

文章编号:1001-6112(2010)04-0400-05

硫酸盐热还原作用模拟实验装置的材料选择

张建勇^{1,2}, 刘文汇^{2,3,4}, 腾格尔⁴, 范明⁴, 郑伦举⁴, 王小芳¹, 刘金钟⁵

(1. 中国石油 杭州地质研究院, 杭州 310023; 2. 中国科学院 兰州地质研究所, 兰州 730000;

3. 中国石油化工股份有限公司 石油勘探开发研究院, 北京 100083;

4. 中国石油化工股份有限公司 石油勘探开发研究院 无锡石油地质研究所, 江苏 无锡 214151;

5. 中国科学院 广州地球化学研究所 有机地球化学国家重点开放实验室, 广州 510640)

摘要:硫酸盐热还原作用(TSR)成因的硫化氢是高含硫天然气藏中硫化氢的主要来源,深入研究 TSR 反应机理,需要开展系统深入的模拟实验。但是,不同材料制作的实验装置,实验结果相差甚远。为了探讨实验装置材料对实验结果的影响,该文对高温高压合金釜、石英管以及金管等实验装置进行了对比试验。实验结果证实:①高温高压合金釜的金属参与反应形成金属硫化物,不适合用于 TSR 模拟实验;②高温高压条件下,石英可以跟硫酸盐反应生成硅酸盐,因此石英管也不适合用于 TSR 模拟实验;③黄金不与 TSR 反应物、中间产物或者产物中的任何一种物质发生反应,黄金管—高压釜限定体系装置虽然受金管容积所限,模拟产物量不足以进行轻烃指标的分析,但是其产物量足以进行气体产物组分及碳同位素测试,是较好的一种 TSR 模拟实验装置。

关键词:石英管;合金釜;金管;实验装置;模拟实验;硫酸盐热还原作用

中图分类号:TE135

文献标识码:A

MATERIAL SELECTION OF TSR SIMULATION EXPERIMENT INSTRUMENTS

Zhang Jianyong^{1,2}, Liu Wenhui^{2,3,4}, Tenger⁴, Fan Ming⁴, Zheng Lunju⁴, Wang Xiaofang¹, Liu Jinzhong⁵

(1. Hangzhou Research Institute of Petroleum Geology, Hangzhou, Zhejiang 310023, China;

2. Lanzhou Institute of Geology, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou, Gansu 730000, China;

3. SINOPEC Exploration & Production Research Institute, Beijing 100083, China; 4. Wuxi Research Institute of

Petroleum Geology, SINOPEC, Wuxi, Jiangsu 214151, China; 5. State Key Laboratory of Organic Geochemistry,

Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou, Guangdong 510640, China)

Abstract: Thermochemical sulfate reduction (TSR) is the major mechanism of gas reservoirs with high content of sulfured hydrogen. The complexity of TSR mechanism demands further research which needs comprehensive simulation experiment, but different simulation experiments with different instruments lead to great diversity. In order to investigate the influence of instrument material on experimental results, a series of contrast experiments have been done. With the experiments, the followings are confirmed: ①The metal in high temperature and pressure kettle reacts with sulfur to generate metallic sulfide, so composition metal kettle is not suitable to be used as an instrument for TSR simulation experiment; ②In high temperature and pressure conditions, quartz reacts with sulfate to generate silicate, so quartz tube can not be used for TSR simulation experiment; ③Gold does not react with the reactant, intermediate reaction product or final reaction product, for the limited bulk volume of golden cube, the hydrocarbon product is not enough for testing light hydrocarbon, but it's enough for testing gaseous hydrocarbon components and carbon isotopes, so it is the best option to use golden cube for such kind of simulation experiment.

