

水井酸处理的周期性负压法

韩乾坤^{1,2}, 靳孟贵¹, 常振松²

(1. 中国地质大学工程学院, 湖北武汉 430074; 2. 河南省新密市水利局, 河南新密 452370)

摘要: 针对常规水井酸处理法增产效果有限、对地下水污染严重的问题, 提出了水井酸处理的周期性负压法。该方法通过产生周期性负压, 不断向裂隙中压入并筒里活性较强的酸液, 并及时清除裂隙中的反应产物, 因而使用一次周期性负压法, 具有多次常规酸处理加物理洗井的增产效果; 同时它利用周期性负压和少量多次注酸, 限制水井酸处理的污染范围, 降低对地下水的污染程度。使用结果表明: 与常规水井酸处理法相比, 水井酸处理的周期性负压法可使水井酸处理效果平均提高 186%, 酸处理后的污水排出量减少 59%。另外, 该方法简便易用, 使用成本低, 可广泛推广应用。

关键词: 水井酸处理; 效果; 污染; 周期性负压。

中图分类号: X703; P641 **文献标识码:** A

文章编号: 1000-2383(2002)02-0189-04

作者简介: 韩乾坤(1962—), 男, 高级工程师, 现为中国地质大学(武汉)在读博士生, 主要从事水资源开发与管理的生产和科研工作。

酸处理是以低渗透碳酸盐岩地层为主要含水层水井(以下简称低产碳酸盐岩井)的最有效增产技术。不过, 水井酸处理一般需要几 t 到十几 t 盐酸, 会产生大量污染产物, 污染大量地下水。过去的水井酸处理方法基本没有考虑酸处理带来的污染问题, 酸处理造成的污染较严重。为此, 作者提出水井酸处理的周期性负压法, 既显著地提高了水井酸处理增产效果(以井的单位涌水量增加值来表示), 又有效地降低了水井酸处理的污染程度。

1 传统水井酸处理法存在的问题

1.1 酸处理对地下水污染严重

传统的水井酸处理对地下水的污染主要表现在以下 3 个方面: (1) 产生大量的污染产物。酸处理的主要产物是 CaCl_2 和 MgCl_2 。由于它们数量很大, 且水溶液都带一定的颜色, 被污染的地下水的使用功能大大降低。例如, 1 t 30% 盐酸与石灰岩反应可产生 456 kg 的 CaCl_2 或 2.28 t 20% 的 CaCl_2 溶液。一般酸处理要用 5~15 t 30% 盐酸, 这样就会产生

CaCl_2 2.28~6.84 t 或 11.4~34.2 t 20% 的 CaCl_2 溶液。另外, 酸处理后井中还有一定数量的残酸。(2) 形成很大的污染范围。传统的水井酸处理法, 连续压酸使酸及酸处理产物压到很远处, 从而产生很大范围的污染。据计算, 一个被处理的碳酸盐岩含水层厚度为 20 m, 裂隙率为 0.2%, 酸处理用酸量为 8 t 30% 盐酸, 假设酸进入裂隙后浓度下降 50% (15% 盐酸密度为 1.07 t/m^3), 连续压入 8 t 30% 盐酸的酸处理污染平均半径将达 11 m, 这个值约为水井酸处理有效作用半径的 4 倍。(3) 酸处理后需排出大量的污水。尽管酸处理产物一般只有数 t, 如对酸处理过的井洗井, 有时排出数千 m^3 污水后, 井水仍达不到饮用水水质标准; 这是因为连续压酸形成了很大的污染范围, 其中绝大部分在酸处理有效作用范围以外, 这部分裂隙宽度并未加大, 这里地下水流速很慢, 携带能力很差, 无法使裂隙中酸处理产物迅速携带到并筒中。另外, 含水层以下裂隙中地下水循环很慢, 也很难在短时间内把其中的酸处理产物携带到并筒中。为了便于对比, 把酸处理后、井中水质达到饮用水水质标准前的井中抽水量, 称为水井酸处理后的污水排出量。

1.2 酸处理增产效果不理想

从井流的流网特征看, 由于并筒附近过水断面

小,大部分水头损失都将集中在这里,低产碳酸盐岩井筒附近水头损失集中现象更为明显,所以只要井筒附近含水层的渗透性有了显著提高,井的出水能力就会显著提高^[1].实际资料^[2]表明,水井中一般裂隙宽度都小于 0.2 cm.据石油界有关试验结果^[3,4],酸在这些裂隙中的有效作用距离一般都小于 3m,因而酸处理的有效作用范围也只能在井筒附近.传统的连续压酸水井酸处理方法,不可能把酸沿着多数小裂隙压到更远处,对于含水层裂隙堵塞严重的井,甚至无法压到多数小裂隙的较深部.相反,连续压酸可使大部分酸沿着少数大裂隙流向很远处,这对于提高井筒附近含水层的整体渗透性作用不大,且消耗大量酸.可见,传统的水井酸处理法酸的有效利用率很低,因而酸处理效果不理想,一般只能使水井的单位涌水量增加 0.5~2 倍,而且由上面的分析可知,这种方法还会对地下水产生严重的污染.为此,作者提出水井酸处理的周期性负压法.

