

低密度水泥固井质量评价方法的改进

罗勇¹ 宋文字² 步玉环² 王美洁²

1. 中海石油(中国)有限公司上海分公司 2. 中国石油大学(华东)石油工程学院

罗勇等. 低密度水泥固井质量评价方法的改进. 天然气工业, 2012, 32(10): 59-62.

摘要 为了防止低压易漏地层发生固井液漏失并有效保护油气层, 固井过程中经常采用低密度水泥浆体系。由于低密度水泥浆体系中密度减轻剂的使用, 其水泥环的声阻抗值较之常规密度水泥环的声阻抗存在差异, 若采用常规密度水泥的固井质量评价标准来评价低密度水泥浆体系的固井质量, 则其真实可靠性存在问题。为此, 进行了 3 种常用低密度水泥浆体系的水泥石抗压强度与声阻抗实验, 分别测定了水泥石养护时间 24 h 和 48 h 的抗压强度和声阻抗值。结果表明, 不同类型不同密度的低密度水泥石 24 h 和 48 h 条件下的抗压强度与声阻抗具有良好的线性关系, 由此得出了考虑第一界面胶结良好时, 基于抗压强度的低密度水泥浆体系套管波声幅值计算公式, 进而提出了基于低密度水泥石抗压强度的低密度固井质量评价的改进方法, 为全面改进低密度水泥浆体系固井质量评价标准奠定了基础。

关键词 抗压强度 声阻抗 低密度 固井质量评价 评价标准 第一界面

DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2012.10.014

用低密度水泥固井时, 由于套管与水泥环声耦合要比常规密度水泥差^[1], 这就造成采用常规水泥浆体系固井质量评价标准进行其固井质量的结果会有所偏差, 甚至导致错误的评价结果。现场的实际应用也证明了低密度水泥固井时声波水泥胶结测井解释结果有时与实际固井质量存在不一致的问题^[2]。

楚泽涵等在只增大水灰比来减轻水泥石密度的实验研究中, 提出了油井水泥抗压强度与声阻抗之间有非线性关系^[3], 而在固井的现场作业过程中都是通过添加减轻剂和调整水灰比来同时达到减轻水泥浆密度的目的, 因此其实验存在一定误差。章成广等提出采用校正图版和校正公式来改进低密度固井质量评价^[4], 但是由于减轻剂的不同, 每种类型的低密度水泥石的声学特性不完全相同, 用此方法来评价低密度固井质量并不完全适用于所有类型低密度水泥浆。

笔者拟通过实验对比几种常规低密度水泥浆的水泥石声阻抗与抗压强度关系, 提出基于此关系的低密度固井质量评价的一种改进方法。

1 实验配方及操作流程

1.1 实验配方

实验主要是针对于现场常用的漂珠微硅复合低密

度水泥浆体系、粉煤灰低密度水泥体系和微硅低密度水泥浆体系进行实验研究。实验中采用的低密度水泥浆体系的配方如表 1~3 所示。

表 1 漂珠微硅复合低密度水泥浆配方表^[5]

$m_{\text{漂珠}} : m_{\text{水泥}}$	$m_{\text{微硅}} : m_{\text{水泥}}$	水灰比	密度/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$
0 : 100	0 : 100	0.440	1.900
2 : 100	1 : 100	0.535	1.746
6 : 100	2 : 100	0.587	1.68
10 : 100	5 : 100	0.633	1.571
30 : 100	5 : 100	0.845	1.321
40 : 100	5 : 100	0.930	1.245
50 : 100	5 : 100	1.015	1.197
70 : 100	5 : 100	1.185	1.175
90 : 100	5 : 100	1.355	1.091

1.2 实验流程

1) 将每种类型低密度水泥浆配备两组, 倒入模具中, 放入 75 °C 常压养护釜内养护, 一组养护 24 h, 一组养护 48 h。

2) 称取并记录得到的水泥石的质量, 然后利用排水法求出水泥石的体积, 进而求出水泥石的密度 ρ_c 。

表 2 粉煤灰低密度水泥浆配方表^[6]

$m_{\text{粉煤灰}} : m_{\text{水泥}}$	水灰比	密度 / $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$
0 : 100	0.440	1.900
30 : 100	0.665	1.740
60 : 100	0.890	1.650
90 : 100	1.065	1.630
120 : 100	1.240	1.608
150 : 100	1.510	1.570
200 : 100	2.000	1.520

