



中华人民共和国石油天然气行业标准

SY/T 6302—2009

代替 SY/T 6302—1997

压裂支撑剂充填层短期导流 能力评价推荐方法

Recommended practices for evaluating short
term proppant pack conductivity
(API RP 61: 1989, IDT)
(API RP 61: 1989, IDT)

2009—12—01 发布

2010—05—01 实施

国家能源局 发布

目 次

前言 II

1 总纲 1

2 推荐的导流能力实验 1

附录 A（资料性附录） 液压控制 13

附录 B（资料性附录） 支撑剂体积密度的测量 15

附录 C（资料性附录） 单位换算 16

前 言

本标准等同采用了 API RP 61: 1989《压裂支撑剂充填层短期导流能力评价推荐方法》(英文版), API RP 61: 1989 引用了 API RP 27: 1956《孔隙介质渗透率测试推荐方法》(英文版)中的式(34)。

本标准代替 SY/T 6302—1997《压裂支撑剂充填层短期导流能力评价推荐方法》。

本标准在采用 API RP 61: 1989 时进行了勘误。这些技术性勘误用垂直双线标识在它们所涉及的条款的空白处。

本标准等同翻译 API RP 61: 1989。

为了便于使用,本标准还做了下列编辑性修改:

- “本 API 标准”一词改为“本标准”;
- 用小数点“.”代替作为小数点的逗号“,”;
- 删除 API 标准的前言和附录 D。

本标准的附录 A、附录 B 和附录 C 均为资料性附录。

本标准由采油采气专业标准化委员会提出并归口。

本标准起草单位:中国石油勘探开发研究院廊坊分院压裂酸化技术服务中心。

本标准主要起草人:朱文、蒙传幼、崔明月。

本标准所代替标准的历次版本发布情况为:

- SY/T 6302—1997。

压裂支撑剂充填层短期导流能力评价推荐方法

1 总纲

1.1 目的

本方法的目的是提出实验室条件下评价压裂支撑剂充填层短期导流能力所采用的统一的实验设备、实验条件、实验程序。本方法可用来评价、比较实验室条件下支撑剂充填层的导流能力,但并不能获得井下油藏条件下的支撑裂缝导流能力的绝对值。关于微粒问题、地层温度、岩石硬度、井下液体、时间以及其他因素超出了本方法涉及的范围。

1.2 实验条件

用去离子水或蒸馏水作为实验液体,评价支撑剂材料的不同特性。一般来说,环境温度为 24℃。其他液体也可作为实验液体评价支撑剂材料的各种特性,但实验结果可能有所区别。其他液体或以不同的温度条件进行支撑裂缝导流能力评价是有意义的。这类实验可以在供货方和用户协议的情况下进行。

1.3 实验程序

按照此程序进行实验时,需在试样上加足够长时间的闭合压力以使支撑剂充填层达到半稳态(参照 2.6)。在一定的闭合压力下使液体流过支撑剂充填层,在不同闭合压力条件下液体流过支撑剂充填层时,要测量支撑剂充填缝宽、压差和流量。计算出支撑剂充填层导流能力和渗透率。每个闭合压力下可进行三种流量实验,实验结果是三种流量实验的平均值。在要求的流量和室温条件下,不能存在非达西流或惯性影响。一种闭合压力下三个流量实验做完后,可将闭合压力值增至另一个值,等候一定的时间以使支撑剂充填层达到半稳态,再用三种不同的流量做实验,取得所需的数据,确定在此条件下支撑剂充填层的导流能力。重复此程序直到设计的闭合压力和流量全部实验完毕。

2 推荐的导流能力实验

2.1 实验介质

用去离子水或蒸馏水作为实验液体,在层流(达西流)条件下评价支撑剂充填层导流能力。要准确测量导流能力,层流条件下的单相流是关键的条件。

2.2 设备和材料

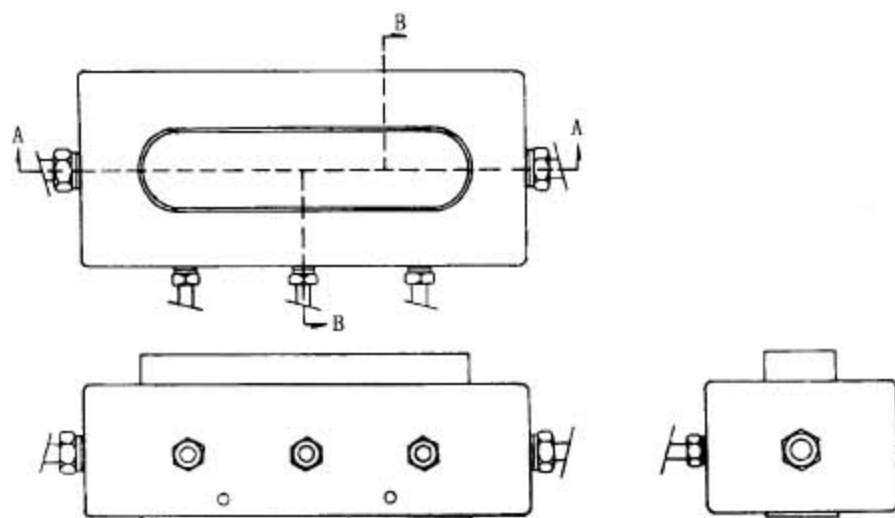
实验应用下列设备和材料。

2.2.1 导流室

导流室应为线性流设计,支撑剂铺置面积为 64.5cm²。导流室的图解详见图 1、图 2、图 3 和图 5。上下活塞、金属板、导流室需用 4Cr13 不锈钢材料制作。图 4 是液体流经导流室的流程示意图。导流室滤网可用不锈钢颗粒压制而成,厚度为 0.318cm。进口滤网滞留颗粒的粒径为 3μm~10μm,其他所有的测压孔和进口的颗粒粒径为 65μm。

