



中华人民共和国国家标准

GB/T 39421—2020

水泥浆静胶凝强度测定方法

Methods for determining the static gel strength of cement formulations

(ISO 10426-6:2008, Petroleum and natural gas industries—
Cements and materials for well cementing—Part 6: Methods for
determining the static gel strength of cement formulations, MOD)

2020-11-19 发布

2021-06-01 实施

国家市场监督管理总局 发布
国家标准化管理委员会

目 次

前言 I

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 取样 1

5 制备 2

6 旋转型静胶凝强度测试仪的试验方法 2

7 超声波静胶凝强度测试仪的试验方法 3

8 间歇旋转型静胶凝强度测试仪的试验方法 4

附录 A（资料性附录） 临界静胶凝强度 6

前 言

本标准按照 GB/T 1.1—2009 给出的规则起草。

本标准使用重新起草法修改采用 ISO 10426-6:2008《石油天然气工业 固井用水泥和材料 第 6 部分:水泥浆静胶凝强度测定方法》。

本标准与 ISO 10426-6:2008 相比存在结构调整,将第 3 章中术语和定义按照出现的先后顺序重新排序。

本标准与 ISO 10426-6:2008 相比存在技术性差异,这些差异涉及的条款已通过在其外侧页边空白位置的垂直单线(|)进行了标示。

本标准与 ISO 10426-6:2008 的技术性差异及其原因如下:

- 修改了第 1 章“范围”,ISO 10426-6:2008 的“范围”论述笼统,不够具体,增加了“适用范围”;
- 关于规范性引用文件,本标准做了技术性差异的调整,以适应我国的技术条件,调整的情况集中反映在第 2 章“规范性引用文件”中,具体调整为:
 - 用修改采用国际标准的 GB/T 19139 代替了 ISO 10426-2:2003;
- 修改了第 5 章“制备”,将注释中的内容调整至正文中,可操作性更强;
- 将 6.2.4、7.2.7、7.3.5、8.2.7、8.3.5 中的“记录达到 50 Pa、100 Pa、150 Pa、200 Pa 和 250 Pa 静胶凝强度的时间”修改为“记录达到 48 Pa、240 Pa 静胶凝强度的时间”,可操作性更强,并删除了对“临界静胶凝强度时间”的重复定义,改为“计算临界静胶凝强度时间”;
- 将“7.1 仪器”中“见 7.2.5”修改为“见 7.2.4 或 7.3.3”,更正了错误引用;
- 将“8.1 仪器”中“见 8.2.4”修改为“见 8.2.4 或 8.3.3”,增强了可操作性。

本标准做了下列编辑性修改:

- 将标准名称修改为《水泥浆静胶凝强度测定方法》;
- 删除了 ISO 10426-6:2008 中相关参数 USC 单位的量值,全部采用 SI 单位;
- 删除了 ISO 10426-6:2008 中采用 USC 单位制公式,全部采用 SI 单位制公式;
- 将附录 A 中计算公式系数“0.027”修改为“0.002 5”,原计算公式系数错误;
- 删除了参考文献。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别这些专利的责任。

本标准由全国石油天然气标准化技术委员会(SAC/TC 355)提出并归口。

本标准起草单位:中国石油化工股份有限公司石油工程技术研究院、中海油田服务股份有限公司、天津中油渤星工程科技有限公司。

本标准主要起草人:丁士东、汪晓静、周仕明、杨红歧、苗霞、陈雷、高元、王清顺、邹建龙。

水泥浆静胶凝强度测定方法

1 范围

本标准规定了模拟井况下水泥浆及相关材料的静胶凝强度测定方法。
本标准适用于水泥浆及相关材料的静胶凝强度测定。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件,仅注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件,其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

GB/T 19139 油井水泥试验方法(GB/T 19139—2012, ISO 10426-2:2003, MOD)

