

◀ 钻井完井 ▶

doi:10.11911/syztjs.2018141

苯丙胶乳水泥浆防气窜效果与失重规律分析

陆沛青^{1,2}, 桑来玉^{1,2}, 谢少艾³, 高 元^{1,2}, 张佳滢⁴, 康旭亮^{1,2}

(1. 页岩油气富集机理与有效开发国家重点实验室, 北京 100101; 2. 中国石化石油工程技术研究院, 北京 100101; 3. 中石化石油机械股份有限公司, 湖北武汉 434014; 4. 油气资源与探测国家重点实验室(中国石油大学(北京)), 北京 102249)

摘 要: 水泥浆候凝期间, 因其失重引发的环空气窜, 是导致气井环空带压的重要因素之一, 掌握水泥浆失重模式与规律, 是预防环空气窜的重要基础。以苯丙胶乳防气窜水泥浆为研究对象, 采用压力传导精确测量装置进行了水泥浆失重试验, 测量了不同胶乳加量、温度、气压、模拟井筒深度等条件下水泥浆浆柱压力的变化, 进行了防气窜效果评价与失重规律分析。试验发现: 在气层压力 (18 kPa) 高于底部浆柱压力 (12~16 kPa) 的情况下, 苯丙胶乳水泥浆依然可有效防止气窜; 水泥浆形成触变或胶凝结构后压力快速降低, 随着水化反应进行压力缓慢降低, 稠化前压力再次加速下降, 而气窜应出现在第一拐点附近。基于该研究成果, 可对水泥浆的防气窜性能进行评价, 以优选出适合高压气井的防气窜水泥浆, 并为建立水泥浆失重预测模型提供试验基础。

关键词: 固井; 防气窜; 胶乳水泥浆; 失重试验; 失重模式; 失重规律

中图分类号: TE256⁺.7 文献标志码: A 文章编号: 1001-0890(2019)01-0052-07

Analysis of the Anti-Gas Channeling Effect and Weight Loss Law of Styrene-Acrylic Latex Cement Slurry

LU Peiqing^{1,2}, SANG Laiyu^{1,2}, XIE Shaoai³, GAO Yuan^{1,2}, ZHANG Jiaying⁴, KANG Xuliang^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Shale Oil and Gas Enrichment Mechanisms and Effective Development, Beijing, 100101, China; 2. Sinopec Research Institute of Petroleum Engineering, Beijing, 100101, China; 3. Sinopec Oilfield Equipment Corporation, Wuhan, Hubei, 434014, China; 4. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting(China University of Petroleum (Beijing)), Beijing, 102249, China)

Abstract: During the WOC of cement slurry, gas channeling in the annulus caused by its weight loss is one of the important factors leading to the sustained casing pressure (SCP). Understanding the weight loss modes and law of cement slurry is an important way to prevent gas intrusion in the annulus. Taking the styrene-acrylic latex anti-gas channeling cement slurry system as the research object, the weight loss test of cement slurry was carried out by means of pressure conduction precision measuring device, and the pressure change data of cement slurry under different latex dosage, temperature, gas pressure and simulated wellbore depth were measured, and the anti-gas channeling effect evaluation and weight loss law analysis were carried out. The test found that the styrene-acrylic latex could still effectively prevent gas channeling when the gas-bearing formation pressure (18 kPa) was higher than the bottom pressure of slurry column (12-16 kPa). In this case, the pressure dropped rapidly after this system formed a thixotropic or gelled structure. As the hydration reaction went on, the pressure decreased slowly, then the pressure of cement slurry dropped rapidly again before the thickening, and the dangerous time of gas channeling should appear near the first inflection point. Based on the research results, the anti-gas channeling performance of cement slurry could be evaluated to select the anti-gas channeling cement slurry system suitable for high-pressure gas wells, and such results could provide test basis for the establishment of cement slurry weight loss prediction model.

Key words: cementing; anti-gas channeling; latex cement slurry; weight loss test; weight loss model; weight loss law

在固井过程中水泥浆候凝期间, 因水泥浆失重引起的井底有效浆柱压力下降, 是导致气井环空带压的重要因素之一^[1]。认识水泥浆失重模式与失重规律, 是预防环空气窜的重要基础。由于现场试验干扰因素较多且数据样本有限, 因此大型物理模拟试验成为研究水泥浆失重规律以及建立失重预测模型的主要方法。前人针对水泥浆失重问题已开展了

收稿日期: 2018-04-13; 改回日期: 2018-11-14。

作者简介: 陆沛青(1988—), 男, 河北张家口人, 2011年毕业于中国石油大学(华东)石油工程专业, 2016年获中国石油大学(北京)油气井工程专业博士学位, 助理研究员, 主要从事特种水泥浆与固井研究工作。E-mail: lupq.sripe@sinopec.com。

