

◀ 钻井完井 ▶

doi:10.3969/j.issn.1001-0890.2014.03.008

超吸水材料在气体钻井井眼干燥中的应用探讨

冯光通¹, 胥豪¹, 唐波¹, 靳瑞环²

(1. 中石化胜利石油工程有限公司钻井工艺研究院, 山东东营 257017; 2. 中国石化中原石油勘探局培训中心, 河南濮阳 457001)

摘要: 气体钻井时地层出水可导致水敏性泥页岩坍塌失稳, 为了解决这一问题, 进行了超吸水材料用于井眼干燥的研究。通过室内试验对超吸水材料的吸水能力、吸水速度、抗盐能力、抗温能力、抗压能力、pH 值适应性、改性方法、井筒通过能力、回收和重复利用可行性进行了评价。结果表明: 超吸水材料具有吸水能力强、吸水速度快的特点; 温度和压力对其吸水能力影响小; 盐分对其吸水能力影响较大, 但可以通过改性方法提高其耐盐性; 超吸水材料吸水后可以顺利返至地面, 可回收, 但脱水困难, 重复利用的可行性低。研究表明, 超吸水材料应用于气体钻井井壁干燥在材料、工艺方面都具备可行性, 可为气体钻井井壁干燥提供了新的思路和技术手段。

关键词: 气体钻井 超吸水材料 地层水 吸水能力 可行性研究

中图分类号: TE242 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-0890(2014)03-0038-07

Discussion on the Application of Super-Absorbent Polymer in Gas Drilling to Dry Wellbore

Feng Guangtong¹, Xu Hao¹, Tang Bo¹, Jin Ruihuan²

(1. Drilling Technology Research Institute, Sinopec Shengli Oilfield Service Corporation, Dongying, Shandong, 257017, China; 2. Training Center of Zhongyuan Petroleum Exploration Bureau, Sinopec, Puyang, Henan, 457001, China)

Abstract: In gas drilling, formation water flow may lead to instability of water-sensitive mudstone and shale. To solve this problem, the feasibility of applying super-absorbent polymer(SAP) to dry wellbore was investigated. A laboratory experiment was made to evaluate the absorption capacity, absorption velocity, salt resistance, temperature resistance, compressive strength, pH value adaptability, modification methods, ability of passing through bit nozzle, recycling and reuse of such materials. The results indicate that super-absorbent materials provide strong and fast water absorption, the absorption capacity is less sensitive to temperature and pressure and highly sensitive to salt content, which can be improved by modification methods. The SAM can return to the surface successfully after absorbing water and then recycled. However, they can't be reused because of difficult dehydration. It is suggested that super-absorbent materials are feasible in both materials and technology for drying wellbore. This research provides new ideas and methods for wellbore drying in gas drilling.

Key words: gas drilling; super-absorbent polymer(SAP); formation water; absorption capacity; feasibility study

气体钻井是利用空气、天然气、氮气或柴油机尾气等作为循环介质的一种欠平衡钻井技术。与常规钻井相比, 其优点是机械钻速快、对储层损害小, 可消除井漏对钻井的影响、克服水敏性页岩和泥岩遇水坍塌导致的井壁失稳等问题。但气体钻井受制于地层出水, 导致其应用范围受到极大限制, 很多井在气体钻井过程中因地层出水而不得不转换为常规钻

收稿日期: 2013-12-12; **改回日期:** 2014-03-27。

作者简介: 冯光通(1974—), 男, 山东庆云人, 1996年毕业于石油大学(华东)钻井工程专业, 1999年获石油大学(北京)油气井工程专业硕士学位, 2012年获中国石油大学(华东)油气井工程博士学位, 高级工程师, 主要从事钻井工艺、钻柱力学等方面的研究工作。

联系方式: (0546)8791421, fengguangtong.slyt@sinopec.com。

基金项目: 中国石油化工集团公司科研攻关项目“气体钻井井壁干燥技术前瞻性研究”(编号: JP13014-22014)部分成果。

井,部分井甚至出现井下故障^[1-3]。

目前气体钻井遇到出水地层时,通常采用加大注气量、采用充气泡沫或者直接转换为常规钻井等措施,极大地限制了气体钻井的应用范围和优势^[4-6]。超吸水材料简称 SAP(super absorbent polymer),也称高吸水性树脂、超强吸水剂或高吸水性聚合物,是一种具有超强吸水能力和保水能力的新型高分子材料。超吸水材料的吸水性非常强,吸水量可以达到其质量的成百甚至上千倍,而且其表面不存在自由水。这类材料具有吸水能力强、吸水速度快、保水能力强的特点,目前广泛应用于医疗卫生用品(缓释性药剂、抗血栓材料等)、日用吸水材料(如尿不湿、卫生巾等)、土壤改良材料和工业堵水吸水等方面^[7-9],油田开发过程中也曾用作堵水材料^[10]。由于其具有超强的吸水能力,给解决气体钻井地层出水时上部地层井壁稳定和携水问题提供了一种新的方案。

