

# 磁性粘弹体的密封抗压试验研究

周开学 陈长恩 卢贵武

(石油大学(华东)数理系)

**摘要** 研究了磁性粘弹体的配方和它在磁场作用下的密封抗压强度,提供了一种可用于磁密封的配方;研究了密封抗压强度与粘弹体中的磁粉含量、所加磁场强度、磁场分布形式之间的关系,得出了磁粉最佳比例。该粘弹体配方具有耐酸碱、不溶于油和水、温度稳定性好等特点,适用于油水井磁封隔及其它工业流封隔。

**主题词** 磁性 粘弹性介质 配方 密封 抗压强度 封隔 试验 应用

**作者简介** 周开学,1943年生。1970年毕业于山东大学物理系,现从事磁场在石油开采中的防蜡、增注、防垢、缓蚀等方面应用的研究及物理教学工作,副教授,硕士生导师。陈长恩,1938年生。1964年毕业于山东大学物理系,现从事磁应用研究及物理教学工作,副教授。卢贵武,1964年生。1989年毕业于北京师范大学物理系,现从事磁应用研究及物理教学工作,讲师。

在对油井实施水力压裂、射孔炮眼酸处理和封堵层间窜流等工艺措施时,广泛应用了各种封隔器。但是,当油层套管存在缺陷(如套管内壁的腐蚀,变形载荷引起的破裂等)时,机械封隔器的有效性大大降低。采用磁性粘弹体进行油井封隔,既能克服机械封隔器的缺陷,又能使分层开发变得灵活方便。把磁性粘弹体灌入油套环形空间,加磁场后磁粉做有序排列,又受到磁力作用,可以有效地封隔井筒,且具有较高的抗压性能。当撤去磁场时,粘弹体的抗压性能将大大降低,可在井筒的内压作用下流出油套环形空间。选择适当的粘弹体,配置最佳的磁场,是研制磁性封隔器遇到的基本问题,先后对环氧树脂基、环氧树脂+松香基、环氧树脂+固化剂基、聚丙烯酰胺冻胶基的磁性粘弹体做了试验和优选,最后选定环氧树脂和  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  作为磁性粘弹体的基本原料,并对其作了较全面的试验和分析。

## 一、环氧树脂基磁性粘弹体的配制

1. 性能 环氧树脂 I,又名环氧树脂 812,淡黄色油状液体,常温下粘度  $1.4\sim 2.0\text{Pa}\cdot\text{s}$ ,具有热稳定性和不活泼性,对金属和非金属都有很高的粘附性,用作密封剂时很易浇注而且收缩性很小,能耐  $177\sim 260\text{C}$  的高温,对于一般的溶剂油类和化学物质具有很高的稳定性。

磁铁矿  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  是一种亚铁磁体,属反尖晶石结构,每个分子的磁矩是  $4.2\mu_{\text{B}}$ ,当温度低于居里点时有较大的磁化率和自发磁化强度。

2. 粘弹体的配制 按不同浓度的用量称取环氧树脂和  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ,混合后放入  $120\text{C}$  的烤箱加热  $10\text{min}$ ,然后充分搅拌,使磁粉被环氧树脂充分包裹。

## 二、试验装置和方法

1. 装置 试验装置由  $\text{N}_2$  瓶、压力容器、压力表、开关、模拟缝隙、磁铁和恒温箱构成,见

图 1。

2. 试验方法 把配制的粘弹体装入模拟缝隙之中,模拟缝隙宽 5mm,深 150mm,由铜制成。加磁场后静置数分钟,之后打开  $K_1$ ,用高压  $N_2$  瓶给模拟缝隙打压, $N_2$  穿透密封液体时的压差用标准压力表测定。为了保持温度稳定,把模拟缝隙置入约 100 C 的恒温箱中。