基金项目: 国家科技重大专项“超深高温高压油气井固井关键技术”(编号: 2017ZX05005-005-003)、国家重点实验室专项“页岩气井水泥环失效机理及控制技术”联合资助。

大量的试验研究工作: G. Carter 和 R. A. Crook 等人^[2-3]发现气体不仅可以通过水泥环第一、二胶结界面的薄弱处侵入环空,也可以在水泥浆候凝期间穿透水泥浆胶凝结构形成气窜。自此,由水泥浆失重引发的早期气窜现象开始引起重视,陆续开展了针对水泥浆静胶凝强度^[4-6]、滤失量^[7]、沉降稳定性^[8-9]、体积收缩^[10-11]、大斜度及水平井等因素对失重影响的机理研究等^[12]。研究发现,影响水泥浆失重的因素复杂多样。目前普遍接受的观点是,井壁悬挂与体积收缩是导致水泥浆失重的 2 大主要因素^[13]。但是,上述失重研究的对象主要集中于水泥净浆,针对特殊水泥浆,特别是防气窜水泥浆的试验研究相对较少,对失重模式与规律的认识还不够清楚。为此,笔者以苯丙胶乳水泥浆为研究对象,利用自主设计的水泥浆压力传导精确测量装置,实时测量了不同试验条件(胶乳加量、温度、气层压力以及井筒深度)下,水泥浆有效液柱压力的变化,分析了苯丙胶乳水泥浆的防气窜效果与失重规律,以期防气窜固井施工及建立水泥浆失重预测模型提供参考。

1 苯丙胶乳水泥浆配方及性能

为有效提高水泥浆的防气窜能力,以 2-丙烯酰胺-2-甲基丙磺酸为功能单体进行改性,合成了一种用以防气窜固井的苯丙胶乳水泥添加剂^[14]。该胶乳为乳白色黏性液体,密度为 1.05 kg/L,固相含量为 40%,黏度为 8.7 mPa·s,胶乳粒径为 125 nm。

由于胶乳粒径远小于水泥颗粒粒径(20~74 μm),当其应用于水泥浆封闭气层时,随着水泥水化反应的进行,环绕水泥颗粒的水被消耗,胶乳局部固相体积分数升高,产生颗粒聚集,从而形成空间网络状非渗透薄膜,并填充于水泥颗粒空隙,避免环空发生窜流。

通过优化组合,确定苯丙胶乳水泥浆的基本配方为 G 级油井水泥+5.0%~20.0% 苯丙胶乳+1.0%~2.0% 胶乳稳定剂+0.1%~0.4% 分散剂+44.0% 水。在不同苯丙胶乳加量下,苯丙胶乳水泥浆的综合性能见表 1。

表 1 苯丙胶乳防气窜水泥浆的综合性能

Table 1 Comprehensive performance of styrene-acrylic latex anti-gas channeling cement slurr

苯丙胶乳加量, %	温度/℃	流动度/cm	六速旋转黏度计读数	流性指数	稠度系数/(Pa·s ⁿ)	滤失量/mL	析水量/mL
5.0	93	24	255/201/128/76/7/4	0.752	0.815	35	0
10.0	93	24	241/195/120/73/8/5	0.717	0.937	26	0
15.0	93	23	238/200/130/80/8/5	0.774	0.727	19	0
20.0	93	22	264/214/165/98/9/6	0.751	1.053	14	0

从表 1 可以看出,苯丙胶乳对水泥浆流性指数的影响较小,但分析认为,苯丙胶乳可以完全分散于水泥浆中,使水泥浆保持良好的流变性和沉降稳定性。同时,随着苯丙胶乳加量增大,具有弹性的胶乳粒子充分充填于水泥颗粒之间,不但可以降低水泥浆的滤失量,还可以降低水泥石的渗透率,因此苯丙胶乳可在不影响水泥浆性能的前提下,提高水泥浆的防气窜性能。目前,该苯丙胶乳水泥浆已在川东北、顺南^[15]和顺北等地区复杂工况下的防气窜固井施工中广泛应用。

2 失重试验方法

2.1 试验装置

为进行苯丙胶乳水泥浆失重试验,设计了一套

水泥浆压力传导精确测量装置,如图 1 所示。该装置主要由 5 大系统组成,分别为模拟井筒、加热及温度控制系统、压力及压差测量系统、出口计量系统和注入系统。1)模拟井筒:水泥环内径为 50.0 mm、长度为 1 000.0 mm,井筒上设有 4 个压力测点(由下至上编号为 1[#]—4[#],间距 20 cm),用以测量不同深度处的压力变化;测点上设有橡胶薄膜套,可以兼作隔离器使用。2)加热及温度控制系统由硅橡胶加热套、温度控制仪及温度传感器组成,控温范围在 10~100 ℃,控温精度为 0.5 ℃。3)压力及压差测量系统:传感器量程为 0.6 MPa,精度 0.25% FS(FS 为 full scale,意即满量程)。4)出口计量系统由气液分离器、高精度电子天平(精度为 0.000 1 g)、干燥器和微量气体流量计组成。5)注入系统控制气源压力,由氮气源、调压阀等组成。

