

# 气井水泥环微间隙封堵材料粒径分形级配优选方法

周照明<sup>1,2</sup> 高洪祥<sup>2</sup> 金春玉<sup>1</sup>

(大庆石油学院<sup>1</sup>,大庆 163318;大庆钻探工程公司规划计划处<sup>2</sup>,大庆 161138)

**摘要** 天然气在微间隙中的气窜流动特征比较复杂,一旦发生环空气窜,就会造成生产损失,甚至影响施工安全。针对目前封堵材料粒径选择方法的不足,国内外公司做了大量的研究,但国内油田在此方面的研究还未成熟,气体上窜问题仍未得到根本解决。引入分形理论,建立微间隙封堵的物理模型,结合激光粒度测试得到的材料粒径分布状况及分形维数的合理筛选( $D=2.556$  mm),假定在小于 1.68 mm、(1.68—56.8) mm、大于 56.8  $\mu\text{m}$  三个粒径范围内分别填充微硅、水泥和漂珠,设计出水泥、微硅和漂珠的质量配比为 100 : 22.068 : 12.973。并对封堵体系进行试验测定,结果表明该堵剂有良好的固结强度、造壁性和封堵效果。从而为微间隙封堵工艺提供技术指导,减少气窜事故的发生。

**关键词** 微间隙 气窜 封堵材料 分形理论

**中图法分类号** TE358.3; **文献标志码** A

气井水泥环间隙气窜是所有气层固井面临的技术难题,其主要危害包括:破坏水泥石胶结质量;降低油气采收率;对油田开发后续作业如酸化压裂和分层开采等造成很大影响;严重时会造成固井后井喷事故,涉及到人员、设备及施工作业的安全<sup>[1]</sup>。根据“微裂缝-微间隙”理论<sup>[2]</sup>,根据微间隙尺寸,合理优选封堵材料,可以有效防止气窜的发生。

## 1 水泥环微间隙封堵的物理模型

微间隙封堵的物理模型如图 1 所示。该图为截取的部分微间隙封堵情况,颗粒在微间隙中的堵塞在一定的条件下遵循“选择性架桥,逐级填充”的过程。

### 1.1 架桥粒子的架桥

图中最大的颗粒为架桥粒子,单个架桥粒子在压差下进入微间隙时:若粒子半径远小于缝隙宽度(一般小于 1/7),则通过缝隙;若粒子半径大于缝隙

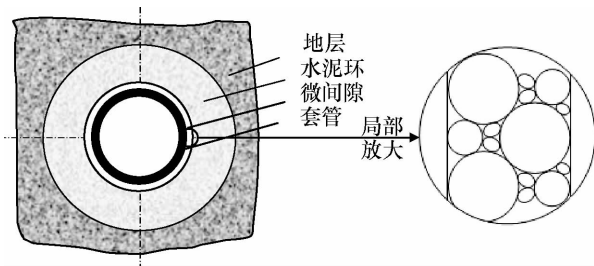


图 1 微间隙封堵物理模型

宽度,则堆积在缝隙外;若粒子半径与缝隙宽度之比为 1/3 ~ 2/3,则在缝隙入口处卡住,成为架桥。

### 1.2 填充粒子的填充

架桥粒子架桥后,微间隙大量减小,封堵液中更小一级粒子卡在更小微间隙的处,这一过程不断重复,这一过程叫单粒逐级填充。这时堵塞带的渗透率取决于封堵液中最小一级粒子的粒级,但渗透率不会为零。

### 1.3 变形粒子的作用

如果封堵液中仅有刚性颗粒作为架桥和填充粒子,仍会留下形状不规则的微间隙,封堵带的渗透率不会为零。这就需要引入微间隙封堵中最关键的颗粒,即外形在一定的温度条件下可变的软化变形颗粒。当最小粒级的粒子是可变形时,就会嵌

