

◀“863”计划专栏▶

# 超声波法测定水泥浆胶凝强度实验研究

姜林林<sup>1</sup> 王瑞和<sup>2</sup> 姜林甫<sup>3</sup> 樊户伟<sup>4</sup> 李楠<sup>1</sup>

(1. 中国石油大学(华东) 石油工程学院, 山东 东营 257061; 2. 中国石油大学(华东), 山东 东营 257061; 3. 中国石化胜利油田分公司 东辛采油厂, 山东 东营 257094; 4. 中国石化胜利油田分公司 技术检测中心, 山东 东营 257000)

**摘要:**针对目前水泥浆静胶凝强度测试装置的不足,在改进了机械剪切法测定水泥浆胶凝强度实验装置的基础上,利用机械测定与无损超声波测定的方法,研究了固井水泥浆的胶凝强度发展规律及对应的超声波声速和声幅变化规律。研究表明,随着水泥浆水化的进行,水泥浆胶凝强度的增大先缓慢后迅速;超声波声速的增长先快速后缓慢;超声波声幅的降低先快速后缓慢;采用超声波声幅衰减对胶凝强度进行指数函数回归拟合效果较好,相对标准差和平均相对误差分别为 10.20% 和 7.06%。

**关键词:**水泥浆;胶凝强度;超声波;声幅衰减;数学分析;

**中图分类号:**TE256<sup>+</sup>.7   **文献标识码:**A   **文章编号:**1001-0890(2010)01-0004-04

水泥浆的防气窜特性与水泥浆胶凝强度发展特性之间存在密切联系,因此,利用水泥浆胶凝强度的发展特性作为衡量水泥浆体系防气窜能力的指标是一种趋势<sup>[1-3]</sup>。目前水泥浆胶凝强度测定的常规方法——传统机械法,步骤较为繁琐而且重复性相对较差,而国外的水泥浆静胶凝强度测试仪其价格非常昂贵<sup>[4]</sup>。为此,笔者在实验室研发无损超声波检测系统与改进水泥浆胶凝强度机械测定装置的基础上,研究分析了水泥浆胶凝强度与超声波声速以及声幅衰减之间的直接数学关系,从而进一步完善了无损超声波检测系统测定水泥浆静胶凝强度的方法。

## 1 实验原理和方法

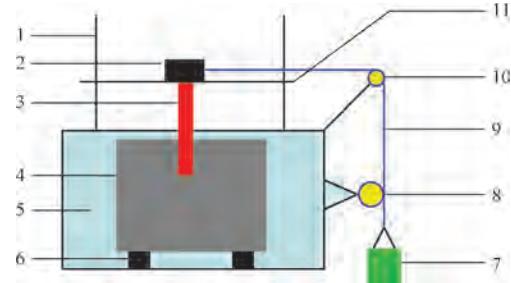
拟在相同实验条件下对相同配方的水泥浆进行实验研究,实验中采用薄刀片切割法测定水泥浆的胶凝强度发展规律,采用超声波无损法对水泥浆不同水化期的声波传播规律进行研究,从而揭示水泥浆胶凝强度与超声波参数之间的关系。

### 1.1 薄刀片切割法测水泥浆胶凝强度

#### 1.1.1 实验装置改进

采用薄刀片切割法测定水泥浆胶凝强度,能够满足水泥浆胶凝强度的测量要求,而且易于操作<sup>[4-5]</sup>,但目前该方法由于机械结构较为复杂,导致机械误差较大。为此,笔者对薄刀片法的装置进行了改

进,改进后的装置如图 1 所示,装置的尺寸见表 1,其原理与薄刀片切割法相同,但其机械结构简单,误差较小。刀片开始运动时,如果忽略摩擦力的影响,小桶的重量即为刀片所受水泥浆的阻力,单位面积刀片所受的阻力反映了浆体结构力的强弱,即胶凝强度。



1. 支架;2. 小车;3. 刀片;4. 水泥槽;5. 保温装置;6. 垫片;  
7. 小桶;8. 垂直滑轮;9. 高强度细线;10. 支撑滑轮;11. 导轨

图 1 水泥浆胶凝强度测量装置原理

表 1 部分实验装置的尺寸

| 名称       | 长/mm       | 宽/mm | 高或厚/mm |
|----------|------------|------|--------|
| 水浴锅      | 465        | 320  | 100.0  |
| 水泥槽      | 450        | 195  | 95.0   |
| 刀片(工作部分) | 120(20~60) | 16   | 1.5    |

