

## 固井第一界面微环隙对声波传播规律的影响

步玉环<sup>1</sup>, 沈兆超<sup>1</sup>, 王银东<sup>1</sup>, 万春浩<sup>1</sup>, 毛广良<sup>2</sup>

(1. 中国石油大学(华东)石油工程学院, 山东青岛 266580; 2. 山西储备物资管理局, 山西太原 030012)

**摘 要:**为消除微环隙对固井质量评价的影响,研究微环隙对声波传播的影响规律是非常必要的。针对微环隙对声波传播的影响,分别进行了实验室试验和理论计算。试验采用简化的平板模型,用中间挖空填水的超薄塑料薄膜来模拟充水微环隙。根据试验模型的特点,由声波在多层介质平面层的透射理论得到微环隙影响声波传播的理论计算公式。试验结果表明,声波首波幅度随微环隙尺寸的增大而减小,当微环隙尺寸增大至 0.1 mm 时声波透射幅度减小 70% 左右,这会造成测井时接收到的反射波声幅的增大,可能将固井质量合格的井解释为不合格。理论计算印证了试验结果,同时也说明声波传播对充气微环隙的敏感程度高于充水微环隙。研究得出,微环隙对声波传播的影响是非常显著的,在声波测井中其影响规律可以应用于对固井质量的评价中。

**关键词:**一界面 微环隙 声波测井 固井质量 多层介质 实验室试验

**中图分类号:**TE256 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0890(2014)01-0037-04

### Effect of Microannulus on Sonic Wave Propagation at First Cementing Interface

Bu Yuhuan<sup>1</sup>, Shen Zhaochao<sup>1</sup>, Wang Yindong<sup>1</sup>, Wan Chunhao<sup>1</sup>, Mao Guangliang<sup>2</sup>

(1. School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (Huadong), Qingdao, Shandong, 266580, China; 2. Shanxi Material Reserves Administrative Bureau, Taiyuan, Shanxi, 030012, China)

**Abstract:** To eliminate the effect of microannulus on cementing quality evaluation, it is necessary to investigate the effect of microannulus on sonic wave propagation. Experimental study and theoretical analysis were used to conduct this research. Adopting a simplified plate model, the microannulus was simulated by thin plastic film filled with water. According to the characteristics of the experimental model, the calculation formula that microannulus effects sonic wave was obtained by using the theory of sonic wave transmission in multi-medium plane layer. Experimental results showed that first sonic amplitude decreases with the increase of microannulus size, when microannulus size is increased to 0.1 mm, the sonic wave amplitude will be decreased by 70%. This will lead to an increase of received amplitude in logging and cause incorrect cementing explanation and evaluation. Both theoretical calculations and experimental study showed that sensitivity of sonic wave propagation in microannulus with air is higher than that filled with water, the effect of microannulus size on sonic wave propagation is very significant, its regularity could be used to evaluate the cementing quality by sonic logging.

**Key words:** first interface; microannulus; sonic logging; cementing quality; multilayered medium; laboratory testing

环空微环隙是指在固井、生产或后续作业过程中,由于井下环空封固系统组成部分不同、各组成部分之间性质不同及温度压力等外界环境条件发生变化,在套管和水泥环界面形成的微小间隙<sup>[1-5]</sup>。固井一界面微环隙的存在严重影响了固井质量评价的准确性。通常,微环隙尺寸在一定范围内(小于 0.01 mm)时,不会发生气窜,但微环

收稿日期:2013-07-16;改回日期:2013-12-17。

作者简介:步玉环(1966—),女,山东茌平人,1988年毕业于石油大学(华东)钻井工程专业,2005年获中国石油大学(华东)油气井工程专业博士学位,教授,硕士生导师,主要从事油气井工程、油气井流体力学、完井工程方面的教学与科研工作。

