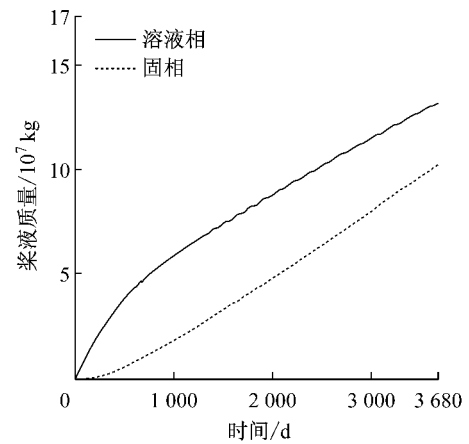


图 4 定量连续注入方式下注入层(第 13 层)中浆液质量变化图

Fig. 4 Slurry mass variation in the injection layer (NO. 13) under constant quantitative injection

着连续注入, 压力梯度逐渐增大到大于屈服值, 产生的沉淀又逐渐开始溶解, 模型中浆液溶解速率小于沉淀速率, 所以在地层中仍存在少量的固相沉淀. 另外, 模型中隔离层由于渗透率极低, 隔离效果明显, 浆液注入层之间无明显扩散现象.

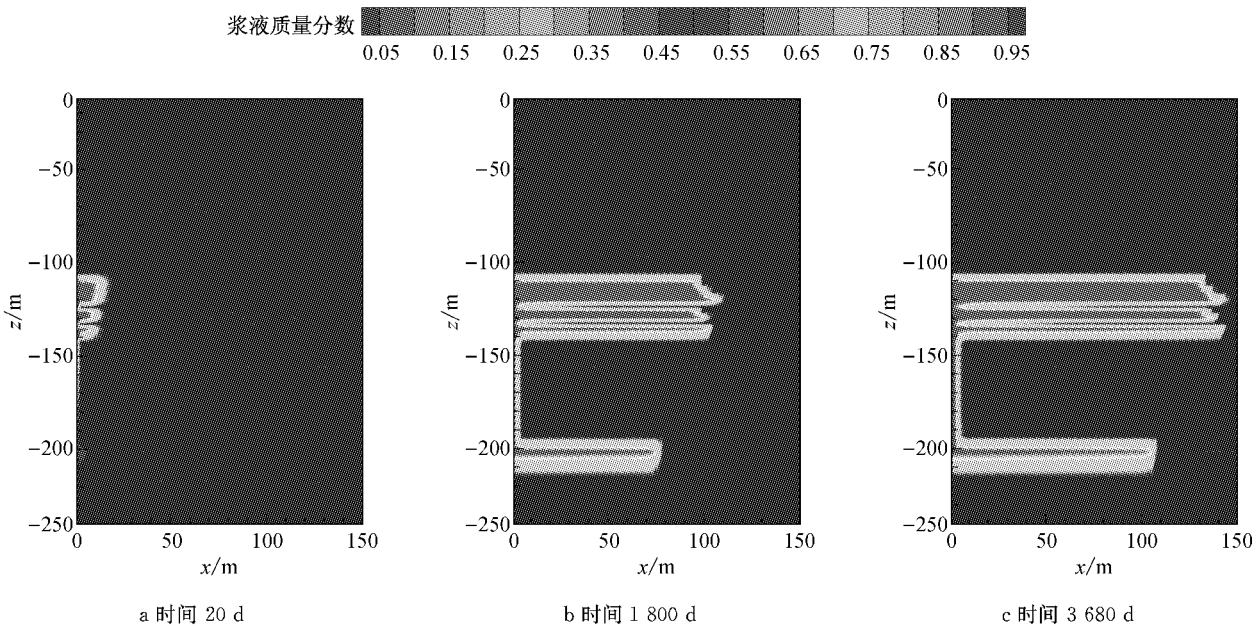


图 5 连续定量注入模型中各注入层在回注周期内液相浆液质量分数图

Fig. 5 Slurry (liquid) mass fraction distribution at each layer under constant quantitative injection

3.2 不同地层埋深下储层容量及影响半径分析

3.2.1 方案设计

为研究不同地层埋深对回注目标地层容量及影响半径的影响, 设计不同地层埋深(地下 800, 1 000, 1 200, 1 500, 1 800 m)方案. 计算分析注入后浆液在地下空间的分布和地层中压力的变化, 确定地层容

量及影响半径. 与基本模型相同, 回注方式采用连续注入, 注入速率为 $2 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$, 选择 $1.5 P_0$ 为地层安全压力阈值.