2.2.2 液压框架

液压框架可以提供的力为 667200N。为使压力分布均匀,两压塞应相互保持平行。液压源应能在延续的时间内保持需要的闭合压力(±0.5%或±140kPa)。在 64.5cm²的导流室上加载的速度为 3500 kPa/min。该实验可应用一台适当规模的水压机,另配置一台补偿压力的液压泵。也可以用一台常规的气/油增压系统代替液压泵。附录 A 提供了制造和改进现有液压框架的资料,以便水压机与气/油增压系统连用。满足上述技术指标的材料试验机均可作为液压框架使用。



操作条件:

支撑剂填充层厚度 0.25cm~1.27cm;

测试面积 64.5cm²;

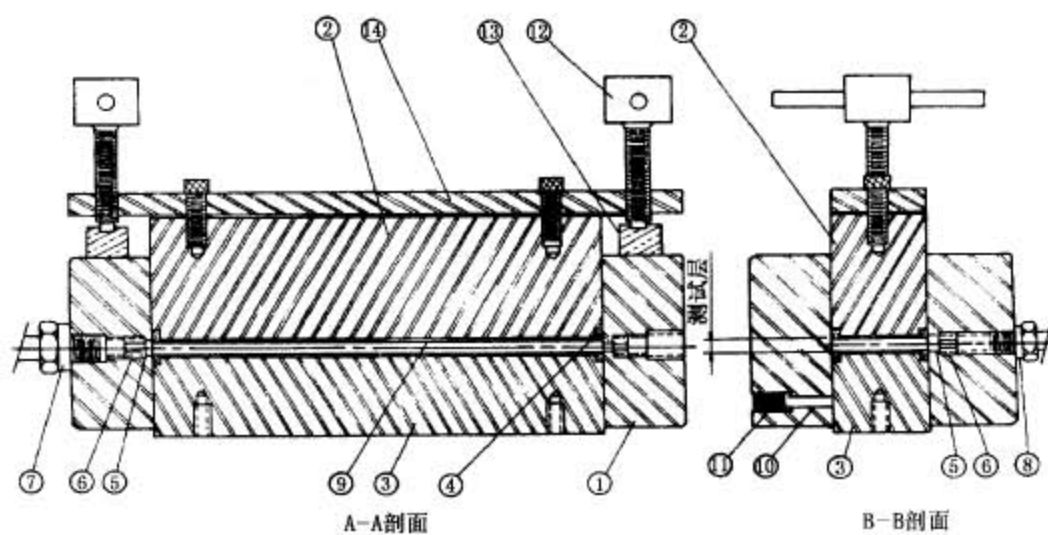
最大载荷力 667200N;

最高温度 204℃;

