

钻井冲洗液对水井出水量影响规律的模拟试验研究及其应用

阮文军, 黄有魁

(长春工程学院, 长春 130021)

[摘要] 钻井冲洗液是影响水井出水量的主要因素之一。通过室内模拟试验, 发现了不同钻井冲洗液类型和不同洗井方法对含水层渗透性的影响规律, 找到了既有较好护壁性又对含水层有较小封堵作用且封堵后易于冲洗的冲洗液, 并对聚合物在含水层中的作用机理进行了初步探讨。同时介绍了两个应用实例。

[关键词] 钻井冲洗液 水井 出水量 渗透系数 封堵 洗井

[中图分类号] P634.6 [文献标识码] A [文章编号] 0495-5331(2001)06-0076-04

1 问题的提出

在合理开发和利用地下水的过程中, 钻井施工因素对管井出水量的影响有多大一直是尚未弄清的重要问题。我们所期望的是施工因素对出水量减少的影响达到最小值。实际上, 在水井的施工过程中, 钻孔周围一定范围内的含水层因受到施工中诸多因素的影响, 使水井未能达到应有的出水量。在钻井工艺中, 影响最显著的因素之一是钻井冲洗液。

在水井施工中, 为保证单井出水量, 要求在钻进和成井过程中保持井壁的完整, 保持井壁的原始地层结构, 以保持地下水在长期流动中形成的自然补给通道。但在成井过程中, 孔内的机械作用和冲洗液中固相的运移常会破坏这种结构^[1]。因此, 在含水层孔段钻进时, 就出现了一个矛盾: 要保证孔壁不坍塌, 就要求冲洗液有良好的护壁性; 而起护壁作用的泥皮或高分子吸附膜反过来却会堵塞孔壁和内部含水层的孔(空)隙, 降低含水层的渗透性, 从而会大大降低水井的出水量。因此, 为了降低冲洗液对含水层的影响, 以便提高水井的出水量和充分利用地下水资源, 就需要找到既有较好的护壁性, 又对含水层封堵作用较小或封堵后容易被后续洗井工序洗出的冲洗液类型。这是水井工程中的一个很重要的实际问题^[7]。

为了解决水井冲洗液的上述问题, 国内外经多年研究和实践已经取得以下结论和成果:

1) 严禁在水井工程中使用高固相细分散泥浆。用细分散泥浆冲孔, 虽然能在一定时期内保持孔壁稳定, 但泥浆中的粘土颗粒会在孔壁表面形成泥皮并渗入含水层内部封堵过水通道, 并给洗井工序带来困难^[6]。这将严重影响水井的出水量。在密云水库帷幕灌浆过程中, 通过开挖观察看出: 在砂卵石石

层, 冲洗液中的粘土固相侵入深度可达 2m 左右。这说明固相颗粒按水力学搬移规律将裂隙和孔隙通道淤塞得十分严密, 可堵死全部渗透通道, 完全破坏了井孔周围含水层的原始状态^[1]。

2) 在第四纪地层钻进时, 如按规范采用清水作冲洗液, 势必产生自然造浆现象。它带来的后果是:

护壁和携粉能力差, 事故多, 钻效低, 成井困难; 孔壁不易形成固相浓度高的致密泥皮, 冲洗液中的岩土颗粒渗入地层孔隙, 将导致含水层严重淤堵。这种淤堵用常规方法处理很难取得预期的洗井效果, 影响了对含水层和水井的评价^[2,4,8]。

3) 选用植物胶类高分子聚合物(如国外的瓜尔胶和国内的田菁胶、魔芋胶), 配之以相应的降解剂, 得到植物胶类无固相冲洗液。植物胶类无固相冲洗液的特点是: 在钻孔过程中它们能在孔壁上形成吸附膜, 从而起到一定的护壁作用(同时也会封堵含水层); 冲洗液中的降解剂能对田菁、魔芋和瓜尔胶等高分子聚合物起降解作用, 使封堵含水层的高分子物长链经过一段时间后断开, 从而使冲洗液粘度降低, 失去对含水层的封堵作用。这样, 就可以使含水层的渗透性得到恢复, 使出水量得到保证。其缺点是价格高。

关于水井冲洗液问题尚有很多内容有待进一步试验研究, 归纳起来有 3 点:

1) 关于各类的泥浆和无固相冲洗液对不同粒径含水层出水量影响的问题, 至今尚无较系统的试验研究报导。因此, 在水井工程中选择冲洗液时, 缺乏可参考的试验数据。另外, 尽管植物胶类无固相冲洗液有上述优点, 但从护壁性能试验结果看它们的护壁性能并不理想。因而应通过含水层渗透性试验和冲洗液护壁性能试验选出既有较好护壁性又有较小封堵作用或封堵后易于冲洗的冲洗液。

2) 冲洗液对含水层孔隙的封堵作用不是一成不变的, 它受到洗井工序的影响。渗入到含水层中的各种高分子聚合物是否容易清洗, 以及选用哪种洗井方法更有利于水井出水量的恢复等问题, 需要由试验来回答。

3) 对高分子聚合物影响含水层渗透性和水井出水量的机理, 应在理论上给予分析和探讨。

为保证试验数据的准确性和结论的正确性, 我们选择了模拟试验的方法。根据水文地质学的有关理论, 当其它参数不变时, 水井的出水量与含水层的渗透系数成正比^[9]。因而渗透系数的大小可以反映水井出水量的大小。所以, 我们考虑了工程实践中的各种影响因素, 建立了实验模型, 并模拟水井工程各个工序的实际情况, 对砂样在冲洗液作用前后和经不同方法洗井前后的渗透性进行了测试。这种模拟试验方法使测得的各种数据基本能反映实际情况。据此方案, 我们取得了以下试验成果: (1) 测定模型中某种粒径砂样的渗透性及其经冲洗液作用前后变化的数据, 并从中得到试验结论。(2) 测定不同洗井方法对砂样渗透性恢复程度的影响。(3) 对各种典型冲洗液的护壁性能进行了比较和优选。

2 试验

2.1 试验仪器及材料

试验仪器: 70 型渗透仪、封盖、储浆罐、高压气筒、木击锤、供水容器等。

钻井冲洗液(5 种代表性冲洗液): 细分散泥浆; 不分散低固相泥浆; PHP - 水玻璃无固相冲洗液; PAA 无固相冲洗液; TG- 1A(田菁胶) 植物胶。

渗透介质(3 组粒径砂样): 0.5 mm ~ 1 mm、1 mm ~ 2 mm、2 mm ~ 5 mm。

模拟洗井用水源: 自来水。

2.2 试验内容、过程和结果

2.2.1 渗透性试验

将某粒径砂样(如 0.5 mm ~ 1 mm 砂样) 按试验规程分别装入 5 台渗透仪后, 测出它们各自的渗透系数 K 。然后在一定压力条件下(2×10^5 Pa) 向 5 台渗透仪中各注满一种冲洗液, 并经 48 h 浸泡后再次测砂样的渗透系数 K 。最后用自来水进行模拟洗井(2×10^5 Pa 条件下持续洗 30 min), 然后再测砂样的渗透系数 K 。试验数据共有 3 组: (1) 该粒径砂样的渗透系数 K (5 个); (2) 经冲洗液浸泡 48 h 后砂样的渗透系数 K (5 个); (3) 砂样经模拟洗井后的渗透系数 K (5 个)。

试验发现, 水温的波动对结果影响极大。为消除试验过程中水温波动的影响, 将各试验在当时水温条件下测得的数据都换算成水温为 10 时的数据(换算公式为 $K_{10} = K_T T / 10$)。

对 3 组粒径砂样都按上述方法进行试验和换算, 将结果填入表 1。

表 1 3 种粒径砂样渗透性试验结果

砂样粒径 (mm)	渗透系数 及 r_1, r_2 值	细分散 泥浆	不分散低 固相泥浆	PHP - 水玻璃	PAA 无固相	TG- 1A 植物胶
2 ~ 5	K (cm/s)	1.29	1.33	1.22	1.51	1.10
	K (cm/s)	0.074	0.146	0.520	0.266	0.171
	K (cm/s)	1.044	0.560	0.727	0.717	0.707
	r_1	5.7 %	11 %	42.6 %	17.6 %	15.5 %
	r_2	80.9 %	42.1 %	59.6 %	47.5 %	64.5 %
1 ~ 2	K (cm/s)	0.517	0.581	0.548	0.613	0.755
	K (cm/s)	0	0	0.268	0.284	0.166
	K (cm/s)	0.124	0.142	0.288	0.248	0.425
	r_1	0	0	48.9 %	46.3 %	22 %
	r_2	24 %	24.4 %	52.6 %	40.5 %	56.3 %
0.5 ~ 1	K (cm/s)	0.200	0.269	0.214	0.213	0.234
	K (cm/s)	0	0	0.068	0	0.103
	K (cm/s)	0.057	0.071	0.158	0.095	0.135
	r_1	0	0	31.8 %	0	44 %
	r_2	28.5 %	26.4 %	73.8 %	44.6 %	57.7 %