1 材料可行性研究

1.1 地层水特点

地层水与岩石长期接触,通常含有相当多的金属盐类,如钾盐、钠盐、钙盐、镁盐等,尤其以钾盐、钠盐最多。地层水溶液中常见的阳离子包括 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} , 常见的阴离子有 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 、 CO_3^{2-} 、 NO_3^- 、 Br^- 和 I^- 。就水型分类而言,常见的地层水类型主要有硫酸钠(Na_2SO_4)型、碳酸氢钠(NaHCO_3)型、氯化镁(MgCl_2)型和氯化钙(CaCl_2)型^[2]。

1.2 材料适应性评价

1.2.1 评价原则

针对地层水的特点和气体钻井的特点,建立了超吸水材料适应性评价原则:

1) 吸水倍数。吸水倍数越高,越有利于减少材料用量,提高经济性;同时,避免过量的吸水材料注入井筒而导致出现井下故障。

2) 吸水速度。气体钻井时气体在井筒内的流速非常快,通常为 $10\sim 15\text{ m/s}$,超吸水材料进入井筒至返出地面的时间不会太长,由水眼喷出之后与地层水接触的时间也较短。因此,其必须具备较快的吸水速度。

3) 抗盐能力。由于地层水通常含有较多的盐

分,其抗盐能力必须要强。

4) 耐酸碱性。由于地层水具有一定的酸碱度,因此要求材料具有较好的耐酸碱性。

5) 抗温和抗压能力。气体钻井时,立管压力通常在 $4\sim 5\text{ MPa}$ ^[2],同时随井深增加,井筒内的温度也随之升高。因此,吸水材料吸水前后必须具备一定的抗温、抗压能力。

1.2.2 性能评价

高吸水树脂(SAP)是一种含强亲水性基团、经适度交联后形成三维网状结构的新型高分子材料,具有超强的吸水能力和保水能力^[11-14]。根据制备高吸水树脂原料的不同来源,其大致分为 3 大系列,即淀粉系列、纤维素系列和合成聚合物系列。其中,聚丙烯酸盐类高吸水树脂具有成本低、吸水能力好、保质期长、吸水速度快、对某些金属离子的络合能力强的特点,应用非常广泛。因此,笔者对该类材料的性能进行了评价。

1) 吸水倍数。3 种聚丙烯酸盐类 SAP 常温下吸收蒸馏水的能力见图 1。从图 1 可以看出:3 种 SAP 的吸水倍数较高,大约为 $500\sim 700$ 倍;同时在 20 min 内 3 种 SAP 的吸水倍数达到 $400\sim 550$ 倍,吸水量为其最大吸水量的 80% 左右,说明其吸水速度很快。

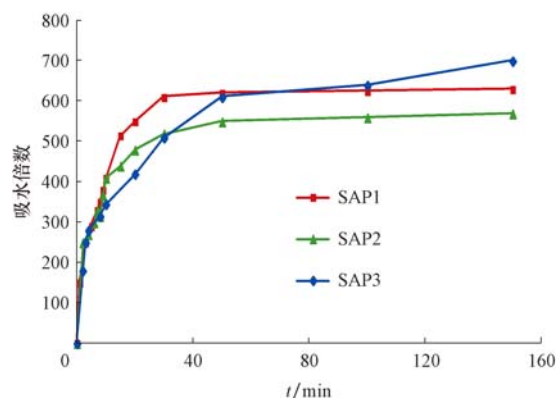


图 1 超吸水材料的吸水能力

Fig. 1 Absorption capacity of SAP

2) 抗盐能力。测试了 SAP 材料在一定时间段内对阴、阳离子浓度 5 mmol/L 不同溶液的吸水能力,结果见图 2 和图 3。

从图 2 可以看出,高价阳离子对 SAP 吸水能力的影响大于低价阳离子,SAP 在不同价位阳离子溶液中的吸水能力顺序大致为 $\text{NaCl} > \text{KCl} > \text{MgCl}_2 > \text{CaCl}_2 > \text{FeCl}_3$ 。SAP 在主族金属离子溶液中的吸