### 三、密封抗压强度试验

1. 磁粉浓度试验 在恒温条件下对磁粉浓度进行重复试验,结果见图 2。

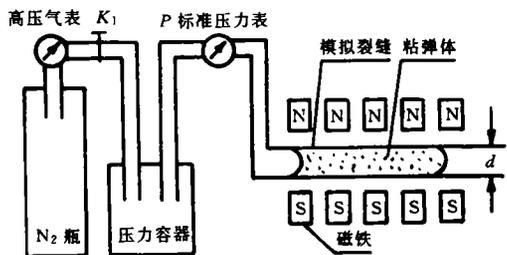


图 1 试验装置示意图

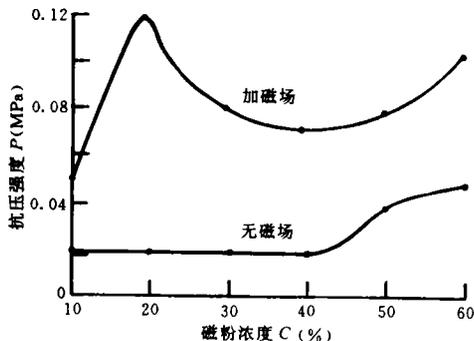


图 2 抗压强度与磁粉浓度关系曲线

图 2 表明,磁粉浓度为 20% 时抗压强度达到极值,浓度介于 20%~40% 时抗压强度递减,大于 40% 时又开始回升,当大于 60% 时粘弹体结构不稳定,一般在 2~3d 内固化。

2. 磁场强度及梯度试验 进行了两种磁场分布的对比试验,磁场的分布如图 3 所示。试验取磁粉浓度 20%,磁场强度取其峰值的绝对值,试验结果见图 4。

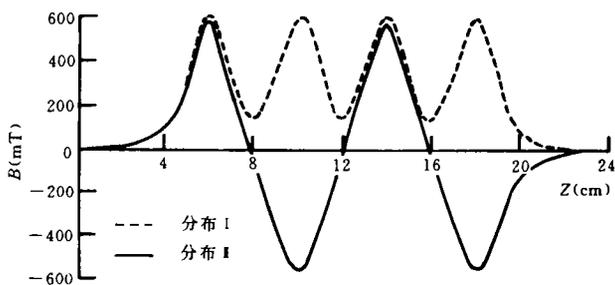


图 3 磁场分布曲线

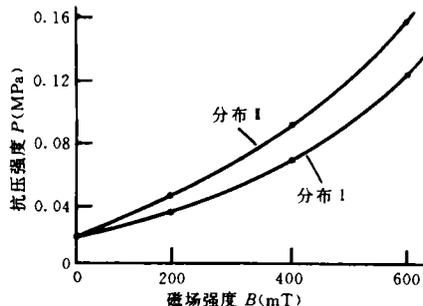


图 4 抗压强度与磁场强度关系曲线

图 4 表明,密封抗压强度随磁场强度的增加而上升;在相同的磁场强度下,磁场分布 II 的密封性比分布 I 大 1/3 左右,因此调整磁极结构,配置最佳磁场梯度分布是尤为重要的。

3. 缝宽试验 在 600mT 磁场强度下,进行了缝隙宽度对密封性的影响试验,取浓度 20%,试验曲线见图 5。试验表明,增大缝宽,密封抗压强度下降,不加磁场时下降更为显著。

4. 温度试验 在 50 C 和 100 C 情况下进行了温度对比试验,见温度对抗压强度影响表,表中数据表明,温度升高对加有磁场的粘弹体的密封性没有显著变化,但不加磁场时变化较大。

### 四、讨论

1. 磁性粘弹体的磁化 磁性粘弹体注入磁场中,其各种组分在磁场作用下被磁化,在磁力线方向出现磁矩  $\vec{m}_i$

温度对抗压强度的影响

温度 (C)		50		100	
浓度 (%)		20	50	20	50
抗压强度 (MPa)	有磁场	0.12	0.08	0.12	0.07
	无磁场	0.02	0.04	0.01	0.02

注:所加磁场为 600mT,缝宽 5mm。

$$\vec{m}_i = \chi \vec{H}$$

其中,  $\chi$  为磁化率;  $H$  为外加磁场强度。环氧树脂为抗磁物质,磁化率  $\chi \approx 10^{-5} \sim 10^{-6}$  且为负值,磁矩  $\vec{m}_i$  与外加磁场反向。Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 为亚铁磁物质,  $\chi \approx 10^3 \sim 10^4$ , 饱和磁感应强度达 0.6T。显然,在同样磁场的作用下,Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 粉末会产生极强的沿磁场方向的磁矩  $\vec{m}_i$ 。相比之下,环氧树脂中的磁矩可被忽略。需要特别说明的是,Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 的磁化过程主要是磁畴转向,而粉末状的 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 的磁化必伴随着颗粒的转向,即磁化过程是颗粒的固有磁矩转向磁场方向的过程。

