

水泥浆桥堵引起的失重和气侵研究

刘崇建* 张玉隆 郭小阳 陈 英
(西南石油学院)

刘崇建等. 水泥浆桥堵引起的失重和气侵研究. 天然气工业, 1997; 17(1) : 39 ~44

摘 要 水泥浆胶凝引起的失重和气侵, 国内外都进行了较深入的研究, 证明了它的存在和严重程度。而水泥浆桥堵失重研究甚少。为此, 在模拟实验的基础上, 研究了水泥浆在有无泥饼情况下的桥堵失重和气侵规律。研究表明, 泥浆形成的内、外泥饼, 对水泥浆自由水渗入模拟地层和桥堵的形成起到了限制作用。不同井壁状况下, 影响水泥浆桥堵失重的温度、失水量、压差等因素, 其交互作用是不相同的。文中还对水泥浆胶凝失重气侵与桥堵失重气侵的特点和气侵压差值进行了对比和分析, 并提出了防止失重和气侵的有关依据。

主题词 固井 注水泥 水泥浆 模拟实验 桥塞 气侵 压差

实验装置及方法

1. 实验装置

图 1 为静态模拟实验装置示意图。该装置能模拟井下地层、温度、压差等因素, 研究水泥浆胶凝和桥堵引起的失重。装置的主要结构及特点如下:

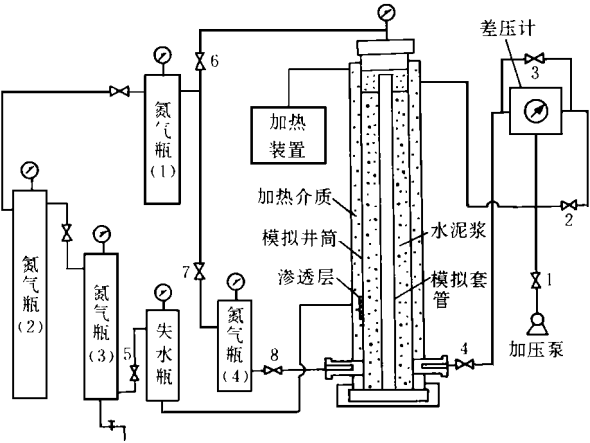


图 1 实验装置示意图

Fig. 1. Diagrammatic sketch of experimental instruments.

- (1) 差压计。通过差压计可测量和记录不同压力下(最高压力为 40 MPa), 水泥浆凝固时, 液柱压力在井筒内的变化情况。
- (2) 模拟井筒。井眼直径(D)为 15 cm, 套管外径(d)为 11.8 cm, 长度(L)为 63 cm。通过改变套管外径, 模拟不同间隙, 研究水泥浆的失重变化情况。

(3) 渗透性地层。采用不同目数的筛网和不同渗透率的固相材料模拟地层。实验采用的固相材料, 渗滤当量孔径为 $8.9\ \mu$, 井筒总的渗滤面积为 $109\ \text{cm}^2$ 。

(4) 地层温度。井眼外环形筒内装有可循环的机油, 通过控温仪加热, 模拟地层温度。温度最高可达 $100\ ^\circ\text{C}$ 。

2. 实验步骤

- (1) 根据要求将井筒预热到实验温度。
- (2) 按水泥浆性能要求及 API 标准配制实验所需的水泥浆。
- (3) 关闭阀 3 后, 将配制的水泥浆从顶部倒入装置筒内, 并装好顶盖。再利用加压泵将井筒内的水泥浆施加到实验压力(按模拟浆柱静压确定)。为保持实验过程, 井筒内的实验压力恒定, 必须同时打开氮气瓶(1)的阀 6。
- (4) 打开回压阀 5 之前, 应按相应压差(与井筒内的压力差)调节氮气瓶(3)的压力。当水泥浆倒入井筒加上压力之后, 即可打开回压阀 5, 此时井筒内的水泥浆在压差作用下, 不断地通过模拟地层失水, 进入氮气瓶(3)。打开阀门即可连续测得水泥浆滤失量。
- (5) 回压阀 5 打开的同时, 记录时间, 直至差压计指针降到零为止, 实验结束。差压计指针为零表示水泥浆柱压力降为水柱压力。
- (6) 如要考虑泥饼的影响, 水泥浆倒入之前需预