内部最大压力 3500kPa。

剖面 A-A 和 B-B 见图 2。

图 1 API 导流室示意图



支撑剂层厚度范围为 0.25cm~1.27cm。底活塞位置要适当, 以使各测试口与测试层连通。

注: 标号说明见图 3。

图 2 API 导流室卸具剖面图

2.2.3 支撑剂充填厚度测量设备

用标度指示盘、测微计、线性位移传感器 (LVDT) 或线性电动势测量仪测量支撑剂充填厚度, 分辨精度可达 0.0025cm, 也可用更精密的仪器。

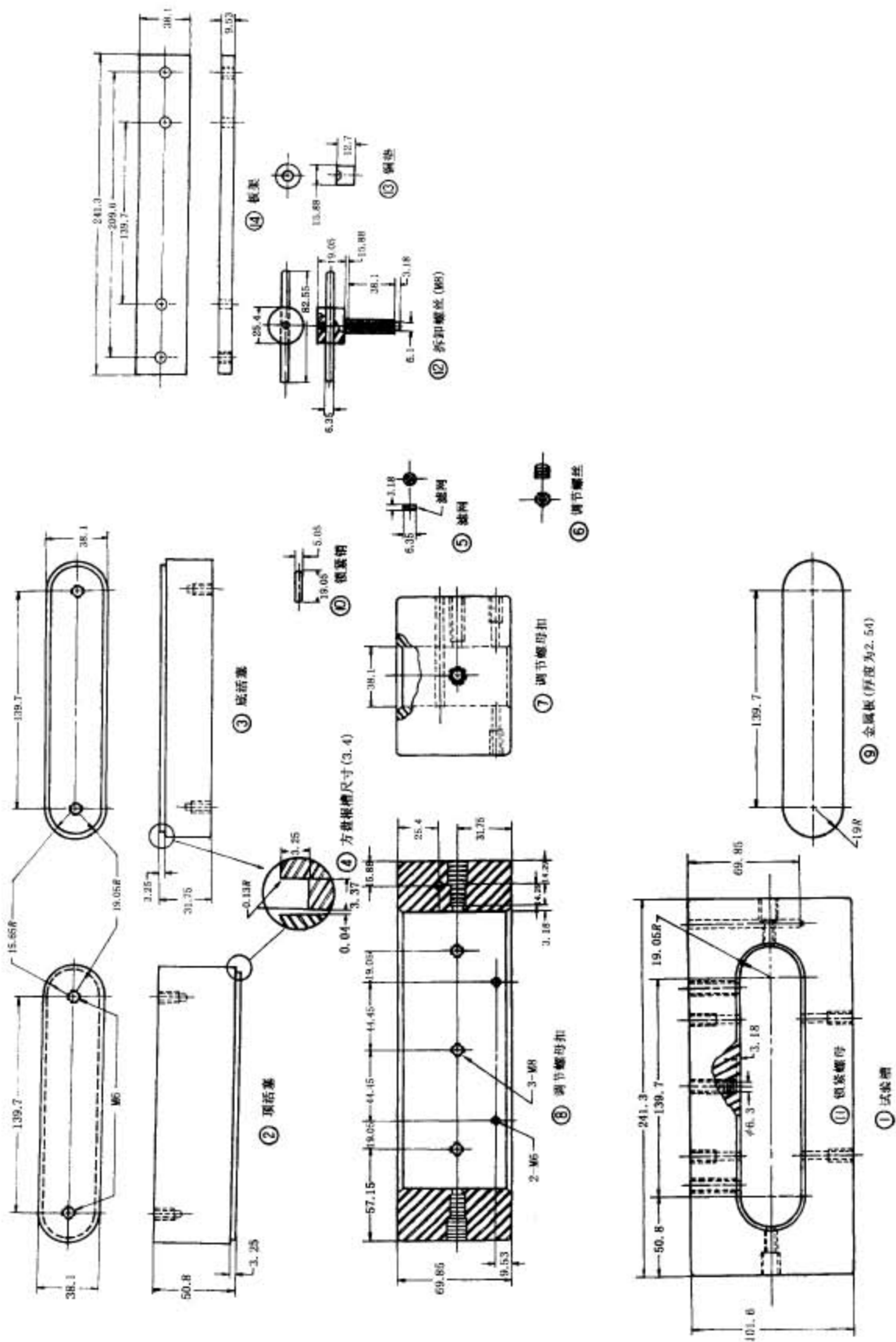


图 3 API 导流室配件示意图

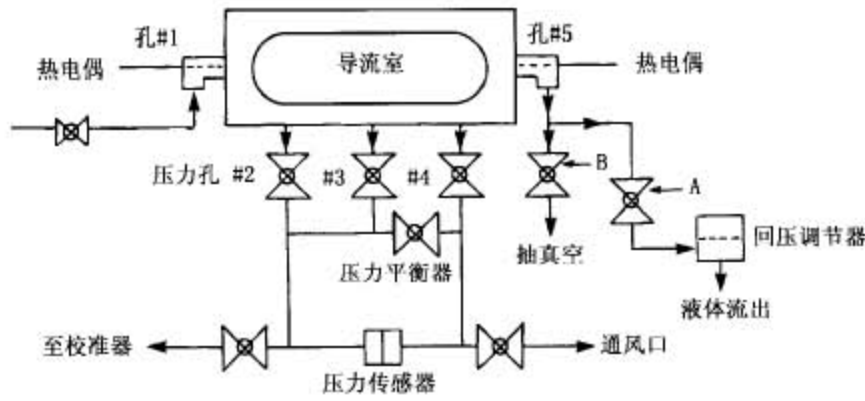
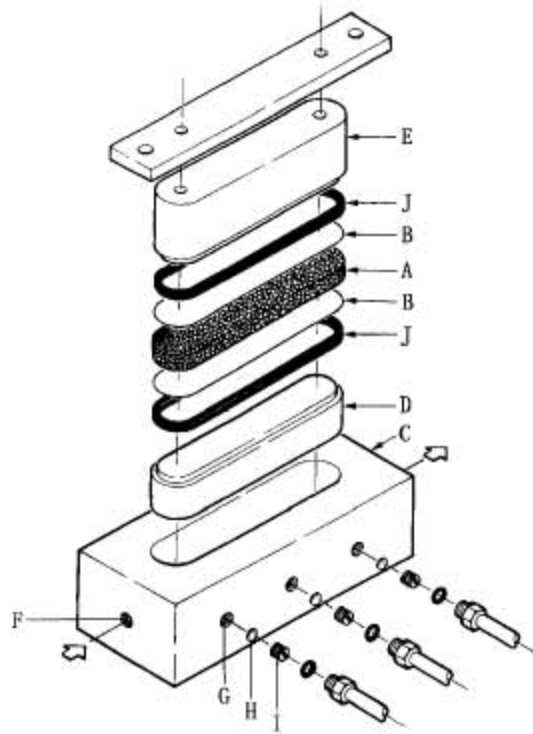


图 4 支撑剂导流能力实验流程图



- | | |
|--|-------------|
| A—支撑剂填充层 (17.78cm×3.81cm×W _i), cm; | F—测试液体进/出口; |
| B—金属板; | G—压差输出口; |
| C—导流室主体; | H—金属滤网; |
| D—下活塞; | I—调节螺丝; |
| E—上活塞; | J—方型密封圈 |

图 5 API 支撑剂填充层导流能力实验装置详细示意图

2.2.4 实验液体驱替系统

应以很稳定的流量 1mL/min~10mL/min ($\pm 1\%$) 驱替实验液体 (去离子水或蒸馏水), 有些泵可以达到这一技术指标, 例如恒速泵类。另外, 可以用可控压力气源以稳定的流量驱替实验液体, 还可以借助活塞、气囊存储器或其他更有效的手段完成实验液体的驱替。一些恒速泵需要配置脉冲压力阻尼器。在测量压差和流量期间的压力波动应控制在 2.0% 以下。每个实验室要确定使用脉冲阻尼器的最好技术和载荷压力 (如使用储能气囊或类似技术), 如果压力峰值很高 (可能是泵的问题, 也可能是流动系统中有气泡), 该系统应经过校正后再使用。

2.2.5 压差计

测量导流室上的压差需要灵敏度很高的仪器。量程为 0kPa~7kPa 的压差传感器可以满足此项要求。压差传感器应能测量出任何一点 $\pm 5\%$ 的压差, 如果测得的压差低于 0.7kPa, 可能需要更精确的压差传感器, 参看 2.2.11 的注。