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

静胶凝强度 static gel strength; SGS

将胶凝流体从已知长度和形状的圆管柱或环空中驱动所需的剪切强度(应力)。

注:静胶凝强度单位为帕(Pa)或牛每平方米(N/m^2)。

3.2

井底循环温度 bottom-hole circulating temperature; BHCT

循环时,井底流体所能达到的最高温度。

3.3

井底静液柱压力 bottom-hole pressure; BHP

由井的垂深、井筒中的流体密度计算而得。

3.4

临界静胶凝强度时间 critical static gel strength period; CSGSP

水泥浆从临界静胶凝强度发展到静胶凝强度为 240 Pa 时,所需的时间。

3.5

临界静胶凝强度 critical static gel strength; CSGS

水泥浆静液柱压力损失导致环空静液柱压力与地层孔隙压力达到平衡时的水泥浆静胶凝强度。

参见附录 A。

注:临界静胶凝强度单位为帕(Pa)或牛每平方米(N/m^2)。

4 取样

4.1 总则

本标准进行水泥浆试验需要水泥或水泥混料、固体和液体外加剂、拌合水。应采用现有的最佳取样技术,以确保实验室试验条件、材料与现场尽可能相近。

4.2 方法

水泥或水泥混料、固体和液体外加剂、拌合水的常见取样方法应按 GB/T 19139 的规定执行。如果需要,水泥或水泥混料、固体和液体外加剂、拌合水的温度可以用精度为 $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的热电偶或温度计测量,并记录温度。温度测量系统的校正应不少于每 3 个月 1 次(例如:热电偶)或每年 1 次(例如:温度计)。

5 制备

按 GB/T 19139 的方法准备试验样品。水泥样品与拌合水的温度应与现场温度相差不超过 $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。如果现场条件未知,水泥样品与拌合水应在 $23\text{ }^{\circ}\text{C}\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的条件下混合。

如果需要制备大体积的水泥浆,则按照 GB/T 19139 的方法进行。水泥浆密度的测定,按照 GB/T 19139 的方法进行。

6 旋转型静胶凝强度测试仪的试验方法

6.1 仪器

该仪器包含一个压力釜,压力釜可模拟固井作业程序进行加热和加压。静胶凝强度(SGS)由已知几何形状的浆叶在低速下旋转所需的扭矩计算而得。在静胶凝强度试验的搅拌阶段,浆叶的旋转速度通常是连续的,大小为 $0.2\text{ }^{\circ}/\text{min}$ 。模拟顶替过程的初始搅拌速度通常是 $150\text{ r}/\text{min}\pm 15\text{ r}/\text{min}$ 。旋转型静胶凝强度测试仪应按照制造商的说明进行校准。养护期间,水泥浆升温升压应按试验方案进行(见 6.2.2)。利用置于测试釜中央的热电偶测定水泥浆温度。温度测量系统的准确度应校准至 $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$,校准次数应不少于每 3 个月 1 次。

注:可根据水泥浆设计的需要,调整仪器的旋转速度。仪器旋转速度的允许范围为 $0.15\text{ }^{\circ}/\text{min}\sim 0.5\text{ }^{\circ}/\text{min}$ 。

6.2 试验步骤

6.2.1 如果现场采用批混作业,测试时间应包括批混时间。在批混时间内,水泥浆应置于设计温度下,压力应为常压。搅拌速度通常为 $150\text{ r}/\text{min}\pm 15\text{ r}/\text{min}$ 。如果没有批混作业,忽略此步。

6.2.2 在水泥浆从井口到达井底的时间内,将水泥浆温度和压力逐步升至井底循环温度(BHCT)和井底静液柱压力(BHP),搅拌速度 $150\text{ r}/\text{min}\pm 15\text{ r}/\text{min}$ 。在水泥浆由井底到达目标层的时间内,将水泥浆温度和压力逐步调整至目标层循环温度和压力,维持温度和压力 $5\text{ min}\pm 30\text{ s}$,搅拌速度 $150\text{ r}/\text{min}\pm 15\text{ r}/\text{min}$ 。在调整过程中,温度应维持在 $\pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的范围内,压力应维持在 $\pm 2\text{ MPa}$ 的范围内。在调整过程的最后 10 min ,温度应维持在 $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的范围内,压力应维持在 $\pm 0.7\text{ MPa}$ 的范围内。

