

高温高压水泥浆体积稳定性测定仪的研制

彭园¹, 姚晓¹, 郭盈盈², 黄磊¹, 何玉鑫¹

(1. 南京工业大学材料科学与工程学院, 江苏南京 210009; 2. 长江大学石油工程学院, 湖北荆州 434023)

摘要:针对常用测试方法不能真实模拟井下高温高压受限环境、室内测试结果失真的问题,研制了高温高压水泥浆体积稳定性测定仪。该仪器能模拟井下高温高压条件,可连续测量水泥浆在塑性状态和硬化状态下的膨胀率,数据采集管理软件可记录整个试验过程,并能生成温度、压力、水泥浆高度增量随时间的变化曲线。该仪器有两套测试筒,可进行对比试验。与螺旋测微仪、量筒进行了对比试验,结果表明:对于晶体类膨胀剂,高温高压水泥浆体积稳定性测定仪的测量结果比螺旋测微仪小,数据更真实;对于常规仪器无法评价的发气类膨胀剂,该仪器也能客观评价。试验表明,高温高压水泥浆体积稳定性测定仪可用于评价固井水泥浆的体积稳定性、优选油井水泥膨胀剂和进行水泥浆配方设计,但数据采集管理软件界面不够简洁,需进一步优化。

关键词: 高温 高压 测量仪器 水泥浆 体积稳定性

中图分类号: TE256⁺.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-0890(2012)04-0115-04

Development of Measuring Instrument for Evaluating Volume Stability of HTHP Cement Slurry

Peng Yuan¹, Yao Xiao¹, Guo Yingying², Huang Lei¹, He Yuxin¹

(1. College of Materials Science and Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing, Jiangsu, 210009, China; 2. Petroleum Engineering College, Yangtze University, Jingzhou, Hubei, 434023, China)

Abstract: Aiming to resolve the problem that the down-hole environments (HTHP and restrained) cannot be simulated by the popularly used methods, and the measurements of laboratory experiment are impractical, a testing device, named measuring instrument for evaluating volume stability of HTHP cement slurry, was developed. The instrument can simulate the down-hole environment and measure the expansion rate of cement slurry continuously when it is in plastic state and hardening state. The process of experiment is recorded and the curves of temperature-time, pressure-time and height increment-time are drawn by data acquisition and management software. There are two measuring sensors which can complete a comparison test and the results are compared with the test detected by spiral micrometer and measuring cylinder. It was shown that data derived from this device was smaller and more reliable than spiral micrometer used to detect the cement slurry with crystalloid expanding agent. Volume stability of the cement slurry with gas former, which can not be evaluated by normal methods, can also be appraised by this instrument. The experiment showed that the device could be used for evaluating volume stability, oil cement additive optimization and formulation designing. However, the graphical interface of data acquisition and management software should be simplified because it was not concise.

Key words: high temperature; high pressure; measuring instrument; cement slurry; volume stability

膨胀剂作为油井水泥重要外加剂之一,能有效弥补水泥浆硬化产生的体积收缩,防止地层流体窜流,提高固井质量^[1-2]。受油井水泥使用环境(高温、高压、三维受限)的限制,常规仪器很难客观评价水泥浆的胀缩特性,国际上尚无标准评价方法。目前常用的测试方法有螺旋测微仪法^[3]和应变计法^[4]:

收稿日期:2011-12-06;改回日期:2012-06-14。

作者简介:彭园(1987—),男,湖北孝感人,2009年毕业于武汉工程大学材料科学与工程学院,在读硕士研究生。

联系方式:(025)83587253, pengydyx@163.com。

通讯作者:姚晓, htm@njut.edu.cn。

基金项目:国家高技术研究发展计划(“863”计划)“油井固井用水泥基多功能复合材料研究”(编号:2003AA327120)资助。

螺旋测微仪法仅能测量硬化体的膨胀,不能测量塑性体的膨胀和硬化体的早期膨胀,测量结果差异较大;应变计法仅能测量塑性体的膨胀,且应变计不能重复使用,测试费用高。以上2种方法均是在常压条件下进行测量,而在高温高压环境下,水泥浆各矿物组分水化速率加快,水泥浆凝结时间缩短,其他性能也有很大变化^[5]。对于发气类膨胀水泥浆,压力更是影响膨胀效果的重要因素^[6]。在相同温度压力条件下,自由状态和受限状态水泥浆的胀缩性也有很大差别。因此,模拟井下高温高压受限环境,是准确评价水泥浆胀缩特性的前提。针对以上问题,Chandler公司研制了水泥收缩/膨胀仪,国内也开发了水泥膨胀模拟试验装置^[7]。这2种仪器能一定程度上模拟井下环境,连续测量塑性体和硬化体的膨胀,但二者均为单筒设计,试验对比性较差。水泥/收缩膨胀仪测量结果失真,与之配套的仪器价格高。水泥膨胀模拟试验装置仅能模拟10 MPa压力环境,测试精度低(0.01 mL)。为此,笔者研制了高温高压水泥浆体积稳定性测定仪,可以连续测量模拟井下环境条件下的水泥浆塑性体和硬化体的体积变化,真实反映水泥浆在井下的胀缩情况。

1 高温高压水泥浆体积稳定性测定仪

1.1 结构及测量原理

高温高压水泥浆体积稳定性测定仪由高温高压小型测长装置^[8]、测试筒、“工”形盖、电加热装置、加压装置、增压泵、温度传感器、压力传感器、水杯、二次仪表、通讯转换器和装有数据采集管理软件的计算机组成(见图1)。

测量过程中,“工”形盖埋入浆体内,水泥浆体积变化带动“工”形盖移动,高温高压小型测长装置测量出“工”形盖的位移变化量。位移、温度和压力传感器将信号传递给计算机,数据采集管理软件自动生成温度、压力、位移随时间的变化曲线。

1.2 特点及主要参数

1.2.1 特点

1) 高温高压小型测长装置测量精度为0.000 5 mm,传感器与测试筒内高温高压环境隔离,解决了电子元器件受温度、压力影响而产生的“温漂”。

2) 高温高压小型测长装置与水泥浆由“工”形盖连接,上盖下表面紧贴水泥浆面,下盖埋入水泥浆

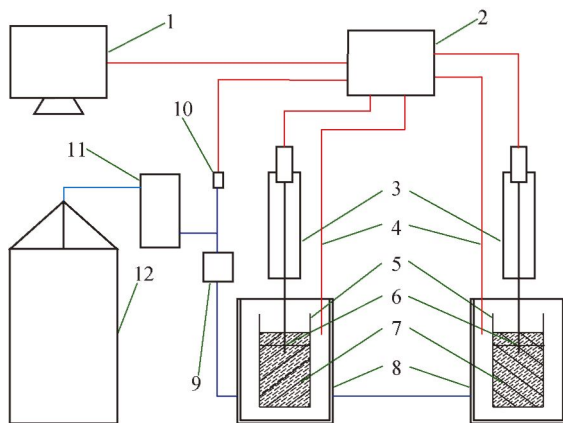


图1 高温高压水泥浆体积稳定性测定仪结构

Fig.1 Structure of measuring instrument of evaluating volume stability for HTHP cement slurry

1. 计算机;2. 通讯转换器;3. 高温高压小型测长装置;4. 温度传感器;5. 测试筒;6. “工”形盖;7. 水泥浆;8. 电加热装置;9. 水杯;10. 压力传感器;11. 增压泵;12. 加压装置

