

doi:10.3969/j.issn.2095-0411.2021.03.007

基于改进理想充填理论的堵漏颗粒 粒度分布设计方法

张世锋, 王 相, 崔新颖, 张 浩, 洪 展

(常州大学 石油工程学院, 江苏 常州 213164)

摘要: 裂缝性地层堵漏架桥颗粒的粒度分布直接决定其堵漏效果, 而现有方法无法根据裂缝尺寸进行全粒径范围堵漏颗粒粒度分布的设计。基于离散颗粒紧密堆积原理, 对理想充填理论进行了改进, 可根据裂缝尺寸计算全粒径范围多级离散有效封堵颗粒的粒度分布。利用改进后的理论针对 5 mm 及 3 mm 裂缝进行了堵漏颗粒粒度分布设计, 并进行了静态裂缝堵漏效果评价。结果表明, 利用改进后理想充填理论设计粒度分布, 使用石英砂或核桃壳均能够有效封堵 5 mm 裂缝, 且较改进前封堵层体积更小, 漏失量更低, 堵漏效果更好; 针对 5 mm 及 3 mm 裂缝利用改进后理论设计粒度分布的核桃壳颗粒能够有效封堵最大裂缝及低于该裂缝尺寸的其他裂缝, 说明该理论可用于多尺度裂缝地层的堵漏材料设计。

关键词: 裂缝性地层; 漏失; 颗粒粒度分布; 理想充填; 紧密堆积

中图分类号: TK 8

文献标志码: A

文章编号: 2095-0411(2021)03-0054-06

Modified Ideal Packing Theory to Optimize Size Distribution of Plugging Particle for Fracture Lost Circulation Control

ZHANG Shifeng, WANG Xiang, CUI Xinying, ZHANG Hao, HONG Zhan

(School of Petroleum Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, China)

Abstract: The grain size distribution of bridging particles can determine the plugging effect in fractured formation, but the existing methods cannot design the size distribution of plugging particles over the whole particle size range according to the fracture size. Based on the Horsefield principle of particles dense packing, the ideal filling theory is improved. The particle size distribution of multi-stage discrete effective plugging particles in the whole particle size range can be calculated according to the fracture size. With the improved theory, the size distribution of bridging particles for 5 mm or 3 mm fractures

收稿日期: 2020-10-26。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52004037); 中国石油科技创新基金研究项目(2019D-5007-0307); 江苏省自然科学基金资助(BK20190930); 江苏省高等学校自然科学研究面上项目(19KJB440003)。

作者简介: 张世锋(1987—), 男, 山东济南人, 博士, 副教授。E-mail: shifeng@cczu.edu.cn

引用本文: 张世锋, 王相, 崔新颖, 等. 基于改进理想充填理论的堵漏颗粒粒度分布设计方法[J]. 常州大学学报(自然科学版), 2021, 33(3): 54-59.

was designed, and the fracture plugging effect was evaluated. The results show that, with improved ideal filling theory to design the size distribution, 5 mm fracture can be sealed using quartz sand or walnut shell as the bridge plugging particles, and the plugging effect is better than that of before the improvement with smaller volume of sealing layer, lower amount of the lost circulation. In addition, for 5 mm or 3 mm fractures, the bridge plugging walnut shell particles with size distribution designed with the improved theory can effectively block the corresponding fractures and those with lower size, indicating this theory can be used to design plugging particle size distribution in multi-scale fracture formations.

Key words: fractured formation; lost circulation; particle size distribution; ideal filling; close packing

油气钻探开发过程中,钻井液成本占整体成本的 25%~40%,裂缝性地层钻井液漏失是常见的复杂情况,它会造成钻井液的耗损及钻时损失,严重时还会引起卡钻、井喷、井塌,甚至井眼报废等情况,造成重大经济损失,而架桥材料是目前最广泛应用的堵漏材料之一^[1-5]。为实现架桥材料紧密封堵裂缝,国内外学者提出了不同的架桥理论进行架桥颗粒的粒度分布优化设计。为了克服 Abram 规则仅适用于孔隙封堵粒度分布设计的不足^[6],WITHFILL 提出了 Halliburton 方法^[1-2],即堵漏架桥材料的中值粒径 D₅₀ 等于裂缝宽度时,可以有效封堵裂缝;ALSABA 等^[4-5]基于实验研究提出,架桥颗粒 D₅₀ 应大于裂缝宽度的 3/10,架桥颗粒的 D₉₀ 应大于裂缝宽度的 5/6。但上述方法仅规定了 1~2 个粒径分布尺寸要求,无法满足桥堵材料全粒径范围内颗粒尺寸的设计;理想充填理论^[7]可设计架桥颗粒的连续粒度分布,但应用过程需筛选全部粒径颗粒,实施难度较高。本文基于离散紧密堆积模型对理想充填理论进行了修正,根据裂缝尺寸进行了堵漏颗粒粒度分布的设计,使用静态堵漏测试仪对设计材料的堵漏性能进行了评价。