6.2.3 静胶凝强度的测定中,在模拟顶替结束时,浆叶的旋转转速从 $150\text{ r}/\text{min}\pm 15\text{ r}/\text{min}$ 变化至 $0.2\text{ }^{\circ}/\text{min}$ 或其他允许的旋转速度。维持目标层循环温度和压力。静胶凝强度的测定中,温度和压力应分别保持在温度目标值 $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和压力目标值 $\pm 0.7\text{ MPa}$ 的范围内。

6.2.4 在达到目标层循环温度时,记录静胶凝强度值和运行时间。记录达到 48 Pa 、 240 Pa 静胶凝强度的时间。计算临界静胶凝强度时间(CSGSP)。记录静胶凝强度测试所用仪器的制造商、型号和旋转速度。

7 超声波静胶凝强度测试仪的试验方法

7.1 仪器

将水泥浆置于一个可控温、控压的压力釜内,在静态条件下进行测试,该压力釜可测量水泥浆的声学特性。第一个传感器产生一个可穿过样品的声波信号。第二个传感器测量并记录穿过样品的声波信号振幅的大小。根据声波信号振幅大小与静胶凝强度的关系式确定样品的静胶凝强度值。超声波静胶凝强度仪应根据制造商说明书进行校准。养护期间,水泥浆升温升压应按试验方案进行(见 7.2.4 或 7.3.3)。利用置于测试釜中央的热电偶测试水泥浆温度。温度测量系统的准确度应校准至 $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$,校准次数应不少于每 3 个月 1 次。

7.2 增压养护样品的试验步骤

7.2.1 使用 GB/T 19139 中规定的稠化仪进行养护。

7.2.2 将水泥浆置于增压稠化仪浆杯中,按照 GB/T 19139 的方法进行稠化试验。

7.2.3 如果现场采用批混作业,测试时间应包括批混时间。在批混时间内,水泥浆应置于设计温度下,压力应为常压。搅拌速度通常为 $150\text{ r/min} \pm 15\text{ r/min}$ 。如果没有批混作业,忽略此步。

7.2.4 在水泥浆从井口到达井底的时间内,将水泥浆温度和压力逐步升至井底循环温度(BHCT)和井底静液柱压力(BHP),搅拌速度 $150\text{ r/min} \pm 15\text{ r/min}$ 。在水泥浆由井底到达目标层的时间内,将水泥浆温度和压力逐步调整至目标层循环温度和压力,维持温度和压力 $5\text{ min} \pm 30\text{ s}$,搅拌速度 $150\text{ r/min} \pm 15\text{ r/min}$ 。在调整过程中,温度应维持在 $\pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的范围内,压力应维持在 $\pm 2\text{ MPa}$ 的范围内。在调整过程的最后 10 min,温度应维持在 $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的范围内,压力应维持在 $\pm 0.7\text{ MPa}$ 的范围内。

为安全起见,如果养护温度大于 $88\text{ }^{\circ}\text{C}$,水泥浆从增压稠化仪取出之前,关闭加热器,并尽快将水泥浆冷却至 $88\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右。假设 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 为水的沸点温度, $88\text{ }^{\circ}\text{C}$ 为安全温度。如果试验现场,水的沸点温度小于 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$,则相应地调低安全温度。

