

# 微颗粒成分对金属网布筛管的堵塞机理实验研究

邓福成<sup>1,2,5\*</sup>, 林海<sup>3</sup>, 曹砚锋<sup>4</sup>, 潘豪<sup>4</sup>, 闫伟<sup>5</sup>

1 长江大学机械工程学院, 荆州 424023

2 湖北省油气钻完井工具工程技术研究中心, 荆州 424023

3 中海石油(中国)有限公司天津分公司, 天津 300459

4 中海油研究总院, 北京 100028

5 中国石油大学(北京)石油工程学院, 北京 102249

\* 通信作者, dengfucheng128@163.com

收稿日期: 2017-02-13

国家自然科学基金(51504040)、湖北省技术创新重大项目(2016ACA181)和长江青年基金(2015cqn43) 联合资助

**摘要** 针对金属网布筛管被地层砂中微颗粒堵塞而造成低产或停产的情况, 展开微颗粒对金属网布筛管堵塞机理的研究, 提出微颗粒成分及出砂次序对金属网布筛管堵塞机理的影响。利用油气井防砂模拟实验装置模拟了微颗粒防砂过程中金属网布筛管的堵塞过程及堵塞机理, 分析了影响金属网布筛管堵塞程度的因素及规律。结果表明: (1) 金属网布筛管对微颗粒中蒙脱石含量非常敏感, 蒙脱石含量越高, 堵塞越严重, 产能下降越快, 致使其产生严重堵塞的蒙脱石含量分界线为 10%。(2) 微颗粒混合组分越多, 金属网布筛管堵塞速度越快, 堵塞程度越严重; 微颗粒组分为单一组分时, 纯蒙脱石堵塞后的米采指数最小。(3) 筛管外泥饼颗粒外粗内细、明显分层, 说明黏土的水化膨胀性及泥饼的形成是造成金属网布筛管孔喉堵塞的重要原因。

**关键词** 防砂微颗粒; 金属网布筛管; 堵塞; 泥质含量; 含砂量

## 0 前言

理论防砂设计时, 主要考虑的因素包括: ①生产井储层强度情况; ②油藏孔隙压力情况; ③初始防砂成本; ④可靠性和防砂产能; ⑤完井维修费用; ⑥地层砂的分布形式<sup>[1]</sup>。但现场选用筛管类型时考虑最多的是防砂的可靠性及地层的粒度分布形式<sup>[2]</sup>。国内外对防砂方式设计及筛管类型选择开展了很多研究。如砾石尺寸设计时用到 Saucier 法则: 5~6 倍地层砂粒度中值( $d_{50}$ )<sup>[3]</sup>。优质筛管精度设计时用到 Schwartz 方法<sup>[4]</sup>: 主要考虑 UC( $d_{40}/d_{90}$ ) 分布范围和地层砂粒度的特征值  $d_{10}$ 、 $d_{40}$ 、 $d_{70}$ 。割缝筛管及绕丝筛管精度设计时用到 Stain 和 Coberly 方法<sup>[5]</sup>: 主要考虑地层砂粒度的特征值  $d_{85}$  和  $d_{10}$ 。以上方法虽然已在现场使用, 但在

设计过程中未考虑地层砂中的微颗粒部分, 特别是在深海深水油气藏中。

微颗粒可分为细粉砂颗粒( $d_{50} \leq 45 \mu\text{m}$ )和泥质( $d_{50} = 2 \mu\text{m}$ )。对于细粉砂含量较高的地层, 油田现场防砂设计时主要是采用砾石充填与其他筛管配合使用的方式。后来 Tiffen 在防砂设计时引入了 2 个新参数来评价地层砂的粒度分布<sup>[6]</sup>: 分选系数 SC( $d_{10}/d_{95}$ )及细颗粒含量(地层砂中小于  $45 \mu\text{m}$  颗粒所占总量的质量百分比), 对于泥质含量或细粉砂含量高的地层主要采用砾石充填完井。Temana 油田<sup>[7]</sup>细颗粒含量( $<45 \mu\text{m}$ )=35%, 生产初期采用砾石充填, 而后发现该方法表皮系数很高, 一部分井采用了绕丝筛管防砂, 但要限制生产压差。