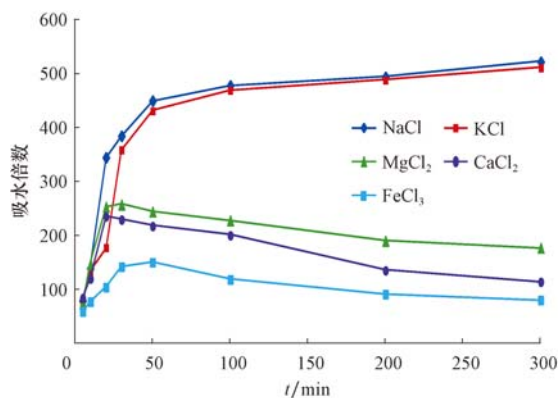


图2 不同阳离子对SAP吸水能力的影响

Fig. 2 Effects of different cations on SAP's absorption capacity

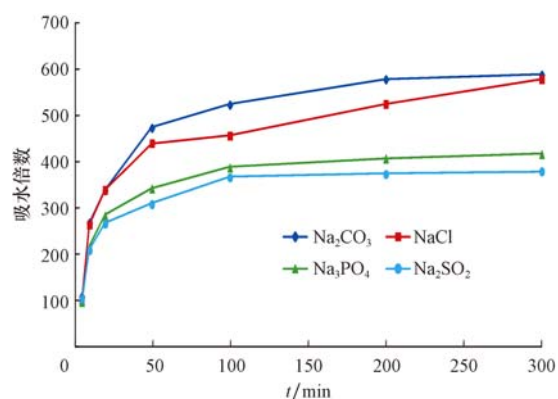


图3 不同阴离子对SAP吸水能力的影响

Fig. 3 Effects of different anions on SAP's absorption capacity

水倍数主要取决于阳离子的水合离子半径,在过渡金属离子溶液中的吸水倍数主要取决于阳离子与树脂基团形成络合物的稳定性^[15]。

从图3可以看出,SAP在不同价位阴离子溶液中的吸水能力顺序为 $\text{Na}_2\text{CO}_3 > \text{NaCl} > \text{Na}_3\text{PO}_4 > \text{Na}_2\text{SO}_4$,且随着吸水时间的增长,吸水倍数在前30 min迅速增大,100 min后基本达到平衡状态。SAP在 Na_2SO_4 溶液中的平衡吸水倍数最低,这可能是由于二价离子价位较高,与SAP中的阴离子斥力较大,较难进入树脂网络结构中对树脂网络链起排斥扩张作用^[15]。

测试了不同阴、阳离子浓度对SAP吸水能力的影响,结果见图4和图5。从图4可知:随着阳离子浓度的增大,SAP的吸水能力呈现迅速降低的趋势,当阳离子浓度达到6 mmol/L以后,SAP在二价和三价阳离子溶液中基本达到溶胀平衡,其吸水能力变化较小。这主要是由于阳离子浓度达到一定程度后,树脂与溶液的渗透压很小,故阳离子浓度的增加对吸水倍数的影响不大;SAP抵抗一价阳离子的能力稍强,当阳离子浓度达到10 mmol/L以后基本