联系方式:buyuhuan@163.com。

基金项目:教育部“长江学者和创新团队发展计划”之“海洋油气井钻完井理论与工程创新团队”(编号:IRT1086)资助。

隙与窜槽在声波测井曲线上的响应是相似的,因此可能会对固井质量造成误判<sup>[6-7]</sup>。据统计,美国每年有耗资3 000~4 000万美元的挤水泥作业是由错误的测井解释结果造成的<sup>[8]</sup>。因此,需要研究微环隙对声波测井的影响规律,以消除微环隙对固井质量评价的影响。目前,针对环空微环隙的研究很多,涉及微环隙尺寸计算、微环隙成因、消除微环隙对测井影响等技术方法<sup>[6]</sup>,但针对试验模拟微环隙与测井关系的研究较少。J. J. Jutten等人<sup>[9]</sup>就微环隙对注水泥后测井的影响进行了大量的试验及现场案例研究,发现声幅测井和超声波测井均对微环隙非常敏感,但两者的敏感程度有所差异;刘继生等人<sup>[10]</sup>对微环隙与声幅测井套管波幅度的关系进行了数值模拟和试验研究,但其仅模拟了微环隙宽度为0.1 mm时的套管波幅度,并没有得到随微环隙宽度变化的规律特性;L. Boukhefifa等人<sup>[11]</sup>对微环隙进行了试验模拟,但其研究主要集中于微环隙引起的气体窜流,并未涉及微环隙对声波测井的影响规律。为此,笔者进行了微环隙的模拟试验,采用声波仪器测试了不同微环隙尺寸对声波传播的影响,并结合声波透射理论模型计算了不同微环隙尺寸下的声波透射率,以探讨微环隙对声波传播的影响规律。

## 1 微环隙影响声波传播的室内试验

### 1.1 试验装置设计

1) 模拟微环隙。由于微环隙尺寸非常小,且多为液体充填,很难进行直接模拟。试验中,选用超薄塑料薄膜来控制所模拟微环隙的尺寸,将塑料薄膜选定位置中间挖空(30 mm×30 mm),挖空部分充水以模拟含水微环隙。最薄塑料薄膜的厚度为0.012 50 mm,最厚为0.875 00 mm。

2) 简化井筒模型。将井筒平面化,用水泥石试块(G级水泥,水灰比0.44,75℃温度下养护48 h,尺寸为50 mm×50 mm×50 mm)模拟水泥环,用N80材质钢板(80 mm×80 mm×10 mm)模拟套管。

3) 微环隙两端恒加载力。将声波探头(型号A101S-RM)与试件垂直放置,加载力即为探头与试件的重力之和,这样可保证两端加载力不变,避免额外施加外力增大加载力大小的控制难度,从而消除外力变化对试验结果的干扰。

4) 发射声波采用垂直入射方式,研究微环隙对垂直入射波的影响规律。

基于上述设计,形成的试验装置如图1所示。

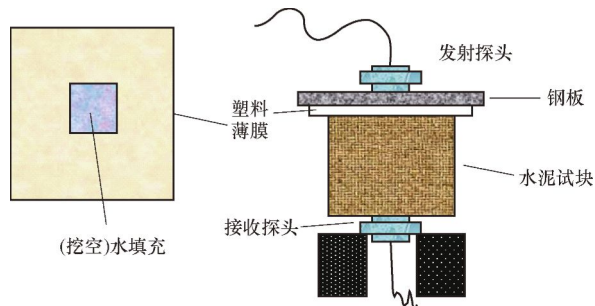


图1 设计的试验装置

Fig. 1 Design of experimental device

### 1.2 试验步骤

当采用空气填充微环隙时,由于探头界面与空气不能形成很好的声耦合,声波衰减严重,故无法进行有效测量,所以仅采用水填充进行了模拟试验。试验步骤如下:

1) 测取钢板与水泥石直接接触时的声波首播幅度,作为对比基数;

2) 选取要测尺寸的薄膜,经过恒力压实,然后在中间挖空(远大于探头尺寸),安装好试验装置,在薄膜挖空处用微针头充水,然后进行声波测试;

3) 改变微环隙的尺寸,测取不同尺寸微环隙所对应的声波透射参数。

### 1.3 试验结果及分析

取所测波形的首波幅度进行研究。为了得到微环隙对声波传播规律的影响规律,试验中不断调整微环隙尺寸,测取不同尺寸微环隙对应的声波首波幅度(结果见表1),得到微环隙尺寸对首波幅度的影响规律曲线(见图2)。