图 4 是用水做校正实验时管线连接图。校正实验应用实际实验液体, 液体应接触测压差的两个挡板。

注: 大多数制造厂的压差传感器是按满量程确定精确度。量程为 0kPa~7kPa 的压差传感器精度为 $\pm 0.5\%$ 。含义为每个读数可精确到 $\pm 0.035\text{kPa}$ 。因为一般 0.07kPa 的读数较常见, 精确度只有 50%。实验室内经验证明, 如果校正工作好, 这类压差传感器即使在读数为 0.07kPa 时, 准确度可达 $\pm 5\%$ (或 $\pm 0.0035\text{kPa}$)。因此, 测量的压差只有全量程的 10% 时, 校正工作尤其重要。

2.2.6 回压调节器

回压调节器应能够保持比实验液体 (去离子水) 蒸汽压力高 350kPa ($\pm 5\%$) 的压力。

2.2.7 天平

天平称量至少为 100g, 精度 0.1g 或更高。

2.2.8 实验液体

实验液体应是刚脱气 [即温度为 24°C , 3.3kPa (25 mm 水银柱), 脱气 1h] 的去离子水或蒸馏水, 并测得实验温度条件下的实验液体的黏度和密度。由表 3 可得到水的黏度和密度值。

2.2.9 支撑剂

导流能力测试可在相当于充填厚度 0.64cm 的体积 (未加载) 或以测试装置内单位面积质量为 $9.76\text{kg}/\text{m}^2$ 铺置浓度的条件下进行。但是, 对比实验应以相等的支撑剂材料体积作基准, 而不是相等质量。对比实验所需的支撑剂用量取决于支撑剂的体积密度。支撑剂体积密度参见附录 B 确定。

2.2.10 温度控制

导流室和支撑剂充填部分应保持在 $24^\circ\text{C} \pm 3^\circ\text{C}$ 室温条件下。测量进出口实验液体的温度, 这些温度的平均值作为该实验的温度 (见表 4 和表 5), 根据这个实验温度可以从表 3 中查得实验液体的黏度。

2.2.11 载荷测量装置

在液压柱塞和框架平台之间应有一温度补偿的电子式力传感器, 用于确定施加在导流室上的闭合压力, 这类装置和液压计相比较应为首选方法。

注: 如果液压计被用来确定施加闭合压力, 配合使用辅助性施加闭合压力的方法 (气/油增压泵), 应确保连通液压计的液体不受活塞回程滞留的影响, 导致闭合压力的计算误差。

2.3 设备的校正

2.3.1 液体流动线路上的压差计安装好后先进行校正, 以后每次实验时都要认真地检验, 如 2.2.5 所述。设备其他部分初次使用要检查, 以后至少每年检查一次。液压载荷测试装置应以压力环或作为国家计量溯源的力传感器校正。用块规来校正盘式指示器、千分尺、线性位移传感器 (LVDT) 和线性电位器等。用精确的天平、量器、秒表测试恒速泵。高量程的压力计和传感器应做静重实验。斜管压力计和水柱可对低量程的压力传感器校正。使用传感器量程的重复性和线性好的部分。另外, 建议该系统中的每一个部分应有备用的机械校正和测量装置。

2.3.2 实验支撑剂样品之前, 在没有装入支撑剂时, 测量每个闭合压力值下的导流室的垂向尺寸 (精确到 0.0025cm)。将这些值作为测量支撑剂充填厚度的基础值。

2.4 渗漏实验

2.4.1 液压载荷框架

液压系统包括管线、接头、泵, 初次使用时应仔细检查, 以后应定期检查, 确保无渗漏。可将适当尺寸高强度的材料放入水压机平板之间 (最小受力面积为 64.5cm^2), 施加最大载荷, 关机, 然后

观察压力或载荷在 30min 以内变化是否大于最大读数的 $\pm 2\%$ 。如果压力和载荷有明显的变化, 检查所有的管线、接头, 看是否有渗漏。如果管线没有渗漏的迹象, 那么水压机或控制阀可能有内漏。

2.4.2 实验液体系统

实验液体系统由泵、管线、接头和支撑剂充填层短期导流能力实验装置组成。在每次实验之前应做渗漏检验。做渗漏检验时, 导流室应至少铺上单层的支撑剂。

注: 在两平板间没有支撑剂时, 方密封圈和下游的设备都不能进行测试。

在导流室上至少加 3500kPa 闭合压力, 在 24℃ 下使整个系统抽真空达到 3.3kPa (25mm 水银柱), 关上真空泵, 观察该系统能否稳压。5min 内该系统的压力变化不应大于 0.13kPa (1mm 水银柱)。

注: 如果管线绝对压力开始低于 3.1kPa (23mm 水银柱) 时, 液体进入抽真空的系统中, 真空泵一旦关掉, 当水蒸气出现时 (24℃, 2.96kPa, 22.2mm 水银柱), 压力会上升。

2.5 导流室的准备

做支撑剂充填层导流能力实验时, 应采用下列步骤组装导流室。

2.5.1 液体进口 (65 μ m) 和出口 (3 μ m~10 μ m) (见图 4 中 1 号孔、5 号孔) 及每一个测压孔放入一个不锈钢的滤网。固定螺丝应做调整, 以免滤网与导流室表面贴在一起。每次实验后应更换滤网以免被压碎的支撑剂堵塞, 导致实验液体流过导流室时压力上升或不稳。

