

水平井暂堵压裂中暂堵球封堵孔眼规律实验研究

唐志湜

成都理工大学能源学院, 四川 成都

收稿日期: 2025年3月31日; 录用日期: 2025年5月16日; 发布日期: 2025年5月26日

摘 要

暂堵球对射孔孔眼的封堵效果直接关系到暂堵转向压裂技术的成败。为明确水平井暂堵压裂过程中暂堵球对水平井射孔孔眼的封堵规律, 本文设计了一种水平井暂堵球射孔孔眼封堵实验装置, 研究了不同泵注排量、暂堵球粒径、携带液粘度、射孔孔眼数以及球孔数比等因素对暂堵球分布及孔眼封堵规律的影响。结果表明: 暂堵球的封堵效率随暂堵球粒径、射孔孔眼数的增大而降低, 随泵注排量、球孔数比的增大而先升高后降低; 实验评价最佳泵注排量为 $0.3 \text{ m}^3/\text{min}$, 最佳球孔数比为4:3; 增大携带液粘度, 暂堵球的封堵效率先减小后增大, 转折点在 $10 \text{ mPa}\cdot\text{s}$, 本文的实验结果为水平井投球暂堵转向压裂方案提供了一定的参考和指导意义。

关键词

暂堵球, 水平井, 压裂, 射孔孔眼

Experimental Study on the Law of Temporary Plugging Balls Plugging Perforation during Temporary Plugging Fracturing in Horizontal Wells

Zhihao Tang

School of Energy, Chengdu University of Technology, Chengdu Sichuan

Received: Mar. 31st, 2025; accepted: May 16th, 2025; published: May 26th, 2025

Abstract

The plugging effect of the ball in the perforation directly affects the success of the temporary blocking steering fracturing technique. To clarify the plugging law of the temporary plugging ball on perforation holes during temporary plugging fracturing in the horizontal wells, this paper designed an experimental device for plugging the perforations with temporary plugging balls in horizontal wells, and analyzed the influence of different pumping rates, the diameters of temporary plugging ball, carrying fluid viscosities, the number of perforations, and the ratio of ball to perforation on the distribution of temporary plugging balls and the plugging laws of the perforations. The results show that the plugging efficiency of the temporary plugging ball decreases with the increase of the diameters of temporary plugging ball and the number of perforations, and increases first and then decreases with the increase of pumping rate and the ratio of ball to perforation; The optimal pump rate for experimental evaluation is 0.3 m³/min, and the optimal ratio of ball to perforation is 4:3; With the increase of the carrying fluid viscosities, the plugging efficiency of the temporary plugging ball first decreases and then increases, and the turning point is 10 mPa·s. The results can provide a certain reference and guiding significance for the optimization of the temporary plugging process of horizontal well to the fracturing ball. The results can provide a certain reference and guiding significance for temporary blocking plugging fracturing in horizontal wells.

Keywords

Temporary Plugging Balls, Horizontal Wells, Fracturing, Perforation

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

水平井与大规模水力压裂是提高非常规油气开采效率的最有效手段。然而，在水平井的多段压裂过程中，缝间应力干扰、段间应力差异以及储层不均匀性会影响各压裂段的进液量和裂缝扩展的均匀性[1]-[5]。采用暂堵转向工艺可以实现压裂液在段内各孔眼的均匀分布。通过投放暂堵球，可以封堵优势射孔簇，提高射孔的开启率，从而促进层段的均匀改造[6]-[8]。然而，目前对于水平井暂堵球的封堵机制研究还不够完善，这给现场施工中暂堵球的选型和投放带来了困难。因此，需要进一步研究和阐明水平井暂堵球的封堵规律。

国内外学者已研究不同施工参数对水平井暂堵球封堵效率的影响。Brown [9]、Li [10]发现，暂堵球接近孔眼时，其行为受惯性力和拖曳力影响，可以通过二者比值评估其封堵能力。由于暂堵球在水平井筒中的封堵涉及复杂的流固耦合，学者们常做简化假设，导致解析模型预测精度降低。李婷婷[11]、李绍鹏[12]等采用 CFD-DPM、CFD-DDPM、CFD-DEM 等流固耦合模拟方法，考虑泵注排量、粒径、密度等因素对暂堵球封堵效率的影响，并提出了优化措施以提升封堵效率。但这些数值模拟方法在描述暂堵球之间及其与套管之间的碰撞行为上存在局限性。为了更好地研究暂堵球在现实中的封堵行为，韩惠芬[13]设计了一种用于评估暂堵球的承压性能动态评价装置，模拟了暂堵球在井筒中的运动和封堵过程。刘罗云[5]、Li [14]、Yuan [15]等人则通过水平井筒暂堵模拟装置开展了实验研究，发现泵注排量、携带液粘度和暂堵球密度对封堵规律有显著影响，但对多孔孔眼暂堵球坐封情况及封堵效率的研究较少。

基于此, 本文采用相似分析方法, 在实验装置中模拟现场暂堵投球施工的流场, 并进行水平井筒射孔孔眼暂堵球分布及效果评价实验。通过实验研究了不同泵注排量、暂堵球粒径、携带液粘度、射孔孔眼数以及球孔数比等因素对水平井单簇射孔孔眼暂堵球分布以及封堵规律的影响, 为水平井投球暂堵工艺提供了一定的参考。

2. 暂堵球在水平井筒中的运动分析

暂堵球在水平井筒中的运动可分为两个阶段: 初期加速阶段和后期匀速阶段。在加速阶段, 暂堵球受流体驱动力 F_t 的作用导致速度增加。但是随着速度的增加, 暂堵球的粘滞阻力 F_r 也开始增加, 直至流体驱动力和流动阻力达到平衡, 使暂堵球进入匀速运动的阶段。在整个非射孔段运动过程中, 暂堵球受到多物理场耦合作用: 重力 F_g 与浮力 F_b 构成的垂向合力垂直于井筒轴线方向, 而 F_t 与 F_r 则沿井筒轴向形成动态平衡体系(如图 1 所示)。

