

◀ 试井与开采 ▶

川东北飞仙关组碳酸盐岩气藏产能影响因素及压裂酸化新技术探讨

吴月先

(中国石油四川石油管理局井下作业公司, 四川隆昌 642150)

摘要: 川东北地区飞仙关组碳酸盐岩气藏的储集层条件良好, 不论直井还是水平井均可获高产工业气流, 投产前的解堵酸化均可实现大幅度增产。在分析介绍该地区气藏地质特征的基础上, 全面剖析了影响产能的主要因素, 并对多功能深部酸化技术方案和稠化酸加砂压裂技术方案进行了具体探讨。

关键词: 碳酸盐岩油气藏; 酸化压裂; 酸化效果; 酸处理液; 提高采收率; 川东北

中图分类号: TE357.2 **文献标识码:** B **文章编号:** 1001-0890 (2006) 01-0065-04

川东北地区中生界三叠系下统飞仙关组碳酸盐岩气藏分布较为集中, 且飞仙关组地层纵向上可细分为飞 1、飞 2 和飞 3 ($T_1 f^1$ 、 $T_1 f^2$ 和 $T_1 f^3$) 3 个亚层, 其下部均是储集层发育部位。中国石化仅用了 3a 的时间, 就发现了探明天然气地质储量为 $1\ 143 \times 10^8 m^3$ 的四川盆地内最大的整装气田——普光气田。中国石油也在该地区发现了探明天然气地质储量为 $500 \times 10^8 m^3$ 的整装高陡背斜大气田——罗家寨气田, 目前已完钻 12 口井, 其中发现工业性气流的气井 7 口, 产量为 $1\ 400 \times 10^4 m^3/d$, 罗家 14 H 井完井后地面测试初产气量为 $263.43 \times 10^4 m^3/d$, 创单井气产量最高纪录。

天然气井产出能力的影响因素较多, 有现实的、也有潜在的, 均是气藏地质特征的展示。大规模酸化, 不仅是勘探评价的重要手段, 也是高效开发的重要技术支撑。川东北地区天然气藏前期的酸化作业虽已实现大幅度提高气井产量的目的, 但其工艺技术仍有许多不足之处, 为满足气田高效开发的要求, 必须研究和试验应用新的酸化压裂技术。为此, 笔者就强化酸化功能和防气藏上覆地层应力敏感损害产出条件, 进行了全方位的技术探讨, 并给出了具体的技术方案, 以进一步推动该地区酸化压裂技术创新。

1 飞仙关组气藏主要地质特征

川东北飞仙关组气藏地质特征的研究成果不断增多^[1-4], 这为压裂酸化地质再认识奠定了基础。罗家寨飞仙关组地层高陡构造位于川东北宣汉—开江区块上, 处于五宝场坳陷与温泉井构造之间的断层下盘潜伏构造带上。罗家寨飞仙关构造为整装背斜构造, 长短轴之比为 9.71, 闭合高度 850 m、圈闭面积 64.5

km^2 , 构造上又存在着相对局部的高点。高构造主弯曲率值加上受罗 1 和罗 2 号断层以及成岩后期溶蚀作用的影响, 导致地层内裂隙较发育。有关的薄片分析结果表明, 裂缝、缝合线及溶孔的平均宽度为 0.017~0.020 mm, 这对于连通孔喉有着重要的作用。漏失层段地层岩心也发现有少量高角度构造小缝存在, 溶蚀孔较为发育, 有良好的连通性, 不排除溶孔连通形成溶蚀缝的可能性。尽管如此, 缝和溶孔对改善低渗和特低渗储集层的渗透率仍有明显作用, 也为酸化改善储集层的产出条件创造了良好的基础。