7.2.5 缓慢释放压力(大约 1.4 MPa/s)。从稠度仪中取出浆杯,保持浆杯垂直,以避免油混入水泥浆。拧下浆杯顶部紧锁环,从浆叶轴上取下驱动块、垫圈和橡胶隔膜盖。抽走、吸干橡胶隔膜上面的油。取下橡胶隔膜和支撑环。抽走、吸干水泥浆上面所有残留的油。如果污染严重,则废弃该水泥浆并重新开始。取出浆叶,用刮刀迅速搅拌水泥浆以确保水泥浆均匀。增压稠度仪内取出的水泥浆,在 5 min 之内倒入静胶凝强度仪浆杯中。

7.2.6 将水泥浆置于超声波静胶凝强度测试仪的测试釜内,该测试釜需预热至目标层循环温度或 $88\text{ }^{\circ}\text{C}$ 中较低值。将试样加压至目标层压力或仪器的极限压力。如果目标层循环温度大于 $88\text{ }^{\circ}\text{C}$,以 $2\text{ }^{\circ}\text{C/min}$ 的速度将温度逐步升至目标层循环温度。静胶凝强度测试过程中,试验温度应保持在目标值 $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的范围内,试验压力应保持在目标值 $\pm 0.7\text{ MPa}$ 的范围内。

7.2.7 在达到目标层循环温度时,记录静胶凝强度值和运行时间。记录达到 48 Pa、240 Pa 静胶凝强度的时间。计算临界静胶凝强度时间(CSGSP)。记录静胶凝强度测试所用仪器的制造商、型号、养护类型。

7.3 常压养护样品的试验步骤

7.3.1 配浆后 1 min 之内,将水泥浆倒入常压稠化仪养护浆杯中。

7.3.2 如果现场采用批混作业,测试时间应包括批混时间。在批混时间内,水泥浆应置于设计温度下,压力应为常压。搅拌速度通常为 $150\text{ r/min} \pm 15\text{ r/min}$ 。如果没有批混作业,忽略此步。

7.3.3 在水泥浆从井口到达井底的时间内,将水泥浆温度逐步升至井底循环温度(BHCT)或 $88\text{ }^{\circ}\text{C}$ 中的较低值,搅拌速度 $150\text{ r/min} \pm 15\text{ r/min}$ 。在水泥浆由井底到达目标层的时间内,将水泥浆温度逐步调

整至目标层循环温度,维持温度 $5\text{ min} \pm 30\text{ s}$,搅拌速度 $150\text{ r/min} \pm 15\text{ r/min}$ 。在调整过程中,温度应维持在 $\pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的范围内。在调整过程的最后 10 min ,温度应维持在 $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的范围内。温度达到目标层循环温度或 $88\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,取出搅拌叶,用刮刀迅速搅拌水泥浆以确保水泥浆均匀。常压稠度仪内取出的水泥浆,在 5 min 之内倒入静胶凝强度仪浆杯中。

7.3.4 将水泥浆置于超声波静胶凝强度测试仪的测试釜内,该测试釜需预热至目标层循环温度或 $88\text{ }^{\circ}\text{C}$ 中较低值。将试样加压至目标层压力或仪器的极限压力。如果目标层循环温度大于 $88\text{ }^{\circ}\text{C}$,以 $2\text{ }^{\circ}\text{C/min}$ 的速度将温度逐步升至目标层循环温度。静胶凝强度测试过程中,试验温度应保持在目标值 $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的范围内,试验压力应保持在目标值 $\pm 0.7\text{ MPa}$ 的范围内。

7.3.5 在达到目标层循环温度时,记录静胶凝强度值和运行时间。记录达到 48 Pa 、 240 Pa 静胶凝强度的时间。计算临界静胶凝强度时间(CSGSP)。记录静胶凝强度测试所用仪器的制造商、型号、养护类型。