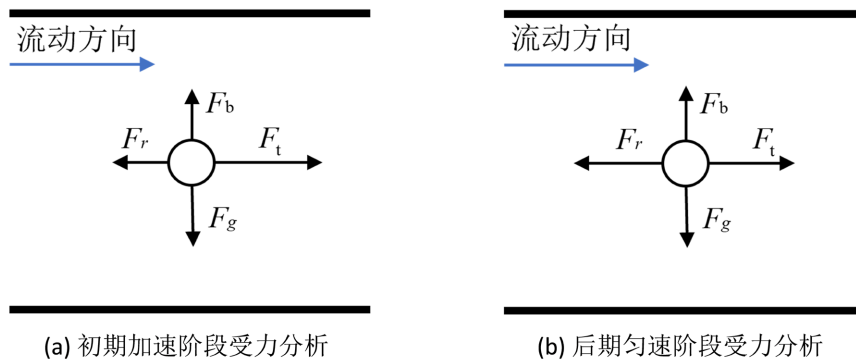


Figure 1. Force analysis of temporary blocking balls in non-perforated sections
图 1. 非射孔段暂堵球受力分析

当暂堵球匀速运动至炮眼附近时, 会受到惯性力 F_i 和拖拽力 F_d 的影响。实现运移轨迹偏转需要克服惯性力效应, 而拖拽力作为诱导暂堵球脱离主流线趋向孔眼的矢量力分量。当 $F_d > F_i$ 时, 暂堵球坐封到孔眼上。

其中 F_i 和 F_d 的计算公式为:

$$F_i = \frac{\pi}{12} \frac{\rho_b d_b^3 v_b^2}{d_{\text{pipe}}} \quad (1)$$

$$F_d = \frac{\pi}{32} K_D \rho_l d_b^2 v_{\text{perf}}^2 \quad (2)$$

式中, F_i ——惯性力, N; F_d ——拖拽力, N; ρ_l ——压裂液密度, kg/m^3 ; ρ_b ——暂堵球密度, kg/m^3 ; d_b ——暂堵球粒径, m; d_{pipe} ——套管直径, m; v_b ——暂堵球运移速度, m/s; v_{perf} ——射孔孔眼处流体流速, m/s; K_D ——拖拽系数, 与流体流态有关, 无因次。

因此定义暂堵球坐封因子为:

$$R_b = \frac{F_d}{F_i} = \frac{3}{8} \frac{K_D \rho_l d_{\text{pipe}} v_{\text{perf}}^2}{\rho_b d_b v_b^2} \quad (3)$$

暂堵球坐封因子越大, 表明暂堵球所受到的拖拽力越大, 越容易封住进液孔眼, 实现暂堵球封堵高导流能力孔眼的目的[16]。

当暂堵球坐封在孔眼处后, 又会受到一种使暂堵球脱离孔眼的力, 即脱离力 F_u , 以及因流体动力和重力作用而对孔眼产生的保持或阻塞力的持球力 F_h 。当持球力小于脱离力时, 暂堵球将会脱离孔眼, 封堵失效。暂堵球在水平井筒射孔段处封堵受力简化示意图如图 2 所示。

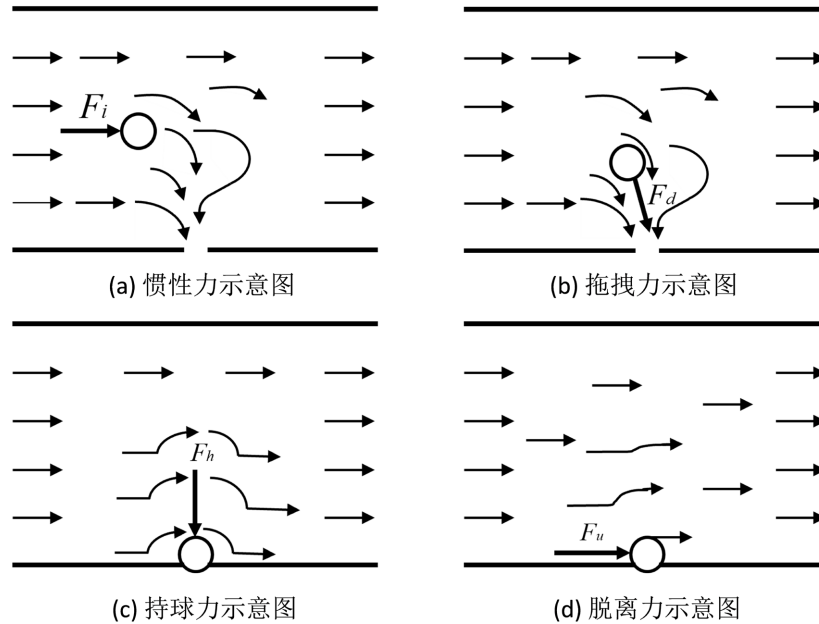


Figure 2. Schematic diagram of the basic forces controlling the seating of temporary blocking balls

图 2. 控制暂堵球坐封的基本力示意图

其中 F_h 和 F_u 的计算公式为:

$$F_h = \frac{\rho \pi d_b^2}{8} (v_b - v_l)^2 \quad (4)$$

$$F_u = 5.28 \times 10^{-3} f_u \rho u_b^2 \left[d_b^2 - \frac{d_b^2 \sin \theta}{180} + \frac{d_p}{\pi} (d_b^2 - d_p^2)^{1/2} \right] \quad (5)$$

式中, v_l ——压裂液速度, m/s; f_u ——阻力系数; n ——射孔孔眼数。

此外, 定义暂堵球的封堵效率 E_b 为:

$$E_b = \frac{n_b}{n_p} \times 100\% \quad (6)$$

式中, E_b ——封堵效率, %; n_b ——坐封在孔眼处的暂堵球的数量; n_p ——射孔孔眼数量。

暂堵球封堵效率是孔眼封堵数与射孔总数的比值, 暂堵球封堵效率越高, 意味着孔眼封堵数量越多, 暂堵球封堵效果越好[17][18]。

3. 实验材料及方法

3.1. 材料

实验所用主要材料包括: 暂堵球, Landys 公司生产, 粒径为 11.0 mm、13.5 mm 和 15.0 mm 三种规格(见图 3); 滑溜水, 中石油川庆钻探页岩气项目经理部现场取样, 粘度范围 2~20 mPa·s。

