

水力压裂施工污染源分析及防控建议*

刘 召 蒋海岩 袁士宝

(西安石油大学石油工程学院)

摘 要 文章通过结合水力压裂施工及工艺特点,分析了水力压裂污染源及可能造成的伤害:水力压裂对油层造成伤害、施工不当引起的相邻水层的污染以及对环境的污染。认为需要重视水力压裂带来的潜在问题,应在技术方面完善、改进,减少对储层及环境的污染与危害;我国在水力压裂法律方面应加快完善相应法律、法规;还应建立完整的监管体系,管控水力压裂存在的污染风险,减少污染危害,水力压裂才能可持续发展。

关键词 水力压裂; 环境污染; 环境保护; 防控体系

DOI:10.3969/j.issn.1005-3158.2017.05.006

文章编号:1005-3158(2017)05-0019-04

0 引 言

水力压裂技术自 1947 年在美国堪萨斯州实验成功至今已过半个世纪^[1],水力压裂大幅度提高了低渗透油藏及页岩气藏的产量。然而,水力压裂引发的环境问题值得深思,法国和保加利亚等国相继颁布法律禁止采用水力压裂开发,英国和德国却保持积极的态度,美国针对水力压裂的环保问题做出了很大的努力,而且较有成效。但是在国内,水力压裂造成的污染是今后环保仍需努力的方向。本文通过水力压裂特点分析污染源,认为应当加强法律、技术及环境监管措施,水力压裂才能可持续发展。

1 水力压裂生产的特点

1.1 规模大

水力压裂自实验成功以来,一直受到广泛的关注。到 1981 年全球压裂作业数量已超过 80 万井次,至 1988 年,作业总数发展至 100 万井次以上,大约近代完钻井数的 35%~40%进行了水力压裂。近年来水力压裂技术在我国也发展得很快,2003 年前后对卫城深层油藏实施水力压裂,共压裂油井 25 口,累计增油 2.25×10^4 t;2010 年前后,华北油田共计实施压裂 2 000 余井次,累计增油 200×10^4 t^[2],增产效果显著,单井产量达 $2\ 000 \sim 8\ 000$ m³/d。

根据能源和资源领域的咨询公司 PacWest 公布的数据,在 2011 年,美国水力压裂消耗 $2\ 879 \times 10^4$ t 压裂砂。而美国在近几年的水力压裂用砂还在持续增长^[3]。水在压裂施工中的消耗量巨大,美国密歇根

的 Antrim 页岩气田,压裂一口井一次需要 $2\ 081.7 \times 10^5$ m³ 水^[4]。仅从砂和水的使用量上来看,水力压裂施工的规模是非常大的,这样大规模的施工对地层和环境造成的伤害和污染值得关注。我国部分地区生态环境脆弱、水资源缺乏,页岩气的开采可能会引发地表水资源枯竭、地下水位下降、土地盐碱化、生态环境恶化等一系列问题。

1.2 压力高

水力压裂是利用液体传压的原理,在地层压开裂缝,形成具有导流能力的渗流通道^[5]。一口 2 100 m 常规砂岩油藏的垂直井,压裂时压力大概需要达到 38 MPa,而一般在钻井施工时需要的压力只是平衡地层压力,大概需要 20 MPa^[6]。

近几年国内部分大型压裂施工应用实例见表 1^[7-8]。

从表 1 可以看出近年来油田水力压裂各个指标的变化情况,施工压力从 1985 年的 32 MPa 到 2009 年的 100.3 MPa,压力增加了 3 倍。随着技术的不断进步和发展,钻井从一千多米发展到两三千米甚至更深,油藏越来越深,施工的压力也越来越大。从最初的垂直井到水平井,压裂的规模越来越大,施工压力也越来越高。高压施工应注意施工的安全性问题,需要考虑设计压力、套管承压。若施工压力大于设计压力,相邻地层会被压开,产生污染,考虑套管承压,避免施工时套管破损,压裂液泄漏,导致地层水污染,甚至泄漏至浅层水,造成严重的污染。