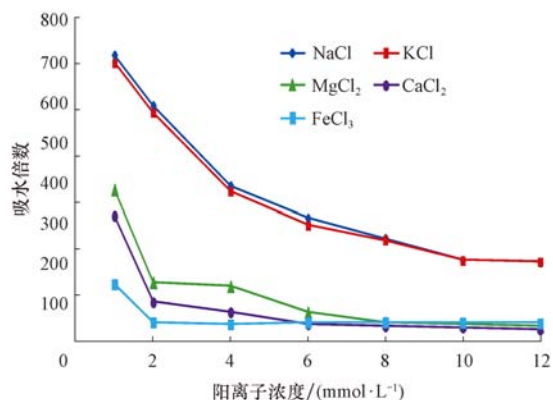


图4 阳离子浓度对SAP吸水能力的影响

Fig. 4 Effects of cation concentration on SAP's absorption capacity

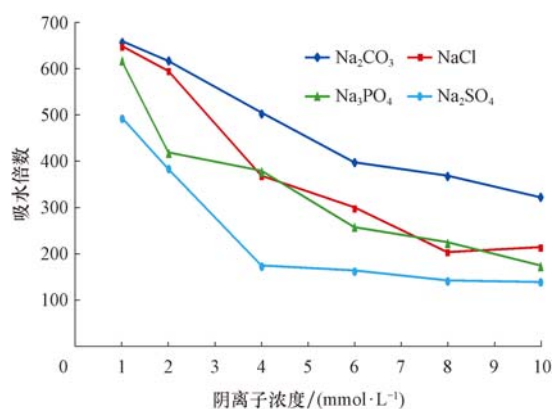


图5 阴离子浓度对SAP吸水能力的影响

Fig. 5 Effects of anion concentration on SAP's absorption capacity

达到溶胀平衡,这是由于树脂对一价阳离子没有吸附作用;由于 Fe^{3+} 在较低浓度时就能与树脂形成较多的络合物,使树脂的网络弹性大幅降低,最终导致吸水倍数迅速下降^[15]。

从图5可以看出,随着阴离子浓度的增大,SAP的吸水倍数不断下降,在 Na_2SO_4 溶液中下降的最快,这可能是由于阴离子价位较高,与树脂中的阴离子斥力较大,较难进入树脂网络结构中对树脂网络链起排斥扩张作用; Na_2CO_3 溶液中的 CO_3^{2-} 大部分水解为 HCO_3^- ,而 HCO_3^- 的半径要比 Cl^- 的大,在树脂网络中更容易起到扩张作用,所以 CO_3^{2-} 浓度的增加对平衡吸水倍数的影响较小; Na_3PO_4 溶液中的 PO_4^{3-} 也易水解成为 HPO_4^{2-} 和 H_2PO_4^- , HPO_4^{2-} 多, H_2PO_4^- 少, HPO_4^{2-} 和 SO_4^{2-} 一样,也由于价位较高,难以进入树脂网络,而 H_2PO_4^- 为一价离子,进入树脂网络链起到了扩张作用,从而其浓度的影响略低于不发生水解的 $\text{Na}_2\text{SO}_4^{2-}$ 溶液,但由于 H_2PO_4^- 较少,因此 PO_4^{3-} 浓度的影响要大于 Cl^- 。

因此, SAP 在不同阴离子溶液中平衡吸水倍数顺序为 $\text{Na}_2\text{CO}_3 > \text{NaCl} > \text{Na}_3\text{PO}_4 > \text{Na}_2\text{SO}_4$ 。

通过上述分析可知: 1) 不同种类的盐对超吸水树脂吸水能力的影响不同; 2) 不同浓度的盐对超吸水树脂吸水能力存在着不同的影响, 当盐浓度增大时, 吸水能力普遍大幅度下降, 部分盐在达到一定浓度后, 超吸水材料吸水能力呈现低位平稳的趋势; 3) 当溶液中盐离子浓度小于 4 mmol/L 时, 超吸水材料处在较高的吸水能力区域, 高于该浓度后, 吸水能力通常较低。目前地层水主要为 CaCl_2 、 Na_2SO_4 、 NaHCO_3 和 Na_2SO_4 4 种类型, 因此研究气体钻井用超吸水材料时, 可针对不同区块的地层水进行重点分析, 以开发适用于不同区块的 SAP 材料。

3) 抗温能力。测试了温度对 3 种聚丙烯酸盐类 SAP 吸水能力的影响, 结果见图 6。由图 6 可知: 随着温度的升高, SAP 的吸水能力有降低的趋势, 但总体降低幅度不大; 当温度达到 80 °C 时, SAP 的吸水能力在常温下吸水能力的 80% 以上。气体钻井应用的井段通常较浅, 钻遇 80 °C 以上高温地层的情况较少。因此 SAP 的抗温能力能够满足气体钻井的要求。

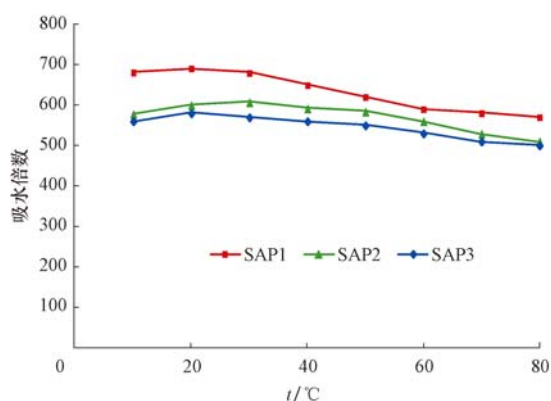


图 6 温度对 SAP 吸水能力的影响

Fig. 6 Effects of temperature on SAP's absorption capacity

4) 抗压能力。测试了压力对 2 种聚丙烯酸盐类 SAP 吸水能力的影响, 结果见表 1。由表 1 可以看出, 压力对 SAP 的吸水能力有一定的影响, 但影响较小。气体钻井时的井筒压力通常在 4~5 MPa, SAP 的抗压能力基本能够满足气体钻井的要求。