注: 在加压情况下实验支撑剂, 压力增高至一定程度时, 大部分支撑剂会被压碎, 出口滤网 (5 号孔) 常常被压碎的支撑剂完全堵塞, 使液体不能流过导流室。如果发生或预计要发生这种情况, 出口的滤网应除去。滤网口用支撑剂充填。可将导流室立置, 出口向下, 倒少量的支撑剂在滤网口中, 用冲子或钝器压实。

继续这样的填入直到此口填满压实。如果使用这种方法, 压碎的材料与实验液体一起流出导流室, 容易受此类压碎材料损害的设备, 像回压调节器等, 不应直接与导流室出口相连。另外, 回压管线上接一个增压调节器较为安全。

2.5.2 将带有方形密封圈的底部活塞放入导流室内。

注: 在导流室底部的斜面上涂上少量的润滑油脂有助于底部活塞和方形密封圈的放入。

2.5.3 将一片金属板放在底部活塞的上面, 金属板应很平以便支撑剂铺层有一个均匀的截面。为保证均匀, 需沿金属板的长度选三点, 用深度规测量从金属板到导流室顶部的深度。金属板板面到导流室顶部间测量的深度之差不应大于 0.0254cm。

2.5.4 用下述方法之一给出导流室加入所需的支撑剂量 [用 b) 叙述的方法对支撑剂进行比较]。

a) 单位面积的质量 (支撑剂铺置浓度, kg/m²) 计算所需的支撑剂用量, 可按式 (1) 计算。

$$W_p = A_1 \cdot C \quad \dots\dots\dots (1)$$

式中:

W_p ——支撑剂质量, 单位为克 (g);

C ——支撑剂铺置浓度, 单位为千克每平方米 (kg/m²);

A_1 ——计算系数, $A_1 = 6.452 \times 10^{-3} \text{m}^2$ 。

注意: 为得到最好的重复性, 建议未加载的支撑剂最大充填宽度为 1.3cm; 最小充填宽度为 0.25cm。

做实验时, 如果未加载的充填宽度偏离建议范围, 有可能损害密封圈和导流室。为了确定支撑剂充填裂缝宽度基准, 实验时应大于建议的未加载支撑剂的最小充填宽度。未加载的支撑剂充填宽度按式 (2) 计算:

$$W_t = 0.100C/\rho \quad \dots\dots\dots (2)$$

式中:

W_t ——支撑剂充填厚度, 单位为厘米 (cm);

C ——支撑剂铺置浓度, 单位为千克每平方米 (kg/m²);

ρ ——支撑剂体积密度（参见附录 B），单位为克每立方厘米（g/cm³）。

b) 未加载支撑剂充填宽度是 0.64cm，有两种方法获得导流数据。

方法 1：导流室内装上 41.0cm² ± 0.1cm² 支撑剂，用式（3）计算支撑剂的质量。

$$W_p = 41.0\rho \quad \dots\dots\dots (3)$$

式中：

W_p ——支撑剂质量，单位为克（g）；

ρ ——支撑剂体积密度（参照附录 B），单位为克每立方厘米（g/cm³）。

方法 2：在最初的未加载的支撑剂充填宽度为 0.64cm 时，导流能力数据可按 2.5.4a) 方法所产生两套导流能力数据进行插值计算。未加载支撑剂充填宽度为 0.64cm 时的支撑剂铺置浓度可用式（4）计算。

$$C = 6.4\rho \quad \dots\dots\dots (4)$$

在要求的闭合压力条件下导流能力按式（5）计算。

$$kW_f = kW_{f1} + (kW_{f2} - kW_{f1}) \left(\frac{C - C_1}{C_2 - C_1} \right) \quad \dots\dots\dots (5)$$

式中：

kW_f ——闭合压力条件下的支撑剂导流能力，单位为平方微米厘米（μm²·cm）（未加载情况下的支撑剂充填厚度为 0.64cm）；

kW_{f1} ——装载了 C_1 支撑剂充填层的导流能力，单位为平方微米厘米（μm²·cm）；

kW_{f2} ——装载了 C_2 支撑剂充填层的导流能力，单位为平方微米厘米（μm²·cm）；

C_1 ——实验 1 时支撑剂铺置浓度，单位为千克每平方米（kg/m²）；

C_2 ——实验 2 时支撑剂铺置浓度，单位为千克每平方米（kg/m²）。

为尽量减少插入误差，实验 1 和实验 2 支撑剂铺置浓度相差不能大于 2.44kg/m²， C 应在 C_1 和 C_2 之间。在适当闭合压力情况下，支撑剂充填层宽度可用计算导流能力一样的步骤按式（6）来计算：

$$W_f = W_{f1} + (W_{f2} - W_{f1}) \left(\frac{C - C_1}{C_2 - C_1} \right) \quad \dots\dots\dots (6)$$

式中：

W_f ——适当闭合压力情况下支撑剂充填层厚度，单位为厘米（cm）（未加载时支撑剂充填宽度为 0.64cm）；

W_{f1} ——装有 C_1 支撑材料的支撑剂充填层厚度，单位为厘米（cm）；

W_{f2} ——装有 C_2 支撑材料的支撑剂充填层厚度，单位为厘米（cm）。

2.5.5 用一刮板形状的工具将实验用的支撑剂充填层刮平（见图 3），不能用振动敲击办法，否则较细的支撑剂会沉到下部。

2.5.6 将另外一片金属板放在刮平的支撑剂充填材料上面，需十分注意，不然会破坏支撑剂充填铺层。放在金属板中间由薄片做成的“扶手”可用做确定支撑剂材料层上金属板的位置，一旦该金属板的位置固定，慢慢除去这“扶手”，但要注意不要搞乱了支撑剂材料。