2. 磁矩  $\vec{m}_i$  在磁场中受到的作用

(1) 磁矩  $\vec{m}_i$  如果与磁场  $\vec{H}$  产生一个夹角  $\theta$ , 则  $\vec{m}_i$  会受磁场给它的一个力矩的作用, 力矩为

$$\vec{L} = \vec{m}_i \cdot \vec{B}$$

其中,  $\vec{B} = \mu \vec{H}$  为  $\vec{m}_i$  所在处的磁感应强度。  $\vec{L}$  的数值为

$$L = m_i B \sin \theta$$

其方向是使  $\vec{m}_i$  转向磁场方向。

在本例中,粘弹体注入磁场静置后,  $\vec{m}_i$  均处于磁场方向,  $L = 0$ 。当粘弹体受外加沿缝隙方向的压强作用流过距离  $\Delta S$  时,磁矩会偏离磁场方向而产生夹角  $\theta$ , 于是磁矩受到磁场作用的力矩  $L$ ,  $L$  使  $m_i$  保持磁场方向, 故为恢复力矩, 阻止粘弹体流动, 产生一种抗剪切能力。

(2) 磁矩  $\vec{m}_i$  处在非均匀磁场中受到磁作用力  $F_m$

$$\vec{F}_m = (\vec{m}_i \cdot \nabla) \vec{B}$$

本例中,假设  $x$  方向磁场均匀。则

$$\vec{F}_m = m_y \left( \frac{\partial B_y}{\partial y} + \frac{\partial B_z}{\partial z} \right) \vec{e}_y + m_z \left( \frac{\partial B_y}{\partial y} + \frac{\partial B_z}{\partial z} \right) \vec{e}_z$$

该式表明,力  $F_m$  有两个分力,各自指向沿  $y$  和  $z$  轴磁场增强的方向,磁场梯度越大,受力越大。

设初始状态下,粘弹体对于磁场而言,沿  $y$  轴和  $z$  轴均对称,则所有磁矩所受磁场的合力为零。若粘弹体受到沿  $z$  轴作用的压力  $P$  作用沿  $z$  轴流过距离  $\Delta S$ , 于是破坏了粘弹体对于磁场的对称性。粘弹体必受到一  $z$  方向的磁力作用。该力阻止粘弹体流动而产生抗压作用。经计算,图 3 中分布 II 的平均  $z$  向磁场梯度比分布 I 大 1/3 左右,故密封抗压强度也大 1/3 左右。

3. 磁矩的相互作用 处在磁场中的粘弹体中的 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 磁矩  $\vec{m}_i$  均沿磁场分布,见图 6。

显然,同一磁力线上相邻磁矩相互吸引,而相邻磁力线上的相邻磁矩相互排斥。若某一磁矩(实为 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 颗粒)欲发生转动,必将受到周围 4 个相邻磁矩所产生的反抗力矩的作用,从而

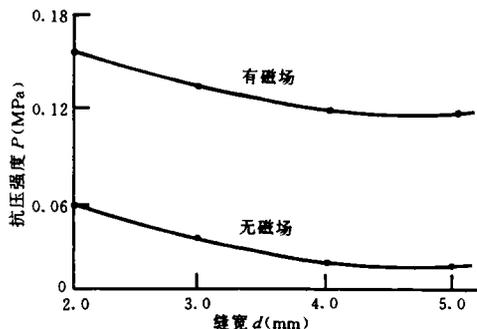


图 5 抗压强度与缝宽关系曲线

使各磁矩均“固化”在原位而难以转动。我们知道,粘滞流体在缝隙中的流动必以层流形式进行,其分子或分子团不转动就难以流动。因此,磁矩间的相互作用会严重阻碍其流动而产生抗压作用。

总之,磁场对磁矩的力矩作用、磁力作用和磁矩间的相互作用均能增强抗压能力。

4. 对  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  浓度的讨论 如前所述,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  粉末在磁场中磁化需要转向。当粘弹体中  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  含量少时,悬浮在液态环氧树脂中的颗粒转向容易,在磁场作用下可以充分转向,即充分磁化。而且增加  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  浓度就增加了有效磁矩  $\vec{m}_i$ , 所以浓度增加会增加密封抗压强度。但当浓度达到某一临界值(例如本例中的 20%)后,进一步增加浓度时,由于颗粒之间距离减小,环氧树脂的粘性阻碍了磁化转向,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  不再能够充分磁化。尽管粘弹体中具有的磁矩量增加,但能转到磁力线方向起到抗压作用的反而减少,而且处于相反方向的磁矩又会起到相反的作用。故在临界浓度以上,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  浓度越大密封抗压性能反而下降。浓度很大时再度上升则是由于液体中含固体量很大时粘度迅速上升所致,而不是磁场和磁矩抗压作用的结果。

