

# 试油测试管柱中重晶石影响因素分析

庞振力<sup>1</sup>, 杜卫刚<sup>1</sup>, 曹智<sup>1</sup>, 刘勇<sup>1</sup>, 宋国强<sup>1</sup>, 陈雪茹<sup>2</sup>

1. 中国石油集团海洋工程有限公司油气技术分公司 天津 300451

2. 中国石油集团西部钻探工程有限公司试油公司 新疆克拉玛依 834000

通讯作者: Email: pangzl01. cpoe@cnpc. com. cn

项目支持: 中石油海洋公司科技研发项目“滩浅海油气开发工程关键技术研究”(202302-0201)

引用: 庞振力, 杜卫刚, 曹智, 等. 试油测试管柱中重晶石影响因素分析[J]. 油气井测试, 2025, 34(1): 7-14.

Cite: PANG Zhenli, DU Weigang, CAO Zhi, et al. Analysis of the influencing factors of barite in the well testing string [J]. Well Testing, 2025, 34(1): 7-14.

**摘要** 在试油测试作业中,重晶石的沉降会导致下入测试管柱遇阻、开关井操作及压井困难等问题。基于实验与仿真模拟分别进行了静态与动态循环高密度试油工作液中的重晶石沉降规律研究。实验结果表明,相同条件下200目重晶石静态1h沉降量是2m/s流速下的111.9倍;黏度、流速与管径的增大对重晶石沉降起抑制作用;粒径、密度的增大对重晶石沉降起促进作用。建立的静态条件下重晶石密度预测模型,最大误差7.7%,可以满足高温高压超深井试油测试作业中试油工作液稳定性测试的需求,为现场作业提供一定的技术支持。

**关键词** 试油测试;试油工作液;重晶石;粒径;沉降稳定性;预测模型;仿真模拟

**中图分类号**: TE27 **文献标识码**: B **DOI**: 10.19680/j.cnki.1004-4388.2025.01.002

## Analysis of the influencing factors of barite in the well testing string

PANG Zhenli<sup>1</sup>, DU Weigang<sup>1</sup>, CAO Zhi<sup>1</sup>, LIU Yong<sup>1</sup>, SONG Guoqiang<sup>1</sup>, CHEN Xueru<sup>2</sup>

1. Oil-Gas Technology Branch of CNPC Offshore Engineering Co., Ltd., Tianjin 300451, China

2. CNPC XiBu Drilling Engineering Company Limited, Well Testing Company, Karamay, Xinjiang 834000, China

**Abstract**: In well testing operations, the settlement of barite can lead to problems such as resistance when running in the testing string, difficulties in well opening and closing operations, and well killing. Based on experiments and simulation, the settlement laws of barite in high-density well testing working fluids under static and dynamic circulation conditions were studied respectively. The experimental results show that under the same conditions, the static settlement of 200-mesh barite in 1 hour is 111.9 times that at a flow rate of 2 m/s. The increase of viscosity, flow rate, and pipe diameter inhibits the settlement of barite, while the increase of particle size and density promotes the settlement of barite. The established density prediction model of barite under static and dynamic conditions has a maximum error of 7.7%, which can meet the needs of the stability test of well testing working fluids in well testing operations of high-temperature, high-pressure, and ultra-deep wells, providing certain technical support for on-site operations.

**Keywords**: well testing; well testing working fluid; barite; particle size; settlement stability; prediction model; simulation

在高温高压深井试油测试过程中,合理控制地层压力至关重要。通常采用重晶石来提高试油工作液的密度,以控制井底压力。然而,高密度试油工作液流变性和沉降稳定性是主要技术难点之一<sup>[1-2]</sup>。

随着勘探技术的进步,高温高压超深层探井逐渐增多,对高密度试油工作液要求也更高。重晶石沉降导致用于控制地层压力的试油工作液密度不足,造成井控困难等问题<sup>[3]</sup>;由重晶石配置的试油工作液在试油测试期间长时间静置,容易产生沉降和分层,导致下入测试管柱遇阻或替液期间开泵困

难<sup>[4-5]</sup>。其沉降稳定性、热稳定性等重要指标变差,引起测试管柱堵塞造成测试工具失效以及测试管柱卡埋等复杂情况,增加非生产时效,降低勘探开发效率,增加生产成本<sup>[6-8]</sup>。因此,要求重晶石在试油工作液的高温高密度条件下,具有良好的沉降稳定性和热稳定性。文中研究重晶石在试油工作液的静态与动态沉降稳定性具有重要的理论与工程意义<sup>[9]</sup>。高密度试油工作液重晶石沉降测试方法主要有静态沉降法和动态沉降法。目前,静态沉降测试法是评价试油工作液沉降稳定性最常用方法



之一,通过计算静态沉降因子来评价试油工作液在静态条件下的沉降趋势<sup>[10-12]</sup>。该方法简单易现场操作,适合对静态工况下试油工作液静态沉降稳定性评价,但对动态工况下试油工作液的沉降稳定性评价时,具有一定的局限性<sup>[13-14]</sup>。经过专家多年沉降规律的研究,形成了试油工作液沉降稳定性的预测方法和现场控制方法。随着高温高压超深井勘探的日趋增加,试油工作液沉降稳定性控制和调节仍面临着严峻的挑战<sup>[15-16]</sup>。一方面,需要简化沉降测试仪器以满足现场模拟条件;另一方面,需深入研究重晶石沉降规律,以求减少沉降,提高试油测试效率,实现现场调控和井场监测。