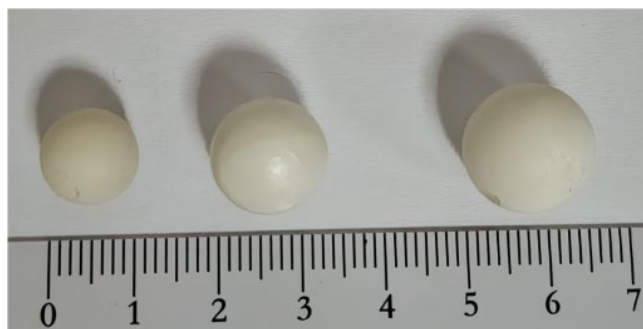


Figure 3. Actual image of degradable temporary blocking balls used in field operations
图 3. 现场施工用可降解暂堵球实物图

3.2. 实验装置

可降解暂堵球动态封堵实验示意图如图 4 所示, 主要由动力装置、投球装置、可视化实验管路和不同型号的水平井筒 4 个部分组成。

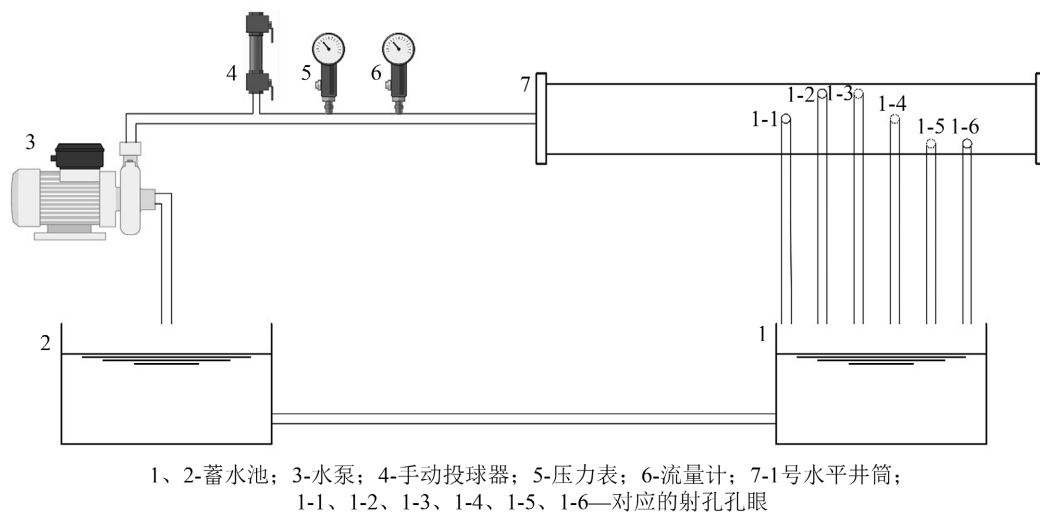
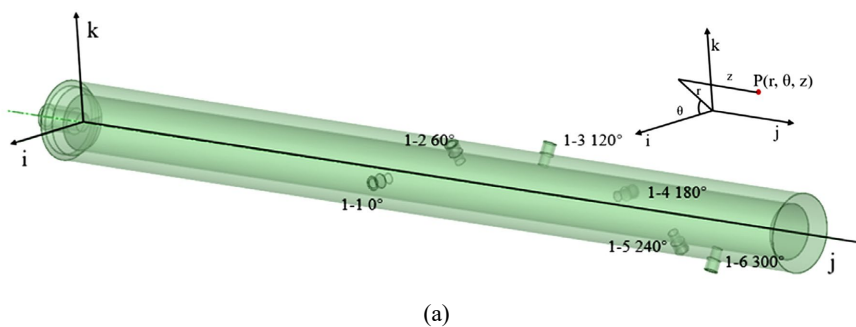


Figure 4. Schematic diagram of the experimental evaluation device for temporary blocking ball perforation
图 4. 暂堵球封堵孔眼规律实验评价装置示意图

实验设计了三种不同型号的水平井筒, 井筒外径为 85.4 mm, 内径为 60.0 mm, 射孔孔眼的直径为 11 mm, 井筒长度为 1000 mm, 射孔相位角均为 60° , 三种井筒的射孔数分为 6 孔、7 孔和 9 孔, 建立如图 5 所示柱坐标系, 各射孔孔眼入口处的坐标如表 1 所示。



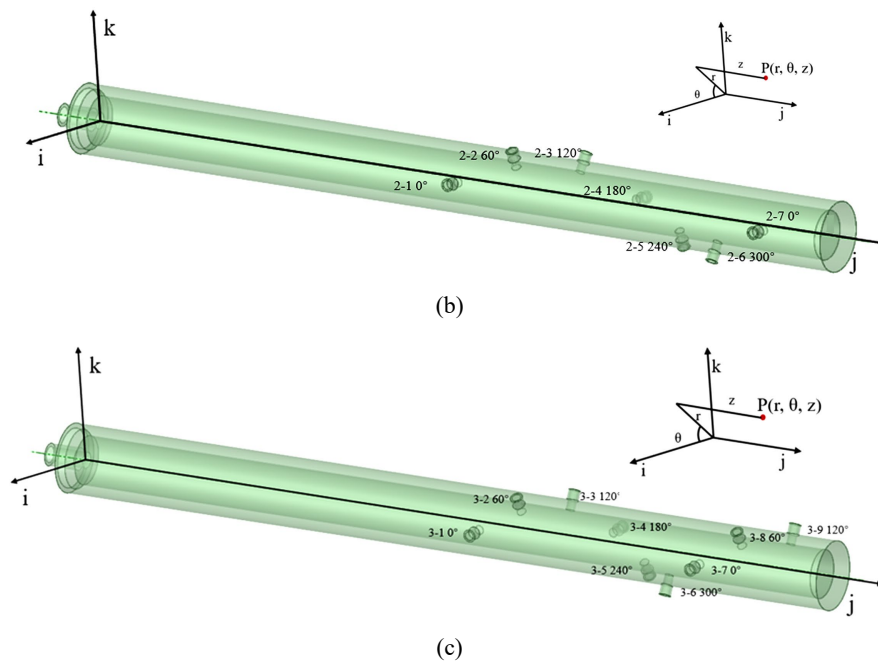


Figure 5. (a) Schematic diagram of No. 1 horizontal wellbore (6 holes); (b) Schematic diagram of No. 2 horizontal wellbore (7 holes); (c) Schematic diagram of No. 3 horizontal wellbore (9 holes)