1.3 时间短

在油田井下作业中,水力压裂在作业时间上比其

* 基金项目:国家自然科学基金资助(51674198);基于燃料沉积演化机制的火烧油层启动与控制;陕西省自然基金(2016JM5031);低渗透油藏注气氧化-驱油协同增产效应机理与控制方法;陕西省教育厅科学研究计划项目(16JS095);低渗透油藏注气氧化-驱油增产与协同增效机理研究。刘召,西安石油大学 2015 级油气田开发专业在读硕士,研究方向:火烧油藏。通信地址:陕西省西安市电子二路东段 18 号西安石油大学,710065

他作业时间更短。钻井作业一般需要耗费几个月时间作业和处理问题^[8],注水需要长时间作业,甚至几年。在水力压裂实施作业的过程中,由表 1 可知压裂

耗时相对较短。近 30 年以来,施工排量明显增加,压裂作业时间更短,使得对地层的施工强度和作业污染的可能性更大。

表 1 近几年国内部分大型压裂施工应用实例

序号	时间	地点	历时/h	压裂液用量/m ³	加砂量/m ³	压裂返排液排量/(m ³ /min)	最高泵压/MPa
1	2010.06	川中某井	—	4 969.2	376.4	—	—
2	2010.05	贵州大方某井	4	2 121.6	270	9.5~10	48.7
3	2010.04	塔河某井	12	4 085	33.7	<9.2	83.7
4	2010.04	塔河某井	10	3 450	48	<11.6	91.3
5	2009.10	胜利某井	3	800	97	—	72.5
6	2009.08	辽河某井	—	668	100	6.2	70
7	2009.07	川西气田某井	—	845	80	4	100.3
8	2006.09	胜利某井	—	—	89.5	<5.7	69
9	2006.03	中原某井	4	138	44.2	4.5	72.4
10	2003.01	文南油田某井	—	—	—	—	50.3
11	1985.05	吉林某井	14	16.8	—	—	32

2 水力压裂的伤害及污染源分析

近年来水力压裂快速发展,在美国被大范围使用,许多报道指出水力压裂在环境方面存在着很大的危害,并对人体健康构成了威胁。美国科学家 DiGiulio 指出水力压裂中添加物存在污染水资源的潜在危险^[9]。下面通过对水力压裂技术的调研,分析水力压裂的污染。

2.1 对油层本身的伤害

①施工压力过大造成的伤害。水力压裂中施工压力过大,导致一些大分子物质进入孔隙结构中,这些物质吸附在孔隙结构表面或者堵塞孔隙,导致孔隙渗透率降低。水力压裂施工压力过大导致地层岩石沿着潜在的微裂缝滑移或岩石移动,堵塞渗流通道和孔道,使地层渗透率降低。近些年美国页岩气开发地区诸如阿肯色、宾夕法尼亚州等的地震发生率较 2000 年以前增加了 10 倍,据报道称,这是由于大规模的水力压裂措施造成的^[10]。

②施工操作不当造成的伤害。水力压裂在地层造成渗流通道,降低井底附近的渗流阻力,但压裂后破胶不彻底或是压裂液不能及时有效的返排,压裂液中的胶体滞留在地层中,堵塞渗透通道,对井底附近造成严重污染,使裂缝的导流能力下降。对于压裂裂缝,压裂液残渣滞留在裂缝中形成滤饼,堵塞油气渗流通道,导致压裂裂缝的导流能力下降^[11]。

③压裂液引起地层物性变化的伤害。当压裂液滤液进入水敏性储层,会引起储层岩石表面性质及结

构的变化,导致储层岩石的膨胀、运移,堵塞孔道,降低渗透率。亲水的岩石由于表面吸附了亲油的压裂液物质,导致油相渗透率下降。压裂液进入地层时,降低储层的温度,地层流体中的蜡、胶质、沥青质等重组分物质析出,降低储层渗透率。