3.2.2 结果分析

在注入层, 封盖层及部分低渗地层中选择监测点, 监测其压力变化. 图 7 为各个方案主要注入层压

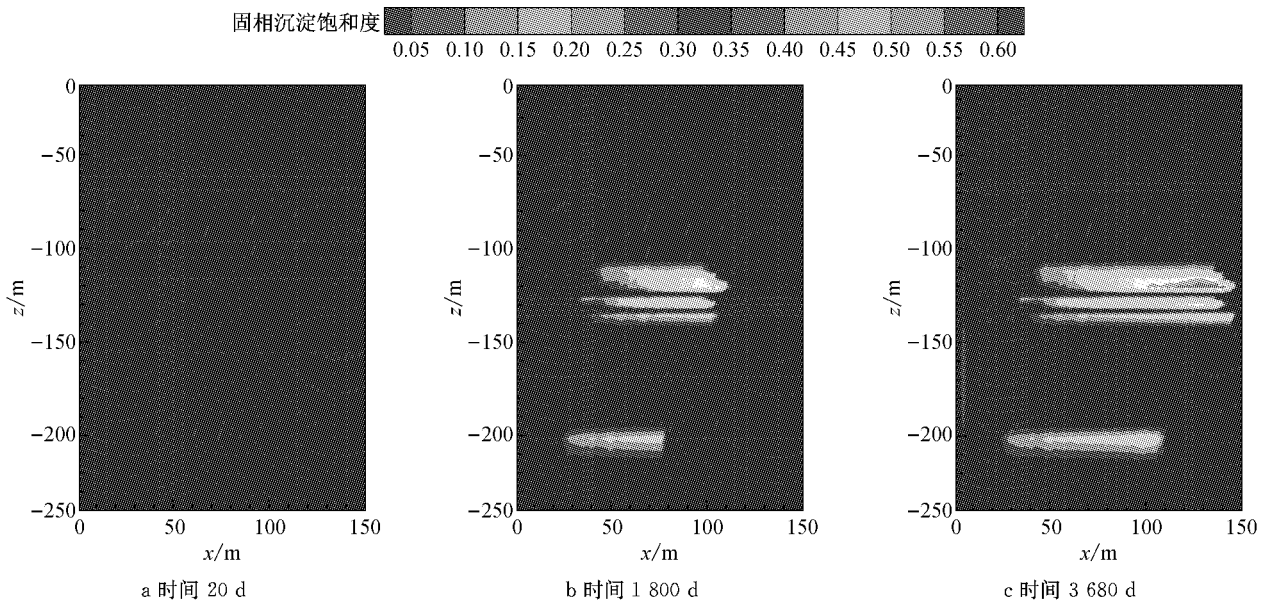


图 6 连续定量注入模型中回注期内固相沉淀饱和度变化图

Fig.6 Slurry (solid) mass saturation distribution at each layer under constant quantitative injection