Key words: quartz tube; kettle; golden tube; experiment instrument; simulation experiment; thermochemical sulfate reduction

世界上高含硫天然气藏(硫化氢体积百分比大于 5%)分布广泛,例如在我国川东北硫化氢含量可以达到 10%以上,在南德克萨斯(美国)盆地甚至达到 98%,高含硫天然气主要为 TSR 成因^[1-8]。TSR 机理研究

到现在已经进行了 30 多年^[9],涉及了油气地质学^[10-15]、矿物学^[16-21]、地球化学^[22-34],但是有些问题仍存在争议。例如甲烷是 TSR 反应物还是产物,水在 TSR 反应中的作用,TSR 反应发生的温度范围等

收稿日期:2010-03-10;修订日期:2010-06-08。

作者简介:张建勇(1978—),男,博士,主要从事油气地质、沉积储层、油气地球化学研究。E-mail:zhangjy_hz@petrochina.com.cn。

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2001CB209102),中石化项目(P06006)与中国科学院西部学子奖学金共同资助。

等。要探讨这些争议问题,深入研究 TSR 反应机理,需要开展系统深入的模拟实验。但是硫元素的活性较大,容易跟几乎所有的金属材料反应,硫化氢溶于水,并且硫化氢很容易被氧化,即便模拟实验产生了少量硫化氢也很难检测,因此多年来鲜有成功的 TSR 形成机理模拟实验。近年来,随着模拟实验装置新材料的应用及测试技术的提高,关于 TSR 机理的模拟实验陆续被报道^[35-41]。但是,不同材料制作的实验装置,实验结果相差甚远,因此我们选用了不同材料进行一系列的探索实验,以期选出最佳的材料来制作实验装置,从而减少实验装置对实验结果的影响,也为类似的模拟实验提供一定的借鉴。

1 实验样品

实验选用的硫酸盐样品为分析纯的 $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ 。为了确保不同实验的样品具有一致性并脱去吸附的水及硫化氢,从而使实验结果具有可比性,将样品粉碎为 200 目,在马弗炉中 600 °C 恒温加热 24 h,然后密封保存。

实验选用的水为去离子水,从大桶的去离子水中取出 500 mL 去离子水装入玻璃瓶,密封保存,每个实验所加的水均选自该玻璃瓶。

本次对比实验研究选用的有机质为分析纯的正己烷。

2 不同材料实验装置及实验结果分析

2.1 耐高温高压合金釜

利用不锈钢合金釜进行 TSR 模拟实验的文章报道,目前主要有 2 篇。一篇为 2003—2005 年岳长涛等^[35-36]做的 CH_4-CaSO_4 反应体系的模拟实验,以 700 °C 高温加热 50 h 后,气体产物中硫化氢含量最高仅为 0.48%,由于没有加水,因此不是地质意义上的 TSR 反应。另一篇为代金友等^[37]进行的“石膏—天然气—水”反应体系的模拟实验,实验用仪器为密闭的耐高温、耐高压不锈钢反应釜,反应体系在 600 °C 高温下恒温 100 h 后产生的硫化氢含量最高,折合成体积百分含量也仅为 0.79%。

本次实验选用的是中国石化石油勘探开发研究院无锡石油地质研究所的“DK-1 型地层孔隙热压生烃模拟实验仪”,耐高温高压的合金釜体积为 90 mL。加入硫酸镁 20 g,去离子水 20 g,正己烷 3 mL,抽真空,恒温 350 °C,恒压 35 MPa,反应 240 h。

气体产物利用 Agilent 公司生产的 6890N 型气相色谱仪进行组分测试,将气体产物注入该色谱仪进行成分分析,采用外标法定量。色谱升温程序起始温度 40 °C,恒温 6 min,再以 25 °C/min 的速率升至 180 °C,恒温 4 min。气体产物组分中未检测出硫化氢(表 1)。

模拟实验后,合金釜壁见黑色物质,取黑色物质在扫描电镜下分析确定为金属硫化物。

该实验说明进行 TSR 模拟实验不仅要考虑高温高压以及加水等实验条件,还要考虑 TSR 模拟实验的反应物和产物是否与实验装置的材料发生反应。在高温高压下与釜壁金属发生反应的可以是 TSR 模拟实验中的反应物硫酸盐,可以是反应产物硫化氢,也可以是中间产物硫单质。本次实验不能确定与合金釜材料反应的是何种产物,但是可以确定高温高压合金釜材料中的金属确实参与到了 TSR 模拟实验中,必定对实验结果产生影响,因此耐高温高压的合金釜不适合用于 TSR 模拟实验。

