

◀ 油气开发 ▶

doi:10.11911/syztjs.201701014

## 二氧化碳对塔河油田裂缝性储层 酸岩反应的影响研究

王 洋<sup>1</sup>, 袁清芸<sup>2</sup>, 赵 兵<sup>1</sup>, 方裕燕<sup>1</sup>, 秦 飞<sup>1</sup>

(1. 中国石化西北油田分公司石油工程技术研究院,新疆乌鲁木齐 830011;2. 中国石化西北油田分公司勘探开发研究院,新疆乌鲁木齐 830011)

**摘要:**为提高塔河油田裂缝性油藏的酸压改造效果,研究了CO<sub>2</sub>对裂缝性油藏酸岩反应影响的问题。利用自主研制的裂缝性储层酸岩反应仪,基于网状裂缝模型,对考虑CO<sub>2</sub>影响的不同类型、不同黏度和不同浓度酸液的酸岩反应情况进行了试验评价。试验得出:随着回压增大,酸岩反应产生的CO<sub>2</sub>转变为超临界态后大量溶于酸液中,酸液流动阻力大幅降低,酸蚀量增大;与胶凝酸及I型地面交联酸相比,HCl质量分数为20%的II型地面交联酸滤失量小、黏度高,受CO<sub>2</sub>影响最大,酸岩反应最慢,有利于实现裂缝性储层深穿透酸压的目的。II型地面交联酸在YJY井重复酸压中进行了现场试验,与该井应用胶凝酸的首次酸压效果相比,液体效率大幅提高,酸蚀缝长长幅增加,压裂后累计产油 $1.2 \times 10^4$ t,增油效果显著。研究表明,超临界CO<sub>2</sub>有助于降低酸液流动阻力,提高酸液深穿透能力,提高塔河油田裂缝性储层酸压改造效果。

**关键词:**裂缝性储集层;酸化压裂;超临界;二氧化碳;酸岩反应;塔河油田

**中图分类号:**TE357.2   **文献标志码:**A   **文章编号:**1001-0890(2017)01-0078-05

### Experiment Research on the Effect of CO<sub>2</sub> on Acid-Rock Reactions in Fractured Reservoirs

WANG Yang<sup>1</sup>, YUAN Qingyun<sup>2</sup>, ZHAO Bing<sup>1</sup>, FANG Yuyan<sup>1</sup>, QIN Fei<sup>1</sup>

(1. Petroleum Engineering Technology Research Institute, Sinopec Northwest Oilfield Company, Urumqi, Xinjiang, 830011, China; 2. Exploration and Development Research Institute, Sinopec Northwest Oilfield Company, Urumqi, Xinjiang, 830011, China)

**Abstract:** To enhance acid fracturing performance in fractured reservoirs in the Tahe Oilfield, research has been conducted to highlight the impact of CO<sub>2</sub> on acid rock reactions in such reservoirs. By using independently developed acid rock reaction instruments and a fracture network model, tests were conducted to study the impact of CO<sub>2</sub> on acid rock reactions with different acids, viscosity and concentration. Test results showed that flow resistance of acid may decrease sharply as CO<sub>2</sub> generated during acid rock reaction become supercritical, then dissolve in acid massively as back pressure increases. Compared with gelled acid and Type I surface cross-linked acid, Type II surface cross-linked acid with concentration of 20% has less filtering loss, higher viscosity and susceptibility to CO<sub>2</sub> and lower acid rock reaction speed. This kind of acid may facilitate acid fracturing to achieve deep penetration in fractured reservoirs. A pilot test was conducted for Type II surface cross-linked acid in the acid refracturing of the Well YJY. Compared with the primary acid fracturing with gelling acid, both fluid efficiency and fracture length increased dramatically. With cumulative oil production of  $1.2 \times 10^4$ t after refracturing, productivity enhancement performance has been observed. So research results showed supercritical CO<sub>2</sub> could effectively reduce flow resistance of acid, enhance acid penetration and promote the performance of acid-fracturing of fractured reservoirs in the Tahe Oilfield.