针对当前重晶石沉降研究中影响因素考虑不足、定量分析预测研究匮乏的问题,本研究基于实验与仿真模拟,分别完成了静态与动态循环高密度试油工作液中的重晶石沉降研究,揭示了重晶石沉降对试油工作液密度的影响规律,明确了重晶石粒径、密度、黏度及管柱尺寸对沉降稳定性的影响。同时,建立的静动态条件下考虑深度、重晶石粒径度、初始密度、黏度下的重晶石密度预测模型,可以满足高温高压超深井试油测试作业中试油工作液稳定性测试,为现场作业提供一定的理论参考。

# 1 测试管柱中重晶石静态沉降实验

本实验采用的是 0~100 kPa 压力传感器,各测点距测试管口距离分别为:1.15 m(测点 1)、2.4 m(测点 2)、3.65 m(测点 3)、4.9 m(测点 4)。

- 具体实验步骤如下:
- (1)用清水将管柱中的残余样品清洗干净,着重清洗压力传感器开孔处,防止重晶石沉积影响测试精度。
  - (2)使用搅拌器将配置好的试验样品充分搅拌,迅速将试验样品从管柱设备上端注入。在注入完毕后,使用计时器开始计时。
  - (3)从计时器开始计时起,在实验数据记录表上每隔 2 min 记录一次压力传感器示数。
  - (4)在沉降时间 60 min 时,用针筒先后从管柱上下端取样。将针筒取得的样品置于试油工作液比重器中测量其上下端密度,将上下端密度记录在数据表中。
  - (5)计算沉降速率:通过实验对各测点在不同时间下测得的密度  $\rho_{i,t}$ ,可计算得到相应测点  $i$  处的重晶石含量可以表示为

$$\eta_{i,t} = \frac{\rho_{i,t} - 1}{\rho_{\text{重晶石}} - 1} \tag{1}$$

式中: $\eta_{i,t}$  为重晶石含量,%; $\rho_{i,t}$  为各测点在不同时间下测得的密度,g/cm<sup>3</sup>; $\rho_{\text{重晶石}}$  为所使用的重晶石耗材密度,g/cm<sup>3</sup>。

(6)实验结束,将管柱中的实验样品从管柱下端阀门处放出,倒至废液桶中统一处理。切断电源,清洗管柱。

## 1.1 不同条件下测试管柱中重晶石静态沉降实验

### (1)重晶石静态沉降规律

开展了四个测点下黏度、密度、粒径、管柱尺寸影响试验,试验设定了三种黏度:10 mPa·s、20 mPa·s 和 30 mPa·s。每种黏度下密度分别为:1.2 g/cm<sup>3</sup> 和 1.5 g/cm<sup>3</sup>,粒径为 200 目和 400 目,管径为 50.8 mm 和 101.6 mm,共计 52 组。

以密度为 1.5 g/cm<sup>3</sup>、黏度为 30 mPa·s 的 400 目和 200 目重晶石样液为例,各测点处密度随时间变化曲线如图 1 所示。

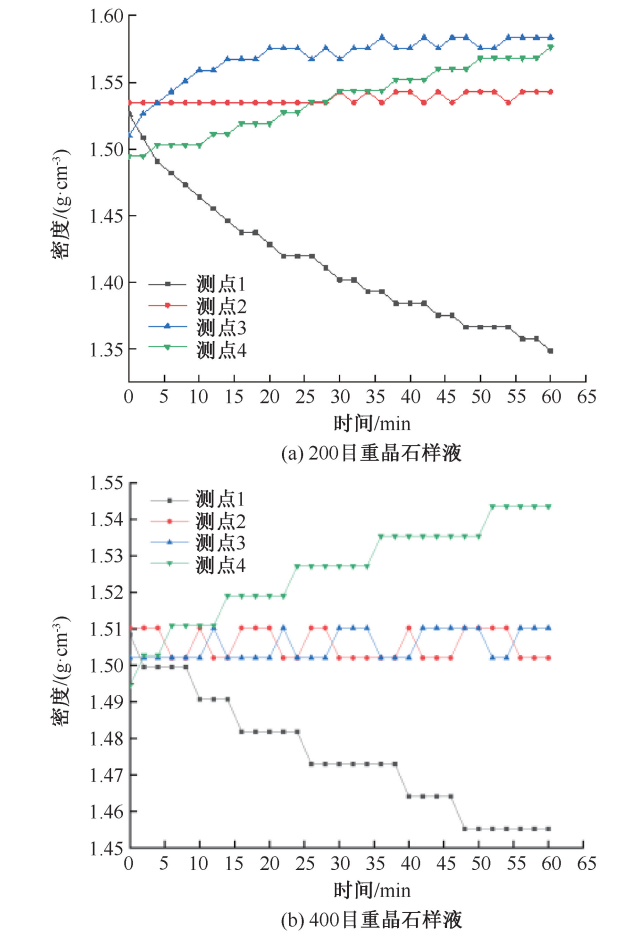


图 1 1.5g/cm<sup>3</sup>、30mPa·s 各测点处密度随时间变化曲线图  
Fig.1 Curve of density change over time at each measuring point of of 1.5 g/cm<sup>3</sup> and 30 mPa·s

图中可以看出:密度为  $1.5\text{ g/cm}^3$  的重晶石样液沉降过程中,管口附近处(测点 1)到管底附近处(测点 4)均匀分布的 4 个测点处密度变化可知:管口附近处样液密度呈降低趋势,且密度降低速度逐渐减缓;管底附近处呈上升趋势,密度上升速度逐渐减缓;中间两测点处密度相对稳定。同时可以得到:重晶石沉降速度随时间呈逐渐减缓的趋势;当沉降效果较为明显时,中间两测点也呈现出沉降速度逐渐减缓的趋势。