图 5. (a) 1 号水平井筒(6 孔)示意图; (b) 2 号水平井筒(7 孔)示意图; (c) 3 号水平井筒(9 孔)示意图

Table 1. Cylindrical coordinate parameters at the center of each perforation hole in the horizontal wellbore used in the experiment

表 1. 实验用水平井筒各射孔孔眼中心处柱坐标参数

1 号水平井筒		2 号水平井筒		3 号水平井筒	
孔眼编号	坐标(r, θ, z)	孔眼编号	坐标(r, θ, z)	孔眼编号	坐标(r, θ, z)
1-1	(60, 0°, 460)	2-1	(60, 0°, 510)	3-1	(60, 0°, 550)
1-2	(60, 60°, 550)	2-2	(60, 60°, 580)	3-2	(60, 60°, 600)
1-3	(60, 120°, 640)	2-3	(60, 120°, 650)	3-3	(60, 120°, 650)
1-4	(60, 180°, 730)	2-4	(60, 180°, 720)	3-4	(60, 180°, 700)
1-5	(60, 240°, 820)	2-5	(60, 240°, 790)	3-5	(60, 240°, 750)
1-6	(60, 300°, 910)	2-6	(60, 300°, 860)	3-6	(60, 300°, 800)
		2-7	(60, 0°, 930)	3-7	(60, 0°, 850)
				3-8	(60, 60°, 900)
				3-9	(60, 120°, 950)

3.3. 实验方案

在水平井筒中, 暂堵球的运动受到流体拖曳力、惯性力、重力和浮力的共同影响。重力和浮力主要影响暂堵球在垂直方向上的运动, 而水平井筒中流体主要沿井筒轴线流动, 因此在室内实验过程中需要重点关注拖曳力和惯性力。根据相似理论来确定实验参数时[19], 可以通过雷诺数来有效地判断实验条件与实际施工条件之间的相似度[20] [21]。

计算实验条件和现场施工的雷诺数分别为 59820 和 60710 (表 2 所示), 其相对误差仅 2%。因此, 实验模拟的流场与现场流场具有良好相似性。

Table 2. Comparison of experimental conditions and field construction conditions parameters
表 2. 实验条件和现场施工条件参数比较

参数	携带液密度 (kg/m ³)	携带液粘度 (mPa·s)	暂堵球密度 (kg/m ³)	暂堵球粒径 (mm)	井筒内径 (mm)	泵注排量 (m ³ /min)	雷诺数
实验基准	1090	2	1412.77	13.5	60	0.3	59820.34
现场施工	1090	40	1412.77	13.5	114.3	12	60710.03
相似比	1	0.05	1	1	0.52	0.025	0.98

根据上述的相似性分析，针对泵注排量、暂堵球粒径、射孔孔眼数量、携带液粘度以及球孔数比等因素设计实验方案，如表 3 所示。

Table 3. Experimental scheme
表 3. 实验方案

方案	泵注排量 (m ³ /min)	暂堵球粒径(mm)	射孔孔眼数	水平井筒 型号	携带液粘度 (mPa·s)	球孔数比	探究因素
1	0.3	13.5	6	1	2	1:1	实验基准
2	0.1	13.5	6	1	2	1:1	
3	0.2	13.5	6	1	2	1:1	
4	0.4	13.5	6	1	2	1:1	
5	0.5	13.5	6	1	2	1:1	
6	0.3	15.0	6	1	2	1:1	暂堵球粒径
7	0.3	11.0	6	1	2	1:1	
8	0.3	13.5	6	2	2	1:1	
9	0.3	13.5	7	3	2	1:1	单簇孔数
10	0.3	13.5	6	1	2	4:3	
11	0.3	13.5	6	1	2	5:3	球孔数比
12	0.3	13.5	6	1	2	2:1	
13	0.3	13.5	6	1	5	1:1	
14	0.3	13.5	6	1	10	1:1	携带液粘度
15	0.3	13.5	6	1	15	1:1	
16	0.3	13.5	6	1	20	1:1	

*将实验过程中封堵的孔眼数与水平井筒总射孔孔眼数之比定义为封堵效率。

4. 结果与讨论

4.1. 泵注排量的影响

利用 1 号水平井筒，系统研究了粒径为 13.5 mm 暂堵球在不同泵注排量下的射孔孔眼封堵规律，实验结果如表 4 所示。泵注排量变化对暂堵球的封堵位置会产生显著影响，当排量设定为 0.1 m³/min 时，暂堵球坐封位于重力低侧的 1-5、1-6 号孔眼；排量增加至 0.2 m³/min 时，除重力低侧的 1-5、1-6 号孔眼被封堵外，中间部位的 1-4 号孔眼首次出现被封堵情况；进一步提升排量至 0.3 m³/min 时，1-4、1-5、1-6 号孔眼均被封堵，顶部的 3 号孔眼在第一次实验中亦被封堵；增加排量至 0.4 m³/min 时，1-5、1-6 号孔眼为主要封堵对象，中间部位的 1-4 号孔眼仅被封堵 1 次；当排量达到 0.5 m³/min 时，封堵主要集中在趾端的 1-6 号孔眼。

Table 4. Experimental results of the effect of different displacement rates on temporary plugging ball sealing
表 4. 不同排量影响暂堵球封堵的实验结果

泵注排量 (m ³ /min)	第 1 次实验封堵孔眼序号	第 2 次实验封堵孔眼序号	第 3 次实验封堵孔眼序号
0.1	1-5、1-6	1-5	1-5、1-6
0.2	1-4、1-5、1-6	1-5、1-6	1-5、1-6
0.3	1-3、1-4、1-5、1-6	1-4、1-5、1-6	1-4、1-5、1-6
0.4	1-5、1-6	1-4、1-5、1-6	1-5、1-6
0.5	1-5、1-6	1-6	1-6