2 周期性负压法的降污增效原理

为了减小水井酸处理污染范围,水井酸处理的周期性负压法采用“少量多次”注酸,但是这样会造成大部分酸留在井筒中.另外,碳酸盐岩含水层裂隙壁和大部分堵塞物都能与酸反应并被溶解^[1],且裂隙宽度很小,面容比很大;因而注酸一段时间后,裂隙中的酸液基本上失去了活性,裂隙中充满了反应产物.同时由于井筒中面容比很小,井筒中酸液仍保持很强的活性.如图 1a 所示,水井酸处理的周期性负压法(简称周期性负压法)在被处理含水层段井筒中,利用活塞或负压发生器推动上部液体上升,降低这段井筒中的压强,使井筒中压强小于裂隙中的液体压强,即

在井筒中产生负压.在这种负压作用下,裂隙中的可溶反应产物及部分不溶反应产物即可随裂隙中气水混合物进入井筒中,裂隙中的液体压强也将随之减小.井筒中负压解除后,由于裂隙中液体流速很慢,不能由裂隙内及时补充进液体而提高压强,因而这时井筒中压强将大于裂隙中的压强,如图 1b 所示.在这个压差及活塞下行压力的作用下,井筒中活性很强的酸液将随之被压入裂隙中.第一次负压产生后,每隔一段时间就再产生一次负压,先清除裂隙中产生的反应产物,再向裂隙中压入井筒里活性较强的酸液.在被处理含水层段每产生一次负压,就相当于一次常规酸处理加一次物理洗井.如此反复进行,即产生周期性负压,可使一次注酸起到多次注酸加多次物理洗井的效果.周期性负压法一般要进行多次注酸,最终会在井筒附近较大范围内形成一个强渗流带,使井的出水能力显著提高.从降低酸处理污染的角度看,首先,周期性负压使进入井筒中的酸得以充分利用,并使酸的作用范围限制在井筒附近,从而提高了酸的使用效率,这样就大大减少了相同增产效果下的用酸量,自然也减少了酸处理产物;其次,周期性负压和少量多次注酸避免了酸及酸处理产物持续向外扩散,从而大幅度地减少了酸处理的污染范围;另外,周期性负压减小酸处理污染范围,并把裂隙中的反应产物及时带入井中,从而降低了酸处理产物的清除难度,可大幅度地减少酸处理后污水排出量及洗井时间,有效地减少了地下水资源的浪费.所以,与常规水井酸处理法相比,周期性负压法对地下水污染程度明显降低.

3 周期性负压法的实施

水井酸处理的周期性负压法实施主要分以下两

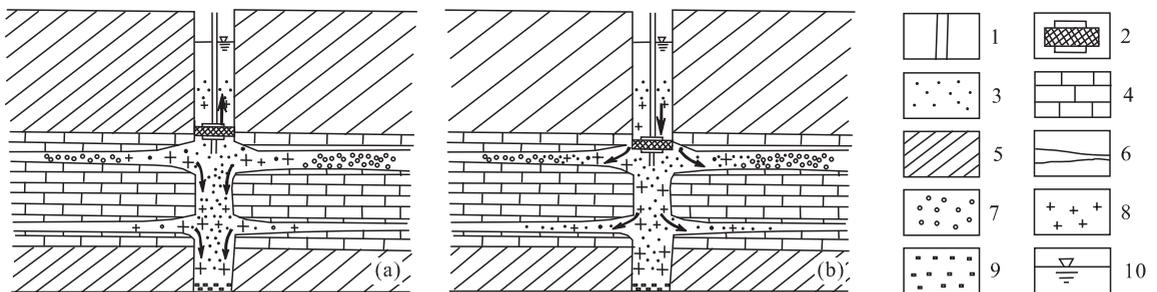


图 1 水井酸处理周期性负压法技术原理示意图

Fig. 1 Principle of well acidification with periodic negative pressure

1. 注酸管; 2. 活塞; 3. 酸液; 4. 石灰岩; 5. 隔水层; 6. 含水层裂隙; 7. 堵塞物; 8. 可溶性酸处理产物; 9. 不可溶性酸处理产物; 10. 地下水位