2.2 对相邻水层的污染

水力压裂施工也可能会造成相邻水层的污染^[12],水力压裂作业裂缝高度与施工排量有着非常密切的关系,施工排量越大,裂缝越高^[13]。施工作业需要根据设计的压力、压裂液排量及加砂量掌握裂缝延伸变化,如果相邻水层被压开裂缝,压裂液、油气沿着压开的裂缝进入水层,造成对相邻层的污染。油气沿裂缝向水层转移,并在地下最薄弱的地方—水井储集、外溢,甚至在人为活动条件下(合闸、断路等)突然起火。曾经有村民的水井,因上述原因发生火灾^[14],2013 年 12 月美国北达科他州男子发现家里自来水可以燃烧,专家称这是由于水力压裂井泄漏引起的^[15]。

2.3 压裂返排物落地污染

压裂作业排出的残余压裂液具有高浊度、高黏度和处理难度大的特点^[16]。在油水井压裂、酸化施工中每口压裂井产出的废水量约为 100~200 m³^[17]。返排液中含有高分子聚合物、有毒重金属、放射性物质等^[18-20],直接排放会导致土地盐碱化、植被退化、农作物死亡,还可能威胁人类健康如生育会受到严重影响^[18],甚至有可能威胁生命,所以必须对其进行处理。水力压裂对地层的伤害及对环境的污染见图 1。

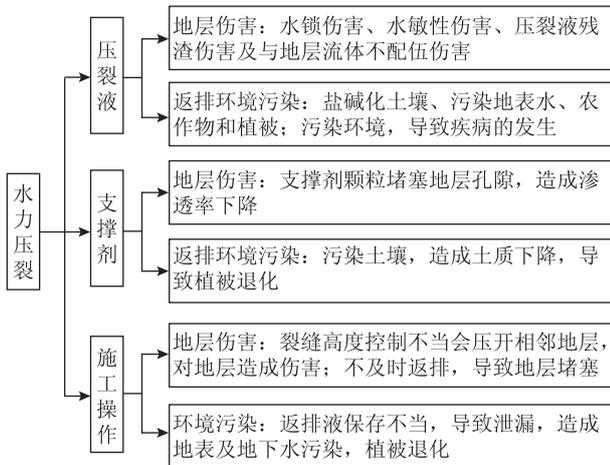


图1 水力压裂对地层的伤害及对环境的污染

3 水力压裂污染防控

水力压裂的大范围使用,使人们开始担忧该技术污染水源,威胁当地生态环境和人体健康。潜在的环境影响还包括地下水的污染、泄漏及对健康的影响。对此必须再次审视水力压裂的环境问题,加强环境保护。

3.1 技术方面的进步

①减少压裂液对地层的伤害。水力压裂液与地层岩石性质的不配伍会导致地层黏土膨胀、分解、运移堵塞渗流孔道;与地层流体不配伍会发生反应产生固体沉淀,堵塞渗流孔道,降低渗透率。所以在配制压裂液时要考虑与地层黏土及流体的配伍性,选择压裂液 pH 值、防膨胀黏土添加剂,确定适合的压裂液来降低压裂过程中对地层的内部伤害。配制压裂液时,需要加入有突出效果的破乳剂、破胶剂和助排剂,优选出易返排的压裂液配方,减少压裂液残渣滞留地层造成的滞留伤害。对于压裂液在地层中由于形成油水两相流动而造成的水锁伤害,可采用反向排液短期解除压裂液的水锁伤害,水锁伤害并不是持久伤害,但其对地层产生的伤害仍需予以重视。在综合各种因素的情况下,应尽量采用清洁压裂液,以最大程度地减少对储层的伤害。

②降低压裂返排液对环境的污染。一般的压裂返排液中含有地层中流体、压裂液添加剂、重金属、高分子聚合物以及地层碎屑,不能直接返排到地面。返排到地面的返排液首先要有安全、封闭的储液容器以及在运输途中确保安全、密闭,保证返排液不会泄漏至环境中,导致泄漏污染。一般的返排液处理有深井灌注、处理后重新利用和处理后外排。深井灌注时需要通过微地震等技术探测地层中潜在的裂缝,确保注入层与水层之间没有潜在裂缝连通,以及监测注入管道的完