1 改进的理想充填理论

1.1 连续粒度分布的理想充填理论

架桥颗粒外观包括尺寸、形状和表面结构存在差异,颗粒堆积规律也有所不同。其中,圆球状颗粒的堆积方式最简单。FURNAS 等^[8-9]研究了连续粒级分布的颗粒分散液,认为颗粒堆积最紧密、孔隙度最低时累积体积分布应符合下述方程

$$P(D) = \left(\frac{D}{D_{\max}}\right)^q \quad D \in [0, D_{\max}] \quad (1)$$

式中: P 为理想充填累积粒度分布; D 为筛分颗粒尺寸; D_{\max} 为最大颗粒尺寸; q 为指数。ANDREAS-EN^[9] 经过大量实验得出式(1)中指数 q , q 取值为 1/3~1/2 时,颗粒堆积最为紧密,当 q 取值为 1/2 时又称为 Fuller 曲线,被广泛应用于分散液颗粒粒度分布设计标准。上述方程仅考虑了体系中最大粒径的影响,故 FUNK 和 DINGER^[10] 对式(1)进行了修正,修正后的粒度分布方程为

$$P(D) = \frac{D^q - D_{\min}^q}{D_{\max}^q - D_{\min}^q} \quad D \in [D_{\min}, D_{\max}] \quad (2)$$

式中 D_{\min} 为最小颗粒尺寸。根据理想充填理论得到的 D₉₀ 规则^[7],认为累积粒度分布为 90% 时的粒径应等于需封堵的最大孔隙直径,则封堵最大孔径为 D_p 的孔隙所需颗粒粒径为

$$D_{\max}^q = (D_p^q - D_{\min}^q) / 0.9 + D_{\min}^q \quad (3)$$

1.2 离散颗粒的紧密堆积

根据 Horsefield 理论^[11],假设堵漏颗粒为球形,根据排列堆积顺序,将颗粒标号为 1st,2nd,3rd,4th,5th,6th。每次堆积的颗粒直径相同,并忽略相互间的物理化学作用。直径 r 的堆积颗粒如果按照六边形紧密堆积,孔隙度为 25.94%。2nd颗粒充填于 1st颗粒堆积的间隙中,颗粒直径为 $0.414r$ 时堆积充填后孔隙度最低,为 20.70%。依次将剩余颗粒填充于上级颗粒的间隙中,形成最紧密堆积时颗粒粒径及孔隙度见表 1^[11]。

表 1 不同粒级紧密堆积颗粒粒径及堆积后孔隙度

Table 1 Particle size and porosity of close packed particles with different size grade

参数	1 st	2 nd	3 rd	4 th	5 th	6 th
颗粒粒径	r	$0.414r$	$0.225r$	$0.177r$	$0.116r$	Infinite small
孔隙度	0.259 4	0.207 0	0.190 0	0.158 0	0.149 0	0.039 0

1.3 改进的理想充填理论

桥堵颗粒封堵裂缝时,随着钻井液的滤失,最大粒径颗粒首先在裂缝前端堆积,次级粒径颗粒填充于上级粒径颗粒堆积形成的孔隙中。根据 Horsefield 理论,多级粒径颗粒依次堆积后,其颗粒粒径满足表 1 所列时孔隙度最低。理想充填理论考虑颗粒连续粒径,则粒径范围介于如 1.2 所述各级堆积颗粒间的颗粒不能形成最紧密堆积,可将其视为无效封堵颗粒。各级有效封堵颗粒直径参考表 1 可得,假设其粒径累积分布仍满足理想充填理论,则任一级有效封堵颗粒粒径分布为