步进行:

3.1 少量注酸

由于一次性注酸污染严重,因而周期性负压法采用“少量多次”注酸;为了提高酸处理效果,水井酸处理应当用原酸^[4],一般为28%~30%的工业用盐酸;每次注(30%)盐酸量可由下式确定^[1]:

$$W_1 = \rho_a (V_w + V_f) = 1.15 \left(\frac{\pi D^2 M}{4} + \frac{\pi R^2 M \gamma}{4} \right) = 0.9M(D^2 + R^2 \gamma)$$

式中: W_1 为每次注酸量, t; M 为被处理含水层厚度, m; D 为被处理含水层段井径, m; R 为酸处理有效作用半径, 一般取 2~3 m; γ 为被酸处理含水层段的裂隙率, 无量纲。

3.2 产生周期性负压配合水井酸处理

产生周期性负压的方法很多, 在一般井中可用活塞产生周期性负压, 在超深井或热水井中可用井中负压发生器产生周期性负压。如用活塞产生周期性负压, 一般就用注酸时封闭被处理含水层段的活塞。拉活塞一定要先上行后下行, 上行速度应尽可能快, 以便迅速产生较强的负压, 把裂隙中的反应产物较彻底地清除; 稍停一段时间(约 1 min)后, 活塞下行。第一次拉活塞一定要等井中酸-岩反应速度趋缓时进行, 以免拉活塞时酸随着 CO_2 气体涌出井外。第一次拉活塞后, 每隔一段时间(灰岩类 1 h, 白云岩类 2 h)后再拉一次活塞。每次拉活塞都要遍及所有被处理含水层。拉活塞 2~4 次后即可结束一个酸处理阶段。

第一个酸处理阶段结束后, 接着进行第二个酸处理阶段, 经过 2~3 个酸处理阶段后, 可封闭被处理含水层顶板, 进行短暂的压水试验, 以检验酸处理效果, 压水时间不要过长, 以免把酸处理产物压向过远处, 加大酸处理污染范围, 一般 10~20 min 即可。如果井的涌水量达到了要求, 即可停止酸处理; 否则, 继续注酸处理。

在酸处理结束时, 应在井中水位以下段再拉一遍活塞, 清除水井所有裂隙中大部分酸处理产物。另外, 酸处理结束时应尽量把水泵下深些, 以便尽快清除井下部的酸处理产物, 减少酸处理后污水排出量。

4 周期性负压法的应用效果

现从增产和降污两方面讨论周期性负压法的应用效果。

4.1 增产效果显著

由于每产生一次负压相当于进行了一次常规酸处理和一次物理洗井, 每个酸处理阶段就相当于多次常规酸处理加多次物理洗井。一般每次酸处理都有不少于 2 个酸处理阶段。实践证明, 周期性负压法增产效果比常规酸处理法好得多。据不完全统计, 自 1996 年作者提出周期性负压法以来, 国内 26 家水井施工单位采用该方法处理 96 眼低产碳酸盐岩井, 大部分井单位涌水量增加了 2 倍以上, 平均增产效果是常规酸处理法的 2.86 倍以上(表 1)。

表 1 1996 年以来郑州市水井酸处理法增产效果对比
Table 1 Comparison of specific well discharge increment for different well acidation methods

单位涌水量增加值	>300%	201%~300%	101%~200%	<100%	平均值
使用周期性负压法的井数(眼)	29	12	5	6	435
使用常规酸处理法的井数(眼)	5	8	12	19	152

表 2 两种酸处理法酸处理后污水排出量对比
Table 2 Comparison of polluted water volume pumped out from wells treated by conventional and periodic negative pressure acidation methods

井名		1	2	3	平均
常规法酸处理法	盐酸(30%)用量/t	10	5	4	
	污水排出量/ m^3	2 700	3 500	2 500	
	吨酸排污量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1})$	270	700	625	531.7
水井酸处理的周期性负压法	盐酸(30%)用量/t	10	5	6	
	污水排出量/ m^3	1 200	1 400	1 500	
	吨酸排污量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1})$	120	280	250	216.7