入到不规则的微间隙中,则封堵带的渗透率可接近于零。

## 2 微间隙封堵分形理论的研究

微间隙的缝隙宽度和封堵材料的颗粒粒径分布均具有分形特征,表示了缝隙宽度和颗粒尺寸分布的复杂程度,能够较好地反映缝隙宽度和颗粒尺寸的真实分布情况。因此,可以根据缝隙宽度分布的分维值,选取同样具有相同或相近颗粒分布分维值的封堵颗粒,作为此缝隙的优选的封堵材料。基于这样的思想,可建立微间隙封堵材料优选分形理论模型。

(1)根据频谱分析法得出缝隙宽度的功率谱密度与空间频率的关系,利用对缝隙宽度分布所建立的分形模型,计算和测定出缝隙宽度尺寸分布的分维数  $D_1$  和平均孔隙半径。通过式(1)可以确定岩样孔隙尺寸和暂堵剂粒度分布的分维数<sup>[3]</sup>。

$$P(< d) = \left( \frac{d}{d_{\max}} \right)^{3-D} \quad (1)$$

式(1)中: $d$ —封堵剂颗粒直径;

$d_{\max}$ —封堵剂最大颗粒直径;

$D$ —颗粒尺寸分布分形维数;

$P(< d)$ —粒径小于  $d$  的粒子累积颗粒体积几率。

(2)根据“2/3 架桥规则”确定将要采用的封堵材料中刚性粒子的平均直径,并据此初选出封堵材料中的刚性粒子封堵颗粒。

(3)按 1/3 ~ 1/4 充填规则,确定提供充填粒子和可变粒子的平均颗粒直径。

(4)根据粒度分析仪对封堵颗粒进行粒度分析,得到颗粒尺寸分布资料,利用封堵材料颗粒粒度分布分形模型测定和计算出各种封堵颗粒的分形维数。

(5)对初选的几种封堵材料进行各种比例的复配。

(6)采用与(4)相同的方法测定各复配封堵颗粒粒度尺寸分布的分形维数  $D_2$ 。

(7)选择与  $D_1$  最接近的  $D_2$  的复配封堵材料配

方,将其作为在分形维数为  $D_1$  的缝隙封堵时最优的封堵材料配方。

## 3 封堵材料配方设计与评价

### 3.1 封堵材料粒径分形级配

封堵颗粒根据其功能分为刚性粒子、填充粒子和可变形的软化粒子。常用的封堵颗粒为以上几种粒子的复配物。通过文献[4]研究认为,封堵材料作为矿物体的一种,其颗粒尺寸分布具有分形特征,在此我们对封堵材料的分形特征和分形维数测量方法进行了研究,给出了复配封堵材料中各种粒子的选取方法,结果引述如下。封堵颗粒的平均粒径可在采用激光粒度分析仪对封堵颗粒进行粒度分析时测量计算出来。初选复配封堵颗粒按前述的“1/3 - 2/3 粒径架桥理论”选择,具体选择各种封堵粒子的原则是:刚性粒子的平均直径应为缝隙平均宽度的 2/3; 充填粒子和可变形粒子的平均颗粒直径应为缝隙平均宽度的 1/3。封堵粒径分布分维数的测量方法为:①采用激光粒度分析仪对封堵颗粒进行粒度分析,可得到封堵颗粒粒径尺寸累积分布曲线、分布频率等资料;②据此资料可以确定某一给定颗粒直径下,累积颗粒体积几率与颗粒直径和选定的最大粒径之比之间的对数关系;③如果粒径分布具有分形特征,则得到的应是一较高置信度下的直线关系,该直线的斜率值即为所研究封堵颗粒粒径分布的分形维数值<sup>[5]</sup>。

假定根据微间隙气窜机理研究,244.5 mm 套管在高压下产生 (73.6 ~ 94.54)  $\mu\text{m}$  的微间隙,  $D_1 = 2.700$ <sup>[6]</sup>。选取水泥、漂珠及微硅作为封堵级配原材料,水泥、漂珠和微硅的密度分别为 3.1, 0.75 和 2.6  $\text{g}/\text{cm}^3$ , 利用激光粒度测试仪测定各材料的粒度分布状况。