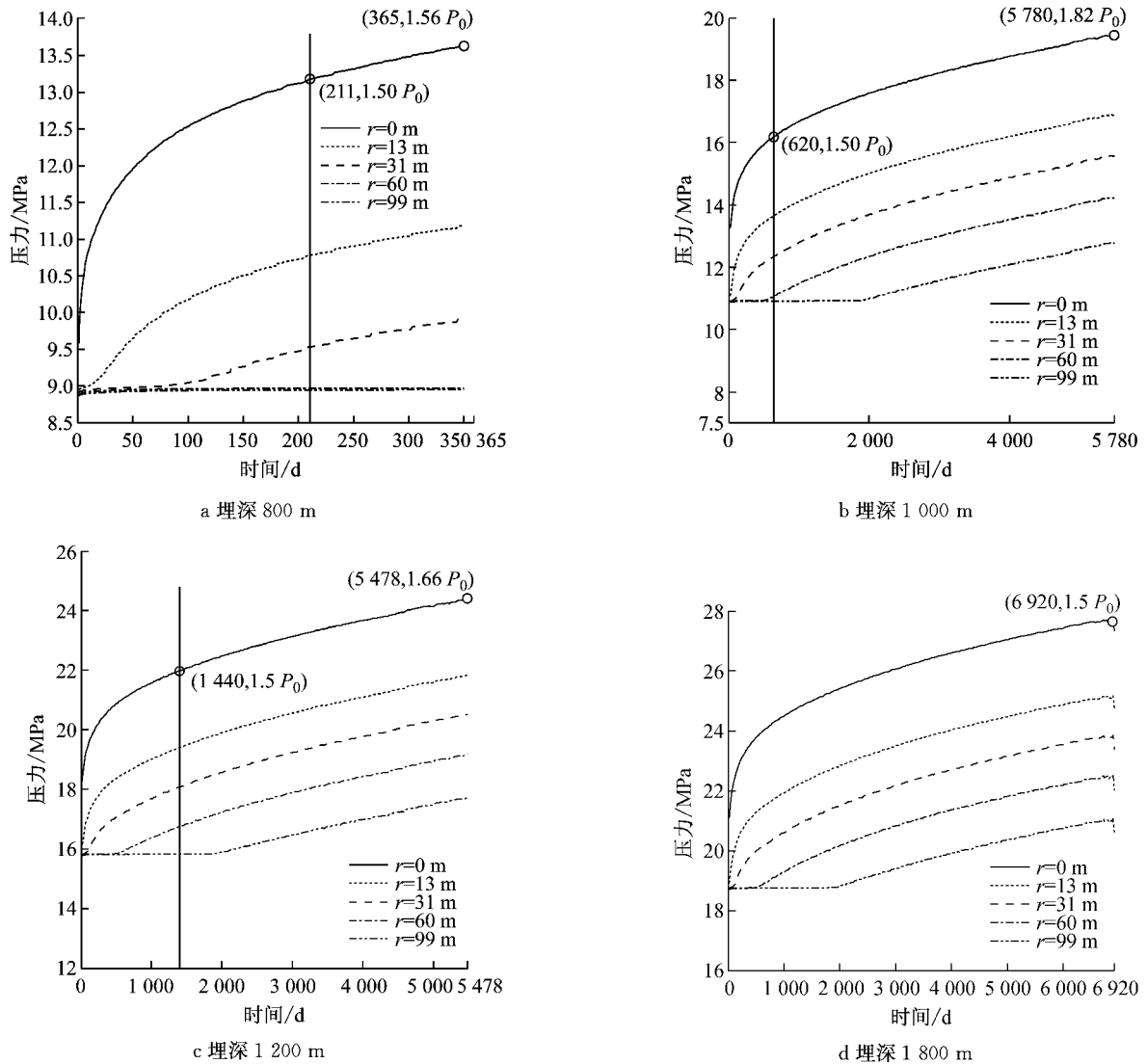


图 7 不同地层埋深方案中注入层压力变化及地层安全注入时间

Fig.7 Pressure variation and injection life span of cases with different formation depth

力随时间变化图,包含注入点,距离注入点距离分别为 0,13,31,60,99 m. 各监测点在注入周期的压力变化基本符合预期预测,在每个监测点的压力缓慢升高,并且随着监测点的深度加深,压力变化增大. 在每个方案中,第 13 层注入点网格监测点压力变化最大,最先达到注入层的安全压力阈值,即 $1.5P_0$,浆液注入停止.

地层埋深 800 m 时(图 7a),在 211 d 左右达到地层安全压力阈值,此时,地层中注入总量为 3.81×10^7 kg,影响半径大约为 49 m. 其余各地层埋深的注入量、影响半径见表 2. 顶部地层埋深越深,其注入量越多,影响半径越大,当地层埋深为 1 800 m 时,注入量最大,为 1.14×10^9 kg. 地层注入量与地层埋深变化趋势如图 8 所示,通过数据分析得到图中的计算公式. 图 9 为不同地层埋深方案对应影响半径变化图,可近似认为线性变化.

表 2 不同地层埋深注入量及影响半径

Tab.2 Injection quantity and influence radius of cases with different formation depth

顶部地层埋深/m	注入量/ 10^8 kg	影响半径/m
800	0.38	49
1 000	1.07	78
1 200	2.48	102
1 500	6.35	145
1 800	11.40	188