注: K_0, K, K' — 砂样原始渗透系数、砂样经冲洗液浸泡后的渗透系数和模拟洗井后的渗透系数。 r_1 — 砂样渗透系数剩余率; r_2 — 砂样渗透系数恢复率。

2.2.2 不同洗井方法对渗透性恢复程度的影响

我们对单向连续冲洗和双向间歇冲洗两种模拟洗井方式进行了对比试验, 结果见表 2。可以算出, 双向间歇冲洗后渗透系数的恢复率(99.7 %) 比单向连续冲洗后渗透系数的恢复率(84.9 %) 提高了 14.8 %。

2.2.3 各种冲洗液护壁性能对比试验

关于聚和物冲洗液护壁性能的评价方法, 国内还没有统一的标准。目前应用较多的是 3 种: 岩样在冲洗液中的浸泡时间、失水试验和岩样滚动回收率。本文采用了岩样浸泡时间来试验。试验所用的岩样为洗净湿压烘干成型的砂样($\phi 1.5$ cm \times 1.5 cm 圆柱形)。

表 2 两种冲洗条件下的渗透试验结果对比表

砂样粒径 (mm)	冲洗液类型	渗透系数 (cm/s)			
		K	K'	$K_{单向}$	$K_{双向}$
1 ~ 2	PAA 无固相冲洗液	0.2741	0.2237	0.2328	0.2734

这种试验方法的原理是: 对某种冲洗液而言, 如果干砂样放入其中以后保持原状而不软塌散的时间越长, 其护壁性能就越好(表 3)。

3 试验成果分析

在整理试验数据时, 需要引入两个参数: r_1 和 r_2 。它们的表达式为:

$$r_1 = (K' / K) \times 100 \% (1)$$

表3 5种冲洗液性能指标

冲洗液类型	表观粘度(cP)	塑性粘度(cP)	动切力(Pa)	漏斗粘度(s)	密度(g/cm ³)	砂样浸泡情况	护壁性能排序
PAA 无固相	4.5	4	0.5	20	1.008	24h 后砂样无任何变化	好
PHP- 水玻璃 细分散泥浆	2.5	2	0.5	23	1.07	24h 后砂样产生掉块 100min 后砂样坍塌	—
TG- 1 植物胶	6.25	5.5	0.75	25	1.01	36min 后砂样坍塌	—
不分散低固相泥浆	8	7.5	0.5	31	1.035	10min 后砂样坍塌	差

注:cP- 粘度单位。1 cP=1 ×10⁻³Pa·s

$$r_2 = (K / K') \times 100 \% (2)$$

从式(1)和(2)可以看出: r_1 反映的是冲洗液对含水层的封堵作用, r_2 反映的是冲洗液是否容易被洗掉。 r_1 越大,表明冲洗液的封堵作用越小; r_2 越大,表明洗井效果越好,试验数据处理后结果见表1。

综合表1、表2和表3的结果可以看出:

1)从冲洗液对含水层的封堵作用和洗井效果上看,PHP—水玻璃无固相冲洗液和TG- 1A无固相冲洗液对3种粒径含水层的封堵作用小,且封堵后易于洗出,模拟洗井效果好。细分散泥浆、不分散低固相泥浆和PAA无固相冲洗液的封堵作用均较大。但这三者的洗井效果并不相同。细分散泥浆浸泡大颗粒(2 mm~5 mm)砂样后,模拟洗井效果好;对于2 mm以下粒径的两种砂样而言,该泥浆的模拟洗井效果不好。而不分散低固相泥浆和PAA无固相冲洗液浸泡3种粒径砂样后洗井效果均不好。