表 3 微硅低密度水泥浆配方表^[7]

$m_{\text{微硅}} : m_{\text{水泥}}$	水灰比	密度 / $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$
0 : 100	0.44	1.900
10 : 100	0.80	1.622
20 : 100	1.10	1.528
30 : 100	1.40	1.455
40 : 100	1.70	1.401
50 : 100	2.00	1.372
60 : 100	2.50	1.320

3)利用 HF-G 型智能超声波综合测试仪(中国扬州)测出水泥石的纵波声速(v),根据 $Z = \rho v$, 求出水泥石的声阻抗(Z)。

4)利用 NYL-300 型压力试验机(无锡建筑材料仪器机械厂)测出水泥石的抗压强度。

2 不同体系配方下水泥石抗压强度与声阻抗关系

2.1 各种配方条件下各自抗压强度和声阻抗的关系

对 3 种配方的抗压强度和声阻抗进行分析,得出如图 1~3 的关系曲线。

由图 1~3 可以看出:

1)3 种低密度水泥浆体系的水泥石的声阻抗均与

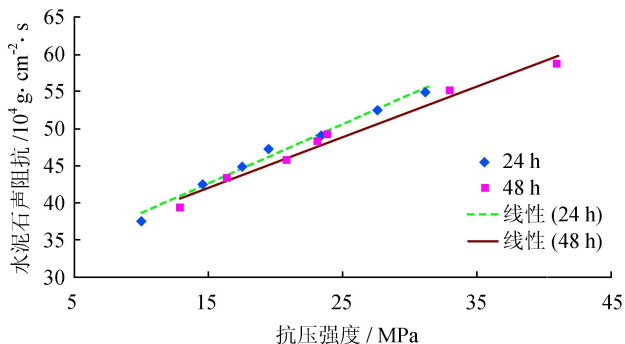


图 2 粉煤灰低密度水泥浆声阻抗与抗压强度关系图

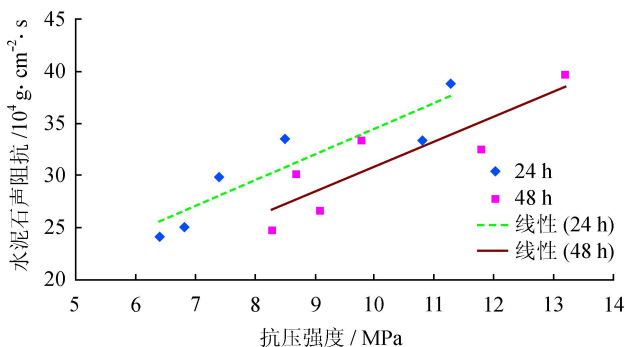


图 3 微硅低密度水泥浆声阻抗与抗压强度关系图

抗压强度呈良好的线性关系,且声阻抗随着抗压强度的增大而增大。

2)随着养护时间的增加,水泥石 48 h 的抗压强度和声阻抗均大于 24 h 的抗压强度和声阻抗,但是曲线斜率略有降低。

2.2 3 种低密度水泥浆体系抗压强度和声阻抗关系的综合分析

尽管图 1~3 都显示出各自体系条件下水泥石抗压强度与声阻抗的良好线性关系,为此需要考察其关系是否可以推广至所有常用低密度水泥浆体系。将 3 种低密度水泥浆体系的抗压强度与声阻抗对应值放入同一幅图中(图 4)进行观察比较。