调研发现, 目前对微颗粒成分( $<45 \mu\text{m}$ )对防砂方

引用格式: 邓福成, 林海, 曹砚锋, 潘豪, 闫伟. 微颗粒成分对金属网布筛管的堵塞机理实验研究. 石油科学通报, 2017, 04: 500-506

DENG Fucheng, LIN Hai, CAO Yanfeng, PAN Hao, YAN Wei. Experimental study of plugging mechanisms of metal mesh screens with different particle compositions. Petroleum Science Bulletin, 2017, 04: 500-506. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2017.04.046

式影响的研究很少，虽然砾石充填的效果较好，但砾石充填的成本是独立优质筛管的好几倍，如果在完井设计中普遍采用砾石充填不仅会增加完井操作时间，同时也会大幅增加完井成本。本文针对油田常用的金属网布筛管，利用防砂实验，研究微颗粒含量及组分对金属网布筛管堵塞机理的影响，分析微颗粒含量较高时，金属网布筛管的选择机制。

## 1 金属网布筛管堵塞机理实验

### 1.1 实验目的及实验装置

以往研究防砂筛管的防砂性能都是基于单个防砂单元进行比较评价的，此类模拟实验尺寸小，与实际生产条件有很大的差异。为此，笔者利用中国石油大学(北京)的油气井防砂模拟实验装置<sup>[8-9]</sup>完成了一系列的比较评价实验，如图1所示。该实验是基于全尺寸防砂管进行的，利用隔膜泵和安全阀等一系列设备模拟稳定油藏的生产条件，并进行有围压情况下的井筒内油砂混合物径向流动规律评价实验，可以更好地从整体上去评价筛管的性能。实验过程中，通过对流

量、压力、出砂量等参数进行测量，便可分析不同完井条件下油井产量与出砂量随时间的变化规律。

### 1.2 实验分析原则

为了评价金属网布筛管在模拟生产过程中的性能，同时为了满足实际实验要求，即平衡防砂与产能之间的矛盾，寻求一种适合油气田长期开发的防砂方式，提出了在保证防砂效果的前提下尽可能提高产能的原则。因此，需要研究不同防砂方式下出砂量和产能的变化规律，以此来评价金属网布筛管的抗堵塞性能。本文所述出砂量是每次实验收集到的产出砂结合产液量计算得到的出砂浓度，产量可用米采液指数来计算<sup>[10]</sup>，见公式(1)。