损,以免造成压裂液运移,污染水层。压裂液成分复杂且含有重金属及有毒物质,导致其处理十分困难。对于压裂液的处理,应着重于处理后的回注以及重金属的回收,现有的方法有混凝沉淀法、Fe/C 微电解法、高级氧化技术、活性污泥法和组合工艺法。这几种工艺单独处理返排液时,在某一方面具有显著的效果,但对成分复杂的返排液处理来说,并不能直接达到回注要求。例如,混凝沉淀法可以有效地去除有机质,但对压裂液中的离子、重金属及放射性物质没有明显的去除效果;Fe/C 微电解法具有很好的废水色度及 COD 去除率,对铁的消费比较大,长时间工作后阳极处铁易钝化。达到回注要求需要结合两种或几种处理工艺,今后应在综合处理方面投入更多的研究,实现达到处理要求、操作流程少、工艺简单以及低成本的目标。

③减少支撑剂对地层的伤害。对于软地层而言,支撑剂会大量嵌入地层之中,支撑剂的嵌入会导致填充裂缝宽度的降低,支撑剂的破碎也会降低裂缝导流能力。在支撑剂的筛选上需要严格按照支撑剂的筛选标准,对于软地层尽量选择适合压裂工艺的低强度、高硬度的支撑剂。

④降低支撑剂返排对环境的污染。压裂液在返排过程中一些支撑剂会随之返排到地面,对于返排的支撑剂同样需要合理处理,直接过滤后排放会污染土壤,造成土质下降,导致植物死亡、植被退化。首先支撑剂的注入应准确计量,避免过量后返排,不仅造成油井堵塞,还带来污染。返排的支撑剂可以通过沉淀、过滤后再加工处理,达标后再次利用,既节省成本又可以避免排放后的环境污染。

⑤减少施工操作不当给地层带来的伤害。压裂时需要控制裂缝的延伸方向和延伸的高度,操作不当会压开相邻储层,对相邻储层造成污染。施工技术方面还应深入研究控缝高技术,以合理的方式控制窜流污染;压裂后需要及时破胶并返排,如果破胶返排不及时或是不完全,压裂残渣滞留地层,堵塞油气渗流通道,对地层造成伤害。施工操作应在这方面加强,掌握好破胶及返排的时间,减少残渣滞留地层。

⑥降低施工操作不当对环境的污染。地面返排液应安全保存,若保存不当,可能导致返排液泄漏,会严重污染地表水及地下水,还会污染土壤、植被。废液储存和运输容器都应具备密闭性好、耐腐蚀以及有报警装置。

3.2 法律规范

法国、保加利亚等国对水力压裂实施禁令,因其可能产生的污染及潜在的地震因素。而在美国,由于越来越

越多的人对水力压裂的质疑,并且要求禁止水力压裂。为此 2011 和 2012 年加州相继颁布了加州规定法则(CCR)和加州资源法律(PRC)来制约和规范水力压裂。

我国低渗、特低渗油藏较多,而且水力压裂井次逐年增加,大规模的水力压裂使得环境问题显得比较突出。需要对水力压裂施工过程建立一系列的标准,对存在的环境问题需要明确的法律来约束。这就需要加快完善水力压裂开发的法律、法规、技术标准和规范并保障其有效落实。

3.3 监管体系的建立

水力压裂的发展必须建立完整的监管体系。水力压裂存在潜在的环境污染风险,在开发过程中需要高度重视其环境污染及影响,加强对环境影响的监督。水力压裂工艺是高耗水作业,大量水资源的消耗使得生态用水减少,尤其是一些水资源严重缺乏地区,平衡水力压裂和水资源的关系是发展水力压裂技术不可避免的问题,应对本地区的水资源、人口、生态环境情况进行调查,得出基础数据并长期监测水力压裂技术应用后的变化情况,根据情况及时作出调整。作业带来的环境污染问题同样引发深思。在我国,对于返排液的处理尽管在技术方面有了较大的提高,但还存在许多问题,如废液处理周期较长、耗费药品量大、投资高、成本高、处理工艺繁冗等。尤其是现场处理,处理废液量小、耗时长,更容易造成落地污染。为了实现返排液安全、高效、环保处理,对于废液处理,需要有一整套处理细则及标准。具体的技术操作也需要进行监管,如套管泄漏、压裂液窜流等。对于施工中可能突发的情况,应该早作预防,避免事故发生。