(2)黏度对重晶石样液沉降的影响规律

以密度为  $1.5\text{ g/cm}^3$  的 200 目与 400 目重晶石样液在  $10\text{ mPa}\cdot\text{s}$ 、 $20\text{ mPa}\cdot\text{s}$  和  $30\text{ mPa}\cdot\text{s}$  三种黏度下的沉降实验为例,5 m 管柱的重晶石样液沉降过程中管口附近处(测点 1)密度及管底附近处(测点 4)密度随时间变化情况为: $1.5\text{ g/cm}^3$  的 200 目重晶石样液在相同沉降时间(60 min)下, $10\text{ mPa}\cdot\text{s}$  时距管口  $1.15\text{ m}$  处(测点 1)密度减小量为  $0.24\text{ g/cm}^3$ 、管底附近(测点 4)密度增大量为  $0.16\text{ g/cm}^3$ ;  $30\text{ mPa}\cdot\text{s}$  时距管口  $1.15\text{ m}$  处(测点 1)密度减小量为  $0.18\text{ g/cm}^3$ 、管底附近(测点 4)密度增大量为  $0.08\text{ g/cm}^3$ 。因此可以得到:随黏度的升高,管口附近处密度下降减缓、管底附近处密度升高速度减缓。即:随黏度升高,重晶石沉降速率减缓。

(3)密度对重晶石样液沉降的影响规律

以黏度为  $10\text{ mPa}\cdot\text{s}$  的重晶石样液在  $1.2\text{ g/cm}^3$  和  $1.5\text{ g/cm}^3$  两种初始密度下的沉降实验为例,5 m 管柱的重晶石样液沉降过程中管口附近处(测点 1)密度及管底附近处(测点 4)密度随时间变化曲线如图 2 所示。

图中可以看出:黏度为  $10\text{ mPa}\cdot\text{s}$  的 200 目重晶石样液在相同沉降时间(60 min)下,初始密度为  $1.2\text{ g/cm}^3$  时距管口  $1.15\text{ m}$  处(测点 1)密度减小量为  $0.098\text{ g/cm}^3$ 、管底附近处密度(测点 4)密度增大量为  $0.076\text{ g/cm}^3$ ;初始密度为  $1.5\text{ g/cm}^3$  时距管口  $1.15\text{ m}$  处(测点 1)密度减小量为  $0.24\text{ g/cm}^3$ 、管底附近处密度(测点 4)增大量为  $0.16\text{ g/cm}^3$ 。因此可以得到:随密度的增大,管口附近处密度下降速度增大、管底附近处密度升高速度增大。即随密度升高,重晶石沉降速率增大。

(4)粒径对重晶石样液沉降的影响规律

以密度为  $1.5\text{ g/cm}^3$  的重晶石样液在 200 目和 400 目两种黏度下的沉降实验为例,5 m 管柱的重晶石样液沉降过程中管口附近处(测点 1)密度及管底附近处(测点 4)密度随时间变化曲线如图 3 所示。

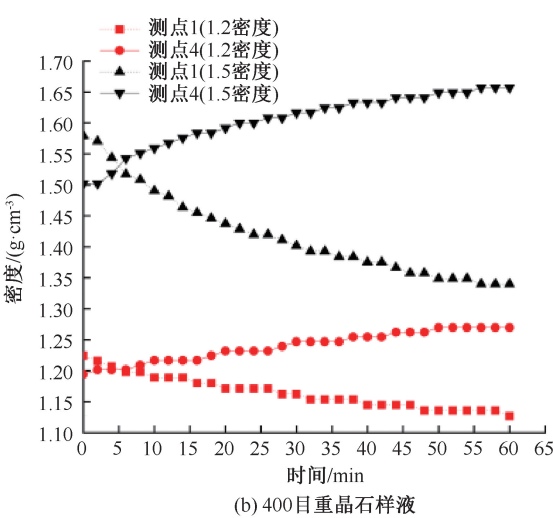
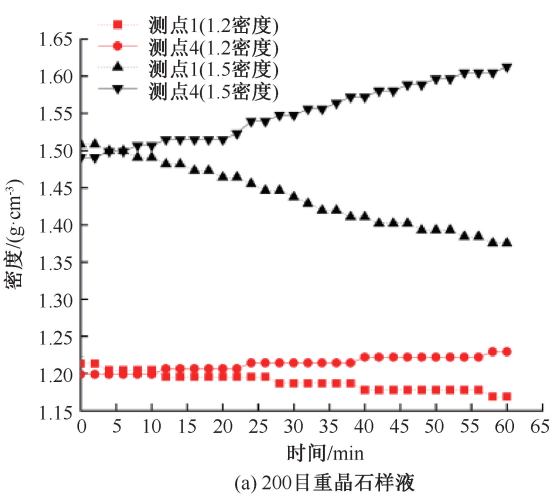


图 2 各测点处密度随时间变化曲线图  
Fig. 2 Curves of density versus time at each measuring point

图中可以看出:黏度为  $10\text{ mPa}\cdot\text{s}$  的重晶石样液在相同沉降时间(60 min)下,200 目时距管口  $1.15\text{ m}$  处(测点 1)密度减小量为  $0.24\text{ g/cm}^3$ 、管底附近处密度(测点 4)密度增大量为  $0.16\text{ g/cm}^3$ ; 400 目时距管口  $1.15\text{ m}$  处(测点 1)密度减小量为  $0.13\text{ g/cm}^3$ 、管底附近处(测点 4)密度增大量为  $0.12\text{ g/cm}^3$ 。因此可以得到:随粒度的增大,管口附近处密度下降速度增大、管底附近处密度升高速度增大。即随粒度升高,重晶石沉降速率增大。

(5)管柱尺寸对重晶石样液沉降的影响规律

以密度为  $1.2\text{ g/cm}^3$  的 200 目的重晶石样液在直径为  $50.4\text{ mm}$  和  $101.6\text{ mm}$  管柱下的沉降实验为例,5 m 管柱的重晶石样液沉降过程中管口附近处(测点 1)密度及管底附近处(测点 4)密度随时间变化曲线如图 4 所示。