沉积相的分析, 有助于深化对现有酸化工艺的认识。罗家寨构造位于古地理混合水白云石化相区与未白云石化相区之间, 其原始沉积的礁、滩特征受其海平面变化的影响。岩性特征、沉积相特征和各种复杂的成岩作用是川东北飞仙关鲕滩分布的控制因素。早期沉积成岩, 继而埋藏加深, 后期的地层抬升, 不仅仅展示了储集层的形成、破坏和建设, 其中也涉及到地层岩性的演变, 灰岩向白云岩方向转变, 而转化程度的大小在很大程度上影响了现今储集条件的优劣。这种演变又往往是非均匀的, 导致现今储集层岩性在纵向上或横向上有明显非均质性, 因而在酸化过程中, 纵向和横向上的反应速度也就不相同。例如在同等条件下, 酸化过程中白云岩的酸岩反应速度大于灰岩。实践表明, 水平井酸化后的水平渗透率与垂向渗透率之比为 73。水平方向渗透率的大幅提高, 有利于扩

收稿日期: 2005-07-06

作者简介: 吴月先 (1945—), 男, 四川简阳人, 1970 年毕业于成都地质学院石油系, 长期从事压裂酸化地质科研工作, 高级工程师。

联系电话: (0832) 3918435

大水平方向的酸作用范围，增大水平方向供给半径（且是水平井段天然气主要来源方向）。

飞仙关组储集层岩性主要有鲕粒云岩、溶孔云岩和鲕粒灰岩，而后者是次要的，因鲕粒灰岩的孔隙度 $<3\%$ ，致密程度高。鲕粒云岩或晶粒云岩一般孔隙度均 $>4\%$ ，是主要储集岩。较好的储集层部位不仅易于酸化，且开发前期还是低生产压差开采的主要产出部位。储层结构有裂缝-孔隙型、裂缝型和孔隙型，储集空间以孔隙为主，裂缝起产出通道作用。储集空间主要为次生孔、粒间溶孔、鲕模孔、晶间溶孔、粒间溶孔，晶间孔很小，这表明溶蚀作用是改造储集层的主要机理。川东北地区气藏中部的埋藏深度为3 660 m左右，不仅有利于钻井，也利于酸化压裂、井下作业和连续油管的使用。

2 气藏产出能力影响因素分析

2.1 气层完善程度

气层暴露的井段越长、暴露的面积越大，则气层的完善程度越高，相应的气井产出能力越强。罗家11H井、罗家14H井和罗家16H-1井均为水平井，罗家14H井采取裸眼衬管完井，另外两口井采取射孔完井方式，完井后的初产天然气量分别为 200.30×10^4 、 263.43×10^4 和 $240.00 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。可见，裸眼衬管完井不仅仅完善程度高，且未受固井作业和射孔作业的影响，加上完井速度快，减少了钻井液对储集层的浸泡时间，所以完井后的初产量较高。

2.2 井眼类型

罗家寨气田罗家1井和罗家6井均为射孔完井的直井，初产量分别为 45.84×10^4 和 $31.32 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ，而罗家11H井和罗家16H-1井均为射孔完井的水平井，初产量分别为 200.30×10^4 和 $240.00 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ，通常水平井较直井的储层污染损害更严重，但是水平井的产量仍然明显高于直井。水平井往往是径向钻进于产层内较好的储集层部位，水平井段就是高导流的通道，且水平井段较长，供给气源的半径较大，这是直井难以相比的，而且直井一般钻穿的产层部位的非均质性很严重。因此利用水平井开发可以有效提高气藏产出能力，其主要优点有：1) 暴露产层的长度大，泄流面积大，产出的阻力小，利于降低生产压差，减小地层压力损失速度，利于稀井高效开采，有助于防治底水和边水所引起的水患；2) 有助于穿遇更多的天然缝洞；3) 酸化难度较小，其解堵的主要部位在井眼附近，且注酸的强度较低，往往易于清除堵塞，如罗家11H井酸化后的视表皮系数为

-2.01。

2.3 储层条件

储集层性质的优劣和所处构造部位的高低，直接影响气井产能的高低。就直井而言，罗家1井和罗家6井，因其储集层性质较好，加之处于相对较好的构造部位，初产时分别获得 45.84×10^4 和 $31.32 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的工业气流。而罗家4井由于储集层性质一般，所处构造部位较差，初产时仅产微气，酸化后的产气量也仅有 $1.68 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ，还过早地产出了地层水。在基质酸化后的低压差开采条件下，Ⅱ类以下的差储层不是气井产能的主要贡献。