实验过程中暂堵球的封堵效率随排量的变化如图 6 所示, 结果表明, 平均封堵效率在排量增加的初期呈上升趋势, 随后出现下降, 转折点位于 0.3 m³/min, 此时封堵效率达到了最大值。这是由于在低排量阶段(<0.3 m³/min), 随着泵注排量的增大, 孔眼流量也在增加, 拖拽力与孔眼处流速呈平方增长, 惯性力与套管内流速呈平方增长, 导致坐封因子 R_b 增加, 而使得流体更易携带暂堵球向孔眼处运移。并且在孔眼处, 随着孔眼流量的增加, 持球力也在增加, 使暂堵球不易从孔眼处脱落, 导致封堵效率增加。当泵注排量超过 0.3 m³/min, 此时继续增加泵注排量, 暂堵球所受惯性力增大, 并逐渐占据主导地位, 暂堵球倾向于向井筒套管底部运移。同时由于孔眼来处的冲击力增强, 脱落力增大, 使暂堵球更容易从孔眼处脱落, 导致封堵效率降低。因此建议现场施工采用合适的泵注排量进行投球暂堵, 在此实验条件下, 应选用 0.3 m³/min 为携带液的泵注排量。

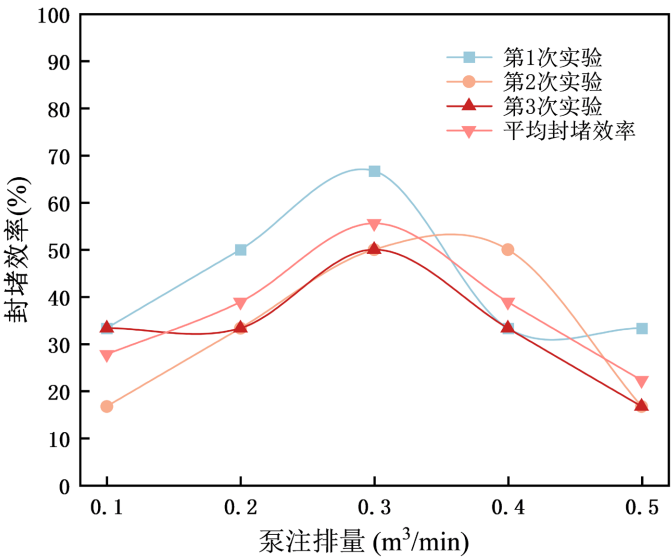


Figure 6. Variation in plugging efficiency of temporary plugging balls at different displacement rates

图 6. 不同排量下暂堵球的封堵效率的变化

4.2. 暂堵球粒径的影响

利用 1 号水平井筒, 系统研究了不同粒径大小暂堵球对射孔孔眼的封堵规律, 实验结果如表 5 所示。当暂堵球粒径为 11.0 mm (球孔直径比为 1.0) 时, 暂堵球封堵了重力低侧的 1-5、1-6 号孔眼, 中部的 1-4 号孔眼以及位于顶部的 1-2、1-3 号孔眼; 暂堵球粒径增至 13.5 mm (球孔直径比约为 1.23) 时, 1-4、1-5、

1-6 号孔眼均被封堵, 顶部的 1-3 号孔眼只在第 1 次实验中被封堵; 当暂堵球粒径达到 15.0 mm (球孔直径比约为 1.36) 时, 封堵的孔眼数量明显减少, 封堵主要集中在重力低侧的 1-5、1-6 号孔眼。

Table 5. Experimental results of the effect of different temporary plugging ball sizes on plugging efficiency
表 5. 不同暂堵球粒径影响暂堵球封堵的实验结果

暂堵球粒径(mm)	第 1 次实验封堵孔眼序号	第 2 次实验封堵孔眼序号	第 3 次实验封堵孔眼序号
11	1-2、1-3、1-4、1-5、1-6	1-3、1-4、1-5、1-6	1-2、1-3、1-5、1-6
13.5	1-3、1-4、1-5、1-6	1-4、1-5、1-6	1-4、1-5、1-6
15	1-4、1-5、1-6	1-5、1-6	1-5

实验结果表明(图 7), 暂堵球封堵效率与粒径呈现显著负相关趋势。当粒径由 11.0 mm 增至 15.0 mm 时, 平均封堵效率从 72.2%逐级下降至 33.3%。粒径的增大显著增强了井筒流场中暂堵球所受惯性力的作用, 导致其运动轨迹调整能力降低——较大粒径颗粒更倾向于沿井筒轴向(趾端方向)运移, 而非产生有效径向偏转坐封射孔孔眼。且随着粒径增加, 暂堵球所受托曳力的增长速度显著滞后于惯性力的增强幅度, 导致 R_b 减小, 即暂堵球的封堵孔眼能力降低。且粒径增大使脱离力增速快于持球力大粒径暂堵球在孔眼处稳定性下降, 封堵后易被高流速流体冲脱。基于现场射孔孔眼存在动态冲蚀扩径现象的工程实际, 建议采用暂堵球粒径与孔直径的比为 1.25 的适配原则进行施工参数设计[22] [23]。

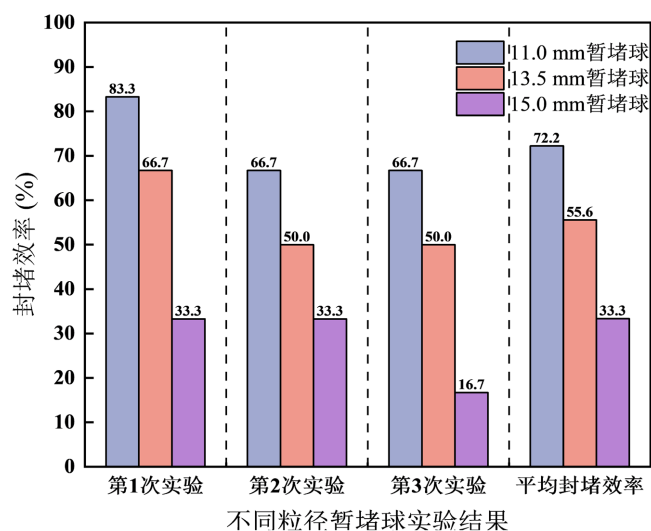


Figure 7. Variation in plugging efficiency of temporary plugging balls with different ball sizes