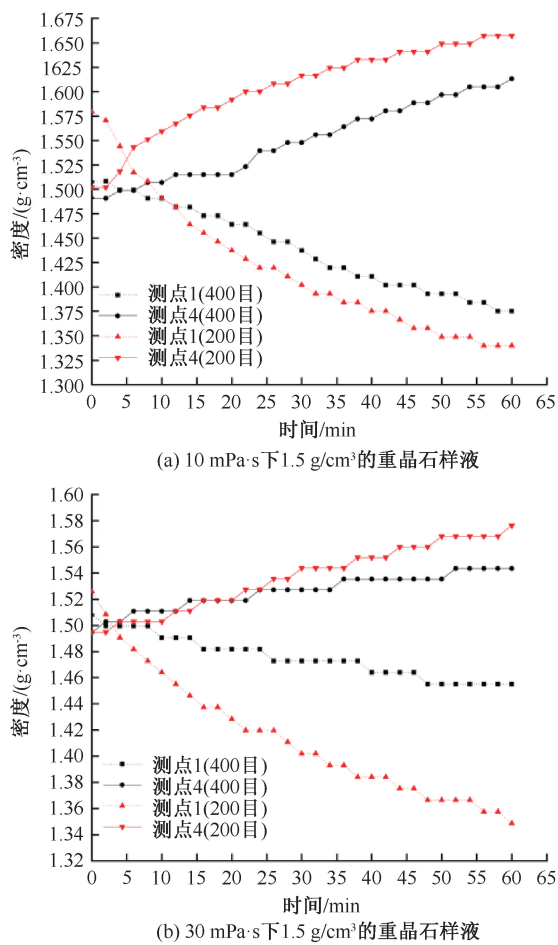


图 3 400 目与 200 目各测点处密度随时间变化曲线图  
Fig. 3 Curves of density versus time at each measuring point for 400 mesh and 200 mesh

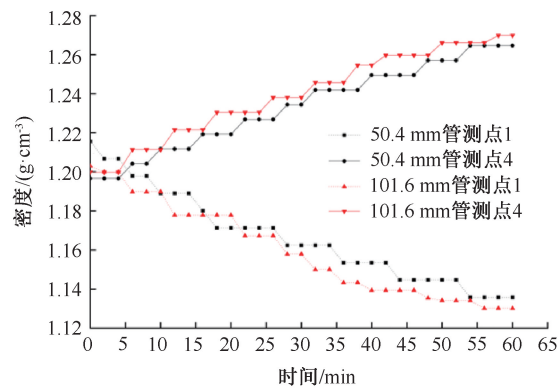


图 4 不同管柱各测点密度随时间变化曲线图  
Fig. 4 Curves of density versus time at each measuring point under different column sizes

图中可以看出,黏度为 30 mPa·s 的重晶石样液在相同沉降时间(60 min)下,管柱直径为 50.4 mm 时距管口 1.15 m 处(测点 1)密度减小量为 0.079 9 g/cm<sup>3</sup>、管底附近处(测点 4)密度增大量为 0.068 0 g/cm<sup>3</sup>;管柱直径为 101.6 mm 时距管口 1.15 m 处(测点 1)密度减小量为 0.072 9 g/cm<sup>3</sup>、管底附近处

(测点 4)密度增大量为 0.070 0 g/cm<sup>3</sup>。与影响重晶石沉降的黏度、密度等影响因素相比,管柱尺寸的影响效果比较微弱。因此可以得到:随管柱直径的增大,管口附近处密度下降量与管底附近处密度升高量小幅度增大。即随管柱尺寸的增大,重晶石沉降速率小幅度增大。

1.2 模型建立

对实验得到的不同深度处密度变化数据进行公式拟合<sup>[17-18]</sup>,见公式(2)。使用方法为:基于已有的实验数据,找到拟合度效果最好的表达式。对相关参数进行拟合,在软件运行足够时间后,收敛百分比达到 100%。通过比较 R<sup>2</sup>、相关系数、最大误差、平均绝对误差和均方误差对拟合得到的一系列模型进行优选,得到关于某一时刻重晶石样液在不同深度、不同重晶石粒度、不同初始密度、黏度下密度随时间变化的最优模型。

$$\rho = \rho_0 + \frac{2.56 \times 10^{-5} \mu t - 0.000\ 118 t d \rho_0^3}{\sin(h)} \quad (2)$$

式中: $\rho$  为重晶石样液密度,g/cm<sup>3</sup>; $\rho_0$  为样液初始密度,g/cm<sup>3</sup>; $\mu$  为黏度,mPa·s; $t$  为时间,min; $d$  为重晶石直径,10<sup>-5</sup>m; $h$  为距管口深度,m。

分析拟合得到的密度变化模型可知:密度变化模型相关系数高达 0.993 以上;R<sup>2</sup> 高于 0.987;均方误差小于 0.000 33;最大误差小于 7.7%;平均绝对误差小于 1.3%。

1.3 模型验证

使用未参与模型拟合的实验数据对模型进行验证,得到该模型各测点的实际密度与预测模型曲线对比如图 5 与图 6 所示。

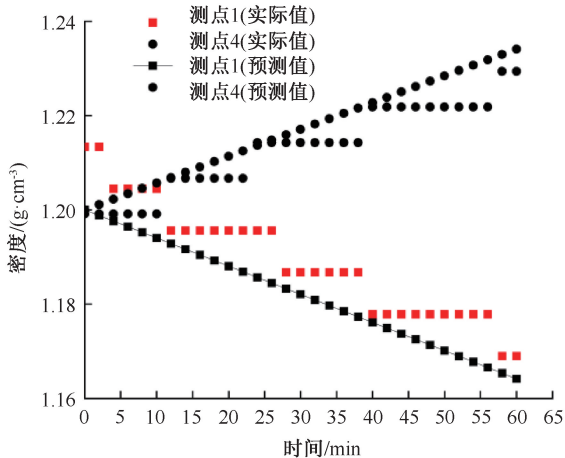


图 5 密度为 1.2g/cm<sup>3</sup>、黏度为 8.5mPa·s 的 400 目测点曲线对比  
Fig. 5 Comparison of 400 mesh test samples with density of 1.2 g/cm<sup>3</sup> and viscosity of 8.5 mPa·s