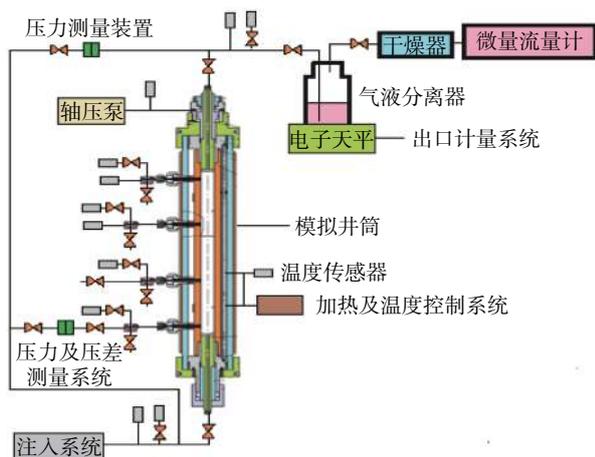


图1 水泥浆压力传导精确测量装置的结构

Fig.1 Structure of cement slurry pressure conduction precision measuring device

利用该装置,可以模拟不同温度及气窜压力条件下水泥浆候凝早期阶段全井筒(1[#]—4[#]测点)有效浆柱压力的变化,评价水泥浆早期防气窜效果。

2.2 试验参数选择

分析认为,影响苯丙胶乳水泥浆失重曲线形态的因素包括苯丙胶乳加量、气窜压力、井筒温度以及井筒几何参数(井筒深度、井径)等。因此,选取上述参数作为试验变量,进行了纯水对比试验、净浆对比试验、苯丙胶乳加量变化试验、气压变化试验以及温度变化试验,相关参数组合见表2。其中,

表2 苯丙胶乳水泥浆失重试验参数

Table 2 The parameters of styrene-acrylic latex anti-gas channeling cement slurry weight loss test

基本配方	苯丙胶乳加量, %	气压/kPa	温度/℃	备注
纯水	0	0~18	室温	纯水对比试验
G级水泥+44%水	0	0, 15, 18	30, 50	净浆对比试验
G级水泥+44%水	5~20	0, 15, 18	30, 50	苯丙胶乳加量变化试验
G级水泥+44%水	5, 10	4~20	30, 50	气压变化试验
G级水泥+44%水	5, 10	0, 15, 18	30~70	温度变化试验

3 试验结果及失重规律分析

3.1 苯丙胶乳水泥浆防气窜效果

采用水灰比为44%、密度为1.88 kg/L的苯丙胶乳水泥浆进行试验,评价其防气窜效果。当气体在水泥浆中形成通道后,1[#]—4[#]测点的压力迅速升高,伴随井筒上端产生气泡,液面上升,据此可以判断

纯水对比试验主要用来检测仪器的密封性、压力测量的精确性以及气窜检测的敏感性。

2.3 试验步骤

1)基于表2中的试验参数,针对不同试验内容,配制不同配方的水泥浆,设置对应的试验温度及气压,除纯水试验外,每一组试验对应一组确定的苯丙胶乳加量、气压和温度,试验过程中不再发生变化。

2)进行纯水试验,确保仪器正常运行,在清水充满模拟井筒的状态下,1[#]—4[#]测点理论上的压力应为2.6, 4.6, 6.6和8.6 kPa,若实测值与理论值差距较大,则需重新调试仪器。

3)用清水充满井筒并保持5~10 min,确保清水通过渗透塞(传递液柱压力,并阻挡水泥颗粒进入传感器)完全充满压力传感器,打开“排压阀”放空传感器内剩余的空气。

4)排出清水,确定模拟井筒充满空气时对应的压力读数为0,随后尽快注入已配制好的水泥浆,并适当敲击井壁消除水泥浆触变,使水泥浆充分充满模拟井筒,并观察仪表读数是否正常。

5)打开气源开始试验,实时记录水泥浆液柱压力及气体流量。

6)试验过程中,密切关注气体流量及水泥浆液柱压力的变化,若发生气窜或水泥失重至等高水柱压力以下时,及时停止试验,并保存数据。

发生了气窜。统计清水、净浆与苯丙胶乳水泥浆发生气窜时的试验数据和比例,即可评价该水泥浆的防气窜效果。

清水对比试验中,当底部气层压力大于8.6 kPa(等高清水液柱压力)时即发生气窜,此后逐步提高底部气层压力,1[#]—4[#]测点的压力同步升高,井筒上端连续冒出气泡,如图2(a)所示。