**Key words:** fractured reservoir; acid fracturing; supercritical; carbon dioxide; acid rock reaction; Tahe Oilfield

塔河油田托甫台、跃进、玉北等区块碳酸盐岩油藏裂缝性储层非均质性强,天然裂缝发育,酸压过程中酸液在流入主裂缝的同时也会大量进入天然裂缝网络中,导致液体效率大幅降低,严重影响酸液的深穿透效果<sup>[1-6]</sup>。塔河油田裂缝性储层的温度(120~160℃)和临界压力(80.0 MPa)远高于CO<sub>2</sub>的临界温度(31℃)和临界压力(7.4 MPa),地层条件下酸岩反应产生的超临界CO<sub>2</sub>会影响酸蚀

裂缝的压力分布及酸岩反应过程<sup>[7]</sup>,国内外学者主要对酸液在裂缝性储层中的滤失规律及CO<sub>2</sub>对酸

收稿日期:2016-07-13;改回日期:2016-12-10。

作者简介:王洋(1985—),男,陕西西乡人,2008年毕业于中国地质大学(武汉)石油工程专业,2011年获成都理工大学油气田开发工程专业硕士学位,工程师,主要从事深层复杂油藏储层改造方面的研究工作。E-mail:402849353@qq.com。

基金项目:国家“十二五”科技重大专项“缝洞型碳酸盐岩油藏高效酸压改造技术”(编号:2011ZX05014-006)资助。

液滤失的影响进行了研究: O. Izgec 等人<sup>[8]</sup>提出了预测酸液在裂缝网络中推进的分析方法, 认为酸液滤失主要发生在主裂缝中, 在裂缝交叉处滤失量最大; 郭建春等人<sup>[9]</sup>建立了蚯孔扩展及滤失模型, 提出了计算裂缝性油藏酸液滤失量的方法; M. K. R. Panga 等人<sup>[10]</sup>建立了考虑裂缝延伸、缝内温度、酸岩反应及缝内游离态 CO<sub>2</sub> 影响的碳酸盐岩储层酸液滤失量计算模型, 游离态 CO<sub>2</sub> 的存在使缝内净压力升高, 增大了酸液与岩石壁面的接触面积, 减少了酸液的滤失量。但上述研究没有同时考虑天然裂缝和 CO<sub>2</sub> 对酸岩反应的影响。为此, 笔者利用自主研制的裂缝性储层酸岩反应仪, 通过设定不同的回压改变 CO<sub>2</sub> 在酸液中的赋存状态, 获取塔河油田碳酸盐岩裂缝性储层酸岩真实反应情况的信息, 分析了 CO<sub>2</sub> 对裂缝性储层酸岩反应的影响机理, 以期为优选深穿透酸液和酸压工艺提供依据。

## 1 酸岩反应试验设计

### 1.1 试验设备

笔者自主研制了裂缝性储层酸岩反应仪, 该仪器由驱替泵、中间容器、岩心夹持器、围压泵、回压泵、压力计和烧杯等组成(见图 1)。进行试验时, 用岩心夹持器中的岩板模拟塔河油田天然网状裂缝性储层; 通过调节驱替泵和回压泵的泵压, 改变 CO<sub>2</sub> 在裂缝中的流动相态, 分析不同相态 CO<sub>2</sub> 对裂缝性储层酸岩反应的影响。

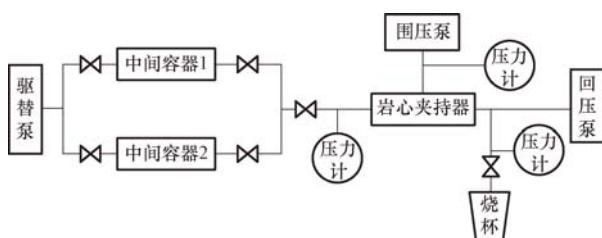


图 1 裂缝性储层酸岩反应仪的基本组成

Fig. 1 Basic components of acid rock reaction instrument for fractured reservoirs

### 1.2 网状裂缝模型

根据塔河油田裂缝性储层具有天然裂缝密度大( $>10$  条/m)、尺度大(宽度以 1.0~3.0 mm 为主)、角度大(中高角度裂缝发育)的特点, 在由地层岩心制成的碳酸盐岩岩板上, 用专用切割工具制作网状裂缝模型, 如图 2 所示(图 2 中, 红色、蓝色和紫色线

