

深井超深井碳酸盐岩储层深度改造技术

——以塔里木油田为例

丁云宏¹ 程兴生¹ 王永辉¹ 张福祥² 彭建新²

1.中国石油勘探开发研究院廊坊分院 2.中国石油塔里木油田公司

丁云宏等.深井超深井碳酸盐岩储层深度改造技术——以塔里木油田为例.天然气工业,2009,29(9):81-84.

摘要 塔里木盆地碳酸盐岩储层具有埋藏深、温度高、油气藏类型复杂、非均质性强等特点,这使得储层深度改造技术成为世界级难题。在低伤害前置液、地面交联酸、乳化酸等材料技术飞速发展的基础上,通过建立大型物理模型,并对酸蚀裂缝导流、酸岩反应动力学等酸压裂机理进行深入研究,初步形成了适应不同储层特点的具有针对性的储层多元化深度改造技术,如深度酸压技术、水力压裂技术、交联酸加砂压裂技术等。塔里木油田碳酸盐岩储层改造的成果及现场应用情况也验证了上述工艺技术的有效性。

关键词 塔里木盆地 碳酸盐岩 压裂 交联酸 注入 多级 酸化 技术

DOI:10.3787/j.issn.1000-0976.2009.09.022

0 引言

2004年至今,是塔里木高温深井碳酸盐岩储层深度改造技术紧密结合储层特点向多元化发展的阶段。随着塔里木油田勘探开发的跨越发展,对工程技术提出了更高的要求。由于储层埋藏深、地层温度高、滤失大、酸岩反应速度快、酸蚀裂缝长度有限,如何实现高温深井碳酸盐岩储层改造的有效深穿透,达到发现油气、认识储层和稳产高产的目的,已成为储层改造技术发展目标。伴随材料技术得到飞速发展,通过建立大型物理模型对酸蚀裂缝导流、酸岩反应动力学等酸压裂机理研究的深入,初步形成了适应不同储层特点的具有针对性的储层深度改造配套工艺技术,包括不同液体组合的多级注入+闭合酸化的深度酸压裂技术、植物胶压裂液加砂技术、交联酸加砂技术等碳酸盐岩储层多元化的深度改造技术^[1]。

1 碳酸盐岩储层特点和改造难点

塔里木盆地碳酸盐岩勘探的主要领域为塔中、轮南、英买力三大古隆起。储层埋藏最深达7 000

m,温度高达160℃,储层岩性有石灰岩、泥质灰岩、白云岩等多种,储层类型有大缝洞型、基质孔隙型、裂缝型、致密型等^[2]。

储层埋藏深导致井口施工压力高,施工难度及风险大,对液体降阻性能要求高;储层温度高,酸液的高温缓速问题严重制约着酸压效果;由于酸岩反应速度及裂缝的刻蚀形态与岩性有很强的相关性,同样影响着酸压裂效果。

2 储层改造液体技术

2.1 GHPG 高温压裂液体系

GHPG 高温压裂液体系是选用低水不溶物改性瓜胶粉作为稠化剂、选用有机硼交联剂、优选其他功能性添加剂,形成的高温低伤害压裂液体系,为了降低井口施工压力,采用KCl对该体系进行加重,密度达到1.13 g/cm³,基本满足加砂压裂和酸压裂前置液性能要求,体系的残渣低于200 mg/L。

2.2 DMJ-130 地面交联酸体系

DMJ-130 地面交联酸是在胶凝酸(稠化酸)基础上发展起来的新型酸液体系。该体系通过含有可交联基团的高分子来稠化酸液,然后使用交联剂交联

作者简介 丁云宏,1962年生,教授级高级工程师,博士,中国石油天然气集团公司高级技术专家;现任中国石油勘探开发研究院廊坊分院副院长,从事油气藏增产改造研究及科研管理工作。地址:(065007)河北省廊坊市万庄44号信箱。电话:(010)69213347。E-mail:dyhong@petrochina.com.cn

