

# 裂缝性碳酸盐岩储层保护技术研究进展

杨枝<sup>1</sup>, 孙金声<sup>2</sup>, 张洁<sup>2</sup>, 张希文<sup>2</sup>, 王成彪<sup>1</sup>

(1. 中国地质大学(北京), 北京 100083; 2. 中石油集团钻井工程技术研究院, 北京 100195)

**摘要:**概述了近年来国内外裂缝性碳酸盐岩储层保护技术的研究进展。主要介绍了裂缝性碳酸盐岩储层损害的评价方法、损害机理以及储层保护技术的研究现状,并与成熟的碎屑岩储层保护技术相比较,分析了裂缝性碳酸盐岩储层保护技术的发展方向。

**关键词:**裂缝性碳酸盐岩储层;评价方法;损害机理;保护技术;钻井液

**中图分类号:**TE258 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2009)11-0004-07

**Advances in Protection Technology of Fractured Carbonate Reservoir/YANG zhi<sup>1</sup>, SUN Jin-sheng<sup>2</sup>, ZHANG Jie<sup>2</sup>, ZHANG Xi-wen<sup>2</sup>, WANG Cheng-biao<sup>1</sup>** (1. China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. CNPC Drilling Research Institute, Beijing 100195, China)

**Abstract:** The paper reviews advances in protection technology of fractured carbonate reservoir in recent years and chiefly introduces the present situation of damage evaluation, damage mechanism and protection technology about fractured carbonate reservoir. Moreover, by comparing with the protection technology of fragmental rock reservoir, the development direction of the research in protection technology of fractured carbonate reservoir is analyzed.

**Key words:** fractured carbonate reservoir; evaluation; damage mechanism; protection technology; drilling fluid

裂缝性储层指油气渗流通道主要为裂缝的储层,这些储层大多为碳酸盐岩。碳酸盐岩是极为重要的储集岩,中东、北美、前苏联以及我国四川盆地、塔里木盆地、鄂尔多斯盆地、华北平原等都有极其丰富的油气资源储藏于碳酸盐岩储层中,对石油工业具有重大价值。裂缝性碳酸盐岩储层岩石的非均质性强,裂缝开度具有不确定性,在勘探开发过程中易受外来流体和固相颗粒的损害,至今国内外对裂缝性碳酸盐岩油气藏的损害评价及储层保护技术措施还没有形成成熟统一的标准和方法,因此裂缝性碳酸盐岩的储层保护技术成为全球当前亟需解决的重要难题之一。

## 1 裂缝性碳酸盐岩储层损害评价方法的研究

碳酸盐岩油气藏在石油勘探开发中占有重要地位,在钻井、完井以及修井等作业过程中碳酸盐岩储层的裂缝很容易受到工作液及其滤液的污染而导致产能下降,因此对裂缝性储层损害进行评价是实施储层保护技术的前提。由于裂缝性碳酸盐岩储层本身的复杂性和特殊性,其对钻井完井液体体系的损害评价方法与孔隙型砂岩相比较有较大的变化。赵佩华、DiJiao、MukulM、Sharma 等<sup>[1]</sup>对裂缝性油藏中钻

井液诱发的地层损害进行了实验测试,发现钻井液对裂缝造成的损害是严重而不可逆的,将筛分的纤维作为钻井液的添加剂可显著地降低地层损害的深度和范围。对于这种污染,一般采用基质酸化措施以提高油气井的产量。赵立强<sup>[2]</sup>针对碳酸盐岩储层基质酸化时酸在裂缝性-孔隙系统中的流动反应特点,建立并完善了裂缝性碳酸盐岩基质酸化设计计算模型,能较好地模拟裂缝性碳酸盐岩储层基质酸化过程,可用于基质酸化设计和优化施工参数。李道芬<sup>[3]</sup>阐述了适用于四川地区裂缝性致密碳酸盐岩储层损害的评价新方法,对 11 种钻井完井液体体系进行了损害评价,为该地区裂缝性碳酸盐岩气层减少钻井完井液损害、指定和优选使用保护储层的钻完井液体体系提供了重要依据。

## 2 裂缝性碳酸盐岩储层损害机理的研究

储层损害机理是指在油气井作业中油气层受到损害的原因及物理化学变化过程,是制定和实施保护油气层技术的基础<sup>[4]</sup>。国外自 20 世纪 50 年代开始了储层损害机理的研究<sup>[5]</sup>,国内则始于 80 年代初期,目前对孔隙性储层损害机理已比较清楚<sup>[6,7]</sup>,但对裂缝性碳酸盐岩储层的损害机理问题,国内外研

收稿日期:2009-06-12

基金项目:“大型油气田及煤层气开发”-21-深井钻录、测试技术和配套装备(编号:2008ZX05021)

作者简介:杨枝(1982-),女(汉族),天津人,中国地质大学(北京)博士研究生在读,钻井工程专业,主要研究方向是钻井液储层保护,北京市海淀区学院路 29 号中国地质大学(北京)B07 工程,perfect\_stone\_zhi@yahoo.com.cn。

究较少,且主要集中在固相颗粒运移堵塞、应力敏感性和水相圈闭等方面<sup>[8-11]</sup>。

## 2.1 流体敏感性<sup>[12]</sup>

钻井过程中,地面面临钻井液或地层水的侵入,外来流体侵入储层,可造成储层不同程度污染。我们这里所谈及的储层流体敏感性是指在钻井完井过程中,外来流体与地层水不配伍,侵入的滤液与储层中的矿物发生物理化学作用,生成沉淀物沉积在裂缝或孔隙的通道中,形成流体流动的阻碍物,引起储层渗透率的变化。粘土矿物和非粘土矿物均属于敏感性矿物。Hewitt 与 Gray 分别指出水敏损害主要是粘土膨胀或微粒运移堵塞孔喉造成的,并认为可以采用渗透率测试法、物理测试法等方法来测试储层水敏程度<sup>[13-15]</sup>。非粘土矿物对储层造成的损害由 Muecke 提出,研究表明储层胶结程度、流体相分别都是影响储层渗透率降低的因素<sup>[16]</sup>。Cesar. M. Cerda 于 1988 年开始对微粒的受力情况进行研究,他认为颗粒主要受到范氏力、双电层力和水平方向的水动力 3 种,而当时未考虑重力和垂直方向的水动力<sup>[17]</sup>。王欣等结合微粒的受力分析研究,理论性地探讨了重力、范氏力、双电层力和水动力对微粒的影响,并着重研究了微粒水化分散、运移的临界浓度和临界启动速度等多种影响因素<sup>[18]</sup>。