表1 不同尺寸微环隙对应的首波幅度

Table 1 Amplitude of first wave corresponding to different microannulus size

微环隙尺寸/mm	首波幅度/dB	微环隙尺寸/mm	首波幅度/dB
0	128.0	0.131 25	42.0
0.012 50	100.0	0.175 00	38.0
0.025 00	78.0	0.262 50	31.5
0.037 50	62.0	0.437 50	23.0
0.043 75	52.0	0.700 00	21.0
0.087 50	45.0	0.875 00	20.0

从图2可以看出:声波首波幅度随微环隙尺寸

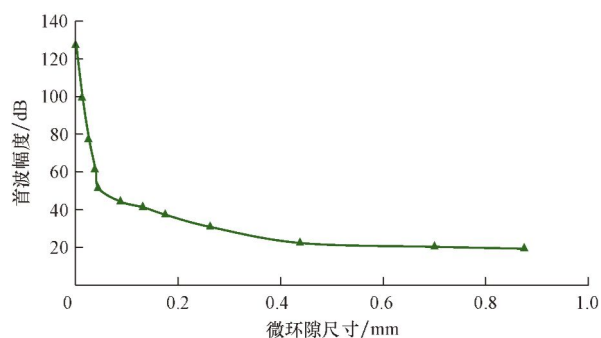


图 2 充水微环隙首波幅度与微环隙尺寸的关系

Fig. 2 Relationship of microannulus size and amplitude of first wave when micro-annulus is filled with water

的增大而减小;当微环隙尺寸增大至近 0.1 mm 时,声波幅度减小 70% 左右;微环隙尺寸大于 0.1 mm 后,首波幅度随微环隙尺寸的减小幅度逐渐变小。

## 2 微环隙影响声波传播的理论计算

在上述试验模型中,声波入射方式为垂直入射,套管-微环隙-水泥试块三者构成了三层平面平行介质,由声波在多层介质平面层的反射与透射理论可知,三层平面平行介质的声强透射系数可由下式求得<sup>[12]</sup>:

$$T_2 = \frac{4Z_1Z_3}{(Z_1 + Z_2)^2 \cos^2 kd + \left[ Z_2 + \frac{Z_1Z_3}{Z_2} \right]^2 \sin^2 kd} \quad (1)$$

式中:  $T_2$  为多层介质的声强透射系数;  $Z_1, Z_2, Z_3$  分别为套管、微环隙和水泥环的声阻抗,  $Z_i = \rho_i c_i$  ( $i=1, 2, 3$ ),  $N \cdot s/m^3$ ;  $\rho_1, \rho_2, \rho_3$  分别为套管、微环隙和水泥环的密度,  $kg/m^3$ ;  $c_1, c_2, c_3$  分别为套管、微环隙和水泥环的介质声速,  $m/s$ ;  $k$  为中间层的波数;  $k = \frac{\omega}{c_2}$ ;  $\omega$  为声波频率,  $Hz$ ;  $d$  为微环隙的尺寸,  $m$ 。

一般水泥声测井超声换能器的工作频率设定在套管共振频率(取决于套管壁厚)附近,为 200~700 kHz,故试验选取的声波频率为 500 kHz。将各介质参数(见表 2)及入射波频率代入式(1),调整微

表 2 不同介质的声波传播速度和密度

Table 2 Acoustic velocity and density of different media

介质	纵波速度/( $m \cdot s^{-1}$ )	密度/( $kg \cdot m^{-3}$ )
套管	5 450	7 850
空气	630	0.140
淡水	1 480	1 000
水泥石	3 000	1 800

环隙的尺寸  $d$ , 就可以计算得到对应充填水和空气时不同微环隙尺寸的声强透射系数,将不同微环隙尺寸的声强透射系数除以微环隙尺寸为 0 时声强透射系数,就得不同微环隙尺寸的相对透射率,结果见图 3。