形成冻胶,增加酸液在地层温度下的黏度,从而降低酸岩反应速度和酸液的滤失,以满足携砂的性能要求。一种胶囊破胶剂能确保施工结束后残酸彻底破胶返排,降低了高分子对储层的伤害。

2.3 乳化酸

乳化酸是在乳化剂及助乳化剂作用下,将油和酸按一定的比例配制而成的油包酸型乳状液,其缓速是通过油包酸,将酸与岩石隔离开来,从而延缓酸岩反应速度。目前,乳化酸的稳定性问题已经得到解决,但高摩阻仍制约着在高温深井中的应用。

3 酸岩反应机理研究成果

3.1 酸蚀裂缝大型物模的建立及初步应用

为了研究压裂液、酸液在裂缝中的分布、流态以及对酸蚀缝导流形成的影响,实验室建立了裂缝大型物理模型装置。使用该装置研究了黏度差、密度差、注入速度等对裂缝中两种流体流态的影响,研究酸液对裂缝壁面的刻蚀形态。

3.2 建立高温酸岩反应动力学方程

酸岩反应速度决定酸的有效作用距离,影响裂

缝表面的刻蚀形态,从而决定酸压裂后有效酸蚀缝长和酸蚀裂缝导流能力,并最终影响酸压裂效果。对比研究交联酸与颗粒灰岩、含泥灰岩、白云岩的反应动力学参数^[3],同时对比研究胶凝酸与颗粒灰岩的反应速度(表1)。结果表明岩性都为颗粒灰岩,20%的盐酸浓度的胶凝酸的反应速度是交联酸的1.875倍,交联酸的反应速度比胶凝酸慢,交联酸的缓速性能远远优于胶凝酸;同样为交联酸,对于不同岩性,含泥灰岩和白云岩反应慢,尤其是含泥灰岩,尽管泥质含量为1%左右,但影响酸岩反应速度。刻蚀形态也存在差异,胶凝酸、交联酸与颗粒灰岩反应不均匀刻蚀明显,但交联酸与含泥灰岩、白云岩反应没有明显刻蚀沟槽,基本为平面反应。

3.3 酸蚀裂缝导流能力模拟试验

酸蚀裂缝导流能力试验是采用平行板岩心在地层温度和压力条件下,模拟不同酸压裂工艺方法,测定所得到的酸蚀裂缝导流能力(表2)。

试验结果表明,20%胶凝酸鲜酸能得到一定的导流能力,10%胶凝酸(模拟残酸)导流能力远远低于鲜酸,说明酸液进入裂缝的深部刻蚀能力降低,试

表1 不同酸液体系、不同岩性的反应动力学参数表

岩性	试验温度(°C)	酸液类型	动力学方程: $J = KC^m$ [mol/(cm ² ·s)]	20% HCl 反应速度 [mol/(cm ² ·s)]
颗粒灰岩	130	交联酸	$8.695 \times 10^{-7} C^{1.8453}$	2.59
颗粒灰岩	130	胶凝酸	$1.987 \times 10^{-6} C^{1.7082}$	4.8
含泥灰岩	130	交联酸	$5.109 \times 10^{-8} C^{2.8497}$	1.1
白云岩	130	交联酸	$4.221 \times 10^{-8} C^{2.6202}$	0.332

表2 酸蚀裂缝导流能力试验结果表

试验编号	酸液类型	不同闭合压力下的导流能力(μm ² ·cm)					
		0 MPa	10 MPa	2 MPa	30 MPa	40 MPa	50 MPa
1	20% 胶凝酸	128.76	101.87	70.69	38.43	18.66	8.40
2	10% 胶凝酸	102.59	69.95	37.06	20.73	5.75	2.76
3	20% 胶凝酸+闭合酸化	129.70	109.62	63.37	32.86	16.41	29.04
4	20% 交联酸	455.18	252.10	138.50	86.30	54.55, 67.30	45.30
5	交联酸二次反应酸液	358.80	198.70	108.24	66.74	46	38.90