8 间歇旋转型静胶凝强度测试仪的试验方法

8.1 仪器

将水泥浆置于一个可控温、控压的压力釜内,在静态条件下进行测试。静胶凝强度(SGS)由已知几何形状的浆叶在低速下间歇旋转所需的扭矩计算而得。在静胶凝强度测试过程中,该仪器以 $0.01\text{ r/min} \pm 0.003\text{ r/min}$ 的速度转动 6 s 。间歇时间在 1 min 与 10 min 之间可调节,通常情况下每 3 min 转动一次。间歇旋转型静胶凝强度测试仪应按照制造商的说明进行校准。养护期间,水泥浆升温升压应按试验方案进行(见 8.2.4 或 8.3.3)。利用置于测试釜中央的热电偶测试水泥浆温度。温度测量系统的准确度应校准至 $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$,校准次数应不少于每 3 个月 1 次 。

8.2 增压养护样品的试验步骤

8.2.1 使用 GB/T 19139 中规定的稠化仪进行养护。

8.2.2 将水泥浆置于增压稠化仪浆杯中,按照 GB/T 19139 的方法进行稠化试验。

8.2.3 如果现场采用批混作业,测试时间应包括批混时间。在批混时间内,水泥浆应置于设计温度下,压力应为常压。搅拌速度通常为 $150\text{ r/min} \pm 15\text{ r/min}$ 。如果没有批混作业,忽略此步。

8.2.4 在水泥浆从井口到达井底的时间内,将水泥浆温度和压力逐步升至井底循环温度(BHCT)和井底静液柱压力(BHP),搅拌速度 $150\text{ r/min} \pm 15\text{ r/min}$ 。在水泥浆由井底到达目标层的时间内,将水泥浆温度和压力逐步调整至目标层循环温度和压力,维持温度和压力 $5\text{ min} \pm 30\text{ s}$,搅拌速度 $150\text{ r/min} \pm 15\text{ r/min}$ 。在调整过程中,温度应维持在 $\pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的范围内,压力应维持在 $\pm 2\text{ MPa}$ 的范围内。在调整过程的最后 10 min ,温度应维持在 $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的范围内,压力应维持在 $\pm 0.7\text{ MPa}$ 的范围内。

为安全起见,如果养护温度大于 $88\text{ }^{\circ}\text{C}$,水泥浆从增压稠化仪取出之前,关闭加热器,并尽快将水泥浆冷却至 $88\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右。假设 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 为水的沸点温度, $88\text{ }^{\circ}\text{C}$ 为安全温度。如果试验现场,水的沸点温度小于 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$,则相应地调低安全温度。

8.2.5 缓慢释放压力(大约 $1\text{ }400\text{ kPa/s}$)。从稠度仪中取出浆杯,保持浆杯垂直,以避免油混入水泥浆。拧下浆杯顶部紧锁环,从浆叶轴上取下驱动片、垫圈和橡胶隔膜盖。抽走、吸干橡胶隔膜上面的油。取下橡胶隔膜和支撑环。抽走、吸干水泥浆上面所有残留的油。如果油污严重,则废弃该水泥浆并重新开始试验。取出搅拌叶,用刮刀迅速搅拌水泥浆以确保水泥浆均匀。增压稠度仪内取出的水泥浆,在 5 min 之内倒入静胶凝强度仪浆杯中。

8.2.6 将水泥浆置于间歇旋转型静胶凝强度测试仪的测试釜内,该测试釜需预热至目标层循环温度或 $88\text{ }^{\circ}\text{C}$ 中较低值。将试样加压至目标层压力或仪器的极限压力。如果目标层循环温度大于 $88\text{ }^{\circ}\text{C}$,以 $2\text{ }^{\circ}\text{C/min}$ 的速度将温度逐步升至目标层循环温度。静胶凝强度测试过程中,试验温度应保持在目标值

±1℃的范围内,试验压力应保持在目标值±0.7 MPa的范围内。

8.2.7 在达到目标层循环温度时,记录静胶凝强度值和运行时间。记录达到 48 Pa、240 Pa 静胶凝强度的时间。计算临界静胶凝强度时间(CSGSP)。记录静胶凝强度测试所用仪器的制造商、型号、旋转速度。