2.4 非均匀损害

储层的非均质性可能导致气井钻井过程中产生垂直于井壁的椭圆形损害。水平钻井时，由于地层存在横向非均质性，加上井眼轨迹漂移的影响，各井段储层条件差异就更明显，其储层损害的总趋势是由强到弱，其中又是变化的。这其中水平垂向渗透率非均质性也必然对气井产能造成巨大影响，因为水平井段流体的流动状态不是单一的，近处有可能是径向流，而远处有可能是线性流。

对于直井而言同样如此，纵向储层非均质性明显，其损害的总趋势是由强到弱，其中仍是变化的，尤其裂缝较发育部位损害范围更是增大。这均对气藏产能产生影响。

2.5 入井工作液的性能

气井钻井完井过程中，钻井液、固井液必然会对储层造成损害，其中钻井液对储层的损害尤为严重。例如罗家寨气田所钻井完井后视表皮系数高达30~70，罗11H井即使使用低伤害钻井液钻进，其岩心渗透率也降低了31.2%。采用酸化解堵技术可以在一定程度上降低入井液对储层的损害，但并不能完全恢复气藏的产能。

2.6 酸化泵注技术

罗家6井与罗家1井均为射孔完井的直井，应用同一浓度的胶凝酸酸化处理（酸量相当），但前者每 100 m^3 酸的净增气产量却较后者少 $10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。分析罗家6井施工曲线：前期泵注11 min排量平稳，其中前6 min泵压曲线明显上升，后5 min泵压下降约12 MPa，此为井壁附近解堵的过程；以后9 min内排量大幅度上升，泵压也有所上升，这是酸液向地层内充填的过程；继而历经9 min，在排量处于高值稳定时，泵压下降约7 MPa，此为纵向上第二个部位被解堵。往后本应稳定排量泵注，但排量在16 min

内一直大幅度下降，泵压也相应如此，这明显影响了酸化效果。

罗家 11 井应用组合酸化大型作业后，天然气产量净增 $40 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ，但每 100 m^3 酸液净增天然气产量却远远低于直井罗家 1 井和罗家 6 井。分析施工曲线发现：前 30 min 泵注作业中，泵压曲线和排量曲线的变化趋势具有对应性，最为明显的是泵注 30 min 后、排量快速上升到约 $8 \text{ m}^3/\text{min}$ 时，泵压快速降至 10 MPa，降低 40 MPa，地层解堵很明显。但此后 25 min 的泵注作业中，一直降低排量（降低 $1.3 \text{ m}^3/\text{min}$ ）泵注，泵压一直处于低压逐降的趋势，显然不利于提高酸化效果，尽管该井酸化后的视表皮系数降至 -2.01，但水平渗透与垂直渗透率之比却高达 73。由此可以看出，酸化泵注技术对储层酸化效果的影响很大，因而对气藏的产出能力影响很大，必须针对不同的气藏采取不同的酸化泵注技术。

2.7 开发中潜在的因素

目前飞仙关组气藏的压力系数较高，但随着特大高产气井成批的投产，气源近处的亏空将增大，地层压力必然呈下降趋势，其下降幅度主要取决于气藏水驱动力的补充情况。如果井下压力失去平衡，在气藏上覆地层应力的作用下，储层微细裂缝将会闭合，致使产能明显下降。相关的研发成果^[5]要引起重视，并力求开发研究新技术。飞仙关高陡构造的气柱高度待查明，因罗家 4 井不仅酸化后气产量低，且有产水迹象。这表明有底水和边水存在，开发期要注重监测，并力求合理配产，尽可能均衡稀井开采。以往的开采实践表明：气井一但有产水迹象，特别是井筒积液时，井筒附近地层的气相渗透率就要下降，影响气井产能，况且产出气中含较高浓度的硫化氢气体，会对井筒液面以下管柱造成严重的腐蚀，垢物积存井筒后堵塞产气通道，以至于被迫进行大修井作业。因此在气井投产时，管串结构上应采取不同材料的组合管或下部连接有防腐的采气管柱。