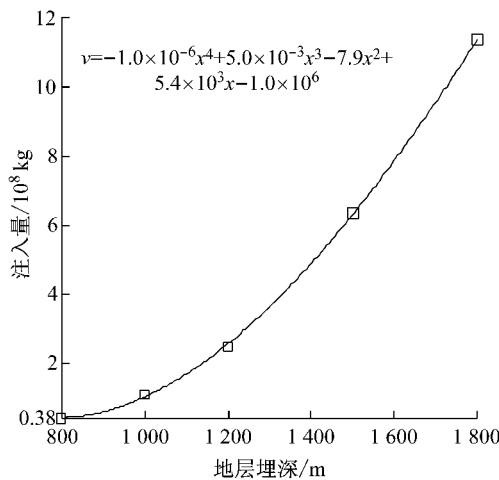


图 8 不同地层埋深储层注入量变化图

Fig.8 Injection quantity of different formation depth cases

3.3 不同地层渗透率对储层容量及影响半径影响

3.3.1 方案设计

地层渗透率为影响流体运移的重要因素之一,影响流体运移及压力的传播等进而影响地层储量及影响半径的评估,因此有必要针对渗透率进行敏感

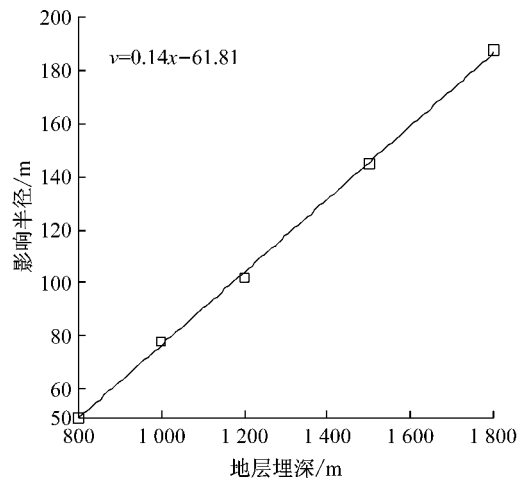


图 9 不同地层埋深影响半径变化图

Fig.9 Influence radius of different formation depth cases

性分析. 以基本模型渗透率为基准,选择 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.4 倍基本模型渗透率进行研究.

3.3.2 结果分析

同样假设地层安全压力阈值为 1.5 倍的原始静水压力,如图 10 所示,确定地层安全回注时间.

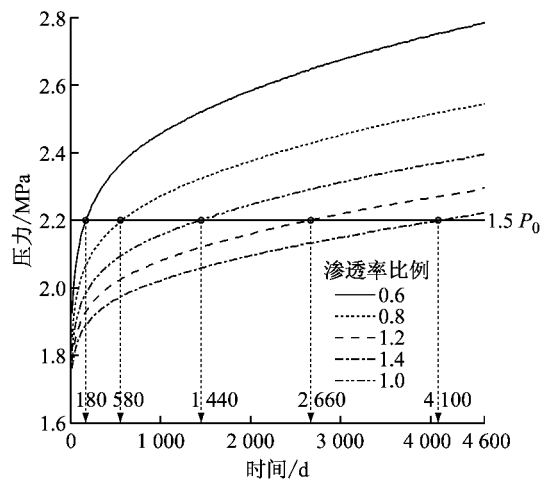


图 10 不同渗透率比例方案压力变化及回注时间确定

Fig.10 Pressure variation and injection life span of cases with different permeability

表 3 为不同渗透率比例方案下注入量及影响半径的结果. 对地层不同渗透率敏感性分析结果表明,不同的渗透率对浆液注入量及影响半径具有较大的影响.

对于浆液注入量和注入时间,图 11 中浆液注入量与渗透率比例变化,两者近似成指数型函数变化关系. 对于影响半径,如图 12 所示,近似成线性变化关系. 因此在评估地层回注容量及影响半径时,需要尽可能精确测量地层渗透率,因为较小倍数渗透率

表 3 不同渗透率比例方案注入量及影响半径对比

Tab.3 Injection quantity and influence radius of cases with different permeability

渗透率比例	注入总时间/d	注入量/ 10^5 t	影响半径/m
0.6	180	0.31	48
0.8	580	1.00	76
1.0	1 440	2.48	102
1.2	2 660	4.59	120
1.4	4 100	7.08	150

的变化,带来的地层容量及影响半径的评估将会产生较大误差.