5) 耐酸碱性。测试了 SAP 对不同 pH 值溶液的吸水能力, 结果见图 7。由图 7 可知: 当溶液的 pH 值小于 2 时, SAP 吸水能力极低; 当溶液的 pH 值为 2~5 时, 吸水能力随着 pH 值的增高而迅速增大; 当溶液的 pH 值为 5~9 时, SAP 吸水能力基本保持不变, 且处于较高吸水能力区间; 当溶液的 pH

表 1 压力对 SAP 吸水能力的影响

Table 1 Effects of pressure on SAP's absorption capacity

材料类型	压力/MPa	吸水前质量/g	吸水后质量/g	吸水倍数
SAP1	0.1	0.5	293.5	587
	4.0	0.5	281.0	562
SAP2	0.1	0.5	307.5	615
	4.0	0.5	299.0	598

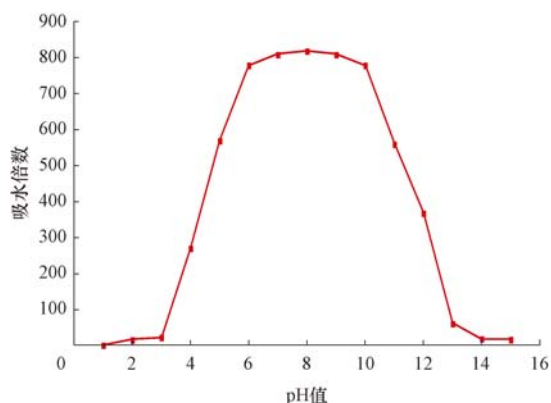


图 7 pH 值对 SAP 吸水能力的影响

Fig. 7 Effects of pH value on SAP's absorption capacity

值大于 9 之后, SAP 的吸水能力迅速下降。

利用超吸水材料进行气体钻井携水排水时, 需要注意地层水的酸碱度, pH 值太高和太低都会限制其使用。不同油田、不同地区地层水的 pH 值有所不同, pH 值受矿化度的影响比较大, 地层水的 pH 值随矿化度的增高而降低, 中等矿化度地层水的 pH 值为 7~8, 高等矿化度地区地层水的 pH 值为 3~4。水的 pH 值为 4~10 时, SAP 吸水能力较强, 因此 SAP 可满足普通地区气体钻井携水的需要。

1.3 材料改性方法

通过分析可知, 耐盐能力不足是影响 SAP 在气体钻井应用的一大阻力, 提高其耐盐能力成为当务之急。SAP 的使用环境一般都有盐类存在, 其耐盐性在一定程度上决定了它的应用范围。目前常用的提高丙烯酸盐系 SAP 耐盐性的方法有共聚、互穿、选用特定交联剂、表面改性等。

何培新等人通过反相悬浮聚合得到吸收 0.9% NaCl 溶液前后质量比为 133 的 SAP, 孙克时等人通过共聚得到吸收 0.9% NaCl 溶液前后质量比为 88 的 SAP, 陈密峰等人通过反相悬浮聚合得到吸收 0.9% NaCl 溶液前后质量比为 199 和 220 的 SAP, 王进锋等人通过共聚得到吸收 0.9% NaCl 溶液前

后质量比为 150 的 SAP,路建美等人通过二元共聚得到吸收去离子水前后质量比为 1484、吸收 0.9% NaCl 溶液前后质量比为 687 的 SAP^[16-20]。可见,随着材料学研究者的努力,可以提高 SAP 的抗盐能力。因此 SAP 应用于气体钻井具备极大的可行性。

2 工艺可行性研究

SAP 用于气体钻井井眼干燥的工艺可行性主要涉及 2 个方面:一是地面注入设备;另一个是井筒通过能力评估。SAP 通常为粉末状,对于地面设备而言,只需要在气体钻井流程的基础上增加一套高压注固设备,设备开发可借鉴粒子冲击钻井的注入系统^[21]。粉末状的 SAP 很容易通过钻头水眼,之后 SAP 遇水并开始迅速吸收水分,在上返过程中继续吸收气体中携带的水分,最终随着岩屑和空气返至地面。气体钻井时加入 SAP 后,井筒内含有吸水