引起速敏伤害的可运移微粒,既有粘土矿物微粒,也有方解石、钙长石等其他非粘土矿物的地层微粒。李治平等运用渗流力学等值阻力原理,根据注入盐水测得的气藏岩心速敏实验数据有条件地计算出气井生产的极限产量<sup>[19]</sup>。段勇指出岩心速敏实验时应该分别用煤油和盐水作实验流体以模拟采油井和注水井的速敏实际情况,认为采油井速敏多发生在井筒附近而注水井速敏既发生在井筒附近也发生在储层深部,因此注水井速敏性强于采油井<sup>[20]</sup>。

岩样渗透率在淡水与盐水中的测定值不同,这一现象被 Johnon 和 Beon 发现后,随后 Monaghan 等明确提出了“地层损害”的概念<sup>[21]</sup>,这一阶段对损害机理的认识主要是由于粘土矿物遇水膨胀而导致地层孔隙度和渗透率下降。Land 等指出,尽管做了数百块岩心实验,仍未能建立蒙脱石含量与水敏损害程度的关系,即蒙脱石膨胀不能引起地层损害。这意味着不含膨胀性粘土矿物的地层也会受到损害<sup>[22]</sup>。Mungan 研究了流体 pH 值和矿化度的变化对渗透率的影响,认为高 pH 值盐水会降低储层渗透率<sup>[23]</sup>。

## 2.2 固相颗粒运移、堵塞损害

固相颗粒、微粒与钻井工作液中的各种组分的泥饼、滤饼及泥膜,是裂缝-孔隙型碳酸盐储层的主要损害因素。泥饼以嵌入井壁部分孔、洞、缝的形式附着在井壁上,滤饼则以侵入裂缝方式深入裂缝。Sharma 认为:没有形成泥饼前的滤失对储层的损害很大,是重要损害因素。随着固相颗粒在孔喉处“架桥”,并在井壁上形成泥饼。泥饼就能阻止液相侵入,减小滤失速率。显然,最有效的控制损害的方法是通过在井壁周围形成低渗透、高强度、质量好的泥饼以减少固相与液相侵入<sup>[24]</sup>。王新建通过扫描电镜和能谱分析证明<sup>[10]</sup>,泥膜普遍存在于碳酸盐岩储层的孔隙、喉道和裂缝壁,是裂缝-孔隙型碳酸盐岩储层最普遍、最重要的损害因素之一。

Gruebeck 和 Collins 讨论了颗粒在多孔介质中运移和沉淀的机理。他认为,一旦高固相钻井液堵住多孔介质中的细喉道,液流将转向较大喉道,引起更多的固相侵入。但是,最后作用在淤塞喉道上的压差太大,以致破坏桥塞,这样固相会涌出,重新开始沉淀<sup>[25]</sup>。Porter 指出:损害液和颗粒必须远离储层,一旦进入多孔介质,在开发返排过程中就无法清除出来<sup>[26]</sup>。Bennion 和 Thomas 认为储层通常包含氧化矿、膨胀粘土和非膨胀粘土。然而其他物质,如钻井液、水力压裂液、水泥浆、岩屑也有可能侵入储层。降滤失剂、加重剂、架桥剂/封堵剂、注入水中的颗粒、钻屑及各种腐蚀产物均可能运移、沉淀及流动<sup>[27]</sup>。Bennion 认为:只有当润湿相饱和度增加到开始活动时(比如水锥进或水窜),固相运移才有可能发生。如果储层是非水湿性的,固相运移的问题很快发生,润湿相会立即运动。通常,碎屑岩中固相运移引起损害更严重,因为可能含有的可运移的物质,比如粘土更多。这个问题在碳酸盐岩中也存在,所以也要评价碳酸盐岩孔隙空间中可能运移的颗粒的胶结程度与组成<sup>[28]</sup>。

向阳等对平落坝气田须二段气藏岩心损害研究表明,造成损害的原因一是钻井液滤液进入地层增大了水膜厚度,二是钻井液颗粒侵入岩心堵塞了渗流通道。张沛元探讨了钻井液静结构力对裂缝油气藏的损害机理,认为:含高固相的钻井液进入地层裂缝,由于静切应力,在裂缝中产生静结构力,阻碍油气向井筒顺利运移,是裂缝性油气藏的主要损害<sup>[29]</sup>。范翔宇等研究了固相侵入深度与钻井液密度、粘度、失水、钻井液颗粒半径以及钻压和地层本身的物性参数的关系。根据物质平衡理论建立起钻井液固、液两相侵入深度的关系模型<sup>[30]</sup>。张振华

等<sup>[31]</sup>通过对国内四川石炭系碳酸盐岩储层的完井模拟实验初步表明,钻井工作液对储层的损害主要是滤液侵入和固相颗粒堵塞,其中固相颗粒和滤饼是造成裂缝性储层损害的主要因素。根据滤失量计算,孔隙性储层滤液损害深度为0.3~0.6 m,固相颗粒损害深度为2~3 cm,而裂缝性储层滤液和固相颗粒的损害深度为1~5 m<sup>[32]</sup>。