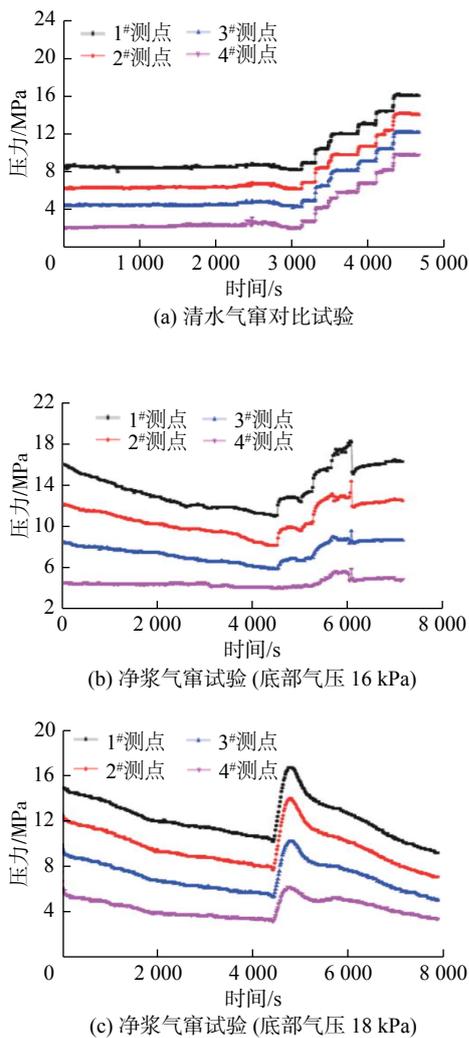


图 2 清水和净浆液柱压力变化曲线

Fig. 2 The slurry column pressure variation curves of fresh water and paste

24 组净浆对比试验中, 有 12 组试验在压力快速下降阶段发生了气窜, 临界气窜压力为 16~18 kPa, 1#—4#测点的压力响应存在一定滞后, 液面小幅升高, 井筒上端断续冒出小气泡, 如图 2(b) 和图 2(c) 所示。

当苯丙胶乳加量为 5% 时, 即使气层压力 (18 kPa) 高于浆柱压力 (由 16 kPa 失重至 12 kPa), 在水泥浆快速失重阶段也未发现有明显的气窜现象。拆卸后发现, 96 组试验中有 20 组试验的水泥浆底部存在气体置换现象, 水泥浆中存在微小气泡。而在苯丙胶乳加量为 10% 及 20% 的水泥浆中, 有 12 组试验水泥浆存在微弱的气体置换现象。气体置换过程中, 苯丙胶乳水泥浆失重曲线未出现显著变化。在相同温度压力条件下, 不同浆体的防气窜效果如图 3 所示。

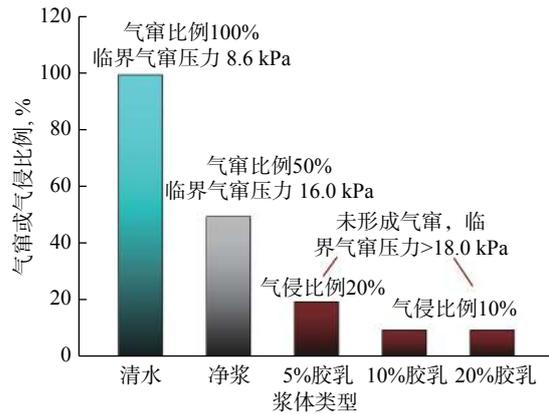


图 3 相同温度压力条件下不同类型浆体的防气窜效果

Fig. 3 The anti-gas channeling effect of different types of slurry under the same temperature and pressure conditions

由图 3 可知, 由于苯丙胶乳粒子具有在压差下聚集成膜, 挤压、填充水泥颗粒孔隙等特性^[16-17], 可有效增强水泥浆整体的结构强度, 对于防止候凝过程中发生气窜具有显著效果。在该试验条件下, 苯丙胶乳含量超过 5% 即可有效抑制环空气窜, 苯丙胶乳加量为 10% 时可使气侵风险降至 20%, 其加量为 20% 时气侵风险可降至 10%。因此, 针对高压气层固井施工, 可与降滤失剂等水泥添加剂配合使用, 建议加入 5%~10% 的苯丙胶乳; 对于易漏易窜等其他更复杂的固井工况条件, 苯丙胶乳加量可以基于该试验方法进一步优化。