后的 SAP,由于 SAP 保水能力强,其表面无自由水,可最大程度地确保上部井壁干燥。此外,SAP 吸水后的密度小于等于地层水的密度,也远远小于岩屑的密度(约 $2.5 \sim 3.0 \text{ g/cm}^3$),因而很容易被携带至地面。

由于 SAP 吸水后普遍呈现冻胶状态,可能会附着于井壁或者井下钻具上,导致井下风险增加,因此进行了室内模拟试验。用光滑的岩心模拟光滑的井壁,用不光滑的岩心模拟不规则的井壁,用钻柱接头模拟井底钻具,空气瓶管线以合适角度吹向岩屑或者钻具表面的 SAP,以模拟气体钻井空气流动,试验检测吸水后的 SAP 能否被顺利携带至地面而不会黏附于井壁和钻具上,结果见图 8。从图 8 可以看出,利用空气均能将岩心和钻具表面吸附的 SAP 全部吹走,因此可以认为吸水后的 SAP 可以被气体顺利携带出井筒,而不会附着于井壁和钻具之上导致井下风险增大。



图 8 气吹前后岩心和钻具表面

Fig. 8 Surfaces of cores and drill pipes before and after blowing gas

由于吸水后的 SAP 在井筒内还会与岩屑混合,因此需要确保其不会与岩屑混在一起形成聚团,增加井下风险。出于此考虑,笔者认为可以通过提高 SAP 吸水后的强度来解决该问题,由于 SAP 吸水后强度较高不易破碎,不会与岩屑发生聚团;同时,SAP 从加入至返出地面通常是一个连续的过程,在高流速气体的携带下,岩屑和 SAP 通常呈均匀分布状态,也可以防止其与岩屑混合形成聚团。

3 回收再利用可行性研究

吸水材料 SAP 吸水后体积膨胀,当遇到超过其吸水能力的水或者溶液时,其成为悬浮状态。气体

钻井时,吸水后的 SAP 与岩屑一起排出井筒,需要将其与岩屑分离,才能再次利用。

笔者通过深入研究,设计出适用于气体钻井现场的 SAP 分离方法,SAP 回收流程如图 9 所示。吸水后的 SAP 与岩屑一起从井口返出,然后进入含水的沉砂池,岩屑下沉,SAP 悬浮;在沉砂池的旁边再建一个分离池,悬浮 SAP 的水进入分离池,分离池内安装一过滤网,用电机将过滤后的水抽回沉砂池,SAP 即可与岩屑分离。为了避免未充分吸水的 SAP 在沉砂池内继续吸水,可在沉砂池内加入过量盐分,充分利用 SAP 抗盐能力不足的特点来解决分离问题。

SAP 再利用的前提是脱水。SAP 的吸水属于

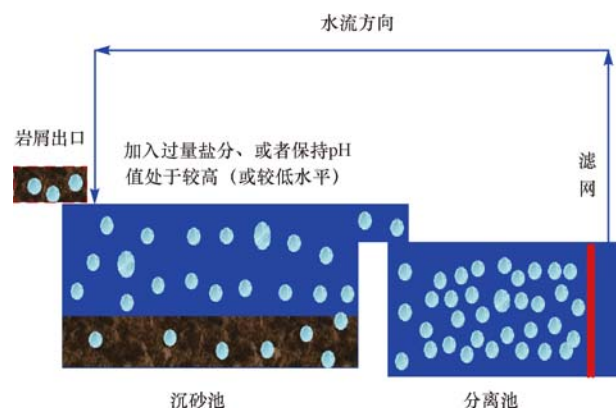


图 9 SAP 回收流程设计

Fig. 9 Recycling process design

化学吸水, 利用离心方法很难将水分离出来。笔者采用烘烤方法, 对 5 种吸水后的 SAP 进行了烘烤脱水试验, 结果见表 2。由表 2 可以看出, SAP 的烘烤脱水能力较弱。

表 2 SAP 高温失水率

Table 2 Water loss rate at high temperature

SAP 类型	不同温度下的失水率, %	
	100 °C	150 °C
SAP1	9.9	44.6
SAP2	11.1	39.3
SAP3	5.4	
SAP4	10.5	47.3
SAP5	11.6	49.2