3 压裂酸化新技术探讨

普光气田和罗家寨气田目前采用的酸化工艺技术起到了一定的提高气井产能的作用，但也存在着技术上的局限性，因而迫切需求提高压裂酸化工艺技术的针对性和科学性，以实现少投入多产出的目的。为此，笔者提出了 4 种酸化压裂技术方案及实施原则，希望能够促进川东北天然气藏的高效开发。

3.1 方案 I

酸化液：胶凝酸（ HNO_3 基）+ 隔离液 + 胶凝酸

（ HCl 基）。

该方案适用于储层条件较差的低产井及堵塞特别严重的气井，旨在发挥多功能酸的作用，尤其是王水的处理作用。该酸化液主要对井眼附近地层解堵，对于开发井井底腐蚀垢物堵塞也有特殊的处理作用。该方案中隔离液不宜多，达到井筒安全泵注为目的，可采用液氮隔离。对于水平井酸化压裂作业，前沿的胶凝酸的粘度和浓度较后者高，采用交替泵注的效果会更好。

3.2 方案 II

酸化液：乳化酸（ HCl 基）+ 隔离液 + 油基携固相酸（粉末 HNO_3 ）+ 隔离液 + 胶凝酸（ HCl 基）。

该方案适用于储层非均质性的直井、水平井段储层横向非均质性的水平井、裂缝发育的高渗储层及开采中的气井。粉末硝酸^[6]可提高暂堵降滤失的转向作用，实现自然选择性作业，并有自然非均匀酸化的作用，利于酸液破乳和降粘，还有自然缓速反应的作用，宜于在地层条件下增大酸浓度。隔离液的要求与方案 I 相同，如果前沿的乳化酸乳化效果好，则前沿的隔离液泵注程序可以去掉。泵注方法也可在水基压裂造缝的基础上进行，有条件时至少进行二级交替泵注，其效果或许更好。需要对粉末硝酸粒的外壳进行研究，如果外壳有防水性能，可用于前沿的水基压裂液中；如果外壳有防酸的性能，可直接加入到各种酸液中，将使工艺技术更简便，效果会更好。

3.3 方案 III

酸化液：乳化酸或胶凝酸（ HCl 基）携砂液。

该方案就是对裂缝和孔洞发育的高渗储集层进行全程式高压充填作业，变高产井地面调节产能为地下调节产能，防止开发中气井应力敏感损害出现，以其高导流能力的支撑缝作为主要的产出条件。稠化酸可有较高的粘度，尤其是胶凝酸，有一定的携支撑剂的能力，一般条件下支撑缝的长度不会很长，但产出效果则较好。饱填支撑剂是该方案技术关键，尾追支撑剂中可适量掺入纤维，以防止支撑剂回流井筒。酸液的另一个功能就是酸蚀扩大动态缝宽度，增大支撑缝缝宽，从而提高导流能力，还可酸蚀沟通更多的微缝和孔喉，提高泄流能力。该方案要求砂浓度前期不宜高，加入的支撑剂的粒径不宜粗，必要时可在前沿注入不同级别的支撑剂，总之支撑剂的粒径应分级增大，不能超越级别。

3.4 方案 IV

酸化压裂液：水基压裂液 + 稠化酸携砂液。

稠化酸携砂压裂已在部分油田进行了试验应用，具有很大的技术开发潜力^[7]。

该方案与方案Ⅲ的根本区别之处就在于它是在高于地层破裂压力条件下进行地层内人工造缝，并沟通、延伸和扩大天然裂缝。稠化酸的作用是酸蚀动态缝壁，从而扩大缝宽，提高缝的导流能力，还会处理掉地层破裂时的破碎颗粒及压裂时的残渣，同时也有促使水基压裂液降粘的作用，以满足作业后及时返排的要求。如果采用乳化酸，就不必用隔离液了；如果用胶凝酸，最好适当泵注隔离液。压裂施工时可提高水基压裂液的粘度，以防止滤失过大；在前期滤失较大时，可应用延迟交联的压裂液，或掺入包有防水外壳的粉末硝酸颗粒。该方案也可以用延迟胶联的水基压裂液取代稠化酸作业，将有防水外壳的粉末硝酸粒掺入到支撑剂中，在地层条件下防水外壳破裂后就起酸基破胶剂的功能，可以清除压裂液残渣，从而满足及时返排的要求。