4 结论及建议

水力压裂的特点主要有:规模大、压力高、施工时间短。水力压裂对油层本身、相邻水层及生态环境均存在一定的污染或伤害。

环境问题仍是水力压裂技术面临的最严重的问题,对于水力压裂潜在的环境污染应当在技术方面加强和创新,最大程度地减少污染;在法律方面,我国应当加快完善制定水力压裂开发的法律、法规、技术标准和规范等并保障其有效落实;同时也必须建立完善的监管体系,加强环境、技术操作方面的管理。

参考文献

[1] 杨秀夫,刘希圣.国内外水力压裂技术现状及发展趋势[J].钻采工艺,1998(4):21-25.
[2] 李海娟.适于陕北低渗透油藏的低分子聚合物清洁压裂

液体体系研究[D].西安:西安石油大学,2014:1-87.

- [3] 人民网.水力压裂法:我们应该知道的事[EB/OL].(2014-06-23)[2016-09-25].http://paper.people.com.cn/zgnyb/html/2014-06/23/content_1445133.htm.
- [4] 微博.水力压裂的环境问题[EB/OL].(2012-06-07)[2016-09-25].http://blog.sina.com.cn/s/blog_3e567417010134j0.html.
- [5] 胡南.苏里格气田二叠系储层水力压裂缝长宽高的侧井预测[D].成都:西南石油大学,2012:1-83.
- [6] 陈刚,姚智,张健,等.钻井液对钻井速度的影响分析[J].科技与生活,2013(4):138-138.
- [7] 张光生,王维波,杨冬玉,等.国内大型压裂技术的应用与发展[J].辽宁化工,2012,41(1):46-50.
- [8] 周文高,胡永全,赵金洲,等.控制压裂缝高技术研究及影响因素分析[J].断块油气田,2006(4):70-72.
- [9] cnBeat.怀俄明州一水库首次被证实受到水力压裂作业的污染[EB/OL].(2016-03-31)[2016-09-25].<http://www.cnbeta.com/articles/488557.htm>.
- [10] 人民网.水力压裂是否要为地震负责[EB/OL].(2013-07-22)[2016-09-25].http://paper.people.com.cn/zgnyb/html/2013-07/22/content_1272429.htm.
- [11] 张海龙,崔福林,徐影.压裂液伤害及油层保护研究[J].石油天然气学报:江汉石油学院学报,2005(S1):95-97.
- [12] 张东晓,杨婷云.美国页岩气水力压裂开发对环境的影响[J].石油勘探与开发,2015,42(6):801-807.
- [13] 张乐,王雪峰,李旭.水力压裂施工中压裂缝高度预测方法研究[J].西部探矿工程,2009,21(1):60-62.
- [14] 刘荣芳,陈鸿汉,王延亮,等.浅析某油田地下水石油类污染途径[J].中国地质,2007,34(1):153-159.
- [15] 齐鲁晚报.美男子发现自家自来水可燃烧,专家:水力压裂导致[EB/OL].(2013-12-31)[2016-09-25].http://www.qlwb.com.cn/2013/1231/74384_2.shtml.
- [16] 李年银,赵立强,张倩,等.裂缝高度延伸诊断与控制技术[J].大庆石油地质与开发,2008,27(5):81-84.
- [17] 刘音,常青,曹阳,等.油田压裂反排液处理的研究进展[J].石油化工应用,2013,32(9):5-9.
- [18] 医学论坛网.水力压裂化学物质影响女性生育功能[EB/OL].(2016-08-27)[2016-09-25].<http://www.cmt.com.cn/detail/1255345.html>.
- [19] KASSOTIS C D, BROMFIELD J J, KEMPL K C, et al. Adverse reproductive and developmental health outcomes following prenatal exposure to a hydraulic fracturing chemical mixture in female C57Bl/6 mice[J]. Endocrinology, 2016, 157(9):3469.
- [20] 王林.浅析油井压裂液返排管理与实践[J].中小企业管理与科技旬刊,2015(7):244.

(收稿日期 2017-06-05)

(编辑 王薇)