图 7. 不同暂堵球粒径下暂堵球的封堵效率的变化

4.3. 射孔孔眼数量的影响

利用 1 号(6 孔)、2 号(7 孔)、3 号(9 孔)水平井筒, 系统研究了粒径为 13.5 mm 的暂堵球在不同射孔孔眼数下对射孔孔眼的封堵规律, 结果如表 6 所示。随着射孔孔眼数量的变化, 暂堵球在射孔孔眼处的封堵位置也发生了变化, 在使用 1 号水平井筒(6 孔)时, 重力低侧的 1-5、1-6 号孔眼及中部的 1-4 号孔眼被封堵, 顶部的 1-3 号孔眼第一次被封堵; 在使用 2 号水平井筒(7 孔)时, 位于重力低侧的 2-5、2-6 号孔眼被封堵, 中部的 2-4、2-7 号孔眼也出现被封堵的情况; 在使用 3 号水平井筒(9 孔)时, 封堵主要集中在重力低侧的 3-5、3-6 号孔眼, 位于中部的 3-7 号孔眼在第 1 次实验中被封堵。

Table 6. Experimental results of the effect of different perforation cluster numbers on plugging efficiency of temporary plugging balls

表 6. 不同单簇孔眼数影响暂堵球封堵的实验结果

水平井筒	第 1 次实验封堵孔眼序号	第 2 次实验封堵孔眼序号	第 3 次实验封堵孔眼序号
1	1-3、1-4、1-5、1-6	1-4、1-5、1-6	1-4、1-5、1-6
2	2-4、2-5、2-6、2-7	2-5、2-7	2-5、2-6、2-7
3	3-5、3-6、3-7	3-5、3-6	3-5、3-6

实验结果表明(图 8), 暂堵球封堵效率与射孔孔眼数量呈现显著非线性负相关, 当孔眼数量从 6 增至 9 时, 平均封堵效率由 55.6%锐减至 25.9%。在恒定泵注排量($0.3 \text{ m}^3/\text{min}$)条件下, 孔眼处流量随孔眼数量增加呈反比例衰减, 导致孔眼处的流速减小。根据拖拽力的计算公式, 拖拽力因孔眼处流体流速的平方衰减而减少, 而惯性力因套管内流体流速维持相对稳定变化不大, 致使坐封因子 R_b 减小, 显著弱化暂堵球向孔眼迁移的动力学条件, 影响封堵效果。此外, 在暂堵球坐封住孔眼后, 由于孔眼流量变小, 孔眼处压差变小, 持球力减小而脱离力不变, 导致暂堵球易从坐封的状态脱离出来, 同时由于顶部孔眼受到重力影响, 导致封堵效果更差。

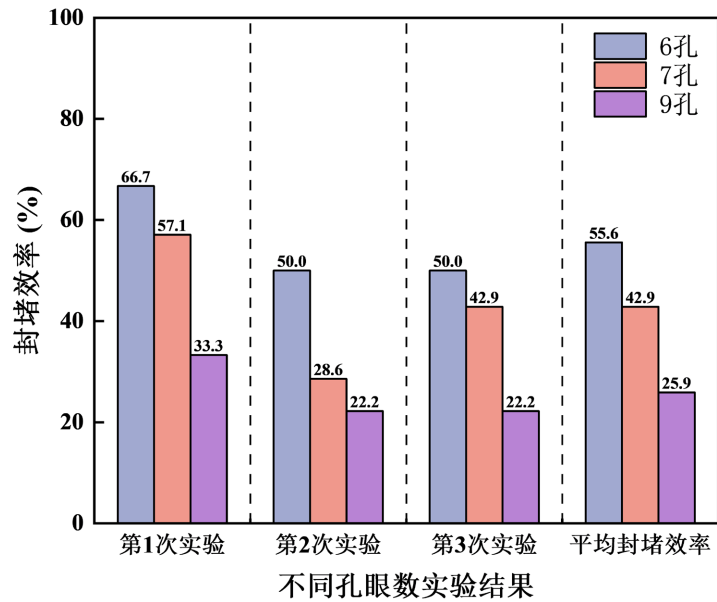


Figure 8. Variation in plugging efficiency of temporary plugging balls with different perforation numbers

图 8. 不同射孔孔眼数下暂堵球的封堵效率变化

4.4. 球孔数比的影响

利用 1 号水平井筒, 系统研究了粒径为 13.5 mm 暂堵球在不同球孔数比下对射孔孔眼的封堵规律, 结果如表 7 所示。当球孔数比为 1:1 时, 暂堵球封堵重力低侧的 1-5、1-6 号孔眼及中部的 1-4 号孔眼, 位于顶部的 1-3 号孔眼也在第 1 次实验中被封堵; 增加暂堵球的数量使球孔数比为 4:3 时, 除 1-3、1-4、1-5、1-6 号孔眼外, 位于顶部的 1-2 号孔眼也出现被封堵情况; 进一步增加球孔数比至 5:3 时, 暂堵球封堵孔眼数量减少, 1-3、1-4、1-5 和 1-6 号孔眼均被封堵; 当球孔数比达到 2:1 时, 暂堵球封堵的孔眼数量进一步减少, 封堵主要集中在 1-5、1-6 号孔眼。

Table 7. Experimental results of the effect of different ball-to-hole ratios on the plugging of temporary plugging balls
表 7. 不同球孔数比影响暂堵球封堵的实验结果

球孔数比	第 1 次实验封堵孔眼序号	第 2 次实验封堵孔眼序号	第 3 次实验封堵孔眼序号
1:1	1-3、1-4、1-5、1-6	1-4、1-5、1-6	1-4、1-5、1-6
4:3	1-2、1-3、1-4、1-5、1-6	1-2、1-4、1-5、1-6	1-2、1-3、1-4、1-6
5:3	1-3、1-4、1-5、1-6	1-3、1-4、1-5	1-3、1-5、1-6
2:1	1-4、1-5、1-6	1-4、1-5、1-6	1-5、1-6