分析结果表明:漂珠构成第 1 级填充结构,平均粒径为 57.51  $\mu\text{m}$ , (35.23 ~ 80.7)  $\mu\text{m}$  的颗粒体积占 90%; 水泥可填充于漂珠颗粒堆积的孔隙中构成第 2 级填充结构,其平均粒径为 20.7  $\mu\text{m}$  (1.58 ~ 56.8)  $\mu\text{m}$  的颗粒体积占 98%; 微硅可填充于漂珠

与水泥颗粒堆积形成的二元体孔隙之间构成第 3 级填充结构,平均粒径为  $0.15 \mu\text{m}$ , ( $0.02 \sim 1.68$ )  $\mu\text{m}$  的颗粒体积占 98%。混合料最小粒径为  $0.02 \mu\text{m}$ , 最大粒径为  $127.6 \mu\text{m}$ 。

在分形级配模型中,可通过适当改变极限粒径和分形维数的方式进行调整。将极限粒径和不同的分形维数代入公式(1),可得不同紧密堆积体系的颗粒尺寸分布曲线,如图 2 所示。分析可知,随着分形维数  $D$  的增大,微硅的含量逐渐增大,而漂珠的含量逐渐减小。说明分形维数越大,粒组越细,反之粒组越粗。

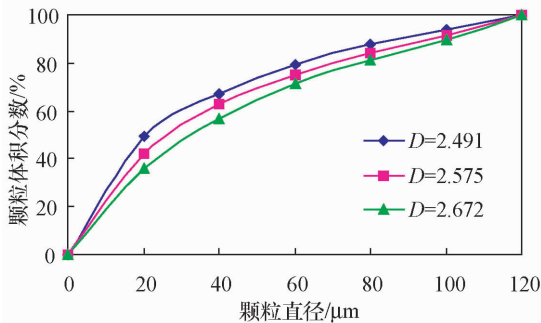


图 2 不同分形维数下的颗粒分布

在恒定体系水固比(0.5)及实验筛选的 Landy 系列添加剂加量的基础上,在 2.491 ~ 2.672 范围内取不同的  $D$  值得到外掺料加量配比,再对形成体系的抗压强度和流变性能进行对比分析,最后优化得出最优  $D$  值范围是 2.521 ~ 2.556。取与  $D_1$  最接近的  $D_2 = 2.556$ ,此时体系的粒径分布状况如表 1 所示。

表 1 三元体系粒径分布表 ( $D=2.556$ )

粒径分布范围/ $\mu\text{m}$	<0.15	<1.68	<20.7	<35.23	<57.51	<80.7	<127.6
颗粒体积分数/%	5.002	14.623	44.596	56.472	70.199	81.593	100

由表 1 可得各掺料等效体积含量,进行质量转换后得到水泥、微硅和漂珠的质量配比为 100: 22.068: 12.973。

### 3.2 封堵材料性能评价

采用不同砂粒填制的特高渗透率岩心管进行

造壁性试验,测试堵剂通过岩心管的通过率(注入量/通过量)来衡量堵剂的造壁性,同时,测定该封堵液的力学性质。试验步骤如下:

① 用粒径(2.0 ~ 5.0) mm, (1.4 ~ 2.0) mm 的不规则砂粒制作的填砂管。

② 向填砂管中分别灌入水灰比为 0.5 的复合封堵材料浆体和常规水泥浆体,灌入量 100 mL。观察造壁和封堵情况。

③ 与常规水泥石进行对比来评价复合封堵材料水泥石的紧密堆积效果。

试验结果如表 2 所示。试验发现,对于粒径(2.0 ~ 5.0) mm, (1.4 ~ 2.0) mm 的填砂管,常规水泥浆体全部通过,而复合封堵体系只能渗漏(10 ~ 20) mL,说明复合封堵材料浆体的造壁性良好。另外,复合封堵材料水泥石的体系强度明显高于常规水泥石的体系强度,这说明利用分形级配模型确定的复合封堵水泥浆体系的颗粒粒径分布合理,达到了良好的紧密封堵效果。

表 2 体系性能试验结果

试验液	水灰比	漏失通 过量/%	24 h 抗压强度/MPa		2 d 胶结强度/MPa 第一界面
			常压,38℃	常压,75℃	
常规水泥	0.5	95	3.5	7.5	1.06
复合封堵 水泥	0.5	11	10	18.6	1.62