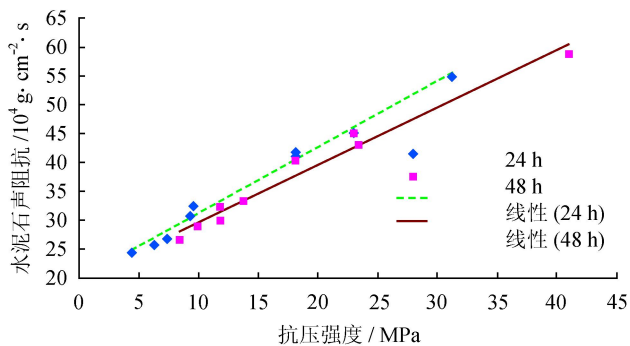


图 1 漂珠微硅复合低密度水泥浆声阻抗与抗压强度关系图

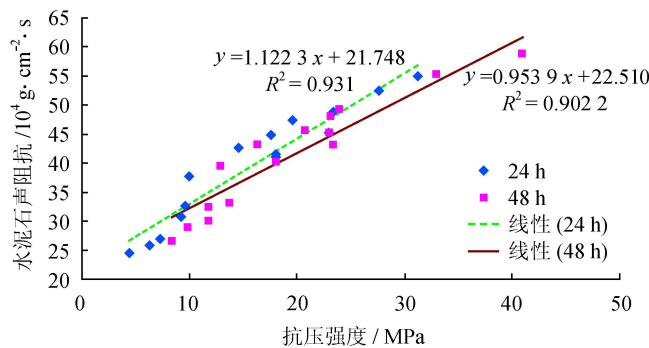


图 4 3 种低密度水泥浆声阻抗与抗压强度关系图

由图4可以看出,将3种低密度水泥石放在一起比较发现,声阻抗与水泥石抗压强度仍然有良好的线性关系。对24h和48h的3种低密度水泥石抗压强度和声阻抗曲线进行拟合,得到如下关系式:

$$24\text{ h 条件下 } Z = 1.122\ 3G + 21.748 \quad (1)$$

$$48\text{ h 条件下 } Z = 0.953\ 9G + 21.510 \quad (2)$$

式中 Z 为水泥石声阻抗, $10^4\text{ g/cm}^2 \cdot \text{s}$; G 为水泥石抗压强度, MPa 。

因此,按照式(1)、(2)可根据测井曲线求出水泥石声阻抗值,进而估算出井内水泥石抗压强度,作为评价固井质量的指标之一。同时也可以根据实验室模拟井下条件或者根据经验方法,测得水泥石抗压强度,然后根据式(1)、(2)求出水泥石声阻抗,进而根据井下声波传播规律,得到低密度固井质量评价改进方法。

3 低密度水泥固井质量评价改进方法

3.1 理论分析

套管波用来评价固井第一界面胶结质量,套管波的声强(或幅度)大小与水泥胶结好坏有关^[8],当不考虑水泥环对声波的吸收衰减时,接收到的套管波声强(J)为:

$$J = J_0 \alpha_2 \beta_3 \alpha_1 = J_0 \alpha_2^2 \beta_3 \quad (3)$$

式中 α_2 为折射系数, β_3 为反射系数。 α_2 与钻井液声阻抗值 Z_1 和套管声阻抗值 Z_2 有关, β_3 与套管声阻抗值 Z_2 和水泥声阻抗值 Z_3 有关。

分析低密度水泥浆与常规密度水泥浆固井质量评价标准时,假设钻井液和套管为固定材料且套管为固定型号,固井质量胶结好,则 Z_1 、 Z_2 为一定值,那么 α_2 也为一定值。那么套管波声强 J 只与反射系数 β_3 有关,即只与水泥环声阻抗值 Z_3 有关。再根据声强与幅度的关系^[9],得到如下的声幅值表达式:

$$A = m / (Z_3 + n) - c \quad (4)$$

式中 $m = 2cZ_2$, 常数; $n = Z_2$, 常数; c 为常数。

则由式(4)可看出,当把其他条件看作定值,只考虑水泥石声阻抗时,套管波首波幅度是关于水泥环声阻抗值 Z_3 的函数,且随着 Z_3 的增大,声幅值 A 减小。而低密度水泥石的声阻抗值要小于常规密度水泥石的声阻抗,故用低密度水泥固井时得到的套管波幅度要大于用常规密度固井时的套管波幅度,如果仍用常规密度水泥固井时的评价标准去评价低密度固井质量时,会出现偏差,因此需要对固井质量评价方法进行修正。由式(4)可以知道,只要知道水泥环声阻抗 Z_3 , 就