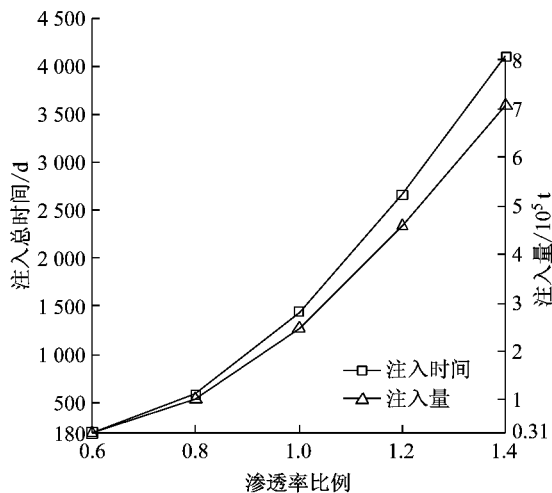


图 11 不同渗透率比例下浆液注入量及注入时间变化图

Fig.11 Slurry (liquid) quantity and injection life of cases with different permeability

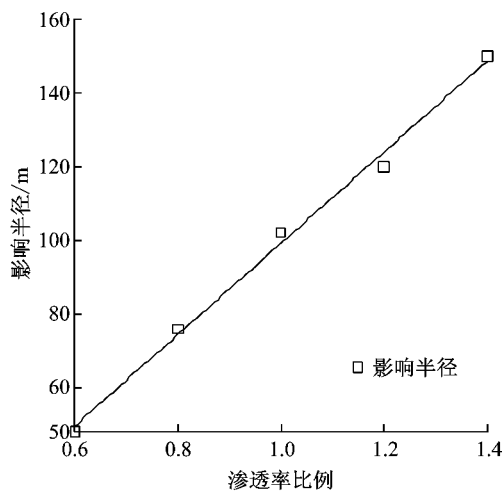


图 12 不同渗透率比例方案影响半径变化图

Fig.12 Influence radius of cases with different permeability

4 结语

浆液回注工程中,地层浆液回注容量及影响半

径的评估是工程设计与施工的前期重要步骤之一.数值模拟方法作为储量及影响半径评估时常用方法之一,TOUGH2 浆液模拟模块可描述浆液作为宾汉流体流动过程,浆液与水的混溶流动过程(满足达西定律,浆液质量分数足够大时进行有效压强梯度修正)以及浆液与水混溶流体的沉淀与溶解过程.不同地层埋深及不同渗透率较小倍数的变化对评估储层容量影响较大,均表现出近似指数形式变化的结果.对于影响半径近似为线性变化.根据不同浆液回注工程的回注量及影响半径的控制,应当选择适当地层埋深及渗透率.

模拟软件对储层容量及影响半径的判断仍然存在一些不足,如模型中浆液需按固定比例注入,在实际情况中会根据浆液回注量而变化,另外,理想模型中地层埋深及渗透率对储层容量及影响半径的影响均为单因素变化,在实际情况中储层容量和影响半径会受到地层埋深、渗透率、孔隙度等多因素综合影响,需要结合实际工程应用进行综合判断.

参考文献:

- [1] 段泽辉, 谢克姜, 张辉. 钻井废弃物全过程管理体系研究与应用[J]. 石油钻采工艺, 2010, 32(1): 107.
DUAN Zehui, XIE Kejiang, ZHANG Hui. Research and application of drilling waste life cycle management system[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2010, 32(1): 107.
- [2] 吴亮, 韩增, 陈宇, 等. 合成基泥浆钻井废弃物的处理方法概述[C]//中国环境科学学会学术年会. 北京: 中国环境科学学会, 2013: 5506-5512.
WU Liang, HANG Zeng, CHEN Yu, et al. Overview of the synthetic base mud drilling and well completion methods of dealing with the waste. [C]//Academic Annual Meeting of China Environmental Science Society. Beijing: China Environmental Science Society, 2013: 5506-5512.
- [3] 安文忠, 陈建兵, 牟小军, 等. 岩屑回注技术及其在国内油田的首次应用[J]. 石油钻探技术, 2003, 31(1): 22.
AN Wenzhong, CHEN Jianbing, MOU Xiaojun, et al. Applications of cuttings re-injection technology used in penglai I9-3 oilfield[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2003, 31(1): 22.
- [4] 李厚铭, 李学军, 张福铭, 等. 国外油田钻井废弃物回注处理技术进展[J]. 科学技术与工程, 2012, 12(28): 7318.
LI Houming, LI Xuejun, ZHANG Fuming, et al. Application status of cutting injection for drilling waste treatment at abroad [J]. Science Technology and Engineering, 2012, 12(28): 7318.
- [5] 乐宏, 陈华勇, 许期聪, 等. 国外新型钻井完井废弃物处理技术[C]//环保型钻井液技术及废弃钻井液处理技术研讨会. 杭州: 中国石油和石化工程研究会, 2010: 28-32.
LE Hong, CHEN Huayong, XU Qicong, et al. New technology of drilling completion waste disposal abroad [C]//