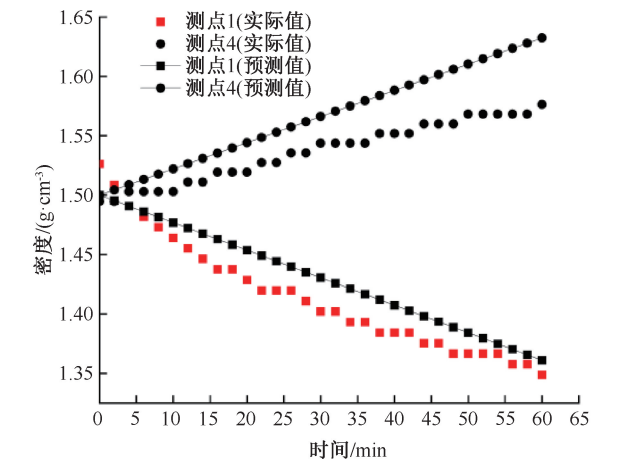


图6 密度为 1.5g/cm<sup>3</sup>、黏度为 32.5mPa·s 的200 目测点曲线对比

Fig. 6 Comparison of 200 mesh test samples with density of 1.5 g/cm<sup>3</sup> and viscosity of 32.5mPa·s

2 重晶石沉降动态模拟分析

使用 Fluent 软件建立了与重晶石动态沉降尺寸相同的管柱,模拟该尺寸井筒在工作液循环过程中的重晶石沉降。通过雷诺数相似对该管柱尺寸下试油工作液流速进行相似计算<sup>[19]</sup>,得到动态沉降数值模拟需要设定的流速范围。当该井试油工作液密度、排量取最大值;黏度取最小值时求得最大雷诺数,反之得到最小雷诺数。计算得到对应该井的雷诺数范围可求得仿真模拟时的流速范围:2.19~6.65 m/s。设计 Fluent 仿真模拟中工作液参数设计如表 1 所示。

表 1 仿真模拟工作液参数设计表			
Table 1 Parameter design table for simulation working fluid			
黏度/mPa·s	密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	流速/(m·s <sup>-1</sup> )	粒径/mm
10~40	1.2~1.5	2~6	0.017 5~0.075

在 Fluent 仿真模拟中选用欧拉多相流模型,通过创建标准状况下的水与标准状态下密度为 4.5 g/cm<sup>3</sup> 的固相来模拟管柱内试油工作液循环过程。通过调整液相黏度、固相体积分数(重晶石密度)、固相颗粒直径(重晶石粒径)、两相入口速度,来模拟不同工况下工作液循环过程中重晶石的沉降。

(1) 重晶石动态沉降规律

以 200 目重晶石在黏度为 10 mPa·s、密度为 1.5 g/cm<sup>3</sup>、流速为 2 m/s 时为例,在沉降时间为 1 h 时,三个不同深度测点处试油工作液密度随时间变化情况为:在沉降时间达到 44 min 后试油工作液密

度到达相对稳定状态。与静态基本规律相似,重晶石动态沉降过程中:管底与管口附近处重晶石沉降效果相对明显;管柱中间部分相对稳定。各深度处重晶石随时间推移始终在初始密度处波动,较之于静态沉降变化极小。对比不同深度可得,距管底 0.25 m 处重晶石密度增大最为显著,距管底 1 m 处次之。即:越靠近管柱底部处,重晶石沉降越显著。动态沉降过程中初始时重晶石沉降速度较快,一段时间后各深度测点处密度趋于稳定,即沉降到达相对稳定状态。

200 目重晶石在黏度为 20 mPa·s、密度为 1.5 g/cm<sup>3</sup>、流速为 2 m/s,在沉降时间为 1 h 时,三个不同深度测点处工作液密度随时间变化情况为:相同实验条件下与静态沉降相比(1.34~1.66 g/cm<sup>3</sup>),重晶石动态沉降量更小,整体在初始重晶石密度附近(1.500~1.501 1 g/cm<sup>3</sup>)波动。即:与动态沉降相比,重晶石动态沉降速度更慢。

(2) 黏度对重晶石动态沉降的影响规律

以初始密度为 1.5 g/cm<sup>3</sup> 的 200 目实验样品(2 m/s)为例,在 10、20、40 mPa·s 三种黏度下,距管底 0.25 m 及距管底 2 m 处密度随时间变化曲线如图 7(a)和(b)所示。