2.2 耐高温石英管

石英的熔融点为 1 750 °C,因此在正常高温模拟实验中石英管不熔融。石英成分为 SiO_2 ,成分单一,通常认为不会污染样品,不会干扰模拟实验反应体系。利用石英管进行模拟实验成本也相对低廉,但是目前为止,见诸报道的利用石英管进行 TSR 模拟实验相对成功的也只有谢增业等利用石英管开放系统进行的模拟实验^[38]。

为了探讨石英管是否适合高温高压的 TSR 模拟实验,设计了如下的流程:①向石英管内加 20 g 硫酸镁、6 mL 正己烷、20 mL 去离子水;②抽真空并用喷灯焊接封口;③将封口的石英管置于高温高压釜内;④按照石英管和釜容积比例向高压釜内加入同样比例的物质,以保持保证石英管内外压力平

表 1 不同材料的装置中 TSR 模拟实验气体产物组分

Table 1 Gas component generated from TSR simulation experiment in different material instruments %

类型	温度/°C	H ₂ S	CO ₂	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	C ₃ H ₈	C ₃ H ₆	iC ₄ H ₁₀	nC ₄ H ₁₀	iC ₅ H ₁₂	nC ₅ H ₁₂
合金釜	350	0.000	1.683	0.716	12.150	34.899	0.273	40.839	4.093	0.459	4.020	0.301	0.567
石英管	350	0.000	1.618	0.689	9.759	33.557	0.263	44.076	3.936	0.441	4.826	0.289	0.545
金管	350	3.938	1.583	0.674	13.428	37.827	0.257	33.414	3.850	0.432	3.781	0.283	0.533
金管	450	5.966	4.775	1.148	55.626	27.480	0.030	4.613	0.049	0.218	0.077	0.009	0.010

衡;⑤高压釜封口;⑥350 °C 恒温 240 h;⑦根据仪表检测,最后系统压力稳定在 22 MPa。

气体产物利用 Agilent 公司生产的 6890N 型气相色谱仪进行组分测试,将气体产物注入该色谱仪进行成分分析,采用外标法定量。色谱升温程序起始温度 40 °C,恒温 6 min,再以 25 °C/min 的速率升至 180 °C,恒温 4 min,气体产物组分中未检测出硫化氢(表 1)。

对冷却后的石英管进行检测,发现石英管有熔融的现象,熔融后的石英管很脆,不再具备石英的性质。用扫描电镜对其成分进行分析,确认为硅酸盐和硫酸盐混合物。本实验证实,在高温高压条件下,石英可以跟硫酸盐反应生成硅酸盐,因此石英管不适合高温高压条件下的 TSR 模拟实验。

2.3 金管

通过前文所述模拟实验分析可知,高温高压合金釜以及石英管都不适合用于 TSR 模拟实验,因此进行 TSR 模拟实验需要利用惰性金属制作的装置。黄金是一种惰性金属,但是强度太弱且昂贵,不适合制作大的耐高温高压反应釜,因此利用黄金制作实验装置,需要特别的设计。“黄金管—高压釜限定体系装置”由中科院广州地球化学研究所与美国加州理工学院能源与环境研究中心合作设计和开发,该系统已经在干酪根生烃动力学、原油裂解生气动力学等模拟实验研究中取得很好的效果,且有利用该系统进行硫化氢生成模拟实验的相关报道^[39-41]。因此我们决定利用该系统探讨黄金材料在制作 TSR 模拟实验装置中的可行性。模拟实验装置主要由高压釜系统(图 1)、产物收集装置、分析测试系统 3 部分组成。