可以知道固井质量胶结好时的理论声幅值。

3.2 基于低密度水泥石抗压强度的套管波幅度计算方法

由于现场评价固井质量时采用的测井时间为24h,在此采用式(1)来求取水环声阻抗值及完全胶结套管波理论幅度值。

将式(1)代入式(4)中就可得到第一界面胶结质量好时,理论接收到的套管波幅度与水泥石抗压强度的关系的计算式:

$$A = \frac{m}{1.122\ 3G + 21.748 + n} - c \quad (5)$$

式中 m 、 n 、 c 均为定值。

因此,套管波幅度只与低密度水泥石抗压强度有关。在测井时,如果通过室内实验知道水泥石的抗压强度,就可以计算出第一界面胶结良好时理论接收到的套管波幅度值。

3.3 固井质量评价方法改进

声幅测井一般采用声波相对幅度法和水泥胶结指数法来判定固井质量,本文针对声波相对幅度法提出改进措施。

声波相对幅度法:

$$A_r = A / A_0 \times 100\% \quad (6)$$

式中 A_r 为相对幅度,%; A 为目的井段套管波首波幅度值, mV ; A_0 为自由套管井段的套管波首波幅度值, mV 。

其常规评价标准为^[10]: $A_r \leq 10\%$ 为水泥胶结良好, $10\% < A_r \leq 30\%$ 为水泥胶结中等, $A_r > 30\%$ 时为水泥胶结差(此标准仅供参考,具体标准根据各油田实际情况而定)。

以 A_{n1} 和 A_{n2} 分别表示低密度水泥石和常规密度水泥石第一界面胶结良好时的理论相对幅值,由式(5)、(6)可以分别计算得出。由于低密度水泥石的声阻抗值要小于常规密度水泥石,声耦合差,造成其声幅值要更高,故 A_{n1} 大于 A_{n2} 。定义基于水泥石抗压强度的低密度声波幅度增大系数为 l , 即

$$l = \frac{A_{n1}}{A_{n2}} \quad (7)$$

由此,可以通过求得 l ($l > 1$) 来改进低密度固井质量评价标准。假定低密度水泥浆体系固井后测得的实际相对幅值为 A_r , 其评价标准就改变为: $A_r \leq 10\% \times l$ 为水泥胶结良好, $10\% \times l < A_r \leq 30\% \times l$ 为水泥胶结中等, $A_r > 30\% \times l$ 时为水泥胶结差。

4 结论

通过理论分析、实验研究得出以下主要结论:

1)对于漂珠微硅复合低密度水泥、微硅低密度水泥和粉煤灰低密度水泥等低密度水泥浆体系来说,水泥石抗压强度与声阻抗值有良好的线性关系。

2)运用几何声学理论分析及实验得到的规律,考虑第一界面胶结良好时,测井接收到的套管波幅度大小取决于水泥环的声阻抗值大小,得出了本实验条件下基于抗压强度的低密度水泥浆体系套管波声幅值计算公式。

3)提出了基于水泥石的抗压强度的低密度水泥浆体系第一界面固井质量评价标准的改进措施,为全面改进低密度水泥浆体系固井质量评价标准奠定了基础。

参 考 文 献

[1] 田鑫,章成广,李维彦.低密度水泥对 CBL/VDL 评价固井质量影响[J].内蒙古石油化工,2005,15(6):113-114.
[2] 李早元,郑友志,郭小阳,等.水泥浆性能对声波水泥胶结

测井结果的影响[J].天然气工业,2008,28(7):60-62.

- [3] 楚泽涵,帅健,白鹏飞,等.油井水泥抗压强度与声阻抗关系的实验研究[J].石油大学学报:自然科学版,1991,13(6):1-6.
[4] 江万哲,章成广,陈义群.低密度水泥固井对套管波幅度的影响及其校正方法[J].石油天然气学报:江汉石油学院学报,2008,30(5):77-80.
[5] 周仕明.微硅漂珠复合低密度水泥体系的探讨[J].钻井液与完井液,1999,16(6):27-29.
[6] 张鹏伟,李元,邹玉兰,等.粉煤灰低密度水泥浆体系的研究与应用[J].河南石油,1998,12(5):28-31.
[7] 刘德平,钟策,王群,等.微硅低密度水泥固井技术研究[J].天然气工业,2001,21(6):65-66.
[8] 章成广,江万哲,潘和平.声波测井原理与应用[M].北京:石油工业出版社,2009.
[9] 张海澜.理论声学[M].北京:高等教育出版社,2007.
[10] 王玺,谢荣院.空心微珠低密度水泥浆固井质量评价方法探讨[J].石油钻探技术,1994,24(1):56-57.

(修改回稿日期 2012-07-11 编辑 凌 忠)