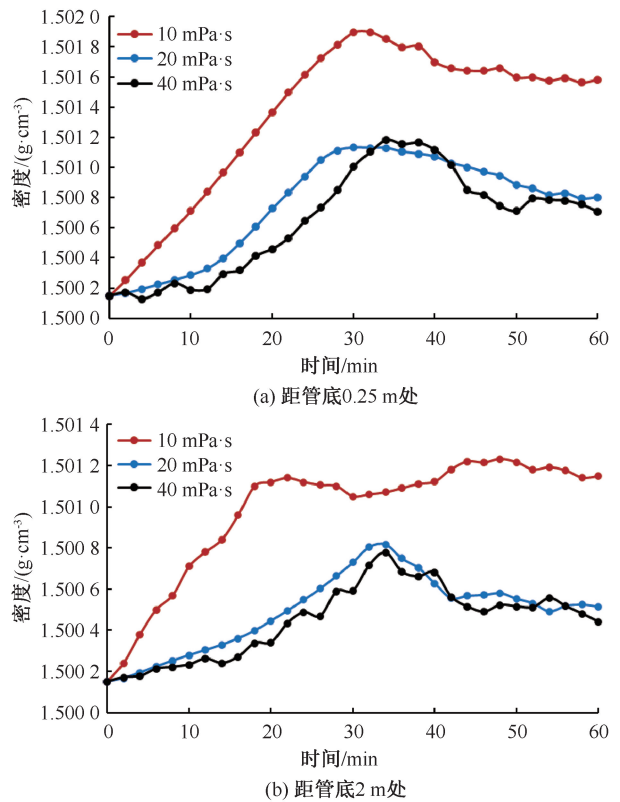


图 7 不同黏度密度变化曲线

Fig. 7 Curves of density variation at different viscosities

图中可以看出:距管底 0.25 m 处相同沉降时间(1 h),黏度为 10 mPa·s 时,密度变化为 0.001 43 g/cm<sup>3</sup>,黏度为 40 mPa·s 时,密度变化为 0.000 56 g/cm<sup>3</sup>;即:随黏度的升高,重晶石沉降效果显著降低;同时,图中可以看出黏度为 20 mPa·s 与 40 mPa·s 时重晶石沉降曲线几乎重合。即当黏度到一定高度后,黏度对重晶石的沉降影响微弱。

(3) 粒径对重晶石动态沉降的影响规律

初始密度为 1.5 g/cm<sup>3</sup> 实验样品(2 m/s、20 mPa·s)为例,200 目、800 目和 400 目三种粒度下,距管底 1 m 及 3 m 处密度随时间变化曲线如图 8 (a)和(b)所示。

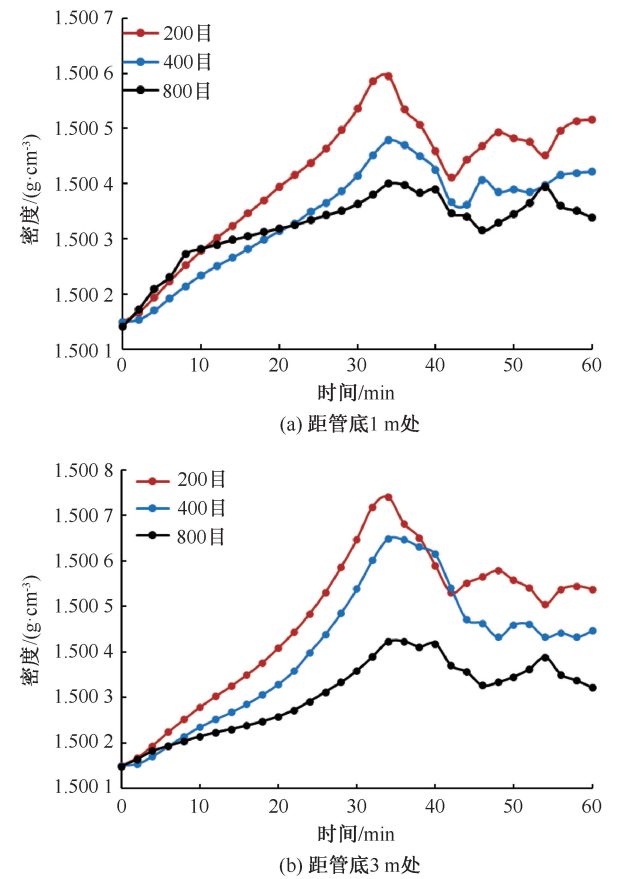


图 8 不同粒度时密度变化曲线

Fig. 8 Curves of density variation at different particle sizes

图中可以看出:距管底 1 m 处相同沉降时间(1 h),粒度为 200 目时,密度变化为 0.000 52 g/cm<sup>3</sup>,粒度增大至 800 目时,密度变化为 0.000 34 g/cm<sup>3</sup>;即:随粒度的升高,重晶石沉降效果显著降低。

(4) 流速对重晶石动态沉降的影响规律

以初始密度为 1.5 g/cm<sup>3</sup> 的 400 目实验样品(20 mPa·s)为例,在 2 m/s、4 m/s 和 6 m/s 三种流量下,距管底 1 m 距管底 3 m 处密度随时间变化曲线如图 9 (a)和(b)所示。

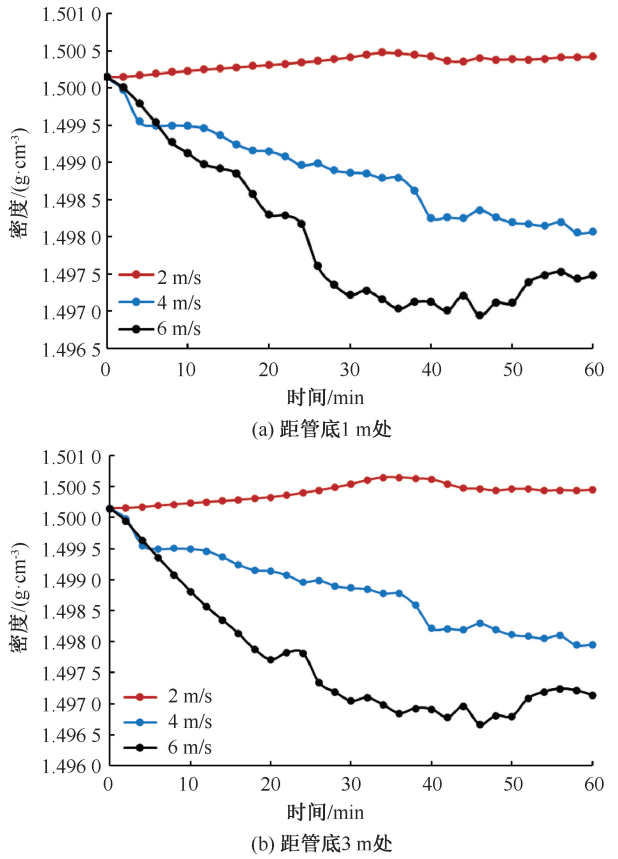


图 9 不同流速时密度变化曲线

Fig. 9 Curves of density variation at different flow rates

图中可以看出:距管底 0.25 m 处沉降时间 1 h,流量为 2 m/s 时,密度变化为 0.000 27 g/cm<sup>3</sup>,流量为 6 m/s 时,密度变化为-0.002 7 g/cm<sup>3</sup>;即:随流量的增大,重晶石沉降量显著降低;当流速到达一定高度时,管柱中间部分重晶石沉降量为负。