收稿日期:2009-08-31;改回日期:2009-11-15

基金项目:国家高技术研究发展计划(“863”计划)项目“深水固井技术基础研究”(编号:2006AA09Z340)部分研究成果

作者简介:姜林林(1980—),女,汉族,山东威海人,2002 年毕业于江汉石油学院环境工程专业,2006 年获中国石油大学(北京)环境工程专业硕士学位,油气井工程专业在读博士研究生,主要研究方向为井下系统、信息与控制工程。

联系方式:(0546)8394360,jiangll\_lx@126.com

### 1.1.2 实验步骤及计算方法

**1) 实验步骤** a. 把水浴锅温度调至实验温度,保持恒定;b. 安装好实验装置,增加小桶的重量,直到小车开始运动,称取小桶重量(装置的摩擦力);c. 配浆;d. 把配好的水泥浆放入水泥槽中,从  $T_0$  时刻开始往小桶里缓缓加细沙,直到小车开始运动,然后取下小桶称取重量;e. 经过  $\Delta T$  后,继续往小桶里加细沙;f. 重复步骤 4,测试过程持续到水泥浆初凝。

**2) 计算方法** 小桶的重量化为小桶的拉力:

$$F = 9.8 \times 10^{-3} G \quad (1)$$

摩擦力  $f_g$  转化为  $f_N$ :

$$f_N = 9.8 \times 10^{-3} f_g \quad (2)$$

则净拉力:

$$F' = F - f_N \quad (3)$$

刀片受力面积:

$$S = l d \quad (4)$$

则胶凝强度:

$$\tau = \frac{10^6 F'}{2S} \quad (5)$$

式中,  $F$  为小刀插入水泥浆时, 小车开始移动时刻小桶重量产生的拉力,  $N$ ;  $G$  为导致小车开始移动的小桶的重量,  $g$ ;  $f_g$  为小刀未插入水泥浆时, 小车开始移动时刻小桶的重量,  $g$ ;  $f_N$  为装置的摩擦力,  $N$ ;  $F'$  为刀片受到的净拉力,  $N$ ;  $S$  为刀片的工作面积,  $mm^2$ ;  $l$  为刀片的工作长度,  $mm$ ;  $d$  为刀片的宽度,  $mm$ ;  $\tau$  为胶凝强度,  $Pa$ 。

### 1.2 超声波无损法测不同水化期声波传播规律

#### 1.2.1 实验装置与测量原理

实验中采用的无损超声波检测系统由中国石油大学(华东)与扬州超声仪器设备厂联合开发。该检测系统是由超声仪主机、水泥浆养护釜体及计算机、打印机等组合而成的智能仪器, 可以用来测定水泥浆胶凝强度发展过程中超声波参数的变化。

声速的测量原理为:通过超声波发射装置向待测样品发射声波, 在一定的空间距离上接收按照待测样品物理特性调制的声波, 其在待测样品中的传播速度将体现在数据接收仪的屏幕上, 通过数据分析即可得到待测样品在不同时刻的声速值。

声幅衰减的测量原理为:超声波在待测样品中

的传播过程中, 能量被待测样品吸收, 随着探测距离的增大, 超声波能量逐渐衰减, 从而体现在回波信号的变化中, 通过对回波信号的分析, 即可得到待测样品在不同时刻的声幅衰减值。

#### 1.2.2 实验步骤

1) 把温度设定在需要温度;2) 启动程序;3) 确定和消除  $T_0$ ;4) 配浆, 并将水泥浆放入控温装置中;5) 调整衰减量, 获取数据和波形, 按照设定文件名保存, 直到测试任务结束;6) 打开采集到的存盘文件, 左边的列表显示每一个测点数据排序, 点击某个测点, 得到对应的测定数据, 点击数据导出, 将数据输出到 Excel, 保存;7) 测试完毕。