$$J = \frac{Q}{(p_r - p_{bf})h} \quad (1)$$

式中： $J$ —米采液指数， $m^3/(m \cdot d \cdot MPa)$ ；

$Q$ —流量， $m^3/d$ ；

$h$ —防砂管有效过流长度， $m$ ；

$p_r$ —储层压力， $MPa$ ；

$p_{bf}$ —井底流体压力， $MPa$ 。

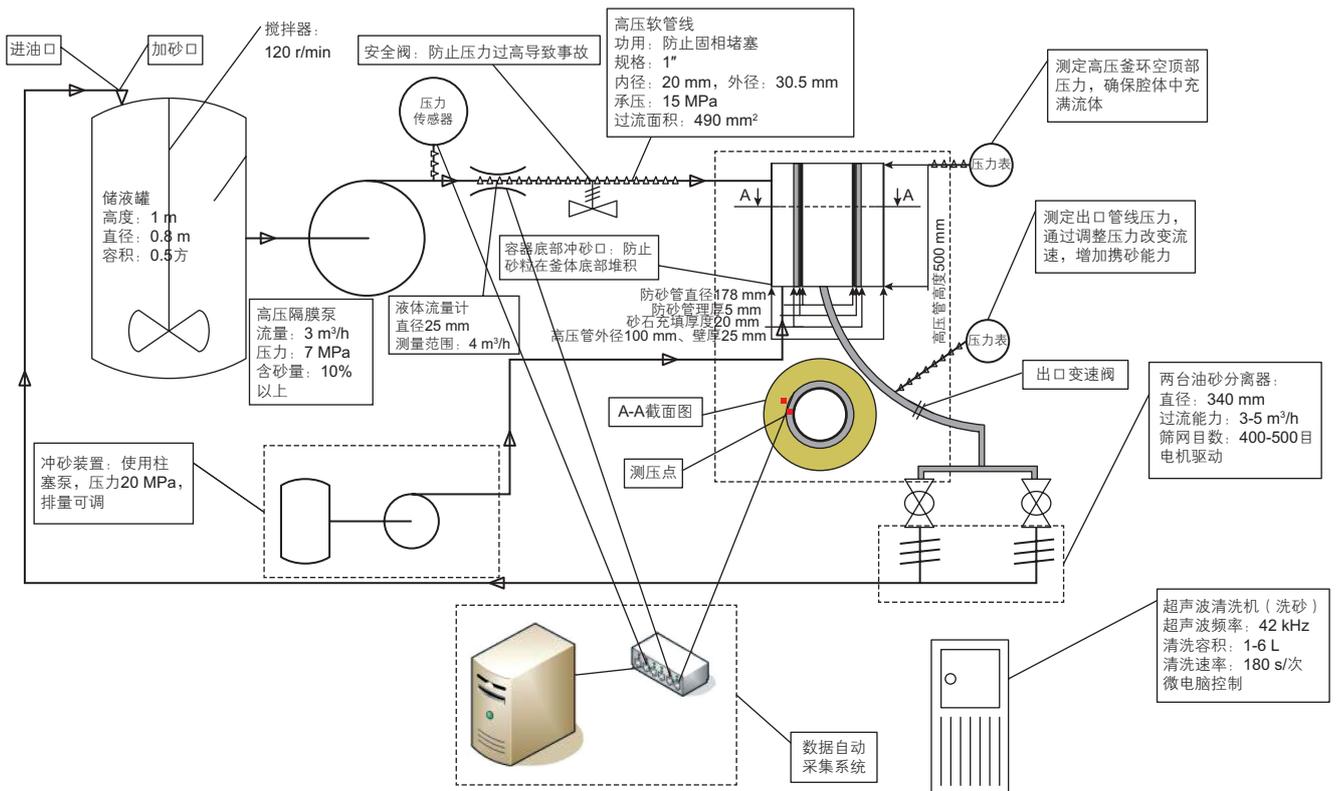


图1 金属网布防砂管防砂效果及抗堵能力评价装置流程图

Fig. 1 Evaluation device of sand control effect and anti-choking ability of the metal mesh screen

## 2 微颗粒对金属网布筛管的堵塞机理实验

### 2.1 蒙脱石含量对金属网布筛管堵塞的影响

实验用砂粒度中值  $d_{50}$  为  $146\ \mu\text{m}$ ，均质系数 UC 为 7；泥质含量 Vsh 黏土矿物总含量为 0~20%；防砂管尺寸为 5 1/2"；金属网布筛管防砂参数为  $150\ \mu\text{m}$ ；实验流体为白油，黏度  $100\ \text{mPa}\cdot\text{s}$ ；生产压差为 2 MPa。共进行了 5 组不同蒙脱石含量的金属网布筛管防砂模拟实验，对每组实验测试其通过防砂管的流量、防砂管压差、出砂量等参数，并进行激光粒度测试分析，测试数据如表 1 所示，实验结果如图 2 所示。

根据金属网布筛管在不同蒙脱石含量下，实验稳定后的产能、出砂量和产出砂的粒径变化得出：(1)金属网布筛管防砂稳定后产能均随蒙脱石含量的增加而降低，金属网布筛管受蒙脱石含量影响明显，产能下降较快。这说明金属网布筛管对微颗粒中蒙脱石的含量非常敏感，蒙脱石水化膨胀后在筛管表面形成泥饼