$$V_e(D_n) = P(D_n) - P(D_{n-1}) \quad (4)$$

式中: V_e 为有效封堵颗粒的体积含量; D_n 为第 n 级有效封堵颗粒的粒径, D_{n-1} 为第 $n-1$ 级有效封堵颗粒的粒径。根据理想充填理论及衍生的 D90 规则,若将需封堵裂缝宽度视为最大孔隙直径,忽略最小颗粒粒径的影响,则封堵裂缝所需最大颗粒粒径为

$$D_{\max} = \frac{D_f}{0.9(\frac{1}{q})} \quad (5)$$

式中 D_f 为最大裂缝宽度。

2 裂缝堵漏实验

2.1 实验设备及材料

分样筛,静态裂缝堵漏仪。如图 1 所示,静态堵漏仪由钻井液储液室、模拟裂缝块、氮气瓶等组成,裂缝块裂缝尺寸分别为 1,2,3,4,5 mm。实验中使用核桃壳及石英砂作为桥堵颗粒。

2.2 实验步骤

依据裂缝尺寸设计各级桥堵颗粒粒度分布,按照体积含量筛分称量堵漏桥堵颗粒并混合均匀;配制 KCl 聚磺钻井液体系作为基浆,配方为 4% 膨润土浆



图 1 裂缝静态承压堵漏仪及裂缝块

Fig.1 Fracture plugging instrument with static pressure and fracture block

+0.3%KPAM+0.5% PAC-LV+4% SMP-1+4%核桃粉。向其中10%的堵漏桥堵颗粒搅拌均匀;将堵漏浆液加入静态裂缝堵漏仪储液室中,并连接氮气管线;打开开关阀,使堵漏浆液接触裂缝块前端,并使用氮气瓶逐渐加压,最高至6.0 MPa;记录堵漏浆液突破裂缝压力或最高压力下的漏失量。

3 结果与讨论

3.1 裂缝堵漏桥堵颗粒粒度分布设计及堵漏效果评价

基于理想充填理论、改进的理想充填理论及 Horsefield 紧密堆积理论分别对5 mm 裂缝的桥堵颗粒粒度分布进行了设计。理想充填理论最大堵漏颗粒粒径由式(5)计算得到,桥堵颗粒体积分数及累积分布根据式(2)计算得到。改进的理想充填理论最大堵漏颗粒粒径及各级有效封堵颗粒粒径根据式(5)和表1计算得到,第5级颗粒填充完毕后,将其视为最大颗粒进行再次封堵,按照表1计算颗粒粒径,直至达到最小可筛分粒径为止;各级有效封堵颗粒累积分布及体积分数根据式(4)计算得到。若 Horsefield 离散堆积理论最大粒径与其他理论一致,各级有效粒径由表1计算得到,体积分数及累积分布根据孔隙度计算得到。各理论设计裂缝桥堵颗粒粒径分布见图2。

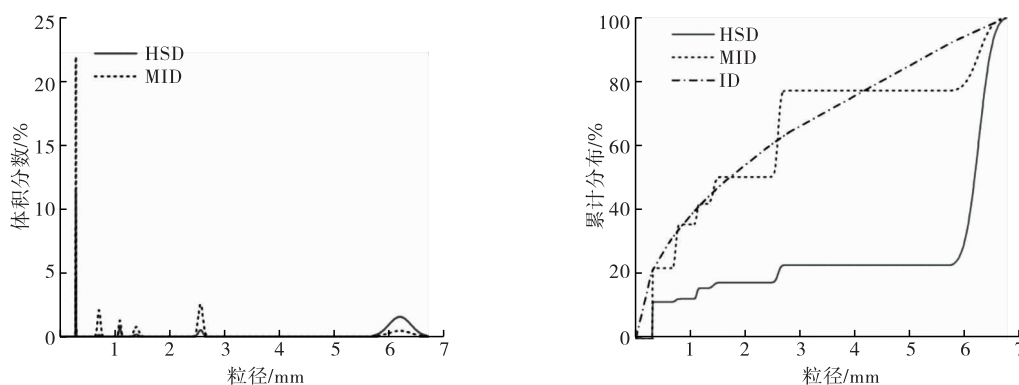


图2 不同理论设计裂缝桥堵颗粒粒度分布(HSD—Horsefield理论;MID—改进的理想充填理论;ID—理想充填理论)

Fig.2 Particle size distribution of plugging particles designed with different theoretical model (HSD—Horsefield theory; MID—Modified ideal packing theory; ID—Ideal packing theory)