## 2 数据分析

为了确保两种方法所测数据的可比性, 实验中选用了相同的水泥浆配方, 并且在相同的温度压力条件下进行实验。水泥浆配方: 胜滩 G 级水泥 + 1.00% 降失水剂 FHJZ-1 + 0.25% 分散剂 SWJ-4, 水灰比 0.44; 温度 40 °C, 压力 0.1 MPa。

#### 2.1 胶凝强度随时间的变化

实验中每 10 min 测一个数据点, 利用实测数据作图得胶凝强度随时间发展的曲线, 如图 2 所示。图 2 中, 红点代表实测数据, 黑线为胶凝强度发展趋势;红色数据点均匀分布在黑线附近, 因此黑线可以代表胶凝强度的发展趋势。从图 2 中可以看出, 随着时间的延长, 胶凝强度开始时增加较缓, 之后开始快速增加。

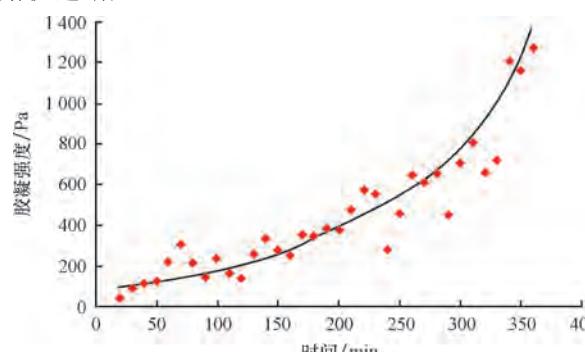


图 2 胶凝强度随时间发展的曲线

#### 2.2 超声波参数随时间的变化

实验中每 10 min 测一个数据点, 利用实测声速与声幅数据分别作图, 得图 3 和图 4。

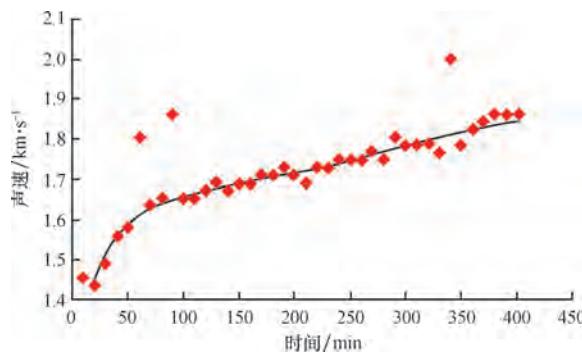


图 3 声速随候凝时间变化曲线

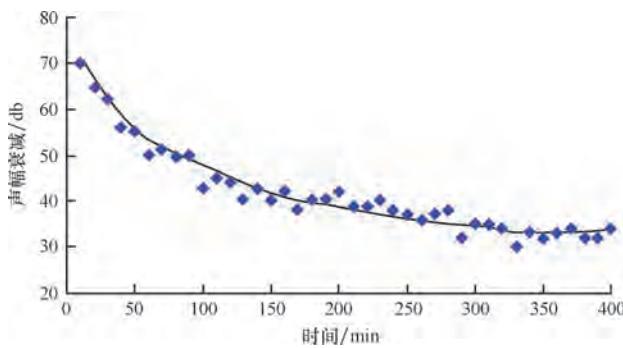


图 4 声幅随候凝时间变化曲线

图 3 中, 红点代表实测数据, 黑线代表声速发展趋势, 红色数据点均匀分布在黑线附近。从图 3 可以看出, 随着时间的延长, 声速开始时增长较快, 随后缓慢增长。图 4 中, 蓝点代表实测数据, 黑线代表发展趋势, 蓝色数据点均匀分布在黑线附近。从图 4 可以看出, 随着时间的延长, 声幅开始时降低较快, 随后缓慢降低。

### 2.3 胶凝强度对超声波参数的影响

2.1 节与 2.2 节中, 胶凝强度与超声波参数在不同时刻的实验数据, 均为相同实验条件下针对同一配方水泥浆实验所得, 因此两部分实验具有时间可比性。利用相同时间点对应胶凝强度数据和时间参数数据作图, 得胶凝强度对声波参数的影响曲线, 如图 5、图 6 所示。