条分别表示宽度为 3.0, 2.0 和 1.0 mm 的裂缝)。

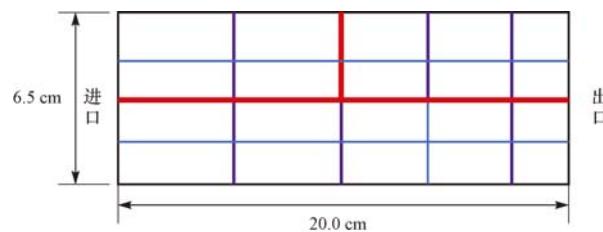


图 2 网状裂缝模型示意

Fig. 2 Fracture network model

### 1.3 酸液的选择

为降低酸液在天然裂缝中的滤失量, 塔河油田裂缝性储层在酸压作业时选用了稠化酸体系。胶凝酸、I型地面交联酸和II型地面交联酸是塔河深穿透酸压作业常用的稠化酸体系, 因此选用上述 3 种酸液进行试验。胶凝酸配方为 20.0% HCl + 0.7% 胶凝剂 + 2.0% 缓蚀剂 + 1.0% 铁离子稳定剂 + 1.0% 破乳剂 + 1.0% 助排剂; I型地面交联酸配方为 20.0% HCl + 0.7% 稠化剂 + 2.0% 缓蚀剂 + 1.0% 破乳剂 + 1.0% 铁离子稳定剂 + 2.0% 交联剂; II型地面交联酸配方为 20.0% HCl + 1.0% 稠化剂 + 2.0% 缓蚀剂 + 1.0% 破乳剂 + 1.0% 助排剂 + 1.0% 铁离子稳定剂 + 4.0% 交联剂。

高温条件下 I型地面交联酸的黏度略低于 II型地面交联酸。其中, 在温度 140 °C、剪切速率 170 s<sup>-1</sup> 条件下剪切 120 min 后, I型地面交联酸和 II型地面交联酸的黏度分别为 70 和 96 mPa·s。

### 1.4 试验方案

试验温度 120 °C, 通过驱替泵控制注入压力, 设置初始注入压力比回压高 0.6 MPa, 通过改变回压来控制 CO<sub>2</sub> 的流动相态, 分别在远低于临界点(回压 1.0 和 2.0 MPa)、临界点附近(回压 4.0 和 6.0 MPa)、远高于临界点(回压 8.0 和 10.0 MPa)3 种不同压力条件下, 利用酸蚀量和注回压差(注入压力和回压的差值, 注回压差越大表明酸蚀裂缝越窄, 注回压差越小表明酸蚀裂缝越宽)来分析不同相态 CO<sub>2</sub> 对酸岩反应的影响。

## 2 试验结果分析

### 2.1 不同酸液条件下 CO<sub>2</sub> 对酸岩反应的影响

#### 2.1.1 地面交联酸

在回压 1.0~10.0 MPa 条件下, 进行了 CO<sub>2</sub> 对

I型地面交联酸酸岩反应的影响试验,酸蚀裂缝形态的对比情况如图3所示,酸蚀量、注回压差随回压的变化曲线如图4所示。

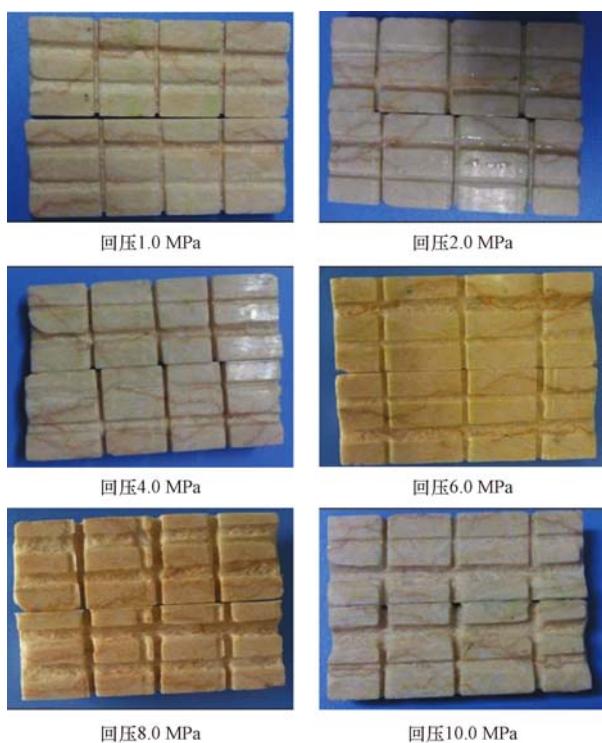


图3 不同回压下I型地面交联酸的酸蚀裂缝形态

Fig. 3 Fracture pattern with Type I surface cross-linked acid corrosion under a different back pressure