2.5.7 将带有方形密封圈的上活塞放入导流室内，用少量油润滑密封环，用手慢推下直到接触金属板。

2.5.8 将安装好的导流室放在液压框架的两平行板之间，提升下平板加液压，直到闭合压力达到启动压力 6900kPa，加载速率为 3500kPa/min。

2.5.9 关闭进口阀和出口阀 A（见图 4），在 24℃ 下将导流室抽真空到 3.3kPa（25mm 水银柱），直

到排空导流室和转换线路中的所有的气体。慢慢打开进口阀，脱气的实验液体到导流室，直到所有管路全充满为止。关闭真空阀 B，慢慢将实验液体加压到工作压力（或至少 69kPa），通过传感器上的泄流孔确保传感器和与之相连接的管路中没有气体。

2.5.10 检验导流室的接头和相连的管路中是否有泄漏，若有泄漏则排除泄漏但不要破坏支撑剂铺层。

2.5.11 检查上下活塞周围有无泄漏，如果有泄漏，实验应终止，导流室需重新充填，泄漏问题应立即解决（参照 2.5.2）。

2.5.12 慢慢打开出口阀 A，调整回压（如果用回压）。

2.5.13 用下列方法检查支撑剂充填层是否均匀。

a) 在导流室的每一端测量充填层的宽度，如果两端测量宽度误差大于 5%，说明充填层不均匀，终止实验，重新充填新材料。

b) 将实验液体以恒速注入导流室，比较 2 号孔和 3 号孔间与 3 号孔和 4 号孔间的压差，如压差相差大于或等于 5%，表明支撑剂充填层不均匀，应中止实验，重新充填（参照 2.5）。

注意：2 号孔和 3 号孔间的压差，可通过在 2 号孔和 4 号孔间的压差中减 3 号孔和 4 号孔间的压差方法计算出来（参照图 4）。

2.6 实验参数

表 1 和表 2 列出了建议的闭合压力、流量、石英砂和高强度支撑剂在闭合压力下达到半稳态承压的时间。以 3500kPa/min 的速率增加闭合压力。

2.7 计算

2.7.1 API RP 27: 1956 中的式 (34) 可用来计算支撑剂充填层与液体在层流（达西流）条件下的渗透率，见式 (7)。

$$k = \frac{99.998\mu \cdot Q \cdot L}{A \cdot \Delta p} \quad \dots\dots\dots (7)$$

式中：

k ——支撑剂充填层渗透率，单位为平方微米 (μm^2)；

μ ——实验温度条件下实验液体的黏度，单位为毫帕秒 ($\text{mPa} \cdot \text{s}$)；

Q ——流量，单位为立方厘米每秒 (cm^3/s)；

L ——测压孔之间的长度，单位为厘米 (cm)；

A ——流通面积，单位为平方厘米 (cm^2)；

Δp ——压差（上游压力减去下游压力），单位为千帕 (kPa)。

表 1 石英砂支撑剂实验参数

闭合压力 kPa (psi)	流量 cm^3/min	各种砂粒径在一规定压力所需的承压时间 h				
		1700 μm ~850 μm	850 μm ~425 μm	600 μm ~300 μm	425 μm ~212 μm	212 μm ~106 μm
6900 (1000)	2.5 5.0 10.0	1.0	0.25	0.25	0.25	0.25
13800 (2000)	2.5 5.0 10.0	1.5	0.25	0.25	0.25	0.25
27600 (4000)	2.5 5.0 10.0	1.5	1.00	0.25	0.25	0.25
41400 (6000)	1.25 2.5 5.0	1.5	1.00	0.25	0.25	0.25
55200 (8000)	1.0 2.0 4.0	1.5	1.00	0.75	0.75	0.75
69000 (10000)	1.0 2.0 4.0	1.5	1.00	1.00	1.00	1.00

注：用 3500kPa/min 的加载速率达到所需压力，闭合压力等于施加在导流室上的压力减去实验液体压力。

表 2 各种粒径高强度支撑剂实验参数

闭合压力 kPa (psi)	流量 cm ³ /min	承压时间 h
6900 (1000)	2.5 5.0 10.0	0.25
13800 (2000)	2.5 5.0 10.0	0.25
27600 (4000)	2.5 5.0 10.0	0.25
41400 (6000)	2.5 5.0 10.0	0.25
55200 (8000)	2.5 5.0 10.0	0.25
69000 (10000)	2.5 5.0 10.0	0.25
82700 (12000)	2.5 5.0 10.0	0.25
96500 (14000)	2.5 5.5 10.0	0.25

注：用 3500kPa/min 的加载速率达到所需压力，闭合压力等于施加在导流室上的压力减去实验液体压力。

当支撑剂充填层的截面形状像裂缝中的一样是个长方形时，按式 (8) 计算：

$$A = W \cdot W_i \quad \dots\dots\dots (8)$$

式中：

A——液体流动的截面积，单位为平方厘米 (cm²)；

W——导流室支撑剂充填宽度，单位为厘米 (cm)；

W_i——支撑剂充填厚度，单位为厘米 (cm)。

可重新整理式 (7)，以便可以计算支撑剂充填层的渗透率和导流能力。

支撑剂充填层的渗透率按式 (9) 计算：

$$k = \frac{99.998\mu \cdot Q \cdot L}{W \cdot \Delta p \cdot W_i} \quad \dots\dots\dots (9)$$

支撑剂充填层的导流能力按式 (10) 计算：

$$kW_i = \frac{99.998\mu \cdot Q \cdot L}{W \cdot \Delta p} \quad \dots\dots\dots (10)$$