## 4 结论

(1) 应用分形理论对微间隙封堵材料粒径进行优选,选择与  $D_1$  最接近的  $D_2$  的复配封堵材料配方,将其作为在分形维数为  $D_1$  的缝隙封堵时最优的封堵材料配方。分形维数越大,粒组越细,反之粒组越粗。

(2) 该封堵体系利用水泥、微硅和漂珠的三级颗粒充填,提高了堵剂的固结强度、造壁性和封堵效果。

### 参 考 文 献

- (5):35—38
- 2 蒋贤儒,张国荣,智卫东,等. 封堵封窜技术在孤东油田的应用. 江汉石油学院学报,2001;23(3):49—51
  - 3 Cui Yingchun, Zhang Yan. Fractal theory on optimal selection of temporary plugging particles in formation damage control. Petroleum Science, 1999;2(4):31—36
  - 4 周云龙. 垂直上升管内气-液两相环状流截面含气率的数学模型. 工程热物理学报. 2005;15(4):102—105
  - 5 Azizi T, Chen H, Rahman S S. Management of wellbore instability & formation damage by improved drilling mud design. IADC/SPE 47786
  - 6 程荣超,王瑞和,步玉环. 基于分形理论的固井水泥浆体系设计. 西安石油大学学报(自然科学版),2007;22(6):60—63

## Optimum Selection of Grain Diameter of Plugging Material Based on Fractal Gradation Theory in Microannulus between Casing and Cement Sheath of Gas Well

ZHOU Zhao-ming<sup>1,2</sup>, GAO Hong-xian<sup>2</sup>, JIN Chun-yu<sup>1</sup>

(Daqing Petroleum Institute, Daqing 163318, P. R. China; The Planning Department of Daqing Drilling Engineering Company, Daqing 163318, P. R. China)

**[Abstract]** The flow behavior of the gas breakthrough in the microgap is complex, production losses caused and construction safety affected by gas breakthrough. The companies research a lot at home and abroad for the optimum selection of grain diameter of plugging material, but this study is not mature at home, This shows that the gas channeling has not been fundamentally resolved. The fractal theory is introduce, the physical model of the plugging microgap was established. The grain-size distributions of the slurry materials are measured by a laser grain-size test machine, and an appropriate fractal dimension is screened ( $D = 2.556$ ). Suppose that the grain sizes of micro-silica, cement and floating beads distribute respectively in  $< 1.68 \mu\text{m}$ ,  $1.68 \sim 56.8 \mu\text{m}$  and  $> 56.8 \mu\text{m}$ , and the mass ratio of cement, micro-silica and floating beads is 100:22.068:12.973. And this sealing system has been determined by testing, the test result indicates that the system has good consolidation strength, building capacity and sealing characteristics. It provided guidance for option of the plugging technology and low possibility for accidents.

**[Key words]** microgap    gas channeling    plugging material    fractal theory

(上接第 1964 页)

## Viscosity Reduction Capability of Lignin to Polyacrylamide

FAN Zhen-zhong, ZHOU Yang\*, HAN Fei<sup>1</sup>, SHENG Li<sup>2</sup>

(Department of Petroleum Engineering, Daqing Petroleum Institute, Daqing 163318, P. R. China;  
The 1st Oil Production Factory, Daqing Oilfield Company, PetroChina<sup>1</sup>, Daqing 163254, P. R. China;  
The 2st Oil Production Factory, Daqing Oilfield Company, PetroChina<sup>2</sup>, Daqing 163000, P. R. China)

**[Abstract]** The existing problem that the viscosity of polymer is too high that affects the oil recovery efficiency, so it is posed a issue to reduce the viscosity of polymer. lignin is used in tertiary oil recovery as a cheap surface active agent. It has a extensive expecting of used in oil field. The viscosity of HPAM of same concentration and same volume is reduce faster when mixed with more lignin. The conclusion of HPAM viscosity reduction experiment show that effect is  $\text{HCl} > \text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8 > \text{NaClO}$ .

**[Key words]** polymer flood    lignin    polyacrylamide    viscosity reduction