实验过程为:①将 50 mg 正己烷、100 mg 去离子水、100 mg 硫酸镁加入黄金管(内径 4.2 mm,长 50 mm),在氩气保护下密封;②将密封好的金管放入高压釜,

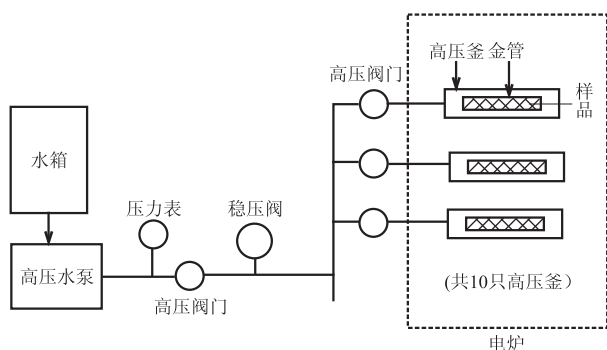


图 1 黄金管—高压釜限定体系装置

Fig. 1 Sealed gold tube—high temperature and pressure instrument

再将高压釜置于程序控温的电炉中,所有高压釜采用压力并联方式,恒温 350 °C,恒压 35 MPa,反应 240 h;③将相应的高压釜取出,冷水淬火,冷却到室温,取出金管;④将取出的金管表面洗净,置于固定体积的真空系统中,在封闭条件下用针刺破,气态产物从金管中释放出来。该真空系统与 Agilent 公司生产的 6890N 型气相色谱仪直接相连,气体通过自动进样系统进入该色谱仪进行成分分析,采用外标法定量。色谱升温程序起始温度 40 °C,恒温 6 h,再以 25 °C/min 的速率升至 180 °C,恒温 4 h;⑤单体碳同位素分析使用的仪器为 VG 公司的 ISOCHROM II 型气相色谱/碳同位素比值质谱仪,使用 PoraPlot Q 型毛细管柱(长 30 m,内径 0.32 mm),氦气作为载气。升温程序:起始温度 40 °C,恒温 3 min,以 20 °C/min 的升温速率升至 180 °C,恒温 5 min。

气体产物分析结果(表 1)显示,该反应装置中的 TSR 模拟实验生成了含量较高的硫化氢,与前文没有生成硫化氢的模拟实验相比烃类组分明显变干,说明该反应系统发生了 TSR 反应且 TSR 反应对烃类的裂解产生影响。

为了确认“黄金管—高压釜限定体系装置”适合进行 TSR 模拟实验,我们利用同样的流程进行了恒温 450 °C、恒压 35 MPa 的模拟实验,结果显示与 350 °C 相对比,气体产物中硫化氢含量明显增加(表 1)。

表 2 显示不同温度下 TSR 气态产物碳同位素值差别较大,说明该反应装置产生的气体量足够进行碳同位素测试。

除了气体组分及碳同位素,轻烃组分及轻烃单体碳同位素也是 TSR 反应机理探讨的重要指标,但是由于金管容积所限,反应产物量不足以进行轻烃指标的测试。一方面随着金管制作技术的进步,将来可以制作较大容积的金管(目前的技术条件下,太大的金管很容易破裂),可以置入较大的反应物,产生较大的产物;另一方面随着测试技术的提高,轻烃测试需要的样品量逐渐下降,因此将来随着技术的进步这一难题将得到解决。

表 2 不同温度下黄金管装置中 TSR 模拟实验气体产物碳同位素

Table 2 Carbon isotope of gaseous hydrocarbon generated in golden tubes with different temperatures

类型	温度/ °C	δC_1 (PDB)/ ‰	δCO_2 (PDB)/ ‰	δC_2 (PDB)/ ‰	δC_3 (PDB)/ ‰
金管	350	-49.7	-45.8	-41.6	-36.4
金管	450	-39.5	-51.4	-24.0	-6.0