2.7.2 当决定使用 API 导流室和其程序时，可用下列资料和公式。

a) 支撑剂渗透率按式 (11) 计算：

$$k = \frac{5.555\mu \cdot Q}{\Delta p \cdot W_i} \quad \dots\dots\dots (11)$$

式中：

k——充填层的渗透率，单位为平方微米 (μm²)；

μ——实验温度条件下实验液体的黏度 (参照表 3)，单位为毫帕秒 (mPa·s)；

Q——流量，单位为立方厘米每秒 (cm³/s)；

W_i——支撑剂充填厚度，单位为厘米 (cm)；

Δp——压差 (上游压力减去下游压力)，单位为千帕 (kPa)。

b) 支撑剂充填层的导流能力按式 (12) 计算：

$$kW_i = \frac{5.555\mu \cdot Q}{\Delta p} \quad \dots\dots\dots (12)$$

式中:

kW_f ——支撑剂充填层的导流能力,单位为平方微米厘米 ($\mu\text{m}^2 \cdot \text{cm}$);

μ ——实验温度条件下实验液体黏度(参照表3),单位为毫帕秒 ($\text{mPa} \cdot \text{s}$);

Q ——流量,单位为立方厘米每分 (cm^3/min);

Δp ——压差(上游压力减下游压力),单位为千帕 (kPa)。

注:式(11)和式(12)中常数计算用的尺寸如下:

导流室支撑剂充填宽度, $W = 3.81\text{cm}$;

2号孔和4号孔两测压孔间的距离 $L = 12.70\text{cm}$ 。

单位换算参照附录C。

2.8 数据报告

数据表见表4和表5。如果用方法2计算未加载支撑剂充填层厚度为0.64cm内插数据时,每一次支撑剂充填层短期导流能力实验都应有两个数据表。在支撑剂充填层短期导流能力递减表中应记录有未加载的支撑剂充填层宽度为0.64cm时的内插数据(参照表5)。

表3 不同温度下水的黏度和密度*

温度 ℃	黏度 $\text{mPa} \cdot \text{s}$	密度 g/cm^3
20.0	1.002	0.9982
21.0	0.978	0.9980
22.0	0.955	0.9978
23.0	0.932	0.9975
24.0	0.911	0.9973
25.0	0.890	0.9970
26.0	0.870	0.9968
27.0	0.851	0.9965
38.0	0.678	0.9930
49.0	0.556	0.9885
60.0	0.466	0.9832
71.0	0.399	0.9775
82.0	0.346	0.9705
93.0	0.304	0.9633
104.0	0.270	0.9554
116.0	0.240	0.9464
127.0	0.217	0.9376
138.0	0.198	0.9281
149.0	0.181	0.9182

表 3 (续)

^a 表中数据由下列公式计算得出:

水密度的计算 (-30℃~150℃):

$$\rho' = (0.99983952 + 0.016945176t - 7.9870401 \times 10^{-6}t^2 - 4.6170461 \times 10^{-8}t^3 + 0.10556302 \times 10^{-9}t^4 - 0.28054253 \times 10^{-12}t^5) / (1 + 0.01687985t)$$

式中:

ρ' ——水的密度,单位为克每立方厘米 (g/cm³);

t ——平均液体温度,单位为摄氏度 (℃)。

水黏度的计算: (20℃~150℃):

$$\mu = e^x$$

式中:

μ ——水黏度,单位为毫帕秒 (mPa·s)。

$e = 2.7182818$ 。

$$x = (60.359768 - 2.9570089t - 0.0024246t^2) / (105 + t)$$

表 4 支撑剂充填层短期导流能力实验数据

标准试验筛网											
支撑剂类型: _____				标准试验筛网	上支撑剂质量	百分比					
				μm	g	%					
颗粒尺寸: _____ μm											
实验条件:				_____	_____	_____					
				_____	_____	_____					
体积密度: _____ g/cm^3				_____	_____	_____					
装置实验面积: _____ cm^2				_____	_____	_____					
实验液体: _____				_____	_____	_____					
支撑剂铺置浓度: _____ kg/m^2				_____	_____	_____					
支撑剂质量: _____ g											
总共 _____											
压差和流量											
压力 kPa	充填层宽度 ^a cm			Δp_1 kPa	Q_1 cm^3/min	Δp_2 kPa	Q_2 cm^3/min	Δp_3 kPa	Q_3 cm^3/min	实验液 体温度 ℃	实验液 体黏度 $\text{mPa} \cdot \text{s}$
	$W_{\text{左}}$	$W_{\text{右}}$	$A_{\text{右}} W$								
6900											
13800											
27600											
41400											
55200											
69000											
82700											
96500											

^a $W_{\text{左}}$ 和 $W_{\text{右}}$ 是实验装置每一端测量的支撑剂充填层宽度。

表 5 支撑剂充填层短期导流能力递减表

支撑剂类型: _____				
颗粒尺寸: _____ μm				
支撑剂铺置浓度: _____ kg/m^2				
体积密度: _____ g/cm^3				
平均温度: _____ $^{\circ}\text{C}$				
液体类型: _____				
最初充填层宽度 ^a : _____ cm				
压力 kPa	平均宽度 cm	平均导流能力 $\mu\text{m}^2 \cdot \text{cm}$	渗透率 ^b μm^2	液体黏度 $\text{mPa} \cdot \text{s}$
6900				
13800				
27600				
41400				
55200				
69000				
82700				
96500				
^a 如果这些数据是由其他实验数据内推到最初充填宽度为 0.64cm 的。请在最初充填宽度为 0.64cm 旁边注上内推。最初充填宽度用式 (2) 计算。 ^b 通过平均导流能力和平均宽度计算渗透率: $k = k W_i / W_f$				