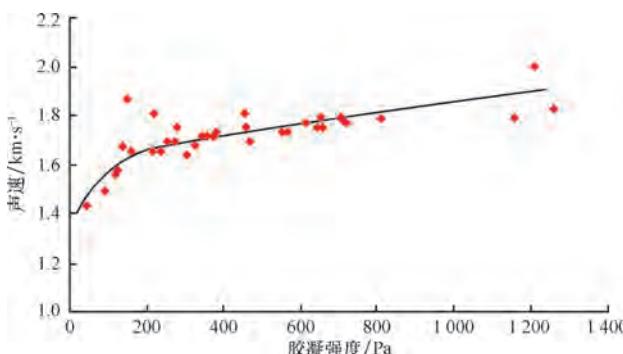


图 5 胶凝强度对声速的影响曲线

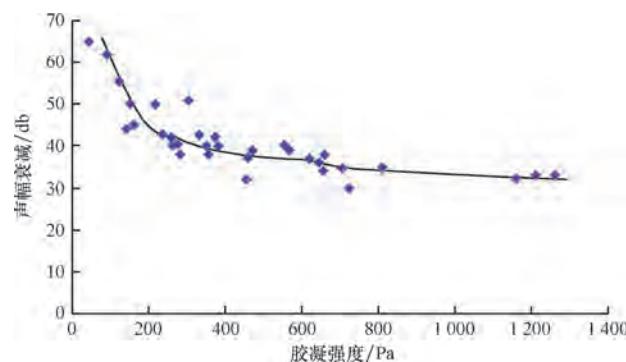


图 6 胶凝强度对声幅的影响曲线

图 5 中, 红点为实测数据, 黑线代表趋势线, 红点均匀分布在黑线附近。从图 5 可以看出, 随着胶凝强度的增大, 超声波速率先大幅增大, 而后增长速率变缓。

图 6 中, 蓝点为实测数据, 黑线代表趋势线, 蓝点均匀分布在黑线附近。从图 6 可以看出, 随着胶凝强度的增大, 超声波声幅先大幅降低, 后降低速率变缓。

## 3 胶凝强度与超声波参数关系分析

通过实验数据分析, 可以得到超声波的声速和声幅随着胶凝强度发展的变化趋势, 笔者根据数学概率与统计中的数据处理方法, 将实验所得数据进行了数学回归, 从而得到了超声波参数与胶凝强度的数学方程, 为利用超声波测定水泥浆胶凝强度的进一步研究奠定了基础。

### 3.1 非线性拟合方法及误差分析

将实验所测数据进行数据统计分析, 根据格拉布斯(Grubbs)准则进行计算, 将每组实验数据中的可疑值剔除<sup>[6-7]</sup>。然后利用最小二乘法<sup>[8]</sup>, 分别采用幂函数和指数函数的形式进行曲线拟合, 从而得到水泥浆胶凝强度与超声波声速和声幅的关系式。并采用胶凝强度平均相对误差  $\delta$  和胶凝强度相对标准差  $e_r$  进行误差分析,  $\delta$  与  $e_r$  越小, 说明回归预报的胶凝强度越精确, 反之不精确<sup>[9]</sup>。

### 3.2 水泥浆胶凝强度与超声波参数回归分析

利用回归方法和误差分析方法进行回归分析, 得水泥浆胶凝强度与超声波声速和声幅之间的关系式。计算得到的关系式与相对应的误差分析见表 2。

由表 2 可知, 无论是采用幂函数型拟合还是指数函数型拟合, 将水泥浆胶凝强度与超声波声幅

表2 水泥浆胶凝强度与声波参数回归分析结果

| 拟合的参数       | 幂函数型  |                 |                     | 指数函数型                               |                 |                     |
|-------------|---|-----------------|---------------------|-------------------------------------|-----------------|---------------------|
|             | 拟合方程  | 相对标准差 $e_r$ , % | 平均相对误差 $\delta$ , % | 拟合方程                                | 相对标准差 $e_r$ , % | 平均相对误差 $\delta$ , % |
| 胶凝强度与声速拟合   | $\tau = 1.725 \cdot 6v^{0.8692}$            | 11.301 16       | 8.990 72            | $\tau = 0.0174 e^{5.7728v}$         | 12.558 34       | 9.161 06            |
| 胶凝强度与声幅衰减拟合 | $\tau = 3.0 \times 10^8 \Delta A^{-3.6434}$ | 11.041 51       | 7.271 85            | $\tau = 10.376 e^{-0.0812\Delta A}$ | 10.221 25       | 7.063 21            |