### 2.3 水相圈闭损害机理

水相圈闭是气层最基本的损害因素,严重制约着碳酸盐岩油气藏的发现成功率和经济开采性<sup>[33]</sup>。B. Parekh 将水相圈闭定义为:水基流体的滤失引起近井地带或裂缝地带含水饱和度高,导致油气相对渗透率的降低<sup>[34]</sup>。Bennion 等探讨了水相圈闭的形成机理、影响因素和损害消除方法<sup>[35~44]</sup>, Cimolai 等认为水相圈闭是由于储层初始含水饱和度远远小于束缚水饱和度引起的<sup>[44,45]</sup>。

Holditch 研究发现致密砂岩气层损害会导致岩石毛管压力增加,气层损害和毛管压力增加的综合影响会导致水相圈闭损害<sup>[46]</sup>。Bennion 认为井壁附近孔喉体系中圈闭液(可能是水、气或油)饱和度瞬变或恒变,毛细管阻力和相对渗透率共同作用导致产出水或注入液的相对渗透率下降,并指出水基钻井液或滤液进入低初始含水饱和度地带、油基钻井液或滤液进入低油饱和度地带,均可能造成圈闭效应<sup>[28]</sup>。贺承祖建立了毛细管束模型,从理论上分析指出外来流体在油气层中的毛细管力是控制水锁效应的主要因素,决定水锁效应的主要是毛细管力,而表面张力只是影响毛细管力的一个因素,此外还必须考虑接触角和毛细管的有效半径影响<sup>[47]</sup>。

M. D. Erwin 通过不同泥浆损害实验表明:油基泥浆返排渗透率大于水基泥浆返排渗透率,研制的油基泥浆预防水相圈闭损害效果明显<sup>[48]</sup>。杨呈德等通过多元回归分析的方法,建立了低孔低渗储层水锁损害渗透率恢复值与储层渗透率及孔隙度的关系式,认为减小水锁损害的方法就是用表面活性剂或醇类物质进行处理,以降低油、水界面张力,从而使毛细管阻力减小,达到减小水锁效应的目的<sup>[49]</sup>。此研究方法和结论对解决海相裂缝性储层的水锁问题也有借鉴意义。

游利军等从初始含水饱和度、储层压力、流体性质和储层孔隙结构等方面分析了水相圈闭损害影响因素,提出了预测水相圈闭损害程度的相圈闭系数法,研究了其对渗透率、初始含水饱和度和压差的敏感性,给出了预测方法<sup>[50]</sup>。

### 2.4 应力敏感性

由于有效应力改变而引起的储层物性的变化即为储层应力敏感性,碳酸盐岩的固有特点是天然裂缝不同程度地发育,表现出宏观—微观多尺度结构复杂性,因此裂缝的应力敏感性一直成为人们关注的重点。国内外的研究集中在实际测量应力对裂缝渗透率的影响。1952年 Fatt 和 Davis 发现储层岩石具有应力敏感性<sup>[51]</sup>,随后 Elkins 和 Skov 也证实了这一现象。樊世忠认为:应力敏感是由很多扁平的裂缝或裂缝状的孔隙及毛细管关闭引起的,由于应力敏感性的存在,岩心渗透率下降50%~90%<sup>[52]</sup>。

Lorenz 认为,在同等应力条件下,大裂缝的应力敏感性要强于小裂缝,但是小裂缝的渗透率受到的影响要强于大裂缝。同时他还指出虽然大裂缝对渗流的贡献占绝大多数,但是小裂缝提供了流向大裂缝的油气<sup>[53]</sup>。张振华等认为:裂缝性碳酸盐岩油气藏存在滞后效应,这与砂岩孔隙性油气藏损害因素不同,即同一个有效应力条件下,有效应力从大到小测时的渗透率小于从小到大测时的渗透率<sup>[31,54]</sup>。Ayoub 研究了有效应力与碳酸盐岩岩样渗透率之间的关系。表明:随着有效应力的增加,渗透率呈现3种变化趋势:一是渗透率平缓的下降;二是渗透率先急剧下降,然后平缓的降低;三是渗透率升高。第一种情况是由于实验岩样含有粒间孔,第二种是岩样含有溶蚀孔,第三种异常情况 Ayoub 认为是岩样中粘土矿物含量反抗净压力所致<sup>[55]</sup>。康毅力等利用应力敏感系数法描述了储层的应力敏感性,他们认为孔隙型与裂缝—孔隙型碳酸盐岩应力敏感性及其敏感机理是不同的,前者应力敏感性弱于后者,主要是由于其受力变形为弹性形变而后者形变为塑性形变范畴<sup>[56~58]</sup>。

李宁等通过实验得出了裂缝性碳酸盐岩渗透率急剧降低的临界压力约为2.5~3.0 MPa<sup>[59]</sup>。向阳等对裂缝—孔隙型储层应力敏感性进行了研究,发现人造裂缝、天然裂缝和孔隙型碳酸盐岩岩样的应力敏感程度是依次减弱的<sup>[60]</sup>。蒋海军和鄢捷年将实验数据进行回归得到了渗透率与有效应力的乘幂关系,用关系式中的常数表示应力敏感性程度<sup>[61]</sup>。Vuting Duan 通过分析不经打磨的储层和露头的自然裂缝及大量人造裂缝表面的拓扑特征,并对自然裂缝的应力敏感性进行了数值模拟,并深入分析与裂缝接触的微观模型,建立了一套裂缝—孔隙性储层应力损害的分析 and 评价方法<sup>[31]</sup>。国内学者高博禹也给出了碳酸盐岩储层的应力敏感模型,他认为

当有效应力增加时,各种孔隙介质的应力敏感度是不同的。裂缝首先被压缩,且卸压后很难恢复原状,然后是喉道、晶间孔被压缩,导致孔隙体积的减小。当有效应力进一步增加时,由于颗粒的支撑作用,储层岩石基本不再发生变化,渗透率趋于稳定<sup>[62]</sup>。