3.2 苯丙胶乳水泥浆失重规律分析

共采集水泥浆压力变化数据 120 组, 其中净浆试验 24 组, 苯丙胶乳加量变化试验 32 组, 气压变化试验 32 组, 温度变化试验 32 组。统计发现: 在水泥浆液柱压力下降到等高水柱压力之前, 有 108 组 (占总数的 90.0%) 压降曲线呈两段式, 称为两段式失重模式; 有 12 组压降曲线 (占总数 10.0%) 呈三段式, 称为三段式失重模式。在两段式失重模式中, 有 29 组 (约占总数的 24.2%) 失重曲线斜率变化剧烈, 前后两段拟合曲线斜率比 > 10, 最高可达 61.8; 有 79 组 (约占总数的 65.8%) 失重曲线斜率变化相对平缓, 前后两段拟合曲线斜率比 < 10, 最低达到 1.04。苯丙胶乳水泥浆两段式失重曲线斜率比分布如图 4 所示。

3.2.1 两段式失重模式

图 5 为典型的斜率变化显著的两段式失重曲线, 对应试验条件分别为苯丙胶乳加量 5%、气压

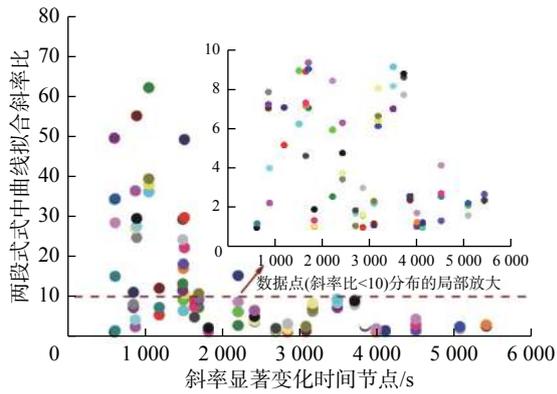


图4 两段式失重曲线斜率比分布

Fig. 4 Slope ratio distribution of two-stage weight loss curve

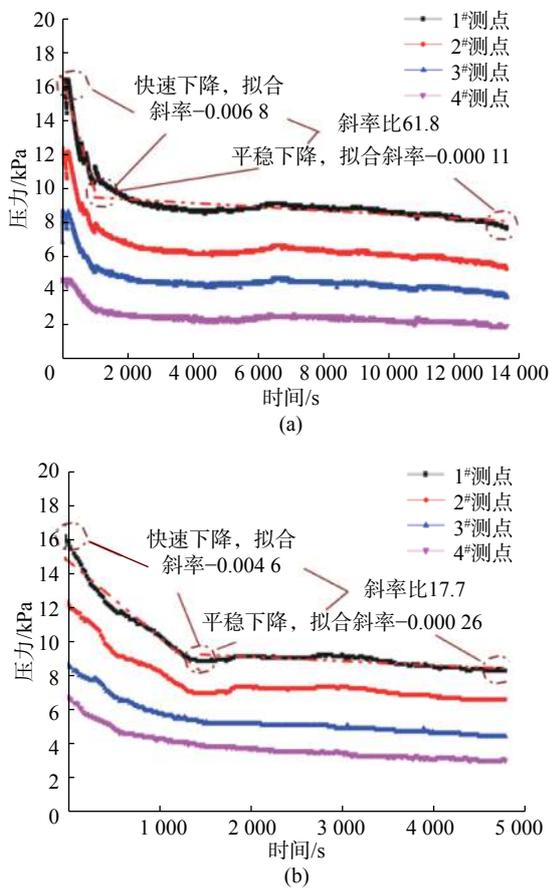


图5 斜率变化显著的两段式失重曲线

Fig. 5 Two-stage weight loss curve with significant slope change

15 kPa、温度 30 ℃ 和苯丙胶乳加量 10%、气压 0 kPa、温度 60 ℃。对两段式失重曲线进行分段线性拟合,分析失重曲线变化趋势。

由图 5(a)可知:在 0~1 055 s 时间段,1[#]—4[#]测

点压力-时间拟合曲线的斜率依次为 -0.006 8, -0.003 4, -0.002 5 和 -0.001 5,在此阶段,水泥浆快速由液体状态向胶凝态转变,并伴有较强的触变现象;在 1 055~14 000 s 时间段,1[#]—4[#]测点压力-时间拟合曲线的斜率分别为 -0.000 11, -0.000 091, -0.000 064 和 -0.000 042,在此阶段,水泥浆呈胶凝态,缓慢失重,直至降至等高水柱压力,停止试验。将上述 2 个阶段拟合曲线的斜率相除,可计算得到 4 条曲线的斜率比依次为 61.8, 37.8, 39.1 和 35.9。类似地,图 5(b)中 4 段拟合曲线的斜率比依次为 17.7, 16.8, 9.0 和 6.3。