2)从冲洗液的护壁作用上看,PAA无固相冲洗液效果最好,PHP无固相冲洗液次之。其余较差。

3)从砂样粒径与冲洗液封堵效果及洗井效果的关系上看,两种泥浆的试验结果存在着明显的规律性,而3种无固相冲洗液则不存在规律性。

对较大粒径砂样(2 mm~5 mm砂样),两种泥浆容易被洗掉,因而砂样的渗透系数恢复程度高;对较小粒径的砂样(1 mm~2mm和0.5 mm~1 mm砂样),两种泥浆将砂样含水层孔隙完全封堵,且洗井效果不好,砂样渗透系数的恢复程度低。

4)从洗井方法对洗井效果的影响关系上看,双向间歇洗井的效果远好于单向连续洗井。

由以上分析,可以得到如下结论:

1)PHP—水玻璃无固相冲洗液既有较好的护壁作用,又对含水层有较小的封堵作用,且冲洗液封堵后容易洗出。因而它可作为水井工程中首选的冲洗液类型。

2)TG- 1A植物胶类无固相冲洗液可用于孔壁自立性好的各类含水层中。

3)细分散泥浆可用粒径大于2 mm的含水层中,但绝不能应用于粒径小于2 mm的含水层中。不分散低固相泥浆不宜用作水井工程的钻井冲洗液。

4)PAA无固相冲洗液不宜用作含水层孔段的钻井冲洗液。但因其护壁作用极强,故可用作坍塌或水敏孔段的钻井冲洗液,或用于处理孔内事故。

4 高分子聚合物在含水层中作用机理的初步探讨

4.1 PHP—水玻璃冲洗液在含水层中的作用机理
水玻璃的化学成分为碱金属硅酸盐,常为钠硅

酸盐($\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$)。它是由 $\begin{array}{c} | & | \\ \text{—Si—O—} & \text{—Si—} \\ | & | \end{array}$ 结构聚合而成的片状无机聚合物胶团。它在含水层中的作用机理有:

1)冲洗液作用到含水层上时,水玻璃先于PHP高分子在含水砂层上吸附,水玻璃薄片状胶团在表面裸露氧原子的含水层表面上形成紧密吸附。虽然吸附胶结厚度不大,但水玻璃胶团与含水层表面的吻合性很好。水玻璃胶团还可以渗透到含水层内,但它对砂粒之间的大通道没有明显的封堵作用。

2)水玻璃对含水砂层的硅酸盐质有抽提作用,并用抽提出的硅酸盐质将距离很近的砂粒以化学键力连结。但抽提作用不会影响砂粒之间的过水通道。

3)冲洗液中的PHP分子吸附在水玻璃胶团外,形成了对含水层的间接吸附。这不但增加了对含水层的胶结护壁作用,也使洗井更容易。因为 SiO_2 胶团容易洗出,而不易洗出的PHP分子的直接吸附量又较小,所以这种吸附方式既利于护壁,又有利于洗井。

4)PHP分子是线型团绕状高分子,它除了间接吸附在含水层表面外,还可以随冲洗液渗透入砂层空隙,在深部形成团状封堵。但这种封堵容易清洗。

4.2 PAA无固相冲洗液的作用机理

1)PAA无固相冲洗液在含水层表面以高分子平卧吸附方式快速形成致密坚韧的吸附薄膜,冲洗液中的高分子还可以随冲洗液进入含水层孔隙中进行渗透胶结,因而它的护壁性能极强。

2)PAA冲洗液作用于含水层后不易洗井,对水井出水量有一定影响。这是因为,PAA分子的吸附薄膜很致密,吸附膜将颗粒间也连接起来。而且,PAA分子在含水层表面的吸附是一个不可逆过程,

常规洗井方法无法将 PAA 分子从含水层表面全部冲走。因而, PAA 无固相冲洗液不宜用于含水层孔段。但因其护壁作用极强, 故可用作坍塌或水敏孔段的钻井冲洗液, 或用于处理孔内事故。

5 应用实例

5.1 PHP - 水玻璃冲洗液用于水文探井

通辽电厂二期工程需钻三口深度为 120 m ~ 180 m 的水文探井。该地区的地表为风成砂, 砂粒径随深度而增大。工程要求不许用泥浆, 且要裸眼钻进。吉林有色地勘局使用我院提供的 PHP - 水玻璃无固相冲洗液技术, 顺利完成全孔裸眼钻进(甚至没用孔口管)。钻进中孔壁保持稳定, 裸眼抽水试验时未发生孔壁坍塌, 冲洗液未影响含水层渗透性。该项工程后被国家勘察协会授予勘察金奖。