此外,碳酸盐岩中也含有石膏及盐类等蒸发岩矿物。它们或是呈层状与碳酸盐岩互层,或是板块状、孔隙充填状产于碳酸盐岩中。盐膏层的蠕动会造成井壁失稳,其存在给钻井及开发带来了复杂的问题。张景廉等认为油气与膏盐有着某种共生的关系<sup>[63]</sup>。戴金星、朱光有等指出碳酸盐岩地层中膏盐层系较为发育,其可参与反应形成硫化氢,因此可以认为膏盐的存在是硫化氢形成的前提条件<sup>[64-66]</sup>。

### 3 裂缝性碳酸盐岩储层保护技术的研究

#### 3.1 裂缝性碳酸盐岩储层暂堵机理研究

目前广泛使用的屏蔽暂堵技术<sup>[67-69]</sup>,主要是针对孔隙性砂岩储层,而对于裂缝性碳酸盐岩储层,其油气储集空间和储集性能同时受孔隙和裂缝等因素尤其是构造作用的控制,形成的一系列裂缝会使储集空间发生变化。

(1)当裂缝性碳酸盐岩储层裂缝宽度小于10  $\mu\text{m}$ 时,应选择可溶性的、粒径与储层孔隙及裂缝尺寸相匹配的、粒度分布合理的暂堵颗粒。Loeppke研究发现如果颗粒大小与裂缝宽度不匹配,形成的屏蔽层就不会稳定,适宜的颗粒尺寸分布才能达到有效的暂堵效果<sup>[70]</sup>。

(2)当裂缝性碳酸盐岩储层裂缝宽度大于10  $\mu\text{m}$ 时,应采取纤维状暂堵剂和起充填作用的颗粒状暂堵剂以及可变形的油溶性暂堵剂复配的暂堵方案。Jiao和Sharma建立了颗粒状暂堵剂(如超细 $\text{CaCO}_3$ )在裂缝中捕集沉积的方程式,研究表明平均裂缝宽度大于10 mm时,单一的颗粒状暂堵剂在滤液侵入的剪切力下,已不能有效的在裂缝壁上捕集沉积,不能形成稳定的屏蔽暂堵带,必须使用复配的暂堵剂<sup>[71,72]</sup>。

Jiao等还提出了使用2种不同的架桥剂 $\text{CaCO}_3$ 与酸溶性纤维可成功减少固相及液相浸入裂缝性岩心。实验结果表明纤维素材料比 $\text{CaCO}_3$ 类颗粒状材料更有效<sup>[73]</sup>,吴诗平等<sup>[78]</sup>得出相同结论。ALI等指出使用不同粒径的纤维颗粒能有效阻止严重枯竭的疏松地层的漏失<sup>[75]</sup>。Jiao和Sharma在用牛顿流体计算纤维状粒子牵引力方程的基础上提出了在非牛顿流体中计算纤维状颗粒牵引力的方程,建立了纤

维状颗粒在裂缝表面捕集沉积的条件方程式,并提出了裂缝宽度与裂缝表面积、裂缝高度、裂缝渗透率及基质渗透率间的函数式<sup>[72]</sup>。崔迎春利用分形理论对裂缝性储层暂堵机理进行了研究,表明裂缝性储层张开度具有分形特征,分维数相近可作为优选暂堵剂的原则<sup>[76]</sup>。

虽然国内外对裂缝性碳酸盐岩的暂堵机理进行了相关实验研究,但对裂缝宽度较大的碳酸盐岩储层,屏蔽暂堵技术仍不能有效保护裂缝性碳酸盐岩储层。

#### 3.2 保护裂缝性碳酸盐岩储层钻井液的研究

钻井液是保护油气层、防止损害技术的重要组成部分,也是造成储层损害的主要因素,是保护储层技术的关键<sup>[32,52,77-78]</sup>。

Krilov通过室内实验,采用加有中粗 $\text{CaCO}_3$ 的饱和盐水/合成聚合物钻井完井液,成功钻探了潘诺尼亚盆地一个高温的、含酸性气体的天然裂缝油藏,结果表明表皮系数略负,生产之初无储层损害<sup>[79]</sup>。Cipolla采用表面活性剂基聚合物钻井液(ClearFRACTM)钻张性裂缝油层,使其导流能力较使用前提高了40%~50%,有利于保护张性裂缝储层,提高产能<sup>[80]</sup>。Francisco开发的具有特殊结构的微泡沫钻井液,泡沫不聚结可循环使用,但在井眼条件下能聚集在一起,在地层裂缝及孔隙中形成桥堵,减少钻井液的侵入保护裂缝性储层<sup>[81]</sup>。Eric等介绍了MMS钻井液在裂缝漏失性碳酸盐岩储层中的成功应用<sup>[82]</sup>。贝克休斯公司研制出的Bio-lose90体系,为可酸溶、无固相体系,专门用于裂缝性碳酸盐岩储层,可以防止固相颗粒侵入碳酸盐岩裂缝,提高油井产能<sup>[83]</sup>。

国内主要采用优化钻井液体系复配暂堵组合的方法,如吴诗平等优选的暂堵型两性离子聚合物钻井液<sup>[74]</sup>、卢虎等通过聚多醇配合一定固相暂堵剂<sup>[84]</sup>、张振华等室内优化MMH正电胶钻井完井液<sup>[85]</sup>、叶艳等研制的复合盐弱凝胶无固相钻井液加入优选暂堵组合<sup>[77,86]</sup>等,均对保护裂缝性储层取得了一定的效果。胡三清等认为油溶性堵漏剂SP与SFP能对0.2~4 mm宽的裂缝实现有效封堵并易于反排和保护油层<sup>[87]</sup>。