后造成堵塞，降低了筛管过流能力及其抗堵塞能力。纵然金属网布筛管有一定的自洁能力，但是当实验蒙脱石含量达到 10% 后，筛管外壁形成泥饼的速度超过了其自身抗堵塞能力，由于筛管外层泥饼的存在降低了筛管的过流能力，致使筛管在实验过程中的米采指数急剧下降。(2)蒙脱石含量超过 10% 后由于膨胀而加剧堵塞，形成泥饼，只有少量泥质和极细砂粒产出。可见蒙脱石在金属网布筛管防砂时，易形成泥饼，是影响防砂方式选择与产能发挥的关键因素。

### 2.2 微颗粒成分对金属网布筛管的堵塞机理

建立金属网布筛管在不同微颗粒组分下的防砂模型，实验过程中主要采用的模拟条件如下：①细粉砂含量为 100%；②伊利石含量 100%；③蒙脱石含量 100%；④蒙脱石和伊利石分别占比为 50%；⑤细粉砂、蒙脱石和伊利石分别占比为 33.33%。实验过程中，每次实验的总体含砂量为 6%，采用的防砂筛管挡砂精度为  $60\ \mu\text{m}$ ，在实验开始前，将微颗粒组分均匀混合后加入实验油中，实验结果如图 3 所示。

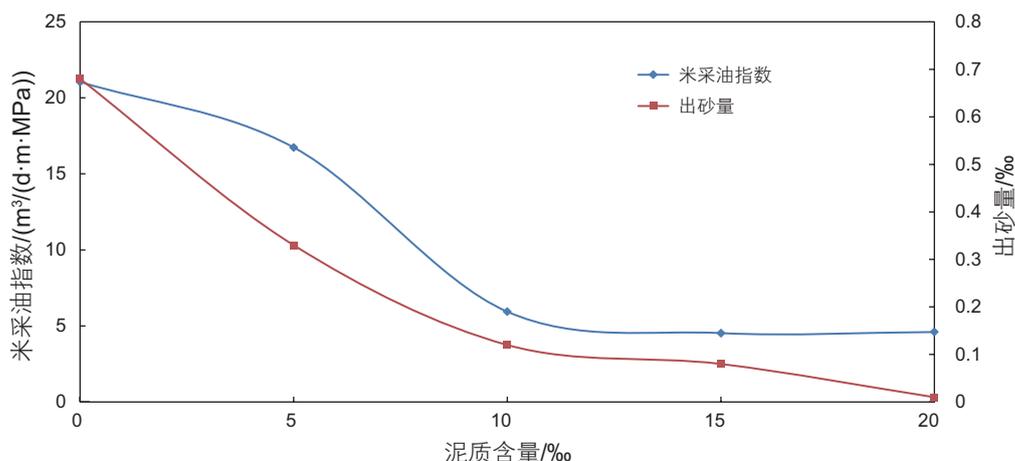


图 2 不同蒙脱石含量下，金属网布筛管产能和出砂量对比实验

Fig. 2 The capacity and sand production of the metal mesh screen with different montmorillonite contents

表 1 不同蒙脱石含量下，金属网布筛管出砂模拟实验结果

Table 1 The results of the metal mesh screen sanding simulation experiments with different montmorillonite contents

序号	蒙脱石含量 / %	初始流量 / (m³/h)	稳定后流量 / (m³/h)	防砂管压差 / MPa	稳定后产出砂 $d_{50}/\mu\text{m}$	稳定后油中含砂量 / %	稳定后米采油指数 / (m³/(d·m·MPa))
1	0	1.800	0.050	0.380	138	0.680	21.053
2	5	1.500	0.045	0.430	114	0.350	16.744
3	10	1.386	0.025	0.673	35	0.125	5.944
4	15	1.043	0.017	0.600	29.5	0.085	4.533
5	20	0.942	0.017	0.577	28.5	0.025	4.603