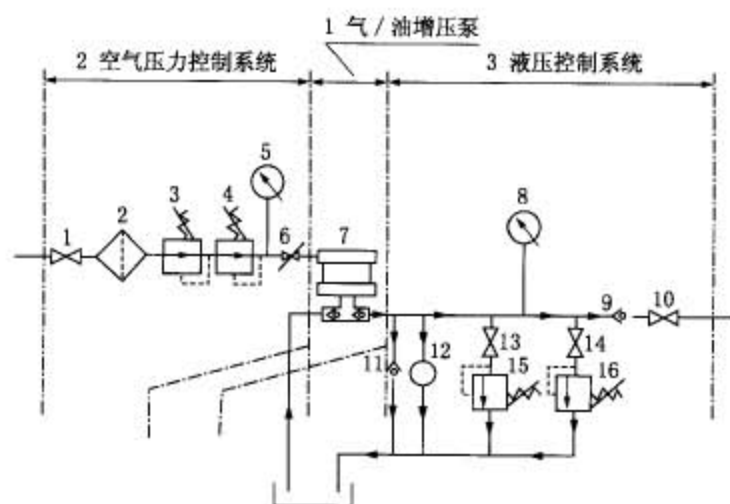
附录 A

(资料性附录)

液 压 控 制

气/油压控制部分可使本系统调到最大工作压力 41000kPa。如果用其他设备做实验，请咨询设备生产厂家，以便确定合适的压力范围和连接系统。

以下是本控制系统的三个部分：气/油增压泵、气压控制系统、液压控制系统，图 A.1 是本控制系统的示意图。



1—进口阀；2—空气过滤器；3—空气调节器；4—空气调节器；5—气压表；6—速度控制阀；7—增压泵；8—压力表；9—流量控制阀；10—截止阀；11—压力释放阀；12—压力释放保险片；13—截止阀；14—截止阀；15—液压调节器；16—液压调节器

图 A.1 气/油增压泵、气压控制系统和液压控制系统示意图

A.1 气/油增压泵（见图 A.1 中序号 7）

增压泵应达到 1 : 60 的压力比，应配备一个低气压控制器，以便能在低于 138kPa 压力下有效地操作。这一改进使得全部循环（启动/停止）和控制阀系统与调节驱动柱塞的空气压力无关。

A.2 气压控制系统

气压控制系统包括（以下序号指在图 A.1 中的序号）：

- 1——进口阀。
 - 2——空气过滤器。
 - 3——空气调节器，可调节。
 - 4——空气调节器，不可调，将压力定在最大许可液压除以增压比。
- 示例： $36544\text{kPa}/60 = 609\text{kPa}$ ，这是一个非常安全的设备。
- 5——气压表，0kPa~1000kPa。
 - 6——速度控制阀，控制增压泵的速度。

A.3 液压控制系统

液压控制系统包括（以下序号指在图 A.1 中的序号）：

- 7——系统额定最大工作压力为 41400kPa
- 8——压力表或传感器，0kPa~50000kPa。
- 9——流量控制阀。
- 10——与压力框架的液压油缸相连的截止阀。
- 11——压力释放阀或溢流阀设定为 37233kPa，以便保证安全。
- 12——压力释放保险片设定压力为 38612kPa，以便保证安全。
- 13，14——与低或高量程液压调节器相连的截止阀。
- 15，16——液压调节器或溢流阀，低量程 520kPa~5200kPa，高量程 4200kPa~42000kPa，这些调节器用以补偿漏压。

附 录 B
(资料性附录)
支撑剂体积密度的测量

B.1 设备及材料

测量支撑剂样品体积密度需要下列物品：

- a) 精确度为 0.01g 的天平。
- b) 100mL 容积的量瓶 (100mL = 100cm³，温度为 24℃ 时)。
- c) 干燥的支撑剂样品。
- d) 大口的漏斗，一端插在量瓶上。

B.2 程序

用下列方法确定支撑剂的体积密度：

- a) 清洗称量，擦干一个精确度为 0.01g 的 100mL 量瓶，用它作为量具。
- b) 将漏斗放在量瓶的颈口处，装支撑剂至 100mL 处，不必摇动或拍打支撑剂。
注：这是很关键的一步，每一个人测量支撑剂体积密度时都应用同样的步骤。
- c) 称装有支撑剂量瓶的质量，精确度为 0.01g。
- d) 用式 (B.1) 计算支撑剂的体积密度：

$$\rho = (W_{\text{B.p}} - W_{\text{B}}) / 100 \quad \dots\dots\dots (\text{B.1})$$

式中：

ρ ——支撑剂的体积密度，单位为克每立方厘米 (g/cm³)；

$W_{\text{B.p}}$ ——装有支撑剂的量瓶质量，单位为克 (g)；

W_{B} ——量瓶的质量，单位为克 (g)。

附 录 C
(资料性附录)
单 位 换 算

$$1\text{ft} = 0.3048\text{m}$$

$$1\text{in} = 2.54\text{cm}$$

$$1\text{D} = 1000\text{mD} = 0.9869\mu\text{m}^2$$

$$1\text{lb}_m = 453.6\text{g}$$

$$1\text{lb}_f = 4.448\text{N}$$

$$1\text{psi} = 6.895\text{kPa}$$

$$1\text{atm} = 14.7\text{psi} = 101.3\text{kPa}$$

$$1\text{mmHg} = 0.1333\text{kPa} \text{ (绝对值)}$$

$$1\text{mL} = 1.000\text{cm}^3$$

$$1^\circ\text{F} = 1.80^\circ\text{C} + 32$$

$$1\text{cP} = 1\text{mPa} \cdot \text{s}$$

$$1\text{lb}_f \cdot \text{s}/\text{ft}^2 = 47.88\text{Pa} \cdot \text{s}$$