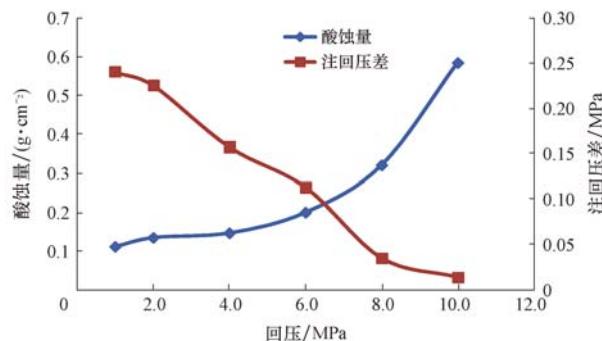


图4 酸蚀量和注回压差随回压的变化曲线

Fig. 4 Acid corrosion rate and injection pressure change under a different back pressure

由图3可知,不同回压下酸液在裂缝中的流动均具有选择性,宽裂缝中酸液流量大,酸岩接触面积大,酸蚀后裂缝宽度和深度的变化明显大于窄裂缝。

由图4可知:

1) 随着回压增大,岩板酸蚀量增大,注回压差降低。临界点之前,酸岩反应产生的CO<sub>2</sub>气体随注入压力升高而逐渐被压缩,流动阻力降低,因此注回

压差降低;临界点之后,气态CO<sub>2</sub>变为超临界流体并迅速溶于酸液中,混合溶液流动阻力小于气态CO<sub>2</sub>,导致注回压差进一步降低。

2) 酸蚀量在临界点之前变化不大,临界点过后酸蚀量快速增大。其主要原因是超临界态CO<sub>2</sub>大量溶解于酸液中,酸液进入微细裂缝的能力增强,与碳酸盐岩壁面的接触面积增大,导致酸蚀量增大。

### 2.1.2 胶凝酸

在回压2.0~10.0 MPa条件下,进行了CO<sub>2</sub>对胶凝酸酸岩反应的影响试验,酸蚀裂缝形态对比情况如图5所示,酸蚀量和注回压差随回压的变化曲线如图6所示。



图5 不同回压下胶凝酸的酸蚀裂缝形态

Fig. 5 Fracture pattern with gelling acid under a different back pressure

由图5可知,胶凝酸的反应速度和酸蚀量远大于地面交联酸,特别是入口处的酸蚀效果明显,不利于实现深穿透<sup>[11]</sup>。

由图6可知:CO<sub>2</sub>对胶凝酸与地面交联酸注回压差、酸蚀量的影响规律相似,即随着回压升高,酸蚀量增大,注回压差降低。临界点前酸岩反应产生的CO<sub>2</sub>气体被压缩,降低了酸液流动阻力,酸蚀量增大,注回压差降低;临界点后超临界CO<sub>2</sub>溶于

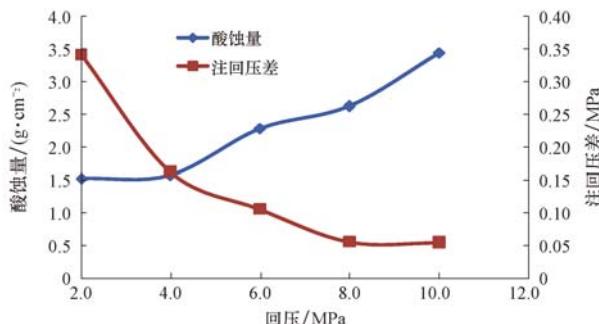


图 6 酸蚀量和注回压差随回压的变化曲线

Fig. 6 Acid corrosion rate and injection pressure change under a different back pressure

酸液中,使酸液通过微小裂隙的能力大幅增强,酸蚀量大幅上升,酸蚀裂缝宽度快速增大,注回压差降低明显。

## 2.2 不同黏度酸液条件下 CO<sub>2</sub> 对酸岩反应的影响

在回压为 8.0 MPa、初始注入压力为 8.6 MPa 的条件下,对比了 I 型地面交联酸和 II 型地面交联酸的酸岩反应情况(这两种地面交联酸在 140 ℃ 温度下的剪切黏度分别为 70 和 96 mPa·s)。