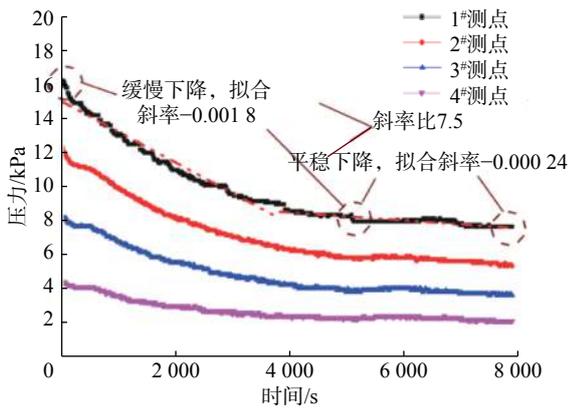
对比图 5 中的曲线可知:当拟合曲线的斜率比 >10 时,失重曲线变化明显,前期失重速度快,后期失重速度相对较小;当拟合曲线的斜率比 <10 时,失重曲线整体较为平缓,斜率显著变化的时间节点不明显。

图 6 为典型的斜率变化幅度较小的两段式失重曲线,对应试验条件分别为苯丙胶乳加量 10%、气压 15 kPa、温度 30 ℃ 和苯丙胶乳加量 20%、气压 0 kPa、温度 50 ℃。与图 5 中的曲线相比,图 6 中曲线斜率变化的幅度相对较小。图 6(a)中,1[#]—4[#]测点压力-时间拟合曲线的斜率比依次为 7.5, 7.4, 8.8 和 8.6;图 6(b)中,1[#]—4[#]测点压力-时间拟合曲线的斜率比为 9.4, 9.5, 9.1 和 7.1。在曲线缓慢下降阶段,水泥浆逐渐由液体状态向胶凝态转变,无明显触变现象;在平稳下降阶段,水泥浆呈胶凝态并伴随有少量胶乳析出,液柱压力缓慢降低,直至降至等高水柱压力。

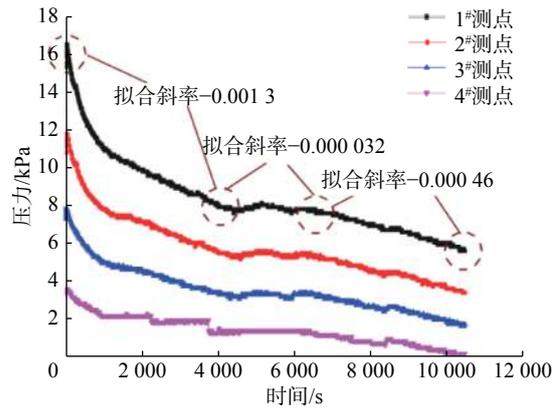
由此可知:对于触变性较强的水泥浆,由于受到触变形成的挂壁效应影响^[17],其液柱压力通常呈现“快速+平稳”两段式下降;对于触变性较小的水泥浆,其失重的原因主要是水泥浆内部颗粒沉降导致水泥颗粒出现桥堵现象,使部分水泥颗粒的重力作用于管壁上^[18],故液柱压力失重相对缓慢,通常呈现“缓慢+平稳”两段式下降。但整体而言,在水泥浆失重阶段,液柱压力并非线性降低,存在阶段性变化,与水泥的水化息息相关。

3.2.2 三段式失重模式

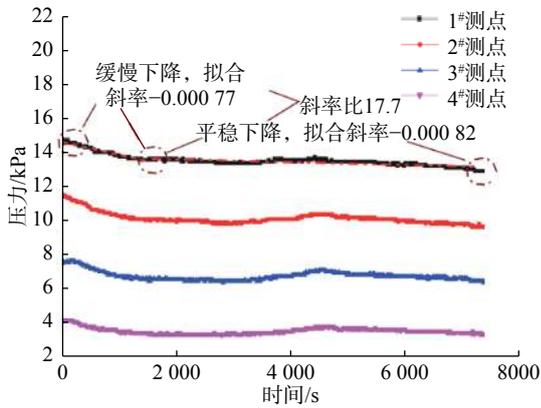
图 7 为典型的三段式失重曲线,对应试验条件为苯丙胶乳加量 5%、气压 15 kPa、温度 50 ℃ 和苯丙胶乳加量 10%、气压 15 kPa、温度 70 ℃。由图 7 可以看出,水泥浆液柱压力平稳降至等高水柱压力后,又开始迅速降低,整体呈现三段式。