王永恒等评价了孙金声等新研制的超低渗透钻井完井液<sup>[88]</sup>对裂缝的暂堵能力、滤饼质量和返排渗透率情况。研究表明:3.5 MPa正压差下,超低渗透钻井完井液对400  $\mu\text{m}$ 以内的不同宽度级别的裂缝均有很好的封堵效果<sup>[89]</sup>。李道芬<sup>[3]</sup>对四川地区使用

的11种钻井液进行的损害评价结果表明,钙处理钻井液对裂缝-孔隙型碳酸盐岩储层的损害较为严重且滤饼质量较差;加有纤维状处理剂的聚合物或聚磺钻井液对储层的损害程度较轻。高峰等<sup>[90]</sup>介绍了一种适用于裂缝性油层的钻井完井液,即在基浆中加入不同浓度的油溶性暂堵剂YD-1,暂堵率与解堵率较高,但对大裂缝油气藏,尚需进一步研究与论证。高自力<sup>[91]</sup>研究了RC800降失水剂、SEP-1膨胀剂、硅粉等水泥外加剂对于提高川东石炭系气层的固井质量和保护油层具有良好的效果。顾军<sup>[92]</sup>研究了低失水防气窜水泥浆使含缝的巴喀油田单井产量明显提高。

但是,这些具有保护裂缝性储层作用的钻井液大多针对裂缝性油藏,基本上沿用的是孔隙性储层保护技术,仅仅停留在室内评价和研究阶段,现场使用效果如何以及对裂缝性碳酸盐岩油气藏能否适用尚需进一步研究。

### 3.3 保护裂缝性碳酸盐岩储层的钻井方式<sup>[93]</sup>

伊朗国家石油公司在伊拉克北部采用欠平衡钻井在裂缝性碳酸盐岩地层钻了第一口井GS333,采用混气液或泡沫液作为钻井液,液相选用天然地层液原油,以减少由于压力瞬变或液体吸胀作用损害储层;气相采用氮气,由膜法制氮循环装置现场生成。结果表明:GS333井井壁规矩,未发现井漏事故。能够及时发现油气显示,对油层造成的污染轻,油井保持了较高的生产能力<sup>[94,95]</sup>。

刘大伟,康毅力等人认为对于裂缝宽度小于100 mm油气层,保护技术与孔隙型砂岩油气层相同,即采用屏蔽暂堵或屏蔽暂堵与水平井结合等保护技术;对于裂缝宽度大于100 mm的油气层,宜采用欠平衡钻井和大斜度井技术,同时与屏蔽暂堵技术结合并做好油气层的防喷防漏工作<sup>[96,97]</sup>。对于伴有H<sub>2</sub>S气体的气层,可适量提高pH值并在钻井液中添加H<sub>2</sub>S清除剂<sup>[98~100]</sup>。1988年,塔河油田开展了欠平衡钻井技术与试验应用,至今已在40余口井钻井中应用了欠平衡钻井技术,保护油气层效果较好<sup>[101,102]</sup>。

## 4 结语

总而言之,自20世纪50年代,裂缝性碳酸盐岩油气藏勘探开发日益成为世界各大石油公司和学者们关注的热点。通过几十年的努力,国内外在碎屑岩、孔隙性储层潜在损害机理与保护方面取得了极大的进步,然而对于裂缝性碳酸盐岩储层的损害机

理和保护技术却存在着认识不清、程度不高等问题,在理论和实践上都还有待探索:(1)裂缝性碳酸盐岩储层应力敏感性和闭合滞后效应;(2)有效应力条件下裂缝宽度的实用性预测;(3)裂缝性碳酸盐岩储层的损害评价和损害机理;(4)保护裂缝性碳酸盐岩储层的钻井液技术。由此可见,有针对性地研究裂缝性碳酸盐岩储层保护技术便成为当前的首要任务。

## 参考文献:

- [1] 赵佩华, DiJiao, Mukul M. Sharma. 裂缝性油藏中泥浆诱发的地层损害[J]. 国外油田工程, 1997, (8).
- [2] 赵立强, 李年银, 李文锦. 普光气田大型酸压改造技术[J]. 天然气工业, 2007, 27(7): 4-7.
- [3] 李道芬. 碳酸盐岩裂缝性储层钻井完井液体系损害评价[J]. 钻采工艺, 2001, 24(5): 85-87.
- [4] 李克向. 保护油气层钻井完井技术[M]. 北京: 石油工业出版社, 1993.
- [5] Faruk C. 油层伤害——原理、模拟、评价和防治[M]. 杨风丽, 侯中昊, 译. 北京: 石油工业出版社, 2003. 235.
- [6] 郝明强, 刘先贵, 胡永乐, 等. 微裂缝性特低渗透油藏储层特征研究[J]. 石油学报, 2007, 28(5): 93-98.
- [7] 何更生. 油层物理[M]. 北京: 石油工业出版社, 1994. 10-48.
- [8] 陈忠, 张峭楠, 沈明道. 粘土矿物在油田保护中的潜在危害[J]. 成都理工学院学报, 1996, 23(2): 80-87.
- [9] 刘树根, 徐国盛, 梁卫. 川东石炭系气藏的封盖条件研究[J]. 成都理工学院学报, 1996, 23(3): 69-78.
- [10] 王新建, 邓素萍. 裂缝-孔隙型碳酸盐岩气藏储集层伤害因素的地质分析[J]. 天然气工业, 1997, 17(6): 72-74.
- [11] 陈忠, 唐洪明, 沈明道, 等. 川南香溪群四段低渗裂缝性砂岩储层保护[J]. 石油与天然气地质, 1998, 19(4): 340-344.
- [12] 何建, 康毅力, 刘大伟, 等. 川渝地区碳酸盐岩气层钻井碱敏性实验研究[J]. 天然气工业, 2005, 25(8).
- [13] Hewitt, C. H.. Analytical Techniques For Recognizing Water-sensitive Reservoir Rock[Z]. The SPE Rocky Mountain Regional Meeting. Denver, Colo. May 27 ~ 28, 1963.
- [14] Gray, D. H., Rex, R. W. Formation Damage in Sandstone Caused by Clay Dispersion and Migration[J]. Clay and Clay Mineral, Pergamon Press, Elmsford, NY(1966)355-66.
- [15] Chauveteau G, Nabzar L, Coste J P. Physics and modeling of permeability damage induced by particle deposition [J]. SPE 39463, 1997.
- [16] Mueck, T. W.. Formation Fines and Factors Controlling Their Movement in Porous Media[J]. SPE 7007. This paper First presented at the SPE-AIME Third Symposium on Formation Damage, held in Lafayette, LA, Feb. 15-16, 1978.
- [17] Cerda C. M.. Mobilization of quartz fines in porous media[J]. Clays and Clay Miners, 1988, 36(6): 491-497.
- [18] 王欣, 张达明. 储层微粒运移机理研究[J]. 钻井液与完井液, 1995, 8(3): 51-64.
- [19] 李治平, 赵必荣, 张敏渝, 等. 气藏岩心速敏实验数据分析方法及应用研究[J]. 钻采工艺, 1998, 21(6): 31-32.
- [20] 段勇. 岩心速敏试验理论与方法的研究[J]. 石油钻采工艺, 1994, 16(2): 56-60.
- [21] Monaghan P H, Salarthiel R A, Morgan B E, et al. Laboratory