内,无论水泥浆处于在流体状态、塑性状态还是硬化状态,只要体积发生变化,“工”形盖能随之上下移动,解决了其他方法不能连续准确测量塑性体膨胀和硬化体膨胀的难题。

3) 增压装置提供的压力由增压泵放大10倍,增压装置加压2.1 MPa,测试筒内压力就可以达到21 MPa;加压介质为水,由高压气瓶或泵泵送,提供水养护条件。

1.2.2 主要参数

浆杯容积200 mL;工作温度10~43℃;输入电压220 V;实测精度0.001 mm;测量位移—5~20 mm;测量温度20~180℃;测量压力0~25 MPa;测量时间10 min~180 d。

2 验证性试验

为验证仪器测量效果,使用量筒、螺旋测微仪和高温高压水泥浆体积稳定性测定仪分别测量不同配方水泥浆的体积稳定性。试验原料为晶体膨胀剂(KW)、硫铝酸钙熟料(CAS,钙矾石型膨胀剂)、发气剂(AP)、G级高抗硫油井水泥(YN)和减阻剂(USZ)。外加剂采用外掺法,加量为与水泥质量的比,水灰比为0.44,水泥浆按照API标准^[9]配制。

发气剂体积膨胀率采用量筒法和高温高压水泥浆体积稳定性测试仪(以下简称测定仪法)测量。晶体膨胀剂采用螺旋测微仪法和测定仪法测量。塑性体膨胀率为初凝至终凝间浆体的膨胀率(初终凝测

量方法见文献[10])

3 结果与讨论

3.1 加发气剂水泥浆的胀缩性试验

采用量筒法在 80 ℃常压下对加 0.5%AP 水泥浆的体积膨胀率进行测量,并采用测定仪法在 80 ℃不同压力下对加 0.5%AP 水泥浆的体积膨胀率进行测量,结果见表 1。

由表 1 可看出,在 80 ℃常压条件下,量筒法测得的加 0.5%AP 水泥浆 2 h 的体积膨胀率高达 32%,而测定仪测得的水泥浆的体积膨胀率为 12.634%,其原因是测定仪测量水泥浆体积膨胀时,测试筒内水泥浆体积膨胀时需克服“工”形盖重力及“工”形盖与测试筒间的阻力,故体积膨胀率降低。从表 1 还可看出:当养护压力为 7.0 MPa 时,水泥

浆 2 h 的膨胀率相对常压降低了 99.99%,在 48 h 内水泥浆的膨胀率随时间的延长略有增大;当养护压力增至 21.0 MPa 时,水泥浆 48 h 的膨胀率接近为零,表明高压条件下发气型膨胀水泥浆几乎不膨胀。

表 1 加 0.5%AP 水泥浆不同条件下的膨胀率测试结果
Table 1 Expansion rate of cement slurry with 0.5% AP under different conditions

编号	压力/MPa	测试方法	体积膨胀率,%		
			2 h	24 h	48 h
1	0.1	量筒法	32.000		
2	0.1	测定仪法	12.634	12.636	12.633
3	7.0	测定仪法	0.004	0.006	0.007
4	21.0	测定仪法	0.003	0.003	0.001

3.2 加晶体膨胀剂水泥浆的胀缩性试验

采用螺旋测微仪法和测定仪法在不同温度下对不同配方水泥浆的膨胀率进行测量,结果见表 2。

表 2 测定仪法和螺旋测微仪法测试结果对比
Table 2 Comparison test of the instrument and spiral micrometer

配方	初凝/min	终凝/min	温度/℃	测试方法	塑性体膨胀率,%	线膨胀率,%	
						24 h	48 h
1	72	98	80	测定仪法	-0.002	-0.018	-0.027
				螺旋测微仪法		-0.013	-0.020
2	65	82	80	测定仪法	0	0.009	0.013
				螺旋测微仪法		0.013	0.017
3	67	93	50	测定仪法	0.002	0.016	0.021
				螺旋测微仪法		0.020	0.030