对比试验结果表明,I 型地面交联酸的酸蚀量(0.32 g/cm<sup>2</sup>)大于 II 型地面交联酸,I 型地面交联酸的注回压差(0.062 MPa)低于 II 型地面交联酸,且酸液黏度越大,注回压差越高,酸蚀量越小。分析认为,随着酸液黏度增高,酸液在微细裂缝中的流动阻力大大升高,酸液的传质速度降低,导致酸岩反应速度降低,酸蚀量变小。因此,为提高酸液的穿透深度,应选择黏度较高的 II 型地面交联酸。

## 2.3 不同酸液浓度条件下 CO<sub>2</sub> 对酸岩反应的影响

在回压为 8.0 MPa 条件下,采用 HCl 质量分数分别为 10%、15% 和 20% 的 II 型地面交联酸,进行了 CO<sub>2</sub> 对酸岩反应的影响试验,结果见表 1。

表 1 不同酸浓度 II 型地面交联酸的酸蚀量和注回压差

Table 1 Acid corrosion rate and injection pressure change with a Type II cross-linked acid of different concentration

w(HCl)	酸蚀量/(g·cm⁻²)	注回压差/MPa
10	1.18	0.240
15	1.29	0.100
20	1.58	0.048

由表 1 知,随着 HCl 质量分数由 10% 上升至 20%,酸蚀量逐渐增大,注回压差逐渐降低。分析认为,随着 HCl 质量分数增大,酸液中盐酸电离度减

小导致 H<sup>+</sup>扩散系数增大,地面交联酸的酸岩反应速度变快,酸蚀量明显增大。因此,选择 HCl 质量分数为 20% 的地面交联酸,可提高裂缝壁面的刻蚀效果和导流能力。

## 3 现场试验

塔河油田跃进区块奥陶系油藏天然裂缝极为发育,前期在采用胶凝酸酸压工艺改造时存在以下问题<sup>[12]</sup>:1)天然裂缝滤失明显,液体效率低(平均液体效率为 18.5%),酸蚀缝短(酸蚀缝平均长 80.0 m);2)压裂后油井自喷期短,累计产油量低(平均累计产油量为 1 200 t)。为此,在该区块 YJY 井进行了 II 型地面交联酸酸压试验。

YJY 井奥陶系储层埋深 7 200.00 m,成像测井资料显示天然裂缝发育。该井首次酸压时采用了胶凝酸,但储层改造效果不佳,酸液滤失量大,液体效率低(18.6%),压裂后产油量低(8.0 t/d)。根据上述室内研究结果,该井应用了滤失量小、黏度高、酸岩反应速度慢的 II 型地面交联酸进行重复酸压,最大排量为 6.5 m<sup>3</sup>/min,最高泵压为 91.0 MPa。酸压后的拟合结果显示,与胶凝酸相比,II 型地面交联酸液体效率明显提高(提高了 14.0%),酸蚀缝明显增长(增长了 32.0 m)。该井酸压后初期油压 21.0 MPa,日产油 31.0 t,累计产油 1.2×10<sup>4</sup> t,增油效果显著。

## 4 结论及建议

1) 随着酸岩反应产生的 CO<sub>2</sub> 由气态向超临界态转化,CO<sub>2</sub> 大量溶于酸液中,酸液流动阻力大幅降低,进入微裂缝能力增强,酸蚀量明显增大。

2) 室内试验结果表明,HCl 质量分数为 20% 的 II 型地面交联酸黏度高,酸岩反应最慢,是塔河油田裂缝性储层深穿透酸压的首选酸液。

3) 针对目前无法准确描述裂缝在酸岩反应前后表面形态变化情况的不足,建议采用 CT 扫描技术与数字化技术相结合的方法,进一步研究酸液在天然裂缝网络中的酸岩反应速度。