- studies of formation damage in sands containing clays [M]. Fall Meeting of Los Angeles Basin Section, Los Angeles, 1959.
- [22] Land Carlon S. Effect of hydration of montmorillonite on the permeability to gas of water-sensitive reservoir rocks[J]. SPE 1206, 1965.
- [23] Mungan N. Permeability reduction through changes in pH and salinity[J]. JPT, 1965, 17(12): 1449 - 1453.
- [24] Jiao, D. Sharma, M M. Formation Damage due to Static and Dynamic Filtration of Water-Based Muds [J]. SPE 23823: 495 - 501.
- [25] Gruesbeck, C. Collons. Entrainment and Deposition of Fine Particles in Porous Media [J]. Soc Petrol Eng, 1982, 22(6): 847 - 856.
- [26] Porter, K. E. An overview of formation damage [J]. Journal of Petroleum technology, 1989, 41(8): 780 - 786.
- [27] Bennion, D B. Thomas, F B. Recent Investigations into Formation Damage in Horizontal Wells During Overbalanced and Underbalanced Drilling and Completion Procedures [J]. 2Nd Annu. Petrol Network Educ. Conf. 1994, no. 23.
- [28] Bennion, D B. An Overview of Formation Damage Mechanisms Causing A reduction in the Productivity and Injectivity of Oil and Gas Producing Formations [J]. J. Can. Petrol Technol, 2002, 41(11): 29 - 36.
- [29] 张沛元. 浅钻钻井液静结构力对裂缝油气藏的损害[J]. 钻采工艺, 2000, 23(6): 66 - 68.
- [30] 范翔宇, 夏宏泉, 等. 钻井液固相侵入深度的计算方法研究[J]. 天然气工业, 2006, 26(3): 75 - 77.
- [31] 张振华, 周志世, 等. 裂缝性碳酸盐岩油气藏保护方法[J]. 钻井液与完井液, 1999, 16(5): 30.
- [32] 李克向. 保护油气层钻井完井技术[M]. 北京: 石油工业出版社, 1993.
- [33] 张振华, 鄢捷年, 李宗飞. 轮南古潜山碳酸盐裂缝性油气藏的水锁效应及影响因素研究[J]. 特种油气藏, 2000, 7(1): 32 - 34.
- [34] Parekh B, Sharma M M. Cleanup of Water Blocks in Depleted Low-Permeability Reservoirs [J]. SPE 89837, 2004: 26 - 29
- [35] Bennion, D. B and Cimoli, M. . Aqueous Phase Trapping in Low Permeability Porous Media [J]. SPE Gas Symposium. Calgary, 1993.
- [36] Bennion D B, Thomas F B, Bietz R F, et al. Water and hydrocarbon phase trapping in porous media-diagnosis [J]. Prevention and Treatment. CIM, 1995: 95 - 69: 1 - 16.
- [37] Bennion D B, Thomas F B, Bietz R F, et al. Remediation of water and hydrocarbon phase trapping problems in low permeability gas reservoirs [J]. JCPT 1999, 38(8): 39 - 48.
- [38] Bennion D B, Thomas F B, Bennion D W. Mechanisms of Formation Damage and Permeability Impairment Associated With the Drilling, Completion and Production of Low API Gravity Oil Reservoirs [J]. SPE 30320.
- [39] Bourbiaux, B. J. , Kalaydian, F. J. , 1990. Experimental study of co-current and counter-current flows in natural porous media [J]. SPE. Sci. Eng. 16 - 69.
- [40] Bennion D. B. et al. Low Permeability Gas Reservoirs: Problem, Opportunities and Solutions for Drilling, Completion, Stimulation and Production [J]. SPE 35577, 1996.