使用不同尺寸分样筛筛分混合核桃壳或石英砂,得到3种理论设计粒度分布的堵漏桥堵颗粒,分别加入基浆内搅拌均匀,进行5 mm 裂缝堵漏性能评价,结果如图3和图4所示。离散堆积理论粒度分布的桥堵颗粒未能有效封堵裂缝,堵漏浆液全部漏失;理想充填理论粒度分布的核桃壳或石英砂均能够实现有效堵漏,漏失量分别为150 mL和760 mL,石英砂封堵层的厚度及体积较核桃壳更大;改进理想充填理论粒度分布的核桃壳或石英砂都能够实现有效堵漏,漏失量分别为60 mL和430 mL,石英砂封堵层的厚度及体积较核桃壳更大。对比改进前后理想充填理论粒度分布颗粒堵漏效果,同种堵漏材料改进后理论所设计粒度分布堵漏漏失量更低,封堵体积更小;对比两种堵漏材料,核桃壳因具有可变形的特点较石英砂更加有效堵漏。

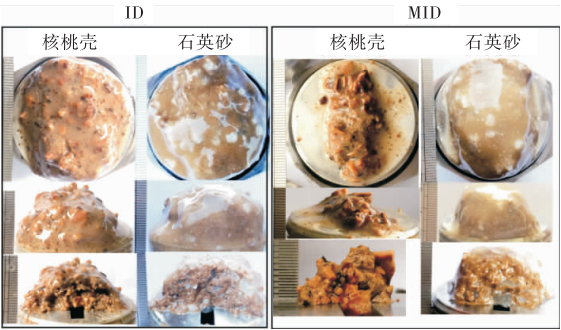


图3 5 mm 裂缝封堵层
Fig.3 5 mm fracture sealing layer

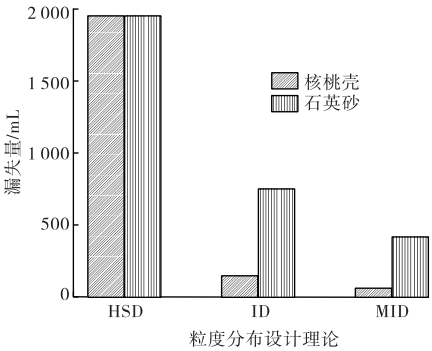


图4 不同理论设计桥堵颗粒裂缝堵漏失量
Fig.4 Lost circulation for plugging particles designed with different theoretical model

3.2 改进理想充填理论设计粒度分布桥堵颗粒多尺度裂缝堵漏性能评价

利用改进的理想充填理论设计了 5 mm 和 3 mm 裂缝堵漏颗粒的粒度分布,使用分样筛筛分核桃壳混合得到堵漏颗粒,加入基浆搅拌均匀。按照 2.1 所述实验步骤评价了 5 mm 裂缝堵漏颗粒封堵 1~5 mm 裂缝的效果及 3 mm 裂缝堵漏颗粒封堵 1~3 mm 裂缝的封堵效果,结果如图 5 和图 6 所示。

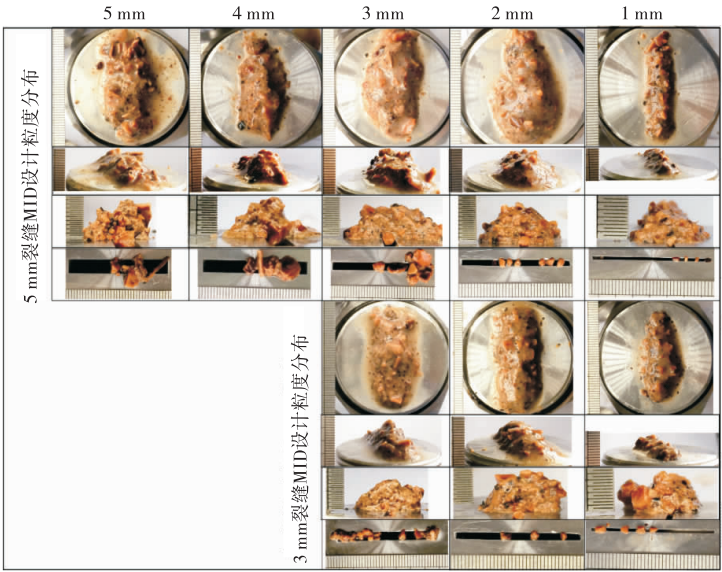


图5 5 mm 及 3 mm 裂缝桥堵颗粒封堵次级裂缝时的封堵层
Fig.5 Fracture sealing layer of plugging particles with size distribution designed for 5 mm or 3 mm fracture