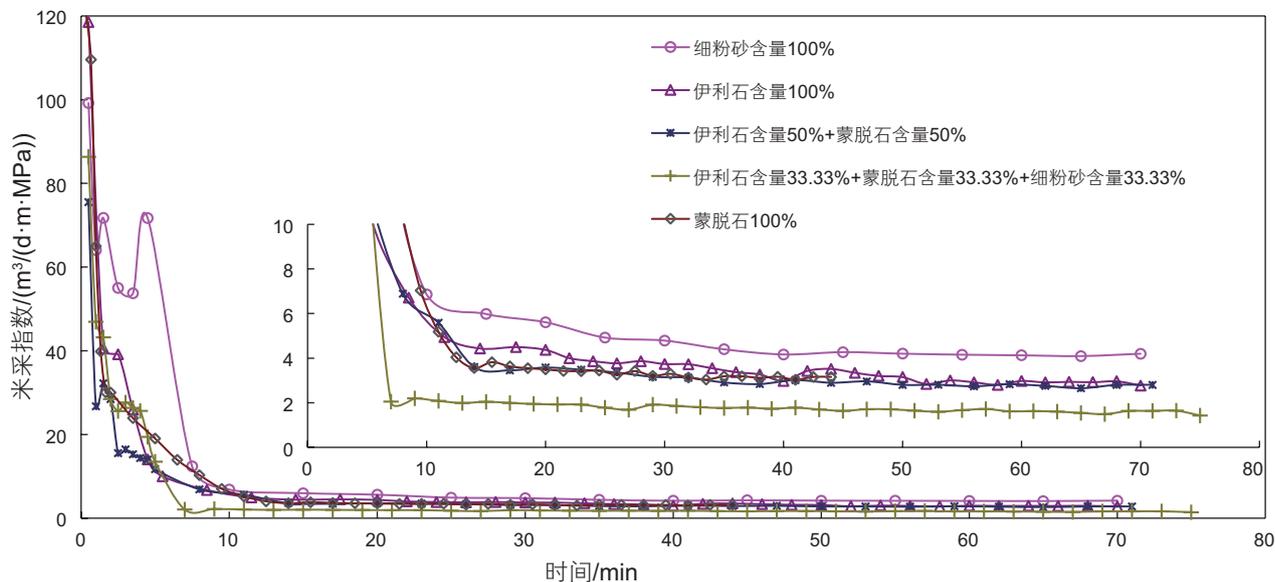


图3 金属网布筛管在不同微颗粒组分条件下的米采指数

Fig. 3 The oil-production index per meter of the metal mesh screen blocked by micro particles with different contents

从图3可以明显看出,当微颗粒组分为纯蒙脱石或细粉砂时,流量在开始阶段均出现先降后增趋势,但前者趋势相较后者不明显。说明在防砂初期,筛管表面迅速形成泥饼(蒙脱石水化膨胀)或建立有效砂拱(细粉砂在筛管表面架桥),过滤单元的有效过流面积减小,流量降低。随着实验进行,由于筛管表面堵塞后产生的不均匀过流速度,使泥饼堵塞面积略微减小或砂拱失效,使过流面积增大,内外表面建立的压差效应弱化,流量增大。但泥饼的致密性受不均匀流速的影响比砂拱小,所以砂拱失效后流量增加幅度更大,细粉砂作用条件下流量达到稳定的时间比蒙脱石的长。伊利石条件下对压力不敏感,实验前期未出现流量先降后增的趋势。细粉砂作用条件下,稳定后流量最高,伊利石次之,蒙脱石最低。