* 作者简介见本刊 1995 年第 5 期。

先在井筒内养护泥饼。其养护方法按上述(1)、(2)、(3)、(4)步骤进行。泥饼一旦在渗透层部位形成后,即可放完井筒内的泥浆,再作水泥浆失重实验。

3. 实验条件及方案

引起水泥浆失重的原因是多方面的,主要包括水泥浆自身性能、压差(泥浆柱压力与地层压力之差)、温度、地层特性及有无泥饼存在等因素。实验选择的有关因素如下:

(1) 水泥浆失水量的确定。实验配制了五种不同失水量的水泥浆。浆体的配方及性能见表 1。

表 1 水泥浆配方及性能

Table 1. Formulation and properties of cement slurry				
序号	配 方	水灰比	水泥浆性能	
			失水量 mL 30min × 7MPa	
			设计	实际
1	水泥+ CMHEC0.05%	0.5	600	635
2	水泥+ 混合液 3.5% + CM HEC0.10%		450	462
3	水泥+ 混合液 2.5% + CM HEC0.15%		350	358
4	水泥+ 混合液 4% + CM HEC0.20%		250	254
5	水泥+ 混合液 4% + CM HEC0.25%		150	149

注:水泥均为 G 级水泥。

(2) 试验压差及温度的选择。根据 API 失水试验标准规定的压差范围,选择了五个压差值,即 0.7、3.5、7.0、9.3、10 MPa。

试验温度选择,常温、35 、55 、75 、95 。

(3) 井壁有无泥饼的实验条件。为了能真实地反映井下实际状况,采用在渗透井壁处养护泥浆泥饼和保持原始状态二种。用于实验的泥浆为低固相聚合物泥浆,性能见表 2。

表 2 低固相聚合物泥浆性能

Table 2. Properties of low solids polymer mud				
密度 (g/cm ³)	塑性粘度 (mPa · s)	pH 值	失水量 mL 30min × 0.7MPa	泥饼厚 (mm)
1.06	41.5	10	12	1.5

(4) 采用 G 级水泥,水泥浆密(ρ_c)为 1.835 g/cm³,井筒高度(H)为 63 cm。由于差压计一端与井筒底部相连,并在连接管内充满了水,故水泥浆对井底的原始浆柱压力为:

$$p_s = \frac{H(\rho_c - \rho_w)}{10} = 5\,330 \text{ (Pa)}$$

(5) 试验均以 p_s 降至水柱压力作为最后的测量数据,此时差压计计为零,即实验装置的量程为 5 330 Pa ~ 0。

按 API 标准测得的水泥浆失水量(B)与模拟井筒内的实际失水量(Q_p)并不完全一致,因为模拟井筒的温度、压差、滤失条件不一定和室内相同,因此水泥浆在井内的实际失水量与平均滤失速率(Q_{pt},单位时间内水泥浆的实际失水量)对水泥浆失重有直接的影响。

试验按正交方法进行设计。选择了水泥浆失水量(B)、温度(T)及压差(Δp)三个因素。在无泥饼的情况下,每个因素五个水平;而在有泥饼时,每个因素三个水平。具体方案按正交表设计,见表 3。为减少试验误差,在同一条件下,试验需重复一次。

表 3 正交表试验方案

Table 3. Testing program designed by orthogonal array						
水 平	有泥饼,按正交表 L ₂₅ (5 ⁶)			无泥饼,按正交表 L ₉ (3 ⁴)		
	A	B ₁	C	A	B ₂	D
	温度 ()	压差 (MPa)	失水量 (mL/30min)	温度 ()	失水量 (mL/30min)	压差 (MPa)
1	95	0.7	600	75	600	0.7
2	75	3.5	450	55	350	3.5
3	55	7.0	350	35	150	7.0
4	35	9.3	250			
5	常温	10.0	150			

根据正交表进行试验,有如下特点:

- (1) 在所包含的影响因素中,试验次数较少。
- (2) 在较少的试验次数中,能较好地进行数理统计,找出影响因素的主次关系及交互作用。
- (3) 试验数据还能进行单因素的直观分析。

水泥浆在渗透性井筒内的失重

实验结果概括如下:

(1) 当井壁无泥饼时,水泥浆失重到水柱压力的时间短至 5~7 s,最长的也仅有 8 min;有泥饼存在时,所需的时间大幅度减慢,一般在 40 min 以上,长的达 4 h。故井壁的状况,对水泥浆的失重影响颇大。

(2) 井壁无泥饼时,水泥浆的失重曲线(图 2)突

然下降,即浆柱压力在瞬间就降为水柱压力;有泥饼时,水泥浆的失重规律与胶凝失重规律大致接近,唯失重加快。

1. 水泥浆在无泥饼时的失重

水泥浆的失重速度用压降速率(Δp_r)表示, Δp_r 为单位时间内,水泥浆柱压力降为水柱压力的大小, Δp_r 愈大,水泥浆失重愈快,反之则慢。

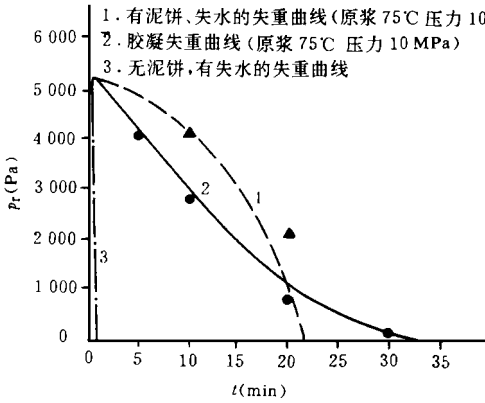


图 2 不同条件下的水泥浆失重曲线
Fig. 2. Weight-loss curves of cement slurry under different conditions.

(1) 失水量、滤失速率与水泥浆失重的关系。由图 3 及表 4 可知:

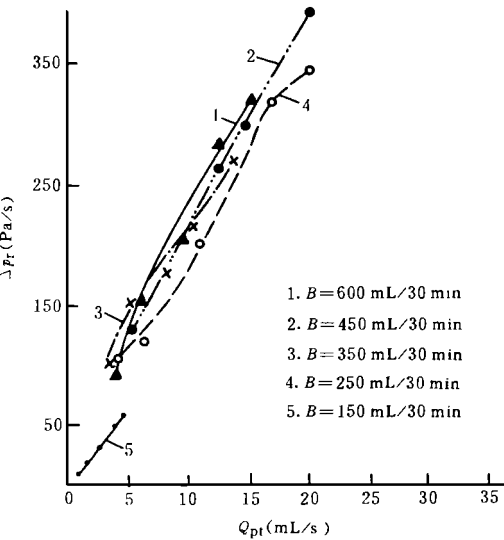


图 3 滤失速率与水泥浆压降速率的关系
Fig. 3. Relation between filtration rate and pressure drop rate of cement slurry.

- 1) 井下滤失率速率愈大,水泥浆失重愈快,反之愈慢;
- 2) 在一般情况下,滤失速率随水泥浆失水量的增加而增加,即水泥浆失水愈大,失重愈快;

3) 当水泥浆失水量 $B \geq 600 \text{ mL}/(30\text{min} \times 7\text{MPa})$ 时(见表 4),失重急剧加快。 $B=250 \sim 400 \text{ mL}/(30\text{min} \times 7\text{MPa})$ 时,压降速率 p_r 为 p_{r600} 的一半; $B=150 \text{ mL}/(30\text{min} \times 7\text{MPa})$ 时,水泥浆失重急剧变慢, p_r 仅为 p_{r600} 的 $1/14$ 。表中 $\bar{p}_r$ 、 $\bar{Q}_{pt}$ 为五组试验数据的平均值。五组试验由五种压力和不同的相应温度组成。