实验结果表明(图 9), 暂堵球封堵效率与球孔数比呈现出先上升后下降的趋势, 当球孔数比从 1:1 增至 4:3 时, 平均封堵效率由 55.6%提升至峰值 72.2%, 而球孔数比继续增至 2:1 时效率减少至 44.4%。这是由于在低球孔数比阶段, 随着暂堵球的数量上升即球孔数比增加时, 多球扰动诱导流场重构, 孔眼处局部流速梯度增大, 拖拽力非线性增强且此时球间距较大, 碰撞频率小, 能量损耗也小; 当球孔数比超过临界阈值时, 即球孔数比超过 4:3 后, 继续增大球孔数比, 会使球与套管壁面及球间的干扰增大, 球与球之间、球与套管壁面之间的碰撞概率增加, 导致封堵效率下降。因此, 建议现场施工时投球数量适中, 推荐使用球孔数比为 4:3。

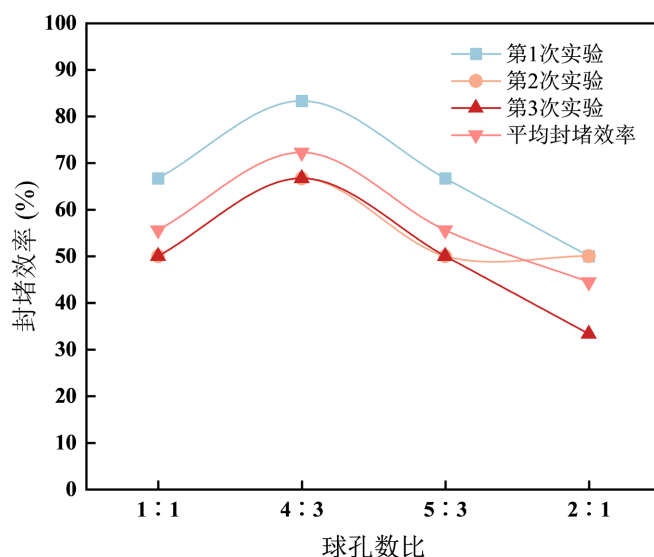


Figure 9. Variation of plugging efficiency and effective utilization rate of temporary plugging balls under different ball-to-hole ratios
图 9. 不同球孔数比下的暂堵球封堵效率及有效利用率的变化

4.5. 携带液粘度的影响

利用 1 号水平井筒, 系统研究了粒径为 13.5 mm 的暂堵球在不同携带液粘度下对射孔孔眼的封堵规律, 实验结果如表 8 所示。当粘度为 2 mPa·s 时, 中间部位的 1-4 号孔眼以及重力低侧的 1-5、1-6 号孔眼均被封堵 3 次, 顶部的 1-3 号孔眼仅被封堵 1 次; 粘度增加至 5 mPa·s 时, 除重力低侧的 1-5、1-6 号孔眼外, 中间部位的 1-4 号孔眼以及顶部的 1-3 号孔眼也被封堵; 进一步提升粘度至 10 mPa·s 时, 封堵的孔眼明显减少, 仅封堵了重力低侧的 1-5、1-6 号孔眼; 增加粘度至 15 mPa·s 时, 暂堵球封堵的孔眼开始增加, 除重力低侧的 1-5、1-6 号孔眼外, 中间部位的 1-4 号孔眼也出现被封堵的情况; 当粘度达到 20 mPa·s 时, 除 1 号孔眼外, 其余孔眼均出现过暂堵现象。

Table 8. Experimental results of the effect of different carrier fluid viscosities on the plugging of temporary plugging balls
表 8. 不同携带液粘度影响暂堵球封堵的实验结果

携带液粘度 (mPa·s)	第 1 次实验封堵孔眼序号	第 2 次实验封堵孔眼序号	第 3 次实验封堵孔眼序号
2	1-3、1-4、1-5、1-6	1-4、1-5、1-6	1-4、1-5、1-6
5	1-4、1-5、1-6	1-5、1-6	1-3、1-5、1-6
10	1-5、1-6	1-5	1-6
15	1-4、1-5、1-6	1-5、1-6	1-5、1-6
20	1-2、1-3、1-4、1-5	1-3、1-4、1-5、1-6	1-2、1-3、1-4、1-5、1-6

实验过程中暂堵球的封堵效率随粘度的变化如图 10 所示,可以看出,平均封堵效率随粘度的增加的初期呈下降趋势,随后出现上升,转折点在 10 mPa·s,此时封堵效率最小。这是由于随着携带液的粘度增加,对暂堵球的携带能力增强,暂堵球在井筒中的沉降速度降低,使暂堵球不易坐封在射孔孔眼处。此外,流体雷诺数的变化引起了拖拽力系数的变化,进而使拖拽力先增大后减小,使暂堵球流向射孔孔眼的合力先减小后增大,进而导致封堵效率先减小后增大。因此,建议在现场施工中采用低粘度携带液 (2 mPa·s)或高粘度(≥ 20 mPa·s)进行投球作业,并根据现场设备和环境条件合理选择携带液粘度。

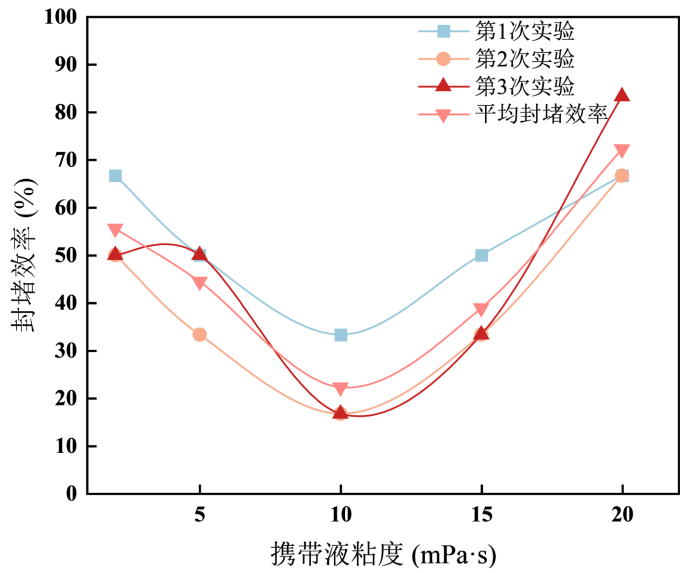


Figure 10. Variation in plugging efficiency of temporary plugging balls under different carrier fluid viscosities