验3与试验1相比,说明闭合酸化能显著提高裂缝导流能力。二次试验后平行板岩心的酸蚀溶孔道更为明显,而且酸蚀孔道的深度更深,具有更高的导流能力(图1)。说明采用高黏度的交联酸,无需进行闭合酸化和多级注入工艺就可以获得高的导流能力,而且由于酸岩反应慢,活性酸能进入地层深部,是进行碳酸盐岩地层深部改造的理想酸液体系。

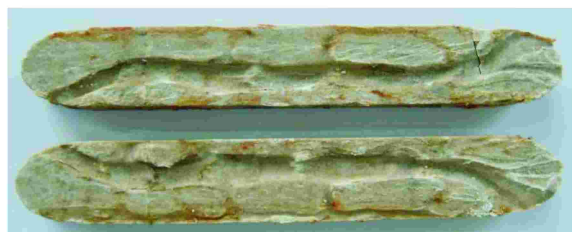


图1 20% 交联酸二次反应酸蚀裂缝形态图

4 碳酸盐岩储层深度改造工艺技术

4.1 深度酸压技术(多级注入+闭合酸化)

深度酸压技术主要靠“多级注入”来实现,多级注入是指将数段前置液和酸液交替注入地层进行酸压施工的工艺技术。根据地层不同特性,用非反应性高黏液与各种不同特性的酸液组合,尤其是利用酸液高黏和低黏的黏度差形成指进达到非均匀刻蚀的目的,构成不同类型、不同规模的多级注入酸压工艺技术^[4-5]。

闭合裂缝酸化是针对较软储层以及均质程度较高的储层发展和应用的一种工艺技术。其主要是解决近井的导流问题,因此常与“多级注入”组合使用,形成“多级注入+闭合酸化”工艺技术。

目前使用的“多级注入+闭合酸化”工艺技术,不仅通过非反应性前置液充填溶蚀孔洞降低滤失,而且,通过增加酸液的黏度,降低了酸液的滤失和酸岩反应速度,通过不同酸液的黏度差形成指进产生非均匀刻蚀,以及考虑了岩性的差异对反应速度和酸蚀裂缝导流形成的影响等,即多种手段和方法来实现深穿透高导流的裂缝。

4.2 水力压裂技术

酸蚀缝长一直是无法评估的,同时,深井中地层闭合压力高,裂缝的有效期往往难以保证。基于酸压裂的这些局限性,针对碳酸盐岩杨氏模量高、缝宽窄、加砂量少、易砂堵的特点,开展了高温深井碳酸盐岩水力压裂攻关研究^[6]。形成了包含以下主要原则的碳酸盐岩加砂压裂工艺技术:①优选低伤害压裂液减少对地层伤害,并满足施工需要的耐温耐剪切性能;②针对储层杨氏模量高、裂缝宽度窄的特点,优选40~60目(或30~50目)小粒径支撑剂;③砂液比以低起点、小台阶、多步、控制最高砂液比的设计原则;④为了降低近井摩阻、降低地层天然裂缝的滤失,在前置液中加入支撑剂段塞“打磨”近井裂缝扭曲、降滤;⑤为了降低地层破裂压力,并解除孔眼污染,采用20%稀盐酸对地层进行预处理。

4.3 交联酸加砂压裂技术

水力压裂能够形成长的人工主裂缝,支撑裂缝导流能力保持较久,但压裂液为惰性液体,不与碳酸盐岩反应,所以沟通天然裂缝能力较差,特别是当最大主应力方向与天然裂缝走向一致时,此缺点尤为明显。交联酸加砂压裂便是在此情况下提出的,它可以结合酸压和水力压裂的优点,充分发挥二者的优势,总体看来,交联酸加砂压裂具有的主要优点有能够形成长的人工裂缝、能够沟通更多天然裂缝、保持长效导流能力,使储层得到最大限度的改造。

4.4 塔里木油田碳酸盐岩储层改造工艺方法的选择

不同类型储层应该采用不同工艺方法。基于以上对地层的分类情况,结合已经相对成熟的工艺措施和酸液体系,确定碳酸盐岩配套的改造原则和改造措施(表3),结合具体井层在大的工艺方法确定的前提下,需要进行优化规模、排量以及对酸液类型的优选等。