3 结论

TSR 模拟实验需要高温高压条件且反应体系中加入水才接近实际地质过程。由于硫元素活性很高,高温高压条件下,TSR 反应物、产物或者中间产物均可能与金属发生反应,即便有些金属釜的模拟实验生成了硫化氢,但由于釜金属材料参与了反应,实验结果也不能真实反映 TSR 机理,实验证实耐高温高压的合金釜不适合作为 TSR 模拟实验装置。在高温高压且有水存在的条件下,硫酸盐可以与石英反应生成硅酸盐,因此石英管也不适合作为 TSR 模拟实验装置。黄金管—高压釜限定体系装置是相对成熟的高温高压模拟实验装置,虽然受其容积所限,模拟产物量不足以进行轻烃指标的分析,但是其产物量足以进行气体产物组分及碳同位素测试,是较好的一种 TSR 模拟实验装置。

参考文献:

- [1] 朱光有,张水昌,李剑,等. 中国高含硫化氢天然气的形成及其分布[J]. 石油勘探与开发,2004,31(3):18—21.
- [2] ORR W L. Changes in sulfur content and isotopic ratios of sulfur during petroleum maturation—Study of Big Horn Basin Paleozoic oil [J]. AAPG Bulletin, 1974,58(11):2295—2318.
- [3] 张子枢. 四川碳酸盐岩气田的硫化氢[J]. 石油实验地质, 1983,5(4):304—307.
- [4] KROUSE H R, CHRISTIAN A V, LESLIE S E, et al. Chemical and isotopic evidence of thermochemical sulphate reduction by light hydrocarbon gases in deep carbonate reservoirs [J]. Nature,1988,333(2):415—419.
- [5] EZAT H, CLYDE H M. Burial diagenesis and thermochemical sulfate reduction Smackover Formation, southeastern Mississippi salt basin[J]. Geology,1989,17(12):1080—1084.
- [6] WORDEN R H, SMALLEY P C, OXTOBY N H. The effects of thermochemical sulfate reduction upon formation water salinity and oxygen isotopes in carbonate gas reservoir [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta,1996,60(20):3925—3931.
- [7] MANZANO B K, FOWLER M G, MACHEL H G. The influence of thermochemical sulphate reduction on hydrocarbon composition in Nisku reservoirs, Brazeau river area, Alberta, Canada[J]. Org Geochem,1997,27(7—8):507—521.
- [8] EZAT H. The Role of Burial Diagenesis in Hydrocarbon Destruction and H₂S Accumulation, Upper Jurassic Smackover Formation, Black Creek Field, Mississippi [J]. AAPG Bulletin, 1997,81(1):26—45.
- [9] WILSON L O. Changes in sulfur content and isotopic ratios of sulfur during petroleum maturation—Study of Big Horn Basin Paleozoic oils [J]. AAPG bulletin, 1974, 58(11): 2295—2318.
- [10] 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—117.
- [11] WORDEN R H, SMALLEY P C. H₂S-producing reactions in deep carbonate gas reservoirs: Khuff Formation, Abu Dhabi [J]. Chemical Geology,1996,133(1—4):157—171.
- [12] 王一刚,窦立荣,文应初,等. 四川盆地东北部三叠系飞仙关组高含硫气藏 H₂S 成因研究 [J]. 地球化学,2002, 31(6):517—524.
- [13] CAI CHUNFANG, RICHARD H W, SIMON H B, et al. Thermochemical sulphate reduction and the generation of hydrogen sulphide and thiols (mercaptans) in Triassic carbonate reservoirs from the Sichuan Basin, China[J]. Chemical Geology, 2003,202(1—2):39—57.
- [14] 马永生,傅强,郭彤楼,等. 川东北地区普光气田长兴—飞仙关气藏成藏模式与成藏过程[J]. 石油实验地质,2005, 27(5):455—461.
- [15] WORDEN R H, CAI CHUNFANG. Geochemical characteristics of the Zhaolanzhuang sour gas accumulation and thermochemical sulfate reduction in the Jixian Sag of Bohai Bay Basin by Zhang et al. (Organic Geochemistry 36, 1717—1730) [J]. Organic Geochemistry,2006,37(4):511—514.
- [16] 张水昌,朱光有,梁英波. 四川盆地普光大型气田 H₂S 及优质储层形成机理探讨:读马永生教授的“四川盆地普光大型气田的发现与勘探启示”有感[J]. 地质论评,2006,52(2):230—234.
- [17] WORDEN R H, SMALLEY P C, OXTOBY N H. Gas Souring by Thermochemical Sulfate Reduction at 140°C [J]. AAPG Bulletin,1995,79(6):854—863.
- [18] WORDEN R H, SMALLEY P C, CROSS M M. The influence of rock fabric and mineralogy on the thermochemical sulfate reduction: Khuff Formation, Anudhabi[J]. Journal of Sedimentary Research,2000,70(5):1210—1221.
- [19] YANG CHAO, HUTCHEON I, KROUSE H R. Fluid inclusion and stable isotopic studies of thermochemical sulphate reduction from Burnt Timber and Crossfield East gas fields in Alberta, Canada[J]. Bulletin of Canadian Petroleum Geology,2001,49(1):149—164.
- [20] BILDSTEIN O, WORDEN R H, BROSSE E. Assessment of anhydrite dissolution as the rate—limiting step during thermochemical sulfate reduction [J]. Chemical Geology, 2001,176(1—4):173—189.
- [21] 刘德汉,肖贤明,熊永强,等. 四川东部飞仙关组鲕滩气藏储层含自然硫不混溶包裹体及硫化氢成因研究[J]. 中国科学 D 辑,2006,36(6):520—532.
- [22] ORR W L. Geologic and geochemical controls on the distribution of hydrogen sulfide in natural gas [C]// CAMPO R, GONI J, eds. Advances in Organic Geochemistry. Madrid: Enadimsa, 1977:571—595.
- [23] GOLDBERGER M B, ORR W L. Kinetic controls on thermochemical sulfate reduction as a source of sedimentary H₂S [J]. American Chemical Society Symposium Series, 1995,612:412—425.
- [24] 沈平,徐永昌,王晋江,等. 天然气中硫化氢同位素组成及沉积地球化学相[J]. 沉积学报,1997,15(2):216—219.
- [25] MACHEL H G. Bacterial and thermochemical sulfate reduction in diagenetic settings: old and new insights [J].