表 4 失水量对水泥浆失重的影响

Table 4. Influences of fluid loss on losing weight of slurry

B $\left(\frac{\text{mL}}{30\text{min} \times 7\text{MPa}}\right)$	600	450	350	250	150
$\bar{Q}_{pt} \text{ (mL/s)}$	27.40	11.75	9.66	8.43	2.59
$\bar{p}_r \text{ (Pa/s)}$	495	228.6	212.6	183.3	34.6

(2) 压差与水泥浆失重的关系。图 4 反映了井壁无泥饼时,水泥浆压降速率的变化趋势。从图中可以看出:

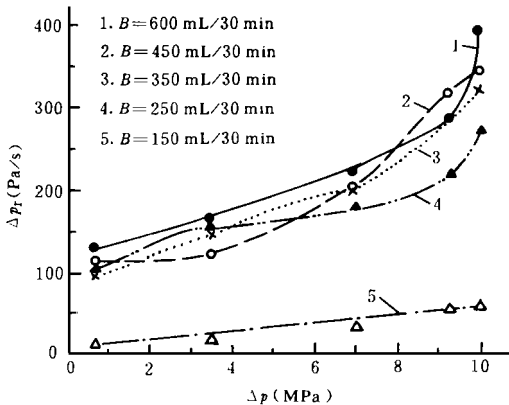


图 4 压差与水泥浆压降速率的关系
Fig. 4. Relation between pressure difference and pressure drop rate of cement slurry.

- 1) 压差(Δp)愈小,压降速率(Δp_r)愈小,水泥浆失重愈缓慢。当 $\Delta p > 9 \text{ MPa}$ 后,形成的环空桥堵愈密实,失重急剧加快;
- 2) 当水泥浆失水量为 $150 \text{ mL}/(30\text{min} \times 7\text{MPa})$ 时,水泥浆失重减慢。压差增加,失重无明显增加的趋势。
- (3) 温度与水泥浆失重的关系。当井壁无泥饼时,由于水泥浆的失水极快,温度尚未对水泥浆性能起作用时,环空桥堵已经形成,水泥浆失重急剧下降。表 5 说明,温度增加,水泥浆失重不一定加快,而失水量与差压的影响却较大。当失水量从 600 降到

150 时,失重时间增加了 10 ~ 15 倍;差压从 10 MPa 减至 0.7 MPa 时,失重时间增加了 3 ~ 6 倍。分析说明,当井壁无泥饼时,影响失重的主要因素是水泥浆的失水量,第 2 位是压差。温度的影响不是主要因素。

表 5 温度对水泥浆失重的影响

Table 5. Influences of temperature on losing weight of sturry

失水量 $\left(\frac{\text{mL}}{30\text{min} \times 7\text{MPa}}\right)$	常温	35	55	75	95
600	17 (3.5)	13 (7.0)	7 (9.3)	5.7 (10)	39 (0.7)
450	25 (7.0)	16 (9.3)	15 (10)	47 (0.7)	32 (3.5)
350	18 (9.3)	16 (10)	54 (0.7)	34 (3.5)	25 (7.0)
250	19 (10)	50 (0.7)	34 (3.5)	29 (7.0)	24 (9.3)
150	398 (0.7)	285 (3.5)	155 (7.0)	100 (9.3)	90 (10)

注:失重时间(s)为浆柱压力降至水柱压力时间。括号中的数据为实验差压值(MPa)。

2. 水泥浆在有泥饼时的失重

(1) 水泥浆失水量与失重的关系。图 5 为不同条件下,水泥浆失水量与平均压降速率($\Delta\bar{p}_r$)的关系曲线。从图中可知:

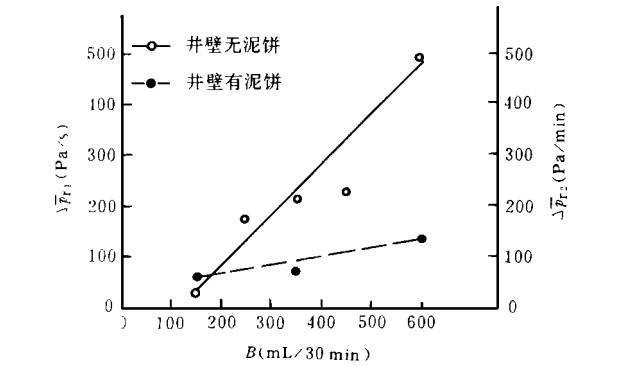


图 5 失水量与水泥浆压降速率的关系

Fig. 5. Relation between fluid loss and pressure drop rate of cement slurry.