## 参 考 文 献

### References

- [1] 张烨,杨胜来,焦克波. 塔河油田超大型复合酸压降滤失技术研究[J]. 西南石油大学学报(自然科学版),2014,36(3):121-

- 126.
- ZHANG Ye, YANG Shenglai, JIAO Kebo. Technology research about super large composite acid fracturing filtration in Tahe Oilfield[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2014, 36(3): 121–126.
- [2] 段艳秋. 塔河油田托甫台区奥陶系碳酸盐岩储集体地质特征研究[J]. 石油地质与工程, 2011, 25(5): 13–17.
- DUAN Yanqiu. Study on geological features of Tuofutai Area Ordovician carbonate rock reservoir body in Taha Oilfield [J]. Petroleum Geology and Engineering, 2011, 25(5): 13–17.
- [3] 陈培元, 杨辉廷, 钟学彬, 等. 塔河油田 6-7 区奥陶系碳酸盐岩储层裂缝建模[J]. 科学技术与工程, 2015, 15(18): 34–39, 55.
- CHEN Peiyuan, YANG Huiting, ZHONG Xuebin, et al. 3D modeling of Ordovician fractured carbonate reservoir, 6-7th Blocks of Tahe Oilfield [J]. Science Technology and Engineering, 2015, 15(18): 34–39, 55.
- [4] 张雄, 耿宇迪, 焦克波, 等. 塔河油田碳酸盐岩油藏水平井暂堵分段酸压技术[J]. 石油钻探技术, 2016, 44(4): 82–87.
- ZHANG Xiong, GENG Yudi, JIAO Kebo, et al. The technology of multi-stage acid fracturing in horizontal well for carbonate reservoir by temporary plugging ways in the Tahe Oilfield[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2016, 44(4): 82–87.
- [5] 李永寿, 贺正刚, 鄢宇杰. 玉北地区交联酸携砂酸压工艺研究与评价[J]. 特种油气藏, 2015, 8(1): 75–78.
- LI Yongshou, HE Zhenggang, YAN Yujie. Research and evaluation of proppant-carrying cross-linked acid fracturing in Yubei Area[J]. Complex Hydrocarbon Reservoirs, 2015, 8(1): 75–78.
- [6] 王洋, 袁清芸, 李立. 塔河油田碳酸盐岩储层自生酸深穿透酸压技术[J]. 石油钻探技术, 2016, 44(5): 90–93.
- WANG Yang, YUAN Qingyun, LI Li. Deep penetrating acid fracturing involving self-generated acid in carbonate reservoirs of the Tahe Oilfield[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2016,
- 44(5): 90–93.
- [7] 李勇明, 郭建春, 赵金洲, 等. 裂缝性气藏压裂液滤失模型的研究及应用[J]. 石油勘探与开发, 2004, 31(5): 120–122.
- LI Yongming, GUO Jianchun, ZHAO Jinzhou, et al. New model for fracturing fluid leakoff in naturally fractured gas fields and its application [J]. Petroleum Exploration and Development, 2004, 31(5): 120–122.
- [8] IZGEC O, ZHU D, HILL A D. Models and methods for understanding of early acid breakthrough observed in acid core-floods of vuggy carbonates[R]. SPE 122357, 2009.
- [9] 郭建春, 李天才, 赵金洲. 酸蚀蚯孔控制的酸压滤失计算方法研究[J]. 钻采工艺, 2006, 29(5): 35–38.
- GUO Jianchun, LI Tiancai, ZHAO Jinzhou. Study on calculation procedures of the acid filtration controlled by the worm-hole in the acid fracturing[J]. Drilling & Production Technology, 2006, 29(5): 35–38.
- [10] PANGA M K R, BALAKOTIAH V, ZIAUDDIN M. Modeling, simulation and comparison of models for wormhole formation during matrix stimulation of carbonates [R]. SPE 77369, 2002.
- [11] 卫伟, 颜晋川, 刘斌, 等. 酸液滤失性评价及控滤对策[J]. 钻井液与完井液, 2011, 28(3): 66–68.
- WEI Wei, YAN Jinchuan, LIU Bin, et al. Acidizing fluid filtration evaluation and filtration control strategy[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2011, 28(3): 66–68.
- [12] 韩忠艳, 耿宇迪, 赵文娜. 塔河油田缝洞型碳酸盐岩油藏水平井酸压技术[J]. 石油钻探技术, 2009, 37(6): 94–97.
- HAN Zhongyan, GENG Yudi, ZHAO Wennna. Fractured-vuggy carbonate reservoirs in Tahe Oilfield[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2009, 37(6): 94–97.

〔编辑 令文学〕

## 本刊入编多种全文数据库系统致作者

本刊已入编《中国学术期刊(光盘版)》全文数据库系统、《ChinaInfo 网络信息资源系统电子期刊》、万方全文数据库、维普全文数据库及《中国石油文摘》全文数据库等数据库。作者稿件一经录用, 将同时被上述文献信息系统全文收录, 如作者不同意收录, 请在向本刊投稿时提出声明, 否则视为同意收录。本刊按国家规定计付稿酬, 所付稿酬包含刊物内容入盘上网服务报酬, 不再另付。

《石油钻探技术》编辑部