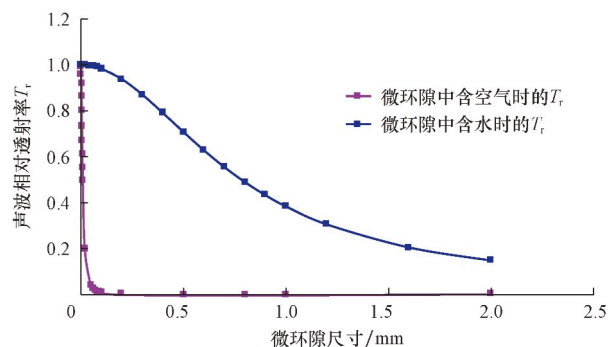


图 3 微环隙中充填水和空气时相对透射率与微环隙尺寸之间的关系

Fig. 3 Relationship between microannulus size and relative transmittance when microannulus is filled with water and air

从图 3 可以看出:不论微环隙中充填水还是充空气,声波相对透射率都随着微环隙尺寸的增大而不断降低;在相同微环隙尺寸条件下,微环隙内充填的物质不同,对声波相对透射率的影响也不同。空气对首波幅度的影响远大于水对首波幅度的影响,即声波传播对于空气的敏感性要大于水。

## 3 试验结果与计算结果的比较

由于试验得到的是声波传播的首波幅度,而理论计算得到的是声波的声强透射系数,要进行对比需先对试验结果进行换算。由于声波能量大小与声幅成正比,先将声幅平方,再与微环隙尺寸为 0 时的声幅平方进行对比,可得到试验得出的声波相对透射率:

$$T = \frac{E}{E_0} = \frac{A^2}{A_0^2} \quad (2)$$

式中:  $T$  为声波相对透射率;  $E$  为声波能量,  $W$ ;  $E_0$  为微环隙尺寸为 0 时的对比声波透射能量,  $W$ ;  $A$  为声波幅度值,  $dB$ ;  $A_0$  为微环隙尺寸为 0 时的对比声波幅度值,  $dB$ 。

将试验测得的声波幅度转化为相对透射率,得到试验相对透射率与微环隙宽度的关系曲线,再将试验结果与理论计算结果进行对比,对比情况如图 4 所示。

由图 4 可知,微环隙对声波传播的影响非常显著,试验与理论计算得出的规律基本一致。微环隙

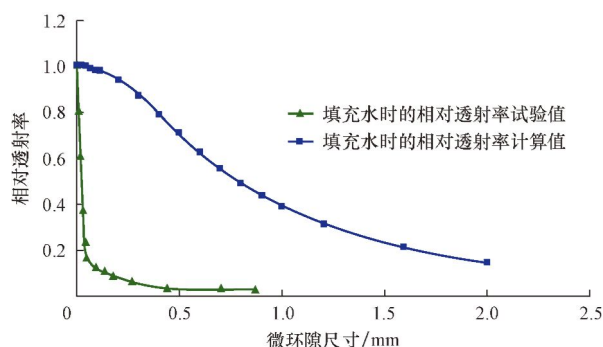


图4 理论计算和试验结果的关系曲线对比

Fig. 4 Comparison of an experimental result and calculation value

对于声波测井解释同样会产生非常大的影响,甚至可造成测井解释错误。微环隙含水时的计算结果与试验结果存在较大差距,理论计算结果的敏感性更强。分析认为,误差可能主要来自两方面:其一,试验中水泥石试件界面存在一定粗糙度,而理论计算的界面是绝对平滑的;其二,试验过程中系统及人为误差远大于理论计算误差。

## 4 结 论

1) 采用平面模型简化井筒模型,用超薄塑料膜控制微环隙宽度,通过将薄膜中间挖空充水来模拟充水微环隙,实现了对微环隙的试验模拟。

2) 试验模拟充水微环隙对声波首波幅度的影响明显,随着微环隙尺寸的增大声波首波幅度不断减小,当微环隙尺寸增大至 0.1 mm 时,声波幅度减小 70% 左右,而微环隙尺寸大于 0.1 mm 后,首波幅度随微环隙尺寸的减小幅度逐渐变小。

3) 理论模拟计算结果表明,声波传播对微环隙非常敏感,随着微环隙尺寸的增大,声波透射率迅速降低,且声波传播对充气微环隙的敏感程度明显高于充水微环隙。

4) 比较模拟试验和理论计算结果发现,声波垂直入射时,两种情况下声波透射能量随微环隙尺寸的变化规律基本一致。但理论计算结果与试验结果仍存在较大差距,分析认为,可能由试验中微环隙界面的粗糙度及试验中系统和人为误差所致。