1) 当水泥浆失水量相同时,有泥饼的平均压降速率($\Delta\bar{p}_{r2}$)大大低于无泥饼的平均压降速率($\Delta\bar{p}_{r1}$),且随失水量的增加,两种差别急剧加大,当失水量为 600 mL 时, $\Delta\bar{p}_{r2}=200\Delta\bar{p}_{r1}$ 。

2) 当失水量较小时, Δp_{r2} 与 Δp_{r1} 差异较小,因此在易渗透地层,用降低水泥浆失水量来控制桥堵是有好处的。

3) 在井壁有泥饼隔离的情况下, Δp_{r2} 变化甚小,即失水量对水泥浆失重的影响不明显。

(2) 压差与水泥浆失重的关系。图 6 为水泥浆压差(Δp)与压降速率(Δp_r)的关系曲线,括号中的数值为实验温度。从图 6 可知:

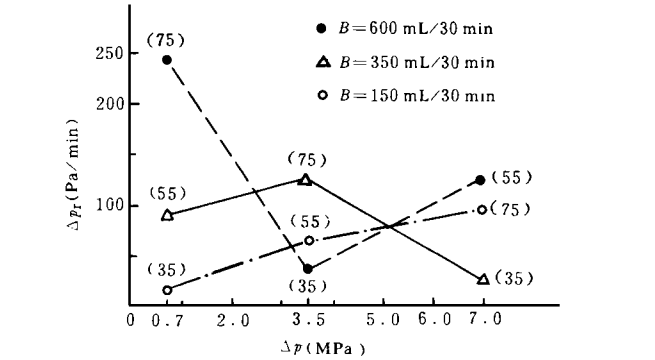


图 6 温度、压差与水泥浆压降速率的关系

Fig. 6. Relation between temperature pressure difference and pressure drop rate of cement slurry.

1) 失水量愈大,压差的影响更为明显。

2) 当温度的变化与压差的变化同步时,压差增加,水泥浆在模拟井的滤失速率增大,桥堵易于形成,失重加快。

(3) 温度与水泥浆失重的关系。从图 6 同样可知:

1) 无论水泥浆失水量大小如何,温度增加,压降速率都明显增加,即使压差低、温度高的压降速率同样要比压差高、温度低的压降速率高很多(表 6)。

表 6 温度对水泥浆失重的影响

Table 6. Influences of temperature on losing weight of slurry

曲线	B $\left(\frac{\text{mL}}{30\text{min} \times 7\text{MPa}}\right)$	T ()	Δp (MPa)	Δp_r (Pa/min)
1	600	75	0.7	246
		35	7	36
2	350	55	0.7	90
		35	7	24

2) 失水量小于 350 mL 时,实验温度在 35 ~ 75 范围内,水泥浆失重变慢,特别在 35 情况下,

水泥浆压降速率明显降低。

根据图 6 中的数据及方差分析和显著性检验方法,可定量得出在有泥饼情况下,影响水泥浆失重的主要因素是温度。水泥浆失水量及压差是次要因素,对水泥浆失重的影响不显著。

桥堵的形成及水泥浆失重的原因

在井下温度和压差作用下,水泥浆内的过量自由水,不断渗入渗透性较好的地层,环形空间形成桥堵。桥堵的形成导致以下问题:

(1) 如在注水泥过程形成桥堵,将会造成注替过程泵压急剧增高或打实心套管的危险。

(2) 如在注水泥浆候凝期间形成桥堵,将造成其上部液柱压力不能传递到桥堵下面的地层,从而引起下部地层失重和油、气、水窜问题。

造成水泥浆失重,除水泥浆自身失水性能外,地层的渗透性是很重要的因素。如果地层渗透性极小或因泥饼的隔离作用,自由水渗入地层受到了限制,桥堵是难以形成的。桥堵的形成不一定会使水泥浆失重,因为液柱压力一直作用在桥塞上,而桥塞之下的地层又与桥塞连成一体,受到同样的压力。试验表明,桥塞下面地层所承受的液柱压力确实降低了。其主要原因在于水泥浆与桥塞的胶凝及收缩特性同时存在的结果。如水泥浆与桥塞无胶凝特性,水泥的收缩只是使水泥柱缩短,而不会造成桥塞下面地层液柱压力的降低,因此桥堵是水泥浆失重的必要条件,水泥浆的胶凝和收缩则是桥堵失重的主要因素。水泥浆的胶凝与收缩特性愈强,失水量愈大,桥堵造成

的失重愈明显。在渗透性好的地层,只要有内泥饼和外泥饼的空隙较小的井眼,合理地控制水泥浆失水量,对防止桥堵的产生是有好处的。

桥堵与气侵

桥堵引起的水泥浆失重,其特点是桥堵段下面的失重不受桥堵上部水泥浆柱失重的影响;而胶凝失重却产生在整个注水泥井段,并随井深的增加(即温度、压力的增加)而变得愈快,即同一时刻,不同井深的胶凝失重是不一致的。胶凝失重引起的气侵^[1,4]已有介绍。现对桥堵失重引起的气侵作如下研究。

1. 实验步骤

(1) 按设计要求,配制好水泥浆,并从顶部注入模拟井筒内。

(2) 对模拟井筒内的水泥浆进行压差滤失和失水,失水时间为 2 min。

(3) 静止水泥浆失重到浆柱压力降为水柱压力时($p_s=51.58\text{ Pa}$),开始进行气侵试验。

(4) 将氮气瓶的气压逐次从小到大调节至某一值后,打开进气阀作气侵试验,根据气压表和静压表的数值变化,确定气侵过程和气侵时的最小压差值($\Delta p_{\min}$)。

如要在井筒内有泥饼情况下作气侵试验,必须事先在井筒内注入泥浆,等 2 h 形成泥饼后,再按上述步骤进行有关试验。

2. 实验结果分析

表 7 为不同条件下,气侵试验的结果。

表 7 不同条件下的气侵试验

Table 7. Gas cut tests under drfferent conditions

井壁状况		无泥饼									有泥饼			
失水量 (mL/ 30min × 7MPa)		600			350			250			600		250	
压差(MPa)		0.7	3.5	7.0	0.7	3.5	7.0	0.7	3.5	7.0	3.5	7.0	3.5	7.0
气侵 压力 (Pa/m)	最小压差	8 730	15 566	31 133	25 686	35 803	40 105	32 886	29 610	34 248	14 010	17 124	23 759	28 019
	平均压差	18 476			33 864			32 438			15 567		25 889	
	有无泥饼的压差	28 259									20 728			
环空水泥饼情况		较疏松	致密较软	致密较硬	疏松薄软	致密较软	致密较软	稀薄	松软	松软	无		无	

从表 7 可知:

(1) 桥堵的严重程度与抗气侵能力有直接关系。

在水泥浆失水量相同的情况下,压差愈大,水泥石愈致密,则气侵最小压差越大,防止气体穿过桥塞的能

力愈强。

(2) 水泥浆在无泥饼情况下的防气侵能力比有泥饼情况下的防气侵能力强。前者是桥塞对气体的阻挡; 后者, 因为水泥浆在环空不易形成桥塞, 浆体呈液塑状态, 浆体和泥饼阻力比桥塞小。

(3) 水泥浆失水量为 600 mL/30min 的浆体, 防气侵能力比失水量为 250 ~ 350 mL/30min 的浆体弱, 防气侵阻力, 前者约为后者的 0.55 倍。失水量大的浆体, 由于较多的自由水进入模拟地层, 形成的水泥饼及桥塞相对较疏松; 而失水量为 250 ~ 350 mL/30min 的浆体, 水泥水化充分, 形成的泥饼及桥塞较柔韧, 防气窜能力较强。因此, 从防气窜出发, 适当控制失水是非常必要的。