5 mm裂缝堵漏颗粒可以有效封堵 5 mm 及 1~4 mm 裂缝,3 mm 裂缝可以有效封堵 3 mm 及 1~2 mm 裂缝,且堵漏浆液形成封堵层较小,滤失量较低,随着裂缝宽度的降低,滤失量呈下降趋势。改进理论充填理论所设计粒度分布桥堵颗粒能够有效封堵最大尺寸及低于该尺寸的裂缝,适用于多尺度裂缝性地层堵漏时桥堵颗粒粒度分布的设计。

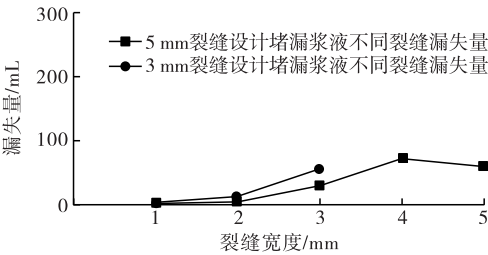


图6 堵漏浆液漏失量随裂缝宽度的变化
Fig.6 The variation of mud fluid loss with fracture width

4 结 论

1)改进的理想充填理论可根据最大裂缝尺寸进行全粒径范围多级离散桥堵颗粒粒度分布的设计。该理论设计粒度分布的桥堵颗粒较改进前堵漏漏失量更低,形成封堵层体积更小,堵漏效果更优。

2)改进的理想充填理论设计粒度分布的桥堵颗粒能够有效封堵最大裂缝及低于该裂缝尺寸的其他裂缝,适用于多尺度裂缝发育地层的桥堵堵漏颗粒设计。

参考文献:

- [1] WITHFILL D. Lost circulation material selection, particle size distribution and fracture modeling with fracture simulation software[C]//Presented at the IADC/SPE Asia Pacific Drilling Technology Conference and Exhibition, Jakarta: SPE-115039-MS, 2008.
- [2] SAVARI S, KULKARNI S D, WHITFILL D L, et al. Engineering design of lost circulation materials (LCMs) is more than adding a word[C]//Presented at the SPE/IADC Drilling Conference and Exhibition, London: SPE-173018-MS, 2015.
- [3] VICKERS S, COWIE M, JONES T, et al. A new methodology that surpasses current bridging theories to efficiently seal a varied pore throat distribution as found in natural reservoir formations[J]. Wiertnictwo Nafta Gaz, 2006, 23 (1): 501-515.
- [4] ALSABA M, AL DUSHAISHI M F, NYGAARD R, et al. Updated criterion to select particle size distribution of lost circulation materials for an effective fracture sealing[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2017, 149: 641-648.
- [5] ALSABA M T, NYGAARD R, SAASEN A, et al. Lost circulation materials capability of sealing wide fractures [C]//Presented at the SPE Deep Water Drilling and Completion Conference, Galveston: SPE-170285-MS, 2014.
- [6] ABRAMS A. Mud design to minimize rock impairment due to particle invasion[J]. Journal of Petroleum Technology, 1977, 29(5): 586-592.
- [7] HANDS N, KOWBEL K, MAIKRANZ S, et al. Drill-in fluid reduces formation damage, increases production rates [J]. Oil and Gas Journal, 1998, 96(28): 65-69.
- [8] FURNAS C C. Grading aggregates-I.-Mathematical relations for beds of broken solids of maximum density[J]. Industrial & Engineering Chemistry, 1931, 23(9): 1052-1058.
- [9] ANDREASEN A H M. Über Die Beziehung zwischen Kornabstufung und Zwischenraum in Produkten aus losen Körnern (mit einigen Experimenten)[J]. Kolloid-Zeitschrift, 1930, 50(3): 217-228.
- [10] FUNK J E, DINGER D R. Predictive process control of crowded particulate suspensions: applied to ceramic manufacturing[M]. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2013.
- [11] FAYED I M E, OTTEN L. 粉体工程手册[M]. 卢寿慈, 王佩云, 译. 北京: 化学工业出版社, 1982.

(责任编辑:殷丽莉)