注:  $\tau$  为水泥浆胶凝强度, Pa;  $v$  为超声波速率, km/s;  $\Delta A$  为声幅衰减, db。

衰减拟合的  $e_r$  和  $\delta$  均比其与超声波声速拟合的  $e_r$  和  $\delta$  小, 即采用超声波声幅衰减对水泥浆胶凝强度进行拟合较好。

由此可以得出, 采用声幅衰减对胶凝强度进行指数函数型拟合, 是对水泥浆胶凝强度较好的拟合方式。

## 4 结 论

1) 改进后的水泥浆胶凝强度测试装置减少了机械之间的摩擦损耗, 并结合消除摩擦方面的计算, 能够便于更精确地测定水泥浆胶凝强度的发展。

2) 在水泥浆水化过程中, 水泥浆胶凝强度开始时增加较缓, 之后快速增加; 超声波声速开始时增长较快, 随后增长变缓; 超声波声幅开始降低较快, 随后缓慢降低。

3) 对水泥浆胶凝强度较好的拟合方式是采用声幅衰减对胶凝强度进行指数函数型拟合, 其相对标准差与平均相对误差均小于 10.5%。

4) 以上结论为进一步完善无损超声波检测系统

测定水泥浆胶凝强度的方法奠定了理论和实验基础。

## 参 考 文 献

- [1] 刘崇建, 黄柏宗, 徐同台, 等. 油气井注水泥理论与应用 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2002: 316-330.
- [2] 王成文, 王瑞和, 步玉环, 等. 深水固井水泥性能及水化机理 [J]. 石油学报, 2009, 30(2): 280-284.
- [3] 丁士东, 张卫东. 国内外防气窜固井技术 [J]. 石油钻探技术, 2002, 30(5): 35-38.
- [4] 黄李荣, 贺彬. 原有水泥浆胶凝强度测量方法存在的问题 [J]. 西部探矿工程, 2005, 17(7): 66-67.
- [5] 张兴国, 王新东. 测量水泥浆胶凝强度的新方法 [J]. 西部探矿工程, 2005, 17(4): 127-128.
- [6] 杨彦, 徐晓芳. 检测数据的自动误差分析 [J]. 成都纺织高等专科学校学报, 2006, 23(3): 33-34, 37.
- [7] 陈希孺, 王松桂. 近代回归分析—原理方法及应用 [M]. 安徽合肥: 安徽教育出版社, 1987.
- [8] 同登科, 周生田, 吴爱弟, 等. 计算方法 [M]. 1 版. 山东东营: 石油大学出版社, 2002: 126-136.
- [9] 招惠玲. 误差分析与数据处理方法 [J]. 机电工程技术, 2003, 32(2): 54-56.

〔审稿 丁士东〕

## Experimental Researches on Measuring Cement Gel Strength Using Ultrasonic Wave

Jiang Linlin<sup>1</sup> Wang Ruihe<sup>2</sup> Jiang Linfu<sup>3</sup> Fan Huwei<sup>4</sup> Li Nan<sup>1</sup>

(1. College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (East China), Dongying, Shandong, 257061, China; 2. China University of Petroleum (East China), Dongying, Shandong, 257061, China; 3. Dongxin Oil Production Plant, Shenli Oilfield Branch, Sinopec, Dongying, Shandong, 257094, China; 4. Inspection & Testing Center, Shenli Oilfield Branch, Sinopec, Dongying, Shandong, 257000, China)

**Abstract:** The experimental device for measuring the gel strength of cement slurry was improved considering shortcomings of current devices. The gel strength, corresponding acoustic velocity, and the change rule of acoustic amplitude during the hydration of cement slurry were investigated by mechanical and ultrasonic measurement. The results show that, during the hydration of cement slurry, the gel strength increases slowly and then increases quickly; the acoustic velocity increases quickly and then increases slowly; the acoustic amplitude decreases quickly and then decreases slowly. The gel strength can be better fitted with the acoustic amplitude by exponential function, its relative standard deviation is 10.2%, and its average fractional error is 7.06%.

**Key words:** cement slurry; bond strength; ultrasonic wave; acoustic amplitude attenuation; mathematical analysis