(4) 在井内有失水的情况下, 当水泥浆柱压力降至水柱压力时, 水泥浆在无泥饼情况下的抗气侵能力为 $2 \times 10^4 \sim 3.6 \times 10^4$ Pa/m; 而在有泥饼情况下的抗气侵能力则为 $1.6 \times 10^4 \sim 2.4 \times 10^4$ Pa/m。水泥浆胶凝抗气侵能力^[1], 在温度 45℃ 为 $1.25 \times 10^4 \sim 3.5 \times 10^4$ Pa/m。如将桥堵气侵试验温度 30℃ 的情况加以考虑, 则桥堵抗气侵能力比水泥胶凝抗气侵能力大。

根据桥堵气侵试验的特点, 桥堵引起水泥浆的失重, 不会导致油、气、水窜过桥塞, 冒至井口, 而是在桥塞下面的层间互相窜流。窜流将直接影响到井网的采输和开发方案的具体实施。

结 论

(1) 不同条件, 影响水泥浆桥堵失重的因素是不相同的。在无泥饼的情况下, 失水量、压差是主要因素, 温度是次要因素; 在有泥饼的情况下, 温度却是主要因素, 失水量、压差为次要因素。

(2) 控制水泥浆的失水量在 250 mL 左右, 对防止桥堵引起的水泥浆失重和气侵是有好处的, 但失水量过低也是不必要的;

(3) 桥堵引起的水泥浆失重, 在井下并不普遍存在, 只有在易渗透地层和环空间隙较小的井眼内才会出现。水泥浆胶凝引起的失重, 无论什么条件都存在。

(4) 桥堵本身能阻止气体窜至井口, 但桥堵段下部地层液柱压力的降低, 却使其下部压力体系不相同的油、气、水层相互窜流。加封隔器注水泥是人为的桥堵, 它会带来同样的危害。

(5) 采用环空憋压等一般措施, 是难以防止桥堵

所引起的失重。使用防气窜剂或不渗透水泥能够弥补水泥凝固时液柱压力的降低, 对胶凝失重和桥堵失重都是有效的。

(6) 当水泥浆液柱压力降至水柱压力时, 桥堵的抗气侵能力比水泥胶凝的抗气侵能力强。用胶凝失重气侵数据, 设计防止失重的方法, 比按桥堵气侵规律设计安全。

参 考 文 献

- 1 西南石油学院钻井研究室. 水泥浆胶凝引起的“失重”和气侵研究. 西南石油学院学报, 1981; (3)
- 2 Cooke C E *et al.* Field measurements of annular pressure and temperature during primary cementing. SPE 11206, 1982
- 3 Cook Clude *et al.* Filtrate control—A key in successful cementing practices. JPT, 1977; (8)
- 4 西南石油学院钻井研究室. 充气水泥防止失重的实验研究. 西南石油学院学报, 1983; (1)
- 5 Christian W W. Gas leakage in primary cementing—A Field study and laboratory investigation. JPT, 1976
- 6 Tinsley J M. Study of factors causing annular gas flow following primary cementing. SPE 8257, 1979
- 7 Tinsley J M. Transition time of cement slurries between the fluid and set. SPE 9285, 1980
- 8 Watters L T. Field evaluation of method to control gas flow following cementing. SPE 9287, 1980

(审稿人 高级工程师 石仲华
收稿日期 1995-08-28 编辑 钟水清)

挪威将开发特罗尔大气田

挪威特罗尔(Troll)大气田, 位于北海北部海域, 1979 年发现, 为背斜圈闭的侏罗系砂岩气藏, 原始可采天然气储量达 $12\,854 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。据挪威能源部长延斯·斯托尔滕贝格 8 月 28 日声称: 随着特罗尔大气田的开发, 挪威对欧洲市场的天然气总供应量将增加到每年 $360 \times 10^8 \text{ m}^3$, 到下个世纪初, 特罗尔大气田产气量达到高峰时, 挪威对欧洲市场的总供气量, 每年超过 $600 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。最近挪威已同捷克达成协议, 于 1997 年 1 月 1 日起, 每年向捷克供气 $30 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

(牟驱摘编自 1185 期《石油消息》)