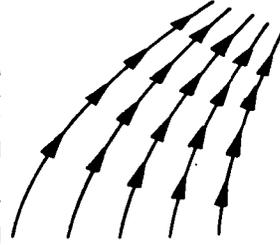


图6 磁矩的相互作用

## 五、结论

1. 在磁场作用下,磁性粘弹体具有较强的密封抗压性能。加磁场可提高抗压强度 4~6 倍。
2. 粘弹体中磁粉浓度存在最佳值,本例中最佳浓度为 20%。
3. 设置沿缝隙方向梯度大的磁场有利于增加密封抗压强度。
4. 环氧树脂+ $\text{Fe}_3\text{O}_4$  是一种性能较好的磁性粘弹体,可用于油、水封隔的磁性封隔器。

## 参 考 文 献

- 1 中国医药公司,试剂手册.上海:上海科技出版社,1985
- 2 方俊鑫等.固体物理学(下册).上海:上海科技出版社,1981
- 3 郭硕鸿.电动力学.北京:高等教育出版社,1979
- 4 Вилгусев 等.利用聚合铁磁性结构提高封隔器的密封能力.石油业,1986(1):53~56

(收稿日期 1996-04-30)

(修改稿收到日期 1996-07-28)

[编辑 王霜梅]

### TESTING AND STUDYING ON RHEOLOGY OF POLYMER SOLUTION

by Li Fujun, Cao Guangsheng, Wang Dexi, Xia Huifen

**Abstract** The polymer solution was verified based on the analysis of testing data of rheology of polymer solution, whose molecular weight is 17 millions, which has pseudo-plastic rheological behavior of power-law fluid when the injection rate of individual well is smaller than 500 m<sup>3</sup>/d. The effect of concentration was analyzed on the rheological behavior of polymer solution. The variable laws of apparent viscosity, fluid index n, and consistency coefficient k was described with concentration of polymer solution.

**Subject heading** polymer solution power-law fluid rheological moded rheology apparent viscosity flow property

### DISCUSSION ON THE CALCULATION METHOD OF SYSTEM EFFICIENCY OF WATER FLOODING

by Ma Qingkun, Liu Qianjin

**Abstract** The system efficiency of water injection well is calculated by multiplying the efficiencies of every unit. The main problem in this method is that some data are difficult to collect and the calculation is complicated. A simple and suitable method was presented based on the analysis of energy variation of water injection system. It is applied to analysis the efficiencies of whole system or each unit. It is helpful to know energy consumption and make system reformation.

**Subject heading** water flooding system efficiency analytical method calculation method

### TESTING AND STUDYING ON SEALING AND COMPRESSIVE PERFORMANCE OF MAGNETIC VISCOELASTIC BODY

by Zhou Kaixue, Chen Chang, en, Lu Guiwu

**Abstract** A study was made on the formula of magnetic viscoelastic body and its seal and compressive strength under magnetic field. The relations were studied among seal and compressive strength, magnetic powder content, strength and distribution form of magnetic field. A new formula was presented to be used for magnetic sealing. It has advantages of acid-resistance, alkali-resistance, insolubility with oil and water and good thermal stability etc., and is suitable for magnetic seal in water/oil wells or other professions.

**Subject heading** magnetic property viscoelastic media formulation sealing compressive strength pack testing application

### STUDY AND APPLICATION OF PHENOLIC-RESIN COATING-SAND EXTERNAL CURING AGENT

by Zeng Qingkun, Jin Qianhuan, Wang Qiaoling

**Abstract** The J-01 type external curing agent, which can make phenolic-resin solidification in 45°C with high curing strength, is introduced in this paper. In the sand control operation using resin coating sand, it can meet the need of sand-control in low-temperature and high production-strength wells. There is important significance for the sand control in later production.

**Subject heading** sand control phenolic resin coating solidification strength temperature