- [41] Bennion D. B. , Thomas F. B, Ma T. Formation Damage Processes Reducing Productivity of Low Permeability Gas Reservoirs [J]. SPE 60325, 2000.
- [42] Bennion, D. B. , et al. Recent Advances in Laboratory Test Protocols for Evaluating Optimum Drilling, Completion and Stimulation Practices for Low Permeability Gas Reservoirs [J]. Paper SPE 60324 March 12 ~ 15, 2000.
- [43] Bennion, D. B. , et al. Water and Hydrocarbon Phase Trapping in Porous Media, Diagnosis, Prevention and Treatment [M]. CIM Paper 95 - 69, 461h Petroleum Society ATM, Banff, Canada, May 14 ~ 17, 1995.
- [44] Bennion D. B. , Bietz R. F. , Thomas F. B. , M. P. Cimola. Reductions in the Productivity of Oil and Low Permeability Gas Reservoirs Due to Aqueous Phase Trapping [J]. JCPT, 1994, 33(8): 45 - 54.
- [45] Cimolai MP, Gies RM, Bennion DB, et al. Mitigating horizontal well formation damage in A low Permeability conglomerate gas reservoir [J]. SPE 26166, 1993.
- [46] Holditch S A, Factors Affecting Water Blocking and Gas Flow from Hydraulically Fractured Gas Wells [J]. Journal of Petroleum Technology, 1979: 1515 - 1524.
- [47] 贺承祖等. 浅淡水锁效应与储层伤害[J]. 天然气工业, 1994, 14(6): 36 - 38.
- [48] M. D. Erwin and C. R. Pierson, D. B. Bennion. Brine imbibition Damage in the Colville River Field Alaska [J]. SPE 84320, old Production & Facilities, 2005, 20(1): 26 - 34
- [49] 杨呈德, 汪建军. 水锁效应对低渗长 6 油层损害的初步研究 [J]. 钻井液与完井液, 1990, (4).
- [50] 游利军, 康毅力, 陈一健, 等. 油气藏水相圈闭损害预测新方法——相圈闭系数法 [J]. 钻井液与完井液, 2007, 24(4): 60 - 62.
- [51] Fatt I, Davis D H. Reduction in Permeability with Overburden Pressure [J]. JPT, 1952, 16(12): 31 - 34.
- [52] 樊世忠, 等. 钻井液完井液及油气层保护技术 [M]. 山东东营: 石油大学出版社, 1996.
- [53] Loren. Stress-sensitive Reservoirs [J]. Journal of Petroleum technology. 1999, (1): 61 - 63.
- [54] 李宁, 张清秀. 裂缝性碳酸盐岩应力敏感性评价室内实验方法研究 [J]. 天然气工业, 2000, 20(3): 30 - 33.
- [55] Ayoub Sadeghazad, Bijan Beiranvand. Unusual Carbonate Rocks Showing Increasing Trends for Rock Compressibility as the Applied Net Stress Increases [J]. SPE 80442, 2003.
- [56] 万仁浦. 现代钻井工程 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2000.
- [57] 练章华, 康毅力, 徐进, 等. 裂缝宽度预测的有限元数值模拟 [J]. 天然气工业, 2001, 21(3): 47 - 50.
- [58] 康毅力, 罗平亚. 粘土矿物对砂岩储层损害的影响——回顾与展望 [J]. 钻井液与完井液, 2000, 17(5): 36 - 40.
- [59] 李宁, 张清秀. 裂缝型碳酸盐岩应力敏感性评价室内实验方法研究 [J]. 天然气工业, 2000, 20(3): 30 - 33.
- [60] 向阳, 向丹, 黄大志, 等. 裂缝 - 孔隙型双重介质应力敏感模拟实验研究 [J]. 石油实验地质, 2003, 25(5): 501 - 504.
- [61] 蒋海军, 鄢捷年. 裂缝性储集层应力敏感性实验研究 [J]. 特种油气藏, 2000, 7(3).
- [62] 高博禹. 碳酸盐岩储层应力敏感性研究 [M]. 成都: 成都理工学院, 2002.
- [63] 张景廉, 郭彦如, 卫平生, 等. 三论油气与金属(非金属)矿床的关系——油气与膏盐 [J]. 新疆石油地质, 1999, (4): 310 - 113.
- [64] 戴金星. 中国含硫化氢的天然气分布特征、分类及其成因探讨 [J]. 沉积学报, 1985, 3(4): 109 - 120.
- [65] 朱光有, 戴金星, 张水昌. 含硫化氢天然气的形成机制及分布