(5) 密度对重晶石动态沉降的影响规律

以初始流速为 2 m/s 的 200 目实验样品(20 mPa·s)为例,在 1.2 g/cm<sup>3</sup> 和 1.5 g/cm<sup>3</sup> 两种初始密度下,距管底 0.25 m、2 m 和 5 m 处密度随时间变化曲线如图 10 (a)和(b)所示。

图中可以看出:距管底 0.25 m 处相同沉降时间(1 h),初始密度为 1.2 g/cm<sup>3</sup> 时,密度变化为-0.000 30 g/cm<sup>3</sup>;初始密度为 1.5 g/cm<sup>3</sup> 时,密度变化 0.000 56 g/cm<sup>3</sup>;即:随密度的增大,重晶石沉降量显著增大;一定流速下,且当密度小到一定程度时,管柱内重晶石沉降量为负值。

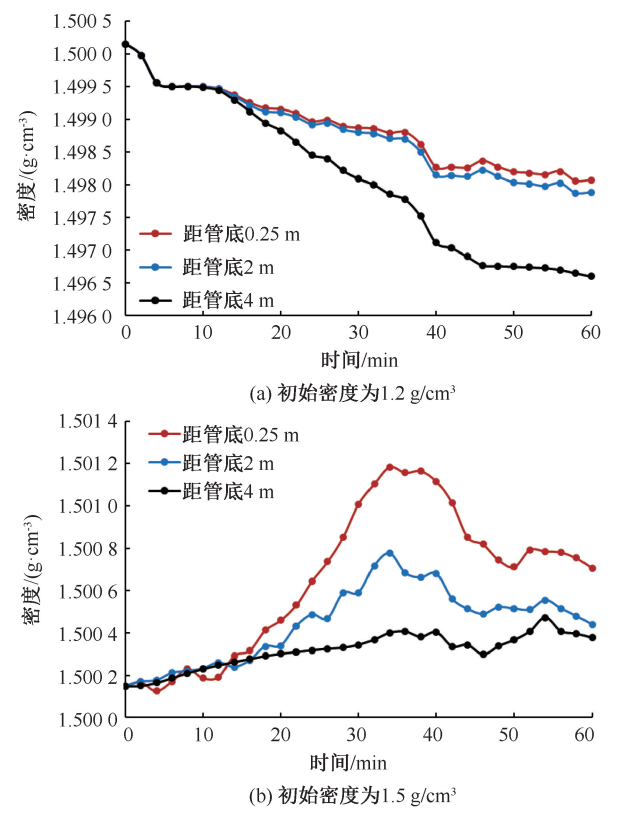


图 10 不同深度处密度变化曲线

Fig. 10 The density-variation curve at different depths

3 结论

(1)通过实验得知,越靠近管柱底部处,重晶石沉降越显著。动态沉降过程中初始时重晶石沉降速度较快,一段时间后各深度测点处密度趋于稳定,即沉降到达相对稳定状态。

(2)通过实验得知,重晶石沉降效果影响主要受黏度、粒径、流速、密度等因素。黏度升高,重晶石沉降效果逐渐降低;粒径的升高,重晶石沉降效果逐渐增强;流量的增大,重晶石沉降量逐渐降低;随密度的增大,重晶石沉降量显著增大;当达到一定程度后,对重晶石沉降效果影响不大。当流速到达一定高度时,管柱中间部分重晶石沉降量为负。

(3)重晶石沉降规律为高温高压超深井测试作业提供了优化测试液配方的依据。通过合理调控黏度、粒径、流速等因素,可以有效地控制沉降现象,保持泥浆的流动性与携带能力,减少沉积物的积累,确保井下作业的顺利进行。

致谢:感谢中油海工各位领导、同事在本文写作过程中给与大力支持和帮助。

参考文献

[1] 武彪彪. 国内抗高温高密度水基钻井液发展现状[J]. 中国石油石化, 2017(10): 59-60.  
WU Biaobiao. Development status of high-temperature and high-density water-based drilling fluids in China [J]. China Petrochem, 2017(10): 59-60.

[2] 庞振力, 杜卫刚, 张宏胜, 等. 试油测试一体化工艺在 GT1 井的应用[J]. 油气井测试, 2024, 33(3): 32-37.  
PANG Zhenli, DU Weigang, ZHANG Hongsheng, et al. Application of integrated testing techniques in well GT1 [J]. Well Testing, 2024, 33(3): 32-37.

[3] 柳庆伟. 超深井深部盐层抗高温高密度钻井液体系研究[J]. 当代化工研究, 2018, 17(6): 57-58.  
LIU Qingwei. Study on drilling fluid system with high temperature resistance and high density in deep salt layer of ultra-deep well [J]. Modern Chemical Research, 2018, 17(6): 57-58.

[4] 胡文军, 罗平亚, 白杨, 等. 新型高温高密度盐水钻井液研究[J]. 钻井液与完井液, 2017, 34(3): 1-10.  
HU Wenjun, LUO Pingya, BAI Yang, et al. Study on a new high temperature high density saltwater drilling fluid [J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2017, 34(3): 1-10.