在蒙脱石和伊利石双重作用下,实验初期流量急剧下降,分析认为在这一阶段蒙脱石水化膨胀效应起主要作用,与蒙脱石单独作用表现趋势相似,流量先降后增,但增加的幅度并不大。该现象表明一旦油井见水,黏土矿物中蒙脱石的水化膨胀作用将导致筛管表面快速形成泥饼,因堵塞程度不均导致产生不均匀过流速度,但泥饼的致密性对流速的不均匀性不敏感。此外,单纯蒙脱石作用致使流量下降值比二者共同作用的小,主要是因为单纯蒙脱石膨胀形成的泥饼单独作用不及伊利石和膨胀的蒙脱石共同作用形成的泥饼强。在蒙脱石、伊利石和细粉砂三者共同作用条件下,稳定后流量比蒙脱石和伊利石共同作用的低。主要是

由于泥饼和砂拱共同作用条件下,筛管表面堵塞程度最高,不均匀流速已不能打破其平衡程度,对流速敏感的砂拱不能满足建立—打破—再建立条件,即压力扰动现象不明显,甚至不存在。

总体来说:(1)纯细粉砂对筛管的堵塞速率最慢,筛管过滤单元堵塞后有效过流面积较大,稳定后流量相比其他条件高。(2)伊利石、蒙脱石和细粉砂三者综合作用时,筛管堵塞速率最快,较短时间内流量达到稳定,且其值最低。其原因可解释为微颗粒混合组分越多,泥饼和砂拱共同作用越强,筛管堵塞程度越严重,有效过流面积越小,致使流量快速下降并迅速达到稳定值。(3)伊利石和蒙脱石共同作用时,受致密泥饼和蒙脱石水化膨胀共同影响,稳定后流量比单纯蒙脱石或伊利石的低。

### 2.3 出砂次序对金属网布筛管的堵塞机理

在防砂设计中,微颗粒组分及含量对防砂方式的选取有非常重要的影响,特别是泥质容易堵塞筛管的孔喉,降低生产后期油井产量。当储层泥质含量很高时,假设生产的过程中地层所出砂全为泥质,此时的实验条件为地层出砂的极限条件,结合油气藏在生产过程中的出砂秩序,地层出砂首先是储层中游离的微颗粒(泥质和微量细粉砂),而后一旦发生地层骨架砂破坏将会引起大量出砂(骨架砂破坏初始出砂也为细粉砂)。本实验为了模拟储层生产初始出砂及骨架砂破坏初始出砂的过程,设计了以下实验,其实验过程共

分5步。

(1)在实验油中混入1 kg的黏土,此时黏土比例为4‰(泥质与实验油质量之比)。通过观察出油口油品颜色判定,初期油品中含有一定量黏土,20 min后,油品变清。(2)在实验油中再混入1 kg黏土,此时黏土比例为8‰。观察出油口油品颜色,判定初期油品中含有一定量黏土,20 min后,油品变清。较第一次添加的黏土量来说,其流量降低不明显。(3)继续在实验油中混入5 kg黏土,此时黏土比例为2.8‰。观察出油口油品颜色,判定初期油品中同样含有一定量黏土,20 min后,油品变清。(4)流量稳定后继续加入4 kg黏土,此时黏土比例达到4.8‰。观察油品颜色,初期

3 min内,油品颜色有些许变黄,而后变清。(5)实验流量稳定后,继续向混砂罐中加入5.77 kg细粉砂(标准工业目数160~200目),实验流量继续下降。图4为实验过程中的米采指数曲线。

图5所示为实验后防砂管外侧的泥饼结构。观察可见泥饼有明显分层,紧贴防砂管外壁的颗粒非常细腻,判定其组分应为黏土,泥饼外表面颗粒度较内层粗,明显为细粉砂颗粒。证明在实验过程中,黏土首先在防砂管外形成了泥饼,实验中加的黏土和细粉砂继续在最初形成的泥饼外堆积,泥饼厚度逐渐增加,同时流量逐渐下降。由此认为,黏土的水化膨胀性及泥饼的形成是造成金属网布筛管孔喉堵塞的重要原因。