5.2 PAA 无固相用于地热井工程

鞍山市水利局在某温泉地区施工一口 300 多 m 深的地热井。钻进中在 219 m 孔段发生严重坍塌, 且长时间处理无效。该孔段地层为断层泥和断层角砾。施工单位采用我院的 PAA 无固相冲洗液技术, 顺利处理了坍塌事故, 完成了井孔钻进。

6 结 论

1) PHP - 水玻璃无固相冲洗液既有较好的护壁效果, 又对含水层有较小的封堵作用, 且封堵后易于洗井, 因而它可作为水井工程的首选钻井冲洗液; TG- 1A 植物胶类无固相冲洗液可用于孔壁自立性好的各类含水层中; 细分散泥浆可用于粒径大于 2 mm 的含水层中; PAA 无固相冲洗液有极强的护壁性能, 适用于粒径较大的含水层、复杂水敏地层和处

理孔内事故。

2) 双向间歇法冲洗效果好于单向连续冲洗。

3) 对无固相冲洗液中各种聚合物的清洗效果不一样, 水玻璃、PHP 和田菁胶都易于洗出, 而 PAA 分子则较难洗出。

4) PHP - 水玻璃无固相冲洗液和 PAA 无固相冲洗液对含水层的作用机理有: SiO₂ 胶团在含水层表面上的吸附、SiO₂ 胶团和 PHP 分子对含水层过水通道的封堵、PAA 分子在含水层表面的不可逆平卧吸附和渗透胶结。

5) PHP - 水玻璃无固相冲洗液和 PAA 无固相冲洗液已经在实际工程中得到了成功应用, 值得在水井工程中进一步推广使用。

[参考文献]

- [1] 王亨君. 提高水井开发质量的技术措施[J]. 水文地质工程地质, 1987(5): 57 ~ 58.
- [2] 赵铭琪, 等. 应用高渗透率泥浆冲洗液取代清水钻进工艺的研究[J]. 水文地质工程地质, 1990(6): 55 ~ 56.
- [3] 张洪叶. 水文水井钻探技术发展方向的探讨[J]. 探矿工程, 1980(3): 17.
- [4] 张蛮庆. 泥浆钻井与出水量的关系[J]. 探矿工程, 1982(5): 40.
- [5] 裴宇韬. 对水文钻探冲洗液的认识[J]. 探矿工程, 1987(2): 48.
- [6] 卢予北. 水井工程技术现状与展望[J]. 探矿工程, 1999(2): 38.
- [7] 李世忠主编. 钻探工艺学[M]. 北京: 地质出版社, 1989.
- [8] 郑继天. 冲洗液在水文钻探中的应用[J]. 探矿工程, 1989(5): 54 ~ 55.
- [9] 刘国昌. 水文地质及工程地质[M]. 北京: 地质出版社, 1980.
- [10] 王文臣主编. 钻孔冲洗与注浆[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1996.
- [11] M. A. 安德森等著, 刘莲升等译. 水溶液吸附化学[M]. 北京: 科学技术出版社, 1989.
- [12] 永泽满等著, 陈振兴译. 高分子水处理剂[M]. 北京: 化学工业出版社, 1985.

RESEARCH ON REGULARITY OF WATER WELL YIELD INFLUENCED BY DRILLING FLUIDS THROUGH SIMULATED TEST AND ITS APPLICATION

RUAN Wen - jun, WANG Wen - chen, HUANG You - kui

Abstract: Drilling fluids is one of the main factors influencing the yield of water well. Through laboratory simulated tests the regularity of aquifers influenced by different kinds of drilling fluids and well - washing methods is found, a kind of drilling fluid is obtained that not only can protect hole - side very well and have less sealing action on aquifers but also is easy to be washed out from aquifers after sealing action, and the mechanism of polymer in aquifers is initially discussed. Furthermore, the paper introduces two samples of successful application of the research.

Key words: Drilling fluid, water well, yield of water, coefficient of seepage, sealing, washing well



[第一作者简介]

阮文军(1969年-),男,1991年毕业于中南工业大学。2000年在吉林大学获硕士学位。现为长春工程学院副教授,吉林大学在读博士研究生,主要从事地基处理和浆液材料的教学和科研工作。

通讯地址:吉林省长春市 长春工程学院土木工程系 邮政编码:130021