注:配方 1 为 G 级高抗硫油井水泥+44%水;配方 2 为配方 1+3%晶体膨胀剂;配方 3 为配方 1+5%硫铝酸钙熟料。下同。

由表 2 可看出,螺旋测微仪法和测定仪法都能测量硬化状态下水泥浆的膨胀率,但螺旋测微仪法无法测量塑性状态下水泥浆的膨胀率。

3.3 不同配方水泥浆测定仪法测量结果

为了研究不同配方水泥浆膨胀率的变化过程,采用测定仪法测量了加 3%KW 水泥浆和水泥净浆在 80 ℃×14.0 MPa 条件下养护 24 h 的膨胀率,结果见图 2。

由图 2 可知:水泥净浆在水化早期体积收缩较少,14 h 后收缩速率加快;加 3%KW 水泥浆在 10 h 内体积略有收缩,10 h 后体积逐渐增大,20 h 后膨胀率也略有降低。由图 2 中的高度增量曲线看出,水泥净浆和加 3%KW 水泥浆在不同时间的高度增量变化速率不一致,原因是 2 种水泥浆中的矿物组

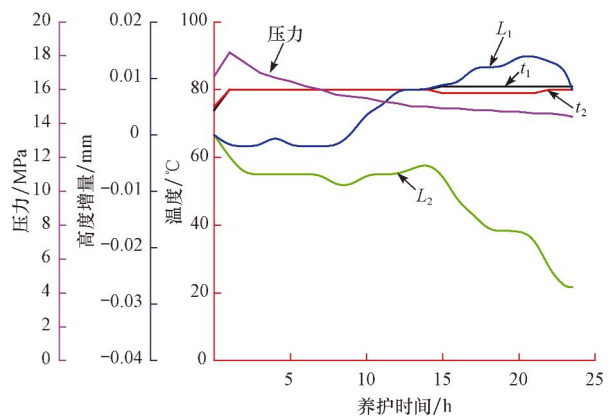


图 2 加 3%KW 水泥浆与净浆膨胀率试验结果
Fig. 2 Expansion rate of slurry with 3%KW and neat cement slurry

L_1 和 L_2 分别为加 3%KW 水泥浆和水泥净浆的高度增量; t_1 和 t_2 分别为测试加 3%KW 水泥浆和水泥净浆高度增量时的温度。

分水化时间不一致,水化速率和水化产物也不同,导致两种水泥浆在相同养护时间的胀缩速率不同。

采用测定仪法测量了不同养护条件下不同配方水泥浆的膨胀率,结果见表 3,其中相同编号的结果是利用测定仪双筒同时测定的。

由表 3 知:加 3%KW 水泥浆在塑性状态下体积略有收缩,硬化后逐渐膨胀;加 5%KW 水泥浆在整个

水化过程中体积始终不收缩,因此,对于膨胀剂 KW,加量达到 5%才能保证水泥浆不收缩;在 80℃×14.0 MPa 条件下,加 5%CAS 水泥浆仅在水化早期稍有膨胀,硬化后很快收缩,48 h 线膨胀率为-0.011%,与 50℃同压力条件下(见表 3)测试结果(0.019%)相差较大,原因是 AFt 在高温条件下分解生成 AFm;加 0.3% USZ 水泥浆的收缩率比净浆大。

表 3 不同配方水泥浆测定仪测量结果

Table 3 Experimental results of different cement slurry formulations measured by instrument

编号	配方	初凝/min	终凝/min	温度/℃	压力/MPa	塑性体膨胀率, %	线膨胀率, %	
							24 h	48 h
1	2	65	83	80	14.0	-0.002	0.008	
	1	78	105	80	14.0	-0.003	-0.025	
2	2	68	86	80	14.0	-0.002	0.009	0.014
	4	60	75	80	14.0	0	0.011	0.030
3	3	50	72	80	14.0	0.001	-0.006	-0.011
	3	67	93	50	14.0	0.002	0.016	0.019
	1	75	100	80	14.0	-0.003	-0.021	-0.030
4	5	82	107	80	7.0	-0.002	-0.020	-0.031
	1	78	100	80	7.0	-0.002	-0.018	-0.002 9