注: 1. 众生制药厂井; 2. 禹州东高村井; 3. 新密白寨井。

4.2 降污效果明显

根据周期性负压法降污增效原理, 周期性负压可以产生 3 个方面的降污效果: 减少了相同增产效果下的用酸量及酸处理产物; 限制了酸和酸处理产物的扩散范围; 降低了清除裂隙中酸处理产物的难度。实践表明采用此法处理的井每注 1 t 相同浓度盐酸的平均污水排出量, 比采用其他酸处理法处理同类井减少了 59%(见表 2), 也就避免了上千 m^3 甚至上万 m^3 地下水作为污水排出。表 2 是作者在河南三眼酸处理井中进行的对比试验结果。

4.3 应用举例

河南省登封市向阳矿的一眼供水井, 主要含水层为白云岩。由于多种因素影响, 刚凿成时井的单位

涌水量仅为 $0.03 \text{ m}^3/\text{h} \cdot \text{m}$, 含水层厚度 28 m , 含水层段并径 0.30 m , 酸处理有效作用半径取 3 m , 含水层段的裂隙率约为 0.12% 。这样, 每次注酸量为:

$$W_1 = 0.9M(D^2 + R^2\gamma) = 0.9 \times 28(0.3^2 + 3^2 \times 0.12\%)t = 2.56 \text{ t}.$$

考虑到该井出水能力太差, 作者用 $8 \text{ t } 30\%$ 盐酸, 分 3 次注入。每次注酸后隔 2 h 拉一次活塞, 每个阶段都拉了 3 次活塞, 结束前还用活塞把井中水位以下段通拉了一遍。酸处理后, 井的单位涌水量达到 $0.38 \text{ m}^3/(\text{h} \cdot \text{m})$, 增加了 11.7 倍; 污水排出量只有 1280 m^3 。当地用常规酸处理方法处理条件类似的井, 一般单位涌水量增加值只有 $0.5 \sim 2$ 倍, 污水排除量都在 3000 m^3 以上。

5 结论

(1) 与常规水井酸处理法相比, 水井酸处理的周期性负压法可减少相同增产效果下的用酸量及酸处理产物, 限制酸处理的污染范围, 减小酸处理产物的排出难度, 大幅度地减少酸处理后污水排出量。(2) 水井酸处理的周期性负压法可以显著地提高水井酸处理的增产效果。(3) 使用结果表明: 与常规水井酸处理法相比, 水井酸处理的周期性负压法可使水井酸处理效果平均提高 186% , 酸处理后的污水排出

量减少 59% 。(4) 该方法简便易用, 不需任何专用设备, 使用成本低, 加之效果好、污染小, 因而可广泛应用。

本文研究中得到了蔡鹤生教授、左敬勋博士和马传明博士的帮助, 谨此致谢!

参考文献:

- [1] 韩乾坤. 基岩井涌水量增大技术[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 1996. 11.
HAN Q K. Technologies to increase well discharge for hard-rock aquifers [M]. Zhengzhou: Yellow River of Water Resources Press, 1996. 11.
- [2] 区永和, 陈爱光, 王恒纯. 水文地质学概论[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1988. 89.
OU Y H, CHEN A G, WANG H C. General hydrogeology [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1988. 89.
- [3] 郭元庆, 刘国斌. 气井酸化读本[M]. 北京: 石油工业出版社, 1997. 72.
GUO Y Q, LIU G B. Acid treatment for gas wells [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1997. 72.
- [4] Michael J E, Kenneth G N. 油藏增产技术[M]. 张宏达, 翁家乡, 杨义连, 等, 译. 北京: 石油大学出版社, 1991. 248.
Michael J E, Kenneth G N. Technologies to increase oil pool production [M]. Beijing: Petroleum University Press, 1991. 248.

Periodic Negative Pressure of Well Acidation Method

HAN Qian-kun^{1,2}, JIN Meng-gui¹, CHANG Zhen-song²

(1. *Engineering Faculty, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China*; 2. *Water Conservancy of Xinmi, Henan Province, Xinmi 452370, China*)

Abstract: To against the disadvantages of lower increase of well discharge and serious pollution to groundwater in using the conventional methods of well acid treatment, the authors advanced a method of well acid treatment with periodic negative pressure. The stronger acid liquor in pit shaft are pushed into fissures of carbonatite aquifer and withdrawn the reaction products in the fissures by periodic negative pressure. Therefore the result using this method one time is equal to the conventional method and flushing for many times. Using periodic negative pressure and less amount of acid with multiple-injection effectively reduces groundwater pollution. The practice results show that this method can increase 186% of average well discharge and reduce 59% of average drainage of polluted water in comparison with the conventional method. The method can be widely used because of its good results, lower pollution and cost, and convenient to be used.

Key words: well acidation; result; pollution; periodic negative pressure.