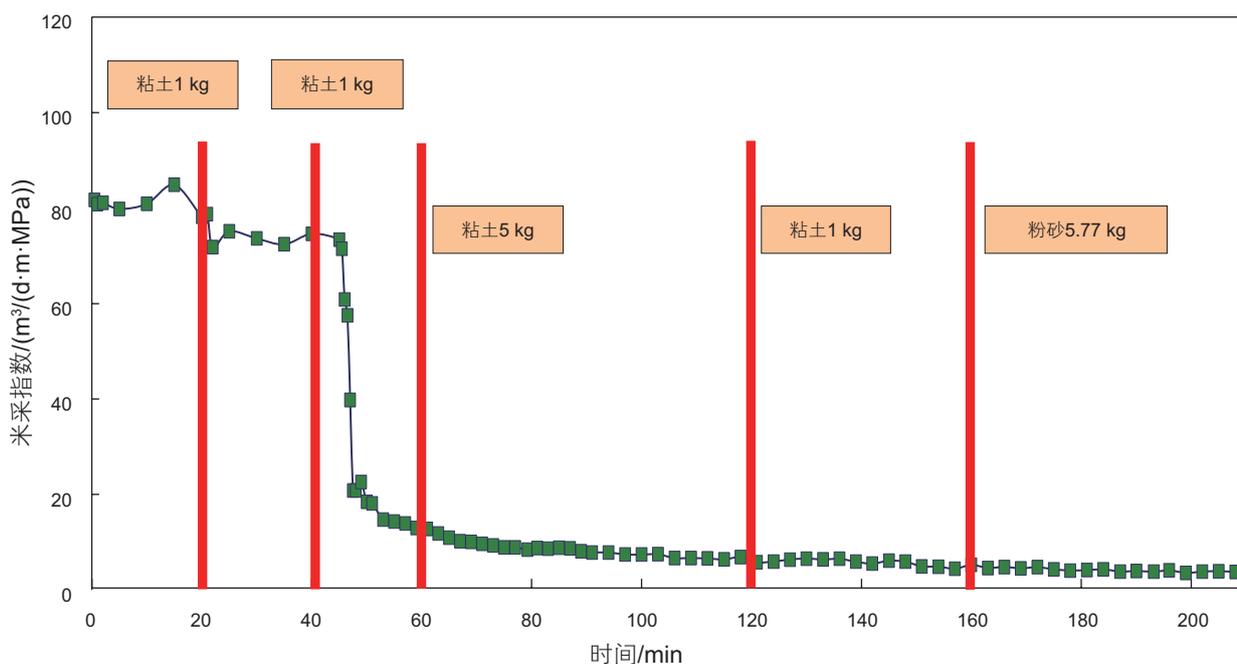


图4 黏土和细粉砂作用下筛管的实验流速和压力

Fig. 4 The flow rate and pressure raw data of the metal mesh screen blocked by clay and fine-silty sand