在钻井现场对大量的 SAP 进行烘烤不现实, 加之脱水后的 SPA 再吸水能力较弱, 再利用的可行性较小。聚丙烯酸盐类 SAP 为高分子聚合物, 具有较强的自然分解能力, 分解后的主要产物为 H_2O 、 CO_2 和 Na^+ 等, 对空气、土壤、水源无污染, 不会对环境造成破坏, 可采用与钻井岩屑类似的固化处理方法。

4 结论与建议

1) 气体钻井应用超吸水材料进行井壁干燥具有可行性。通过进一步深入研究, 有望获得成功, 有助于发挥气体钻井的技术优势, 提高其克服地层出水的能力, 拓宽其应用范围。

2) 聚丙烯酸盐类超吸水材料具备在气体钻井过程中携水的能力, 但由于其抗盐能力较弱, 需要提高其抗盐能力。

3) 应用于气体钻井的聚丙烯酸盐类超吸水材料回收之后脱水困难, 且重复吸水能力显著降低。

因此, 其重复利用的可行性较低。

4) 建议下一步针对一些区块开展超吸水树脂改性方法研究, 提高其应用于气体钻井的适应性, 并开展吸水后的 SAP、岩屑与气体的多相流理论研究和模拟试验。

参 考 文 献

References

- [1] 苏静. 川东北河坝地区气体钻井地层出水研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2010.
Su Jing. The research of yield water for air drilling in Heba Area of Northeastern Sichuan[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2010.
- [2] 杨决算. 大庆油田气体钻井地层出水与井壁稳定技术研究[D]. 大庆: 东北石油大学石油工程学院, 2010.
Yang Juesuan. A study on predicting formation water production and wellbore stability for gas drilling in Daqing Oilfield[D]. Daqing: Northeast Petroleum University, College of Petroleum Engineering, 2010.
- [3] 陈济峰, 燕修良, 高航献. 川东北地区气体钻井技术实践与认识[J]. 石油钻探技术, 2009, 37(4): 39-42.
Chen Jifeng, Yan Xiuliang, Gao Hangxian. Gas drilling technique in Northeast Sichuan Basin[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2009, 37(4): 39-42.
- [4] 卓云, 胡显智, 郑霞, 等. 气体钻井遇地层出水时的充气钻井技术[J]. 天然气工业, 2011, 31(8): 73-75.
Zhuo Yun, Hu Xianzhi, Zheng Xia, et al. Aerated drilling used during gas drilling when encountering the formation water invasion[J]. Natural Gas Industry, 2011, 31(8): 73-75.
- [5] 杨决算. 大庆油田气体钻井配套技术及应用[J]. 石油钻探技术, 2012, 40(6): 47-50.
Yang Juesuan. Matching technology and application of gas drilling in Daqing Oilfield[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2012, 40(6): 47-50.
- [6] 闫铁, 刘顺利, 刘国勇, 等. 非水化地层微量出水后气体钻井最小注气量理论研究[J]. 石油钻探技术, 2011, 39(2): 65-67.
Yan Tie, Liu Shunli, Liu Guoyong, et al. Theoretical study of minimum gas influx in gas drilling after water production from unhydrated formation[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2011, 39(2): 65-67.
- [7] 柳建良. LASP/AA/AM 高吸水树脂的合成、性能及蓄冷保鲜应用研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2012.
Liu Jianliang. Study on synthesis and properties of LASP/AA/AM super absorbent polymer and applied to cool storage fresh-keeping[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2012.
- [8] 谭德新, 王艳丽, 修乐平. 高吸水树脂的应用[J]. 化学推进剂与高分子材料, 2009, 7(6): 26-30.
Tan Dexin, Wang Yanli, Xiu Leping. Application of high water-absorbing resin[J]. Chemical Propellants & Polymeric Materials, 2009, 7(6): 26-30.