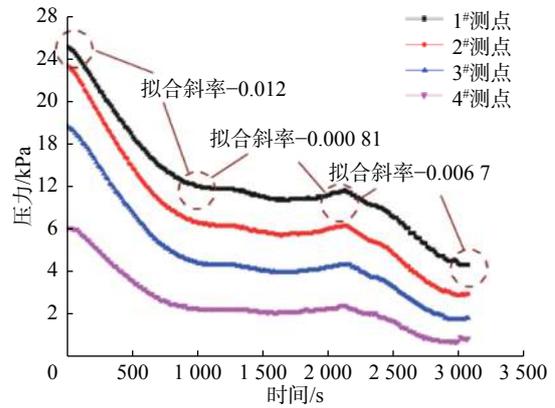
(a) 苯丙胶乳加量10%, 气压15 kPa, 温度30 °C



(a) 苯丙胶乳加量5%, 气压15 kPa, 温度50 °C



(b) 苯丙胶乳加量20%, 气压0 kPa, 温度50 °C



(b) 苯丙胶乳加量10%, 气压15 kPa, 温度70 °C

图 6 斜率变化平缓的两段式失重曲线

图 7 典型的三段式失重曲线

Fig. 6 Two-stage weight loss curve with gentle slope change

Fig. 7 Typical three-stage weight loss curve

由图 7(a)可知:在 1~6 880 s 时间段,曲线的形态与两段式失重曲线一致,1#—4#测点压力-时间拟合曲线的斜率比依次为 40.6, 64.9, 38.5 和 40.5;时间超过 6 880 s 后,水泥浆液柱压力重新开始加速降低,前后 2 个阶段 1#—4#测点压力-时间拟合曲线的斜率比为 0.07, 0.04, 0.05 和 0.03。类似地,图 7(b)水泥浆液柱压力也呈三段式下降,在 70 °C 温度下,水泥浆失重曲线斜率变大,失重至等高水柱压力的时间缩短。水泥浆液柱压力降至等高水柱压力后,水泥浆开始快速凝结、稠化。为防止水泥浆完全凝固在井筒中,停止试验并拆下井筒,发现水泥浆已基本丧失流动性,呈塑性状态。

综合分析上述现象,认为完整的水泥浆失重曲线应为三段式:1)水泥浆进入井筒不再流动后,形成触变或胶凝结构,水泥颗粒沉降,导致水泥颗粒附着于管壁上,造成水泥浆快速失重;2)随着水泥水化反应进行,水泥浆逐渐从“颗粒堆积体”转变为“骨架-孔隙结构”,水泥浆形成孔隙溶液传压,压力缓慢降低^[19];3)当诱导期结束,水泥浆开始快

速水化,直至降至等高水柱压力,随后彻底稠化、凝结,封闭井筒。为防止水泥浆凝固损毁试验井筒,设定水泥浆液柱压力降至等高水柱压力即停止试验。此时,若继续采集数据,应能观察到水泥浆液柱加速失重的过程。因此,试验采集到的绝大部分失重曲线为两段式曲线。

分析认为,在该试验条件下,失重曲线中斜率显著变化的第一个拐点是易发生气窜的状态。在第一拐点处,水泥浆液柱压力迅速降低,而水泥浆胶凝结构尚未完全形成,防气窜的阻力较低,当底部气层压力大于水泥浆底部压力与气窜阻力之和时,就易发生气窜。当水泥浆开始加速水化后,即使水泥浆液柱压力迅速降低,加速形成的水泥浆结构强度也可以阻止气体在水泥浆中运移。因此,在后续研究中,应重点探索失重曲线第一拐点附近压力变化的规律,基于数据建立水泥浆失重预测模型,为防气窜固井施工提供参考和指导。

4 结论及建议

1)设计了一套水泥浆压力传导精确测量装置,

并利用该装置实时测量了不同苯丙胶乳加量、底部气压、环境温度和井筒深度等条件下,水泥浆由液态变成塑性状态过程中有效浆柱压力变化的过程。

2) 苯丙胶乳水泥浆失重试验表明,即使气层压力高于浆柱压力,也未发生明显的气窜现象。整体而言,苯丙胶乳粒子可有效增强水泥浆的整体结构强度,防止发生气窜。对于气层压力较高的井,建议采用苯丙胶乳加量为5%~10%的水泥浆进行固井。

3) 苯丙胶乳水泥浆的主要失重模式为三段式:当候凝形成触变或胶凝结构后,水泥浆快速失重;随着水化反应进行,水泥浆形成孔隙溶液传压,失重现象缓慢,压力缓慢降低;最后,水泥浆开始快速水化,直至降至等高水柱压力,随后彻底稠化。