图5 实验筛管外泥饼断面图

Fig. 5 The mud cake profile of the screen

### 3 结论

(1) 金属网布筛管防砂稳定后的产能随蒙脱石含量的增加而降低, 且下降程度较快。蒙脱石含量在 10% 左右

时, 形成的泥饼超过自身抗堵塞能力, 防砂效果最差。

(2) 微颗粒组分越多, 金属网布筛管堵塞越快; 颗粒组分越多, 对筛管的堵塞能力越强。

(3) 出砂次序对筛管的堵塞效果没有影响, 但筛管外的泥饼结构不同, 有次序的出砂会在筛管外产生分层明显的泥饼。

### 参考文献

- [1] HASKELL J B, TOELSIE S, MOHAN A. Optimization of sand control for unconsolidated, shallow, and low- pressure sandstone reservoirs: A suriname case study[J]. SPE 133 461, 2010.
- [2] 尉亚民, 王爱萍, 董长银, 等. 基于出砂特征半径的水平井出砂临界生产压差预测模型[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2011, 35(02): 85-90.[WEI Y M, WANG A P, DONG C Y, et al. Prediction model for critical sanding pressure drawdown in horizontal wells based on characteristic break radius[J]. Journal of China University of Petroleum, 2011, 35(02): 85-90.]
- [3] SAUCIER R S. Considerations in gravel pack design[J]. SPE Reprint No.43, 1996.
- [4] Schwartz D H. Successful sand control design for high rate oil and water wells[J]. SPE 2 330-PA, 1969.
- [5] BENNETT C. Sand control screen erosion industry joint project[R]. Swri Project Report 04-8 560, 1998.
- [6] TIFFIN C L, KING G E, LARESE R E. New criteria for gravel and screen selection for sand control[J]. SPE 39 437, 1998.
- [7] BALLARD T, BYRNE M, SLAYTER A. Particle size distribution-the challenges and potential solutions[C]. 3rd European SPE Sand Management Forum, Panel Session, 2008
- [8] 邓金根, 李萍, 周建良, 等. 中国海上疏松砂岩适度出砂井防砂方式优选[J]. 石油学报. 2012, 33(04): 676-680.[DENG J G, LI P, ZHOU J L, et al. Sand control optimization applied to moderately sanding wells in offshore loose sandstone reservoirs[J]. Acta Petrolei Sinica. 2012, 33(04): 676-680. ]
- [9] 邓金根, 李萍, 王利华, 等. 渤海湾地区适度防砂技术防砂方式优选[J]. 石油钻采工艺. 2011, 33(01): 98-101.[DENG J G, LI P, WANG L H, et al. The optimization of sand control method for moderate sand control technique application in Bohai Bay[J]. Oil Drilling & Production Technology. 2011, 33(01): 98-101.]
- [10] 万仁溥, 罗英俊. 采油技术手册(修订版)第七分册 防砂技术[M]. 北京: 石油工业出版社, 2004.[WAN R F, LUO Y J. Advanced well completion engineering (third edition) [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2004.]

## Experimental study of plugging mechanisms of metal mesh screens with different particle compositions

DENG Fucheng<sup>1,2,5</sup>, LIN Hai<sup>3</sup>, CAO Yanfeng<sup>4</sup>, PAN Hao<sup>4</sup>, YAN Wei<sup>5</sup>

*1 School of Mechanical Engineering, Yangtze University, Jingzhou 424023, China*

*2 Hubei Province Engineering Research Centers of Oil & Gas Drilling and Completion Tools, Jingzhou 424023, China*

*3 CNOOC China Limited, Tianjin Branch, Tianjin 300451, China*

*4 CNOOC Research Institute, Beijing 100028, China*

*5 College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China*

**Abstract** The micro-particles in oil and gas reservoir sand can block the metal mesh used to stop sand particles entering the product stream, which will cause the production to decrease or shutdown. In order to help resolve these problems, this paper studied the mechanisms of micro-particles plugging metal mesh. The plugging mechanisms of metal mesh screen caused by different micro-particles compositions at different sand production sequences were put forward. The oil and gas well sand control simulation experimental device was used to study the plugging process, plugging mechanisms and effects of the metal mesh screen on the sand control process by micro-particles. The factors affecting the degree of plugging of the metal mesh screen was also studied here. The results show that: (1) The metal mesh screen plugging is very sensitive to the montmorillonite content of the micro-particles. The higher the montmorillonite content, the more rapidly the production capacity decreased. The boundary

of the serious blockage of montmorillonite contents is 10%. (2) The more components of the micro-particles, the faster the metal mesh screen was blocked, and the blockage was more serious. When the micro-particles are a single group, the oil well production index of the blocked screen pipe with pure montmorillonite is minimum. (3) The mud cake outside the screen is apparently layered. It shows that the hydration swelling characteristics of clay and the formation of the mud cake are two important factors that cause the pore throat blockage of the metal mesh screen.

**Keywords** micro-particles; metal mesh screen; plug; montmorillonite content; sand content

**doi:** 10.3969/j.issn.2096-1693.2017.04.046

(编辑 马桂霞)