图 10. 不同携带液粘度下暂堵球的封堵效率的变化

5. 结论

(1) 水平井暂堵压裂过程中射孔孔眼数量增加造成平均孔眼流量减小,会导致暂堵球所受持球力和拖拽力降低,降低暂堵球封堵效率,适当增加暂堵球数量可以使暂堵球封堵效率增加,但过多的暂堵球数量会使球与套管壁面及球间的干扰增大导致封堵效率下降。

(2) 携带液泵注排量在 0.1~0.5 m³/min 范围内,暂堵球封堵效率先增大后减小,转折点为 0.3 m³/min。随着暂堵球粒径增大,封堵效率降低。携带液粘度在 2 mPa·s 到 20 mPa·s 内,封堵效率随携带液粘度的增加先减小后增大,转折点为 10 mPa·s 处。

(3) 在现场投球暂堵转向工艺中, 应尽量采用适当的泵注排量($0.3 \text{ m}^3/\text{min}$)、低粘携带液($2 \text{ mPa}\cdot\text{s}$)或者高粘携带液($\geq 20 \text{ mPa}\cdot\text{s}$)、适当减小单簇射孔孔眼数(6 孔)、选用粒径较小的暂堵球(与孔眼直径比为 1.25)以及合理控制球孔数比(4:3)等方式优化暂堵球封堵效率, 能促进暂堵球在水平井筒射孔孔眼处的均匀分布。

参考文献

- [1] 李扬, 邓金根, 刘伟, 等. 水平井分段多簇限流压裂数值模拟[J]. 断块油气田, 2017, 24(1): 69-73.
- [2] 王博, 周福建, 邹雨时, 等. 水平井暂堵分段缝间干扰数值模拟方法[J]. 断块油气田, 2018, 25(4): 506-509.
- [3] 李昊. 可降解球井筒中运移规律及炮眼内封堵工艺研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国石油大学(北京), 2017.
- [4] 张锋. 水平井多簇水力压裂过程射孔孔眼冲蚀预测[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安石油大学, 2023.
- [5] 刘罗云, 李扬, 王迪. 水平井筒暂堵球运移规律实验及效果评价[J]. 东北石油大学学报, 2023, 47(6): 55-66.
- [6] 李龙, 陈显举, 彭安钰, 等. 贵州正安地区常压页岩气压裂关键技术[J]. 钻探工程, 2022(5): 49.
- [7] 李松, 张华礼, 王萌, 等. 裂缝型碳酸盐岩储层暂堵转向酸压实验评价与工艺优化[J]. 石油与天然气化工, 2021, 50(3): 90-95.
- [8] 李越, 牟建业, 揭琮, 等. 碳酸盐岩缝内暂堵转向压裂裂缝扩展规律实验[J]. 石油钻采工艺, 2022(2): 44.
- [9] Brown, R.W., Neill, G.H. and Loper, R.G. (1963) Factors Influencing Optimum Ball Sealer Performance. *Journal of Petroleum Technology*, **15**, 450-454. <https://doi.org/10.2118/553-pa>
- [10] Li, X., Chen, Z., Chaudhary, S. and Novotny, R.J. (2005). An Integrated Transport Model for Ball-Sealer Diversion in Vertical and Horizontal Wells. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, Dallas, October 2005, SPE-96339-MS. <https://doi.org/10.2118/96339-ms>
- [11] 李婷婷, 许文俊, 王雷, 等. 水平井分段多簇压裂暂堵球运移封堵规律[J]. 断块油气田, 2023, 30(1): 168-176.
- [12] 李绍鹏, 李常兴, 周鹏, 等. 页岩气水平井暂堵坐封机制与可控暂堵压裂工艺[J]. 断块油气田, 2024, 31(3): 432-438.
- [13] 韩慧芬. 可降解暂堵球动态封堵承压性能评价方法及装置研制[J]. 钻采工艺, 2022, 45(3): 55-60.
- [14] Li, S.Y. and Li, Z.M. (2012) Experimental Study on Ball Sealer Diversion for Lateral Well. *Advanced Materials Research*, **524**, 1399-1407. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.524-527.1399>
- [15] Yuan, L., Zhou, F., Li, M., Yang, X., Cheng, J. and Wang, B. (2022) Experimental Study on Diverter Transport through Perforations in Multicluster Fracturing of Horizontal Well. *SPE Journal*, **27**, 971-985. <https://doi.org/10.2118/spe-208606-pa>
- [16] 邹龙庆, 何怀银, 杨亚东, 等. 页岩气水平井暂堵球运移特性数值模拟研究[J]. 石油钻探技术, 2023, 51(5): 156-166.
- [17] 刘明明, 马收, 刘立之, 等. 页岩气水平井压裂施工中暂堵球封堵效果研究[J]. 钻采工艺, 2020, 43(6): 44-48+8.
- [18] 孔祥伟, 时贤, 李赛, 等. 基于坐封受力模型的暂堵球封堵效果影响因素与参数优化[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(13): 5350-5357.
- [19] 李喜斌, 李冬荔, 江世媛. 流体力学基础实验[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2019: 154.
- [20] Nozaki, M., Zhu, D. and Hill, A.D.D. (2013) Experimental and Field Data Analyses of Ball-Sealer Diversion. *SPE Production & Operations*, **28**, 286-295. <https://doi.org/10.2118/147632-pa>
- [21] 余志豪, 苗曼倩, 蒋全荣, 等. 流体力学[M]. 北京: 气象出版社, 2004: 78.
- [22] 张峰, 荣莽, 许明标. 页岩气水平井暂堵球运移坐封机理[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(6): 2202-2208.
- [23] 卢修峰, 刘凤琴. 投球分压的理论验证及实例分析[J]. 石油钻采工艺, 1994, 16(3): 57-62.