## 参 考 文 献

### References

[1] 郭辛阳,沈忠厚,步玉环,等. 固井微环空成因研究进展及解决方法[J]. 钻采工艺,2009,32(5):1-3.  
Guo Xinyang, Shen Zhonghou, Bu Yuhuan, et al. Research develop-

ment of cementing microannular and its solving methods[J]. Drilling & Production Technology, 2009, 32(5): 1-3.

[2] 高伟勤,曲天虹,刘有全,等. 用声波变密度测井识别微环的影响[J]. 河南石油,2004,18(增刊1):71-72.  
Gao Weiqin, Qu Tianhong, Liu Youquan, et al. To recognize the Influence of micro-annuli with acoustic variable density logging[J]. Henan Petroleum, 2004, 18(supplement 1): 71-72.

[3] 宋杰,赵庆东,廖艳,等. 浅谈水泥胶结测井中的“微环”现象[J]. 国外测井技术,2003,18(2):29-30.  
Song Jie, Zhao Qingdong, Liao Yan, et al. Discussion on the phenomenon of “micro-annulus” in cement bond logging[J]. Foreign Logging Technology, 2003, 18(2): 29-30.

[4] 池英柳,陈宪侃. 雁翎油田注入氮气沿微环隙窜流的可能性分析[J]. 石油大学学报:自然科学版,1994,18(1):10-16.  
Chi Yingliu, Chen Xiankan. Possibility of injected nitrogen channeling through micro-annulus in Yanling Oilfield[J]. Journal of the University of Petroleum, China: Edition of Natural Science, 1994, 18(1): 10-16.

[5] 杨燕,杨远光,卢家亭,等. 工作液密度降低对水泥环界面胶结的影响[J]. 石油学报,2010,31(2):333-337.  
Yang Yan, Yang Yuanguang, Lu Jiating, et al. Effect of density reduction of operating fluid in casing on interface cementation of cement sheath[J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31(2): 333-337.

[6] 解宇宁,周晓宇. 微环隙对声幅测井影响的定量计算及校正[J]. 石油钻探技术,2013,41(1):45-50.  
Xie Yuning, Zhou Xiaoyu. Quantitative calculation and correction of the influence of microannulus on acoustic amplitude log [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2013, 41(1): 45-50.

[7] 杨振杰,李家芬,苏长明. 钻井工程固井胶结界面研究现状[J]. 石油钻探技术,2005,33(6):1-5.  
Yang Zhenjie, Li Jiafen, Su Changming. The status quo of researches on bonding interface of well cementing[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2005, 33(6): 1-5.

[8] Frisch G, Graham L, Griffith J. A novel and economical processing technique using conventional bond logs and ultrasonic tools for enhanced cement evaluation; SPWLA 41 Annual Logging Symposium, June 4-7, 2000[C].

[9] Jutten J J, Hayman A J. Micro-annulus effect on cementation logs; experiments and case histories[R]. SPE 25377, 1993.

[10] 刘继生,王克协,谢荣华,等. 套管-水泥界面微间隙的检测方法及应用[J]. 测井技术,2002,26(5):399-401,413.  
Liu Jisheng, Wang Kexie, Xie Ronghua, et al. Identification method and application examples of the annulus between casing and cement sheath[J]. Well Logging Technology, 2002, 26(5): 399-401, 413.

[11] Boukhelifa L, Moroni N, James S G, et al. Evaluation of cement systems for oil and gas well zonal isolation in a full-scale annular geometry[J]. SPE Drilling & Completion, 2005, 20(1):44-53.

[12] 段方勇,黄载禄,蔡德钧,等. 层状介质中声波传播的一维数学模型[J]. 华中理工大学学报,1993,21(6):48-51.  
Duan Fangyong, Huang Zailu, Cai Dejun, et al. A one-dimensional mathematical model of acoustic wave propagation in layered media[J]. Journal Huazhong(Central China) University of Science and Technology, 1993, 21(6): 48-51.