Sedimentary Geology, 2001,140(1-2):143-175.

[26] CAI CHUNFANG, XIE ZENGYE, WORDEN R H, et al. Methane-dominated thermochemical sulphate reduction in the Triassic Feixianguan Formation East Sichuan Basin, China: towards prediction of fatal H₂S concentrations[J]. Marine and Petroleum Geology, 2004, 21(10):1265-1279.

[27] MARTIN M C, DAVID A C, SIMON H B, et al. Thermochemical sulphate reduction (TSR): experimental determination of reaction kinetics and implications of the observed reaction rates for petroleum reservoirs [J]. Organic Geochemistry, 2004, 35(4):393-404.

[28] 岳长涛,李术元,丁康乐,等. 碳酸盐岩系 TSR 系统中铁的硫化物生成模拟实验研究[J]. 沉积学报, 2004, 22(4):743-749.

[29] 蔡春芳,李宏涛. 沉积盆地热化学硫酸盐还原作用评述[J]. 地球科学进展, 2005, 20(10):1100-1105.

[30] ZHANG SHUICHANG, ZHU GUANGYU, LIANG YINGBO, et al. Geochemical characteristics of the Zhalanzhuang sour gas accumulation and thermochemical sulfate reduction in the Jixian Sag of Bohai Bay Basin [J]. Organic Geochemistry, 2005, 36(12): 1717-1730.

[31] 朱光有,张水昌,梁英波,等. 川东北地区飞仙关组高含 H₂S 天然气 TSR 成因的同位素证据[J]. 中国科学 D 辑, 2005, 35(11):1037-1045.

[32] 朱光有,张水昌,梁英波,等. 川东北飞仙关组高含 H₂S 气藏特征与 TSR 对烃类的消耗作用[J]. 沉积学报, 2006, 24

(2):300-307.