- [9] 邹新禧. 超强吸水剂[M]. 北京: 化学工业出版社, 1991: 473-502.
Zou Xinxu. Super-absorbent resin[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 1991: 473-502.
- [10] 狄丽丽, 张智, 段明, 等. 超强吸水树脂堵漏性能研究[J]. 石油钻探技术, 2007, 35(3): 33-36.
Di Lili, Zhang Zhi, Duan Ming, et al. Research of plugging ability of super-absorbent resin[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2007, 35(3): 33-36.
- [11] Jin Shuping, Liu Mingzhu, Zhang Feng, et al. Synthesis and characterization of pH-sensitivity semi-IPN hydrogel based on hydrogen bond between poly(N-vinylpyrrolidone) and poly(acrylic acid)[J]. Polymer, 2006, 47(5): 1526-1532.
- [12] Cao Xiaodong, Zhang Lina. Effects of molecular weight on the miscibility and properties of polyurethane/benzyl starch semi-interpenetrating polymer networks[J]. Biomacromolecules, 2005, 6(2): 671-677.
- [13] 刘廷栋, 刘京. 高吸水性树脂的吸水机理[J]. 高分子通报, 1994(3): 181-185.
Liu Tingdong, Liu Jing. Water absorbing mechanisms of high water absorbent resin[J]. Chinese Polymer Bulletin, 1994(3): 181-185.
- [14] 沈朴. 高吸水性树脂的发展、结构及吸水理论研究现状[J]. 榆林学院学报, 2010, 20(2): 53-55.
Shen Pu. The development of super absorbent polymers, structure and water status of theoretical studies[J]. Journal of Yulin College, 2010, 20(2): 53-55.
- [15] 李晟. CPAAM 高吸水性树脂的制备及性能研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2010.
Li Sheng. Preparation and properties of CTS-g-AA-AM super absorbents[D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2010.
- [16] 陈密峰, 张秀娟, 杨健茂, 等. 反相悬浮法合成高耐盐性的超强吸水剂[J]. 精细化工, 2002, 19(9): 544-547.
Chen Mifeng, Zhang Xiujuan, Yang Jianmao, et al. Synthesis of superabsorbent with high absorbability in saline[J]. Fine Chemicals, 2002, 19(9): 544-547.
- [17] 崔英德, 郭建维, 刘卅, 等. 静态溶液聚合合法合成 SA-IP-SPS 型高吸水性树脂[J]. 化工学报, 2003, 54(5): 665-669.
Cui Yingde, Guo Jianwei, Liu Sa, et al. Synthesis of SA-IP-SPS superabsorbent by static solution polymerization[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering(China), 2003, 54(5): 665-669.
- [18] Cui Yingde, Guo Jianwei, Liao Liewen, et al. Preparation of acrylic superabsorbents with core-shell structure by modified inverse suspension polymerization[J]. CIESC Journal, 2000, 51(6): 723-724.
- [19] 路建美, 朱秀林, 胡逢吉, 等. 乌头酸与丙烯酸钠的微波辐射共聚制高吸水性树脂[J]. 石油化工, 1999, 28(1): 36-38.
Lu Jianmei, Zhu Xiulin, Hu Fengji, et al. High water absorbing resin from copolymerization of aconitic acid and acrylic acid by microwave radiation[J]. Petrochemical Technology, 1999, 28(1): 36-38.
- [20] 张旭. 瓜尔胶接枝聚丙烯酸钠高吸水树脂的合成及其性能研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2011.
Zhang Xu. Study on the synthesis and properties of GG-g-PAA Na superabsorbents[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2011.
- [21] 徐依吉, 赵红香, 孙伟良, 等. 粒子冲击钻井发展现状及关键技术[J]. 钻采工艺, 2010, 33(5): 35-38.
Xu Yiji, Zhao Hongxiang, Sun Weiliang, et al. Current situation and prospect of particle impact drilling technology[J]. Drilling & Production Technology, 2010, 33(5): 35-38.

[编辑 刘文臣]

元陆 30 井大安寨段测试获工业气流

元陆 30 井是位于四川盆地川东北元坝中部断褶带峰占构造-岩性圈闭的一口预探井, 主要目的层为下侏罗统自流井组大安寨段、珍珠冲段、上三叠统须家河组 4 段及中三叠统雷口坡组 4 段, 兼探上三叠统须家河组 2 段及中侏罗统千佛崖组。该井完钻井深 5 187 m, 完钻层位为中三叠统雷口坡组 4 段。该井大安寨段储层岩性为黑灰色泥质介壳灰岩、褐灰色介壳灰岩、深灰色泥岩, 测试井段射孔厚度 20 m。结合邻井同层位测试经验, 优化了测试方案, 采取胶凝酸、大排量等措施对储层深部进行了中等规模酸压改造, 形成了酸蚀裂缝, 扩大了渗流通道, 达到了良好的增产效果, 大安寨段酸压测试喜获工业气流。此前, 元坝探区在元坝 11 井、元坝 101 井、元坝 102-侧 1 井、元坝 5-侧 1 井、元坝 21 井、元坝 222 井和元坝 161 井等井大安寨段泥页岩储层测试, 均获得工业气流, 元陆 30 井的测试结果进一步扩展了大安寨段泥页岩储层含气区域, 扩大了勘探油气成果。