8.3 常压养护样品的试验步骤

8.3.1 配浆后 1 min 之内,将水泥浆倒入常压稠化仪养护浆杯中。

8.3.2 如果现场采用批混作业,测试时间应包括批混时间。在批混时间内,水泥浆应置于设计温度下,压力应为常压。搅拌速度通常为 150 r/min±15 r/min。如果没有批混作业,忽略此步。

8.3.3 水泥浆从井口到达井底的时间内,将水泥浆温度逐步升至井底循环温度(BHCT)或 88℃中的较低值,搅拌速度 150 r/min±15 r/min。在水泥浆由井底到达目标层的时间内,将水泥浆温度逐步调整至目标层循环温度,维持温度 5 min±30 s,搅拌速度 150 r/min±15 r/min。在调整过程中,温度应维持在±3℃的范围内。在调整过程的最后 10 min,温度应维持在±1℃的范围内。温度达到目标层循环温度或 88℃时,取出搅拌叶,用刮刀迅速搅拌水泥浆以确保水泥浆均匀。常压稠度仪内取出的水泥浆,在 5 min 之内倒入静胶凝强度仪浆杯中。

8.3.4 将水泥浆置于间歇旋转型静胶凝强度测试仪的测试釜内,该测试釜需预热至目标层循环温度或 88℃中较低值。将试样加压至目标层压力或仪器的极限压力。如果目标层循环温度大于 88℃,以 2℃/min 的速度将温度逐步升至目标层循环温度。静胶凝强度测试过程中,试验温度应保持在目标值±1℃的范围内,试验压力应保持在目标值±0.7 MPa 的范围内。

8.3.5 在达到目标层循环温度时,记录静胶凝强度值和运行时间。记录达到 48 Pa、240 Pa 静胶凝强度的时间。计算临界静胶凝强度时间(CSGSP)。记录静胶凝强度测试所用仪器的制造商、型号、旋转速度。

附 录 A
(资料性附录)
临界静胶凝强度

减少油井由于水泥胶凝强度发展而造成压力降低(失重)这一危险期的方法之一,即是缩短水泥浆达到能抵抗流体入侵的静胶凝强度的时间。

井下环空中的流体静液柱压力可以平衡地层流体的潜在流动(地层流动是地层孔隙压力的函数)。使用可固化流体时,例如,随着水泥浆由液态转变为凝胶态,最后转变为固态,环空中平衡地层孔隙压力的有效静液柱压力会降低,并最终达到一个平衡点,即地层的孔隙压力等于由于水泥浆胶凝强度发展逐渐降低的静液柱压力加上环空中存在的其他流体产生的静液柱压力。该平衡状态被称之为临界静胶凝强度。一旦超过该强度,水泥的胶凝强度的进一步增加,井筒压力处于欠平衡状态导致侵入。基于水泥临界静胶凝强度的流体运移计算模型是井筒几何形状、活跃层上方水泥柱的长度、水泥浆上方的流体静液压、水泥浆密度和活跃层地层孔隙压力的一个函数。该临界静胶凝强度在业内也被称为“临界壁面剪应力”。临界静胶凝强度(CSGS)可使用公式(A.1)进行计算,式中临界静胶凝强度用 X_{CSGS} 来表示,单位为帕斯卡(Pa):

$$X_{\text{CSGS}} = 0.002\ 5 P_{\text{f0}} / (L / D_{\text{eff}}) \quad \text{.....(A.1)}$$

式中:

0.002 5——转换因数;

P_{f0} ——流体过平衡压力,单位为帕斯卡(Pa);

L ——水泥柱长度,单位为米(m);

D_{eff} ——井筒有效直径,单位为厘米(cm)。

注:浅水层环空流体静液柱压力减去孔隙压力即为流体的过平衡压力。在没有隔水管的深水环境中,计算环空流体静压力时也将泥线以上海水静压包括在内。井筒有效直径等于裸眼直径减去套管直径。