注:配方 4 为配方 1+5%晶体膨胀剂(KW);配方 5 为配方 1+0.3%减阻剂(USZ)。

4 结 论

1) 高温高压水泥浆体积稳定性测定仪能模拟井下高温高压环境,可连续测量水泥浆在塑性状态和硬化状态下的膨胀率,测量结果较其他方法真实、稳定。该仪器有 2 套测试筒,便于进行对比试验。

2) 对于晶体类膨胀剂,测定仪法测量结果比现用测量方法更加客观,测量精度相对较高、对比性强。对于常规方法无法评价的发气类膨胀剂,采用高温高压水泥浆稳定性测定仪也能客观评价。

3) 对于加晶体膨胀剂水泥浆,测定仪的测试结果比现用测量方法普遍偏小,原因是水泥浆在高温高压状态下晶体生长受到了限制。

参 考 文 献

References

- [1] 吴叶成,姚晓.低滤失双膨胀水泥浆体系的室内研究与应用[J].石油钻探技术,2005,33(2):26-29.
Wu Yecheng, Yao Xiao. Improving the cementing quality using a novel additive with double-expansion and fluid-loss-control action [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2005, 33(2): 26-29.
- [2] 桑来玉,丁士东,赵艳,等.油井水泥膨胀剂室内检测与评价[J].石油钻探技术,2000,28(3):24-26.
Sang Laiyu, Ding Shidong, Zhao Yan, et al. Experimental test and evaluation of cement swelling agents [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2000, 28(3): 24-26.
- [3] 姚晓,兰祥辉,邓敏,等.油井水泥多功能防窜剂的研究及应用[J].南京工业大学学报:自然科学版,2004,24(6):11-15.
Yao Xiao, Lan Xianghui, Deng Min, et al. A multifunctional material for controlling fluid migration in cementing [J]. Journal of Nanjing University of Technology: Natural Science Edition, 2004, 24(6): 11-15.
- [4] 祝瑜,邓宏卫,曾京生,等.混凝土自收缩测量方法的进展[J].低温建筑技术,2010(10):7-10.
Zhu Yu, Deng Hongwei, Zeng Jingsheng, et al. Research progress of measuring method for autogenous shrinkage concrete [J]. Low Temperature Architecture Technology, 2010(10): 7-10.
- [5] Jupe A C, Wilkinson A P, Funkhouser G P. Oil-well cement and C₃S hydration under high pressure as seen by in situ X-ray diffraction, temperatures ≤80℃ with no additives [J]. Journal of the American Ceramic Society, 2011, 94(5): 1591-1597.
- [6] 秦国鲲,耿宏章,刘延明,等.泡沫钻井液密度随井深变化关系模拟研究[J].石油钻探技术,2004,32(5):22-24.
Qin Guokun, Geng Hongzhang, Liu Yanming, et al. Simulation study on how the density of foam drilling fluid varies with well depth [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2004, 32(5): 22-24.
- [7] 郭宝利,袁孟雷,赵世军,等.水泥膨胀模拟试验装置:中国,200520108964[P].2006-11-22.
Guo Baoli, Yuan Menglei, Zhao Shijun, et al. Volume variation measuring instrument for slurry: CN, 200520108964 [P]. 2006-11-22.
- [8] 郭盈盈,文守成,张俊睿.高温高压小型测长装置:中国,201010185649 [P].2010-09-08.
Guo Yingying, Wen Shoucheng, Zhang Junrui. Dilatometer for high temperature and pressure: CN, 201010185649 [P]. 2010-09-08.
- [9] API specification 10A Specification for cements and materials for well cements [S].
- [10] GB/T 1346—2001 水泥标准稠度用水量、凝结时间、安定性检验方法 [S].
GB/T 1346—2001 Test methods for water requirement of normal consistency, setting time and soundness of the portland cements [S].