- 规律研究[J]. 天然气地球科学, 2004, 15(2): 166-170.
- [66] 戴金星, 胡见义, 贾承造, 等. 关于科学安全勘探开发高硫化氢天然气田的建议[J]. 中国科学院院士建议, 2004, 1.
- [67] Bailey L, Boek E, Jacpues S, et al. Particulate invasion from drilling fluids [J]. SPE 54762, 1999.
- [68] 刘静, 康毅力, 刘大伟, 等. 考虑裂缝宽度及压差的裂缝-孔隙型储层屏蔽暂堵实验研究[J]. 钻采工艺, 2006, 29(2): 97-98, 101.
- [69] 杨同玉, 张福仁, 孙守港. 屏蔽暂堵技术中暂堵剂粒径的优化选择[J]. 断块油气田, 1996, 6(3): 50-54.
- [70] Leopkcke, G. E., Glowka, D. A, and Wright, E. K. Design and evaluation of lost circulation materials for severe environment [J]. JPT, 1990, 3: 289.
- [71] Di Jiao, M. Sharma. Mud-Induced Formation Damage in Fractured reservoirs [J]. SPE Drilling and Completion, March 1996, 47.
- [72] Jiao, Di; Sharma, Mukul M. Mud Induced Formation Damage in Fractured Reservoirs [J]. SPE 30107, 1995.
- [73] D Jiao, M M Sharma. Mechanism of cake buildup is cross flow colloidal suspension [J]. Colloid and interjace sci., 1994.
- [74] 吴诗平, 鄢捷年, 蒋海军. 三塘湖盆地裂缝性油藏保护储层暂堵技术研究[J]. 钻井液与完井液, 2004, 21(1): 23-26.
- [75] Ali, A. Kallio, C. L., and Sing, U. B. Prevention lost circulation in severely depleted unconsolidated sandstone reservoirs [J]. SPEDC, 1994, (3).
- [76] 崔迎春, 刘媛, 陈玉林, 等. 裂缝性油气层保护技术研究[J]. 石油钻采工艺, 2003, 12(6): 10-13.
- [77] Yan Jienian, Feng Wenqiang. Design of drilling fluids by optimizing selection of bridging particles [J]. SPE 104131, 2006.
- [78] 赵敏, 李云鹏. 泥饼抗冲刷能力强弱的机理研究[J]. 西南石油学院学报, 1995, 17(3): 76-84.
- [79] Krilov Z. Drill-in fluid for a sour-gas naturally fractures reservoir [J]. J Petrol Technol, 2000, (11): 48-53.
- [80] Cipolla L. Case history of complex-fracture behavior in the Hanoi Thongh, Vietnam [J]. Soc Petrol Engrs Drilling Compl, 2000, (12): 89-96.
- [81] Francisco Ramirez, et al. Experience using micro bubbles—aphron drilling fluid in mature reservoirs of lake Maracaibo [J]. SPE 73710.
- [82] Eric Davidson, Lee Richardson Simon Zoller Control of Lost Circulation in Fractured Limestone Reservoirs [Z]. IADC/SPE 62734 Presented at the 2000 IADC/SPE Asia Pacific Drilling Technology held in Kuala Lumpur, Malaysia, 11-13 September, 2000.
- [83] 张军, 孟英峰, 李皋, 等. 裂缝-孔隙型双重介质储层保护技术与探讨[J]. 天然气勘探与开发, 2006, 29(3): 47.
- [84] 卢虎, 吴晓花, 瞿凌敏. 聚合醇保护裂缝性储层应用研究[J]. 油田化学, 2004, 21(3): 206-208.
- [85] 张振华, 鄢捷年, 王书琪. 保护裂缝碳酸盐岩油气藏的钻井完井液[J]. 钻采工艺, 2000, 23(1): 61-64.
- [86] 叶艳, 等. 保护裂缝性储层的复合盐弱凝胶钻井完井液[J]. 天然气工业, 2008, 28(1): 97.
- [87] 胡三清, 李淑廉, 郑延成, 等. 保护油层堵漏钻井液的研究[J]. 石油钻探技术, 2000, 28(1): 33-34.
- [88] 孙金声, 唐继平, 等. 超低渗透钻井液完井液技术研究[J]. 钻井液与完井液, 2005, 22(1): 1-4.
- [89] 王永恒, 等. 一种非渗透钻井完井液对裂缝性储层保护能力实验评价[J]. 钻采工艺, 2007, 30(1): 101-104.
- [90] 高峰, 杨洪, 王文英. 裂缝性油藏屏蔽暂堵方法[J]. 钻井液与完井液, 1998, 15(2): 14-15.
- [91] 高自力. 保护石炭系气层的固井技术[J]. 天然气工业, 1995, 15(2): 48-51.
- [92] 顾军. 保护油气层水泥浆的研究与实践[J]. 石油钻采工艺, 2000, 22(6): 7-10.
- [93] 张辉绪, 邓传光, 伍贤柱. 四川气井钻井技术[J]. 天然气工业, 2001, 21(5): 64-66.
- [94] A. Hooshmandkoochi, M. Zaferanieh, and A. Malekzadeh. First Application of Under-balanced Drilling in Fractured Carbonate Formations of Iranian Oil Fields Leads to Operational Success and Cost Savings [J]. SPE 105536, 2007: 1-3.
- [95] Naser-El-Di, H. A., Al-Humaidan, A. Y., Saudi Aramco, Iron sulfide scale: formation, removal and prevention [Z]. SPE 68315 presented at International Symposium on Oilfield Scale held in Aberdeen, United Kingdom, 30-31 January, 2001.
- [96] 徐同台, 刘玉杰, 申威, 等. 钻井工程防漏堵漏技术(第一版) [M]. 北京: 石油工业出版社, 1997.
- [97] 郑有成, 李向碧, 邓传光, 等. 川东北地区恶性井漏处理技术探索[J]. 天然气工业, 2003, 23(6): 84-85.
- [98] 刘大伟, 康毅力, 何健, 刘静, 张浩. 裂缝性碳酸盐岩油气层钻井完井保护技术[J]. 南方油气, 2005, 18(2): 64-67.
- [99] Kang Yili, Luo Pingya, Xu Jin and Xu Xinghua. Employing both Damage Control and Stimulation: A Way to Successful Development for Tight Gas Sandstone Reservoirs [Z]. SPE 64707 presented at International Oil and Gas Conference and Exhibition held in Beijing, China, 7-10 November, 2000.
- [100] Moghadasi J., Jamialahmadi M., et al. Formation Damage Due to Scale Formation in Porous Media Resulting From Water Injection [Z]. SPE 86524 presented at SPE International Symposium and Exhibition on Formation Damage Control held in Lafayette, Louisiana, 18-20 February, 2004.
- [101] 侯绪田, 莫跃龙. 塔河油田深井碳酸盐岩储层欠平衡钻井技术难点与对策[J]. 石油钻探技术, 2005, 33(5): 77-79.
- [102] 俞新永, 周建东, 腾学清. 塔里木轮南奥陶系碳酸盐岩高压油气藏水平井及大斜度井欠平衡钻井技术[J]. 天然气工业, 2002, 19(2).

## 建行 124.5 亿贷款支持云南 52 条在建二级公路建设

新华社消息 云南省交通运输厅与建设银行云南省分行日前签订云南省在建二级公路贷款合作总协议, 建行云南省分行将提供 124.5 亿元贷款, 用于支持云南省 52 条在建二级公路建设。

到目前为止全省公路通车里程 20 万 km, 但二级以上公路仅占总里程的 3.93%, 全省 129 个县中尚有 38 个县未通二级公路。云南省政府借助国家这项改革的契机, 做出加快 52 条在建二级公路建设的

重大决定。

据了解, 这次获得贷款支持建设的 52 条重点二级公路分布在云南省 16 个州市, 总里程 4901 km, 总投资约 646 亿元。52 条在建二级公路将在 2009 年年底全面开工建设, 在 2011 年 6 月底前建成。届时, 云南省二级公路总里程将达到 9201 km, 公路骨干路网基本成型, 区域经济交流将更加畅通。