4 结 论

1) 川东北地区碳酸盐岩油气藏分布较为集中，已发现的普光气田是四川盆地最大的气田。

2) 川东北地区飞仙关组地层高陡构造利于天然气富集，充气饱满程度高，属于中等异常高压气藏，储层结构具有多样性，储集和产出条件均较好，不论直井还是水平井均有很高的初产量。

3) 钻井桥堵利于保护产气层，尽管完井后的视表皮系数高达30~70，但易于大型酸化作业解除堵塞，获取更理想的产能。

4) 影响天然气气藏产出能力的因素很多，加上目前酸化压裂技术本身又存在不足之处，因而研究开发新的酸化压裂技术就尤为迫切。

5) 酸化压裂技术方案的具体探讨，有益于开阔视野，推动技术创新，促进学术交流，促使各种特色新技术不断萌芽。

参 考 文 献

- [1] 王芙蓉, 陈振林, 王雪莲, 等. 川东北地区飞仙关组飞三段储集性能研究 [J]. 新疆石油学院学报, 2004, 16 (4).
- [2] 王维斌, 马廷虎, 邓团. 川东宣汉—开江地区恶性井漏特征及地质因素 [J]. 天然气工业, 2005, 25 (2): 90-92.
- [3] 王兴志, 张帆, 马青, 等. 四川盆地东部晚二叠世—早三叠世飞仙关期礁、滩特征与海平面变化 [J]. 沉积学报, 2002, 20 (2).
- [4] 陈更生, 曾伟, 杨雨, 等. 川东北部飞仙关组白云岩成因探讨 [J]. 天然气工业, 2005, 25 (4).
- [5] 何健, 康毅力, 刘大伟, 等. 孔隙型与裂缝-孔隙型碳酸盐岩储层应力敏感研究 [J]. 钻采工艺, 2005, 28 (2): 84-86.
- [6] 蔡长宇. 硝酸粉末酸化工艺技术 [A]. //论文集编写组. 井下作业承包商协会论文集 [C]. 北京: 石油工业出版社, 2004.
- [7] 吴康, 马发明, 石映. 四川盆地采气工程技术现状及发展方向 (下) [J]. 天然气工业, 2005, 25 (4): 119-124.

〔审稿 吴晓东〕

Discussion on Factors Affecting Carbonate Gas Reservoir Productivity and Acidizing Fracturing Technology in Feixianguan Formation in Northeast Sichuan

Wu Yuexian

(Downhole Services Company, Sichuan Petroleum Administration, Longchang, Sichuan, 642150, China)

Abstract: Storage conditions of carbonate gas zones in the Feixianguan formation are very good, both vertical and horizontal wells can yield gas at a high flow rate, blockage removal and acidizing operations conducted before production can enhance yield to a great extent. Based on analyzing geologic characteristics of gas zones in the area, the major factors affecting productivity are thoroughly examined, the versatile acidizing program for deep zones and the viscous-acid sand fracturing scheme are also deeply discussed.

Key words: carbonate reservoir; acid fracturing; acidizing effect; acidizing fluid; enhanced oil recovery; Northeast Sichuan

作业机操作系统监视器研制成功

在井下作业施工中，由于起下作业时操作人员不能看到钻柱提升的高度，只能靠经验和感觉判断，容易发生事故。为此河南油田井下作业公司自行设计了用于观察作业机操作系统的监视器。该监视器包括壳体、轴、蜗轮蜗轴、显示仪表光耦等光电电路以及干簧管等部分，结构简单，体积小，工作时部件无滑动摩擦，无负荷运转，在防撞刹车前有灯光和警告声提示，能准确显示工作位置、报警位置以及刹车的全过程，适用于大修作业机、小修作业机和钻井钻机，并具有起下作业操作方便、安全性能高、成本低的优点。