[5] 孙强, 邱正松, 李自立, 等. 高密度钻井液沉降稳定性的模拟试验研究[J]. 能源化工, 2020, 41(6): 49-55.  
SUN Qiang, QIU Zhengsong, LI Zili, et al. Simulation study on sedimentation stability of high density drilling fluid [J]. Energy Chemical Industry, 2020, 41(6): 49-55.

[6] 王健, 彭芳芳, 徐同台, 等. 钻井液沉降稳定性测试与预测方法研究进展[J]. 钻井液与完井液, 2012, 29(5): 79-83.  
WANG Jian, PENG Fangfang, XU Tongtai, et al. Research progress on testing and predicting methods for settling stability of drilling fluid. [J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2012, 29(5): 79-83.

[7] 王平全, 杨坤宾, 朱涛, 等. 复配重晶石对水基钻井液性能的影响[J]. 钻井液与完井液, 2014, 31(1): 16-19.  
WANG Pingquan, YANG Kunbin, ZHU Tao, et al. Study of the effect of mixed sized barite on the water-based drilling fluids [J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2014, 31(1): 16-19.

[8] 余加水, 周玉东, 辛小亮, 等. 准噶尔盆地超深井达探 1 井钻井液技术[J]. 钻井液与完井液, 2016, 33(4): 60-64.  
YU Jiashui, ZHOU Yudong, XIN Xiaoliang, et al. Drilling fluid technology used in drilling ultra deep well Datan-1 in Junggar basin [J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2016, 33(4): 60-64.

[9] 余加水, 李竞, 孔德强, 等. 超高密度钻井液技术研究[J]. 钻井液与完井液, 2005, 22(增刊 1): 17-20.

YU Jiashui, LI Jing, KONG Deqiang, et al. Study on a ultra-high density drilling fluid [J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2005, 22 (Suppl. 1): 17-20.

[10] 白杨,翟玉芬,罗平亚,等. 四川长宁页岩气长水平段油基钻井液井壁稳定技术[J]. 钻采工艺,2024,47(6): 152-158.

BAI Yang, ZHAI Yufen, LUO Pingya, et al. Wellbore stability technology of oil-based drilling fluid in long horizontal sections for shale gas in Changning, Sichuan [J]. Drilling & Production Technology, 2024, 47(6): 152-158.

[11] 周长虹,崔茂荣,马勇,等. 深井高密度钻井液的应用及发展趋势探讨[J]. 特种油气藏,2006,13(3):1-3.

ZHOU Changhong, CUI Maorong, MA Yong, et al. Application and development of deep well high-density drilling[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2006, 13 (3): 1-3.

[12] 潘谊党,于培志,马京缘. 高密度钻井液加重材料沉降问题研究进展[J]. 钻井液与完井液,2019,36(1):1-9.

PAN Yidang, YU Peizhi, MA Jingyuan. Review on settlement problem of drilling fluid weighting materials [J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2019, 36(1): 1-9.

[13] 李辉,郑义平,陈亮,等. 抗高温高密度钻井液配方的研制与性能评价[J]. 长江大学学报(自然科学版), 2019,16(11):27-31.

LI Hui, ZHENG Yiping, CHEN Liang, et al. Development and performance evaluation of high-temperature and high-density drilling fluid formulations [J]. Journal of Yangtze University (Natural Science Edition), 2019, 16(11): 27-31.

[14] 韩成,张超,刘贤玉,等. 粒度级配对高密度钻井液性能的影响研究[J]. 长江大学学报(自然科学版),2016, 13(16):18-20.

HAN Cheng, ZHANG Chao, LIU Xianyu, et al. Research on the influence of particle size gradation on the properties of high-density drilling fluids [J]. Journal of Yangtze University (Natural Science Edition), 2016, 13(16): 18-20.

[15] 程玉生,罗鸣,胡文军,等. 莺琼盆地高温高压井水基钻井液技术[J]. 石油钻采工艺,2015,37(5):37-40.

CHENG Yusheng, LUO Ming, HU Wenjun, et al. Technology of water-based well testing working fluids for high-temperature and high-pressure wells in Yingqiong basin [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2015, 37(5): 37-40.

[16] 周福建,刘雨晴,杨贤友,等. 水包油试油工作液高温高压流变性研究[J]. 石油学报,1999(3):85-89.

ZHOU Fujian, LIU Yuqing, YANG Xianyou, et al. Study on the rheological properties of oil-in-water well testing working fluids under high temperature and high pressure [J]. Acta Petrolei Sinica, 1999(3): 85-89.

[17] HANSON P M, TRIGG T K, Jr, RACHAL G, et al. Investigation of barite “sag” in weighted drilling fluids in highly deviated wells[R]. SPE 20423,1990.

[18] MAXEY J. Rheological analysis of static and dynamic sag in drilling fluids [J]. Annual Transactions-Nordic Rheology Society, 2007, 15: 181.

[19] 樊洪海,彭齐,腾学清,等. 不同流变模式钻井流体圆管层流压耗的通用精确算法[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2014,38(1):70-74.

FAN Honghai, PENG Qi, TENG Xueqing, et al. A high precision method for calculating laminar pressure drop of drilling fluid in pipe flow with different rheological models [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2014, 38(1): 70-74.

编辑 吴志力

**第一作者简介:**庞振力,男,1982 年出生,高级工程师,本科,2008 年毕业于重庆科技大学石油工程专业,现主要从事现场试油测试施工、试井资料解释工作及油气藏研究。电话:18202209362,Email: pangz101. cpoe@ cnpc. com. cn。通信地址:天津滨海新区石油科技大厦五楼中石油海洋天津分公司技术中心,邮政编码:300451。