[33] 杜春国,郝芳,邹华耀,等. 热化学硫酸盐还原作用对碳酸盐岩气藏的化学改造:以川东北地区长兴组—飞仙关组气藏为例[J]. 地质学报, 2007, 81(1):119-125.

[34] MOUGIN P, VAR V L, BARITEAU A, et al. Thermodynamic of thermochemical sulphate reduction [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2007, 58(3-4):413-427.

[35] 岳长涛,李术元,丁康乐,等. 甲烷和固态硫酸钙的热化学还原反应模拟实验初步研究[J]. 地球化学, 2003, 32(6):601-605.

[36] 岳长涛,李术元,丁康乐,等. 影响天然气保存的 TSR 反应体系模拟实验研究[J]. 中国科学 D 辑, 2005, 35(1):48-53.

[37] 代金友,陈安定,何顺利. 模拟硫化氢生成的热化学还原反应实验研究[J]. 石油实验地质, 2008, 30(2):200-202.

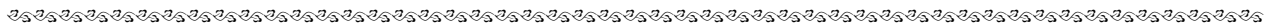
[38] 谢增业,李志生,王春怡,等. 硫化氢生成模拟实验研究[J]. 石油实验地质, 2008, 30(2):192-195.

[39] 于林平,潘长春,刘金钟,等. 氧化作用对气态烃组成和碳同位素组成的影响[J]. 地球化学, 2005, 34(3):269-276.

[40] PAN CHANGCHUN, YU LINPING, LIU JINZHONG, et al. Chemical and carbon isotopic fractionations of gaseous hydrocarbons during abiogenic oxidation[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2006, 246(1-2):70-89.

[41] ZHANG TONGWEI, GEOFFREY S E, WANG KANGSHI, et al. Effect of hydrocarbon type on thermochemical sulfate reduction [J]. Organic Geochemistry, 2007, 38(6):897-910.

(编辑 黄娟)



(上接第 399 页)

参考文献:

[1] CHOI K, JACKSON M D, HAMPSON G, et al. Impact of heterogeneity on flow in fluvial-deltaic reservoirs: Implications for the giant ACG field, South Caspian Basin[J]. Society of Petroleum Engineers, 2007:3214-3229.

[2] 石磊,匡建超,曾剑毅,等. 川西新场气田沙溪庙组致密碎屑岩储层单井产能评价与预测[J]. 石油实验地质, 2009, 31(4):338-342.

[3] 于翠玲,林承焰. 储层非均质性研究进展[J]. 油气地质与采收率, 2007, 14(4):15-18.

[4] 尹太举,张昌民,李中超,等. 濮城油田沙三中层序格架内储层非均质性研究[J]. 石油学报, 2003, 24(5):75-83.

[5] 陈刚,王正,陈清华. 陈堡油田陈 2 断块阜宁组阜三段储层非均质性研究[J]. 油气地质与采收率, 2009, 16(2):20-23

[6] SENOCAK D, PENNELL S P, GIBSON C E, et al. Effective use of heterogeneity measures in the evaluation of a mature CO₂ flood[J]. SPE73803, 2008:1325-1333.

[7] ROY B, ANNO P, GURCH M. Imaging oil-sand reservoir heterogeneities using wide-angle prestack seismic inversion[J]. Leading Edge, 2008, 27(9): 1192-1201.

[8] KWON S I, SUNG W M, HUH D G, et al. Characterization of reservoir heterogeneity using inverse model equipped with parallel genetic algorithm[J]. Energy Sources, 2007, 29(9): 823-838.

[9] 李潮流,周灿灿. 碎屑岩储集层层内非均质性测井定量评价方法[J]. 石油勘探与开发, 2008, 35(5):595-599.

[10] 康晓东,刘德华,蒋明焯,等. 洛伦茨曲线在油藏工程中的应用[J]. 新疆石油地质, 2002, 23(1):65-67.

(编辑 黄娟)