4) 在文中试验条件下,失重曲线的第一个拐点位置对应的是最易发生气窜的状态,在后期研究中,建议重点研究第一拐点附近水泥浆液柱压力变化的规律。

5) 建议采用水泥浆压力传导精确测量装置与测量方法,进一步研究多种水泥添加剂、外掺料对水泥浆失重模式的影响,完善水泥浆失重规律分析。

参 考 文 献

References

- [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,2001:316-345.
LIU Chongjian, HUANG Bozong, XU Tongtai, et al. Theory and application of cementing of oil and gas well[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2001: 316-345.
- [2] CARTER G, SLAGLE K. A study of completion practices to minimize gas communication[J]. *Journal of Petroleum Technology*, 1972, 24(9): 1170-1174.
- [3] CROOK R A, HEATHMAN J. Predicting potential gas-flow rates to help determine the best cementing practices[J]. *Drilling Contractor*, 1998, November/December: 40-43.
- [4] SABINS F L, TINSLEY J M, SUTTON D L. Transition time of cement slurries between the fluid and set states[J]. *SPE Journal*, 1982, 22(6): 875-882.
- [5] SABINS F L, SUTTON D L. The relationship of thickening time, gel strength, and compressive strength of oil well cements[J]. *SPE Production Engineering*, 1986, 1(2): 143-152.
- [6] 步玉环,穆海朋,姜林甫,等. 水泥浆失重建模以及实验研究[J]. *钻井液与完井液*, 2007, 24(6): 52-54.
BU Yuhuan, MU Haipeng, JIANG Linfu, et al. Modeling and laboratory studies of cement slurry weight loss[J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2007, 24(6): 52-54.
- [7] BANNISTER C E, LAWSON V M. Role of cement fluid loss in wellbore completion[R]. SPE 14433, 1985.
- [8] HARTOG J J, DAVIES D R, STEWART R B. An integrated approach for successful primary cementations[J]. *Journal of Petroleum Technology*, 1983, 35(9): 1600-1610.
- [9] 孙展利. 水泥浆在不同井斜的沉降失重和沉降-胶凝失重[J]. *天然气工业*, 1998, 18(4): 55-58.
SUN Zhanli. Settling weightlessness and settling jellification weightlessness of slurry under various hole deviations[J]. *Natural Gas Industry*, 1998, 18(4): 55-58.
- [10] SYKES R L, LOGAN J L. New technology in gas migration control[R]. SPE 16653, 1987.
- [11] ZHOU Desheng, WOJTANOWICZ A K. New model of pressure reduction to annulus during primary cementing[R]. SPE 59137, 2000.
- [12] 郭小阳,刘崇建,谢应权,等. 大斜度及水平井中水泥浆的失重和气侵研究[J]. *西南石油学院学报*, 1996, 18(2): 25-34.
GUO Xiaoyang, LIU Chongjian, XIE Yingquan, et al. Study of weightlessness and air cutting of cement slurry in highly deviated and horizontal well[J]. *Journal of Southwest Petroleum Institute*, 1996, 18(2): 25-34.
- [13] LI Zichang, VANDENBOSSCHE J, IANNACCHIONE A, et al. Theory-based review of limitations with static gel strength in cement/matrix characterization[R]. SPE 178923, 2016.
- [14] 汪晓静,孔祥明,曾敏,等. 新型苯丙胶乳水泥浆体系的室内研究[J]. *石油钻探技术*, 2014, 42(2): 80-84.
WANG Xiaojing, KONG Xiangming, ZENG Min, et al. Laboratory research on a new styrene acrylic latex cement slurry system[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2014, 42(2): 80-84.
- [15] 路飞飞,王永洪,刘云,等. 顺南井区高温高压防气窜尾管固井技术[J]. *钻井液与完井液*, 2016, 33(2): 88-91.
LU Feifei, WANG Yonghong, LIU Yun, et al. Anti-channeling HTHP Liner Cementing Technologies Used in Block Shunnan[J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2016, 33(2): 88-91.
- [16] 刘仍光,周仕明,陶谦,等. 胶乳对油井水泥水化产物和硬化浆体微结构的影响[J]. *电子显微学报*, 2015, 34(3): 211-215.
LIU Rengguang, ZHOU Shiming, TAO Qian, et al. Influence of latex on the hydration products and microstructure of oil well cement pastes[J]. *Journal of Chinese Electron Microscopy Society*, 2015, 34(3): 211-215.
- [17] 朱海金,王恩合,王学成,等. 水泥浆防窜性能实验评价及其应用[J]. *天然气工业*, 2013, 33(11): 79-85.
ZHU Haijin, WANG Enhe, WANG Xuecheng, et al. Experimental evaluation of gas channeling prevention of cement slurries and its application[J]. *Natural Gas Industry*, 2013, 33(11): 79-85.
- [18] 张兴国. 水泥浆网架结构胶凝悬挂失重机理研究[D]. 南充:西南石油大学,2002.
ZHANG Xingguo. Study on weightlessness mechanisms of slurry suspension during cement gelation[D]. Nanchong: Southwest Petroleum University, 2002.
- [19] 程小伟,刘开强,李早元,等. 油井水泥浆液-固态演变的结构与性能[J]. *石油学报*, 2016, 37(10): 1287-1292.
CHENG Xiaowei, LIU Kaiqiang, LI Zaoyuan, et al. Structure and properties of oil well cement slurry liquid-solid transition[J]. *Acta Petroli Sinica*, 2016, 37(10): 1287-1292.

[编辑 令文学]