5 应用实例

5.1 交联酸多级注入深度酸压

A井6438~6448m井段,采用前置液+交联酸+胶凝酸二级注入工艺方式,共注入地层总液量520m³,施工排量5.0m³/min,施工压力19.3~82.9MPa。施工结束后停泵压力只有7.3MPa且不降,折算至井底压力已经接近地层压力,说明人工裂缝已经沟通了比较大的缝洞储集体。酸压后求产日产油82.3m³、气408800m³,表明该井经改造后取得了良好效果。

5.2 植物胶加砂压裂

B井奥陶系改造目的层段4849~4885m,地层温度132℃。采用GHPG压裂液体体系进行加砂压裂,施工排量4.0~4.5m³/min,井口压力65.11~54.8MPa,注入40~60目陶粒30.5m³,平均砂浓度400kg/m³。压裂后求产,日产油103.87m³、日产气52741m³,截至2008年11月,累计增产原油7.17×10⁴t。

表3 碳酸盐岩储层改造配套措施表

储层类型	改造原则	改造方式
大缝洞型	沟通缝洞发育带	大规模前置液探索缝洞的酸压工艺
孔隙型	扩大渗流面积	加砂压裂为最优选择
天然裂缝型	扩大渗流面积、深穿透形成网状沟通	交联酸加砂或考虑清水加砂,酸压裂
致密型	就储层本身不建议改造	/

5.3 交联酸加砂压裂

对C井5 529~5 550 m进行了交联酸加砂压裂施工,共加入地层30~50目陶粒 36.2 m^3 ,砂浓度 $100\sim 463\text{ kg/m}^3$;施工压力 $70\sim 81.2\text{ MPa}$,排量 $5.27\sim 5.39\text{ m}^3/\text{min}$ (图2)。

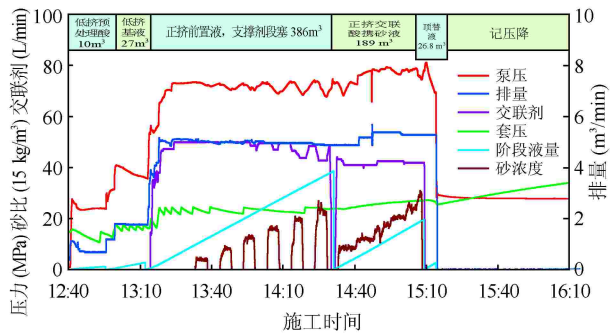


图2 C井交联酸加砂压裂施工曲线图

C井的交联酸加砂压裂是国内外首次在井深超过5 000 m、温度高于 $140\text{ }^\circ\text{C}$ 地层中成功实现真正的

交联酸加砂施工,为碳酸盐岩的储层改造开拓了新的、更广阔的途径,在碳酸盐岩改造工艺突破的历史进程中具有里程碑的意义。

参考文献

- [1] 陈志海,戴勇. 深层碳酸盐岩储层酸压工艺技术现状与展望[J]. 石油钻探技术, 2006, 33(1): 58-61.
- [2] 叶登胜,任勇,管彬,等. 塔里木盆地异常高温高压井储层改造难点与对策[J]. 天然气工业, 2009, 29(3): 77-79.
- [3] 孙连环. 塔里木盆地塔中碳酸盐岩储层酸岩反应动力学实验研究[J]. 石油与天然气化工, 2006, 35(1): 51-53.
- [4] 满江红,张玉梅. 深井碳酸盐岩储层深度酸压工艺技术探讨[J]. 新疆石油学院学报, 2003, 15(1): 77-80.
- [5] 郭建春,辛军,赵金洲,等. 酸处理降低地层破裂压力的计算分析[J]. 西南石油大学学报:自然科学版, 2008, 30(2): 83-86.
- [6] 李中林,张焯,孙忠杰,等. 碳酸盐岩储层水力加砂压裂技术研究与应用[J]. 吐哈油气, 2008, 13(2): 147-150.

(收稿日期 2009-06-11 编辑 韩晓渝)