- Environmentally Friendly Drilling Fluid Technology and Waste Drilling Fluid Disposal Technology Seminar. Hangzhou: China Petroleum and Petrochemical Engineering Institute, 2010: 28-32.
- [6] 张霄. 地下工程动水注浆过程中浆液扩散与封堵机理研究及应用[D]. 济南: 山东大学岩土与结构工程研究中心, 2011. ZHANG Xiao. Diffusion of cement slurry in fracture dynamic grouting [D]. Jinan: Geotechnical and Structural Engineering Research Center, Shandong University, 2011.
- [7] 郝哲, 王介强, 刘斌. 岩体渗透注浆的理论研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(4): 492. HAO Zhe, WANG Jieqiang, LIU Bin. Theoretical study of osmotic grouting in rock mass [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(4): 492.
- [8] 葛家良, 陆士良. 注浆模拟试验及其应用的研究[J]. 岩土工程学报, 1997, 19(3): 28. GE Jialiang, LU Shiliang. Study on grouting simulation experiment and its application [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1997, 19(3): 28.
- [9] 刘健, 刘人太, 张霄, 等. 水泥浆液裂隙注浆扩散规律模型试验与数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(12): 2445. LIU Jian, LIU Rentai, ZHANG Xiao, *et al.* Diffusion law model test and numerical simulation of cement fracture grouting [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(12): 2445.
- [10] 乔道勇. 钻孔灌注桩桩底后注浆数值模拟研究[D]. 长春: 吉林大学建设工程学院, 2014. QIAO Daoyong. Numerical simulation of bottom cast-in-situ pile after grouting[D]. Jilin: Construction Engineering College of Jilin University, 2014.
- [11] 杨米加, 陈明雄, 贺永年. 裂隙岩体注浆模拟实验研究[J]. 实验力学, 2001, 16(1): 105. YANG Mijia, CHEN Mingxiong, HE Yongnian. Simulating experiment for grouting seepage in rockmass[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2001, 16(1): 105.
- [12] Ekambara K, Sanders R S, Nandakumar K, *et al.* Hydrodynamic simulation of horizontal slurry pipeline flow using ANSYS-CFX [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2009, 48(17): 8159.
- [13] Kim Y S, Whittle A J. Particle network model for simulating the filtration of a microfine cement grout in sand[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2009, 135(2): 224.
- [14] 李术才, 郑卓, 刘人太, 等. 基于渗滤效应的多孔介质渗透注浆扩散规律分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(10): 15. LI Shucui, ZHENG Zhuo, LIU Rentai, *et al.* Analysis of porous media permeation grouting diffusion rule based on filtration effect [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(10): 15.
- [15] 钟伟, 高振记, 臧雅琼. 工业有害废液地下灌注国内外研究现状分析[J]. 环境工程技术学报, 2013, 3(3): 208. ZHONG Wei, GAO Zhenji ZANG Yaqiong. Review of research on underground injection technology for industrial hazardous waste disposal both at home and abroad [J]. Journal of Environment Engineering Technology, 2013, 3(3): 208.
- [16] Pruess K, Oldenburg C, Moridis G, TOUGH2 user's guide version 2 report [R]. Berkeley: Lawrence Berkeley National Laboratory, 1999.
- [17] Wang Xiaoyu, Zhang Keni, Guo Chaobin. A Numerical Method for Simulating Cuttings Reinjection[C]//TOUGH Symposium 2015. Berkeley: Lawrence Berkeley National Laboratory, 2015: 257-264.
- [18] 王笑雨, 张可霓, 郭朝斌 等. 岩屑回注的数值模拟方法[J]. 水文地质工程地质, 2015, 42(6): 137. WANG Xiaoyu, ZHANG Keni, GUO Chaobin *et al.* A numerical method for simulating cuttings reinjection [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2015, 42(6): 137.
- [19] Bingham E C. An investigation of the laws of plastic flow [M]. Washington: National Bureau of Standards, 1917.
- [20] Wu Y, Pruess K. A numerical method for simulating non-Newtonian fluid flow and displacement in porous media [J]. Advances in Water Resources, 1998, 21(5): 351.
- [21] Pascal H. A theoretical analysis on stability of a moving interface in a porous medium for Bingham displacing fluids and its application in oil displacement mechanism [J]. The Canadian Journal of Chemical Engineering, 1986, 64(3): 375.