

核磁共振录井发展现状与定性识别油水层方法

邓鑫 王鑫 刘玥 王超

东北石油大学地球科学学院, 黑龙江 大庆 163318

摘要:为了能够准确地评价储集层及油气资源,分析岩石物性参数和孔隙流体性质具有十分重要的意义。核磁共振录井技术可以在录井施工现场快速、准确、连续分析储层物性,三次测量后得到的 T_2 弛豫图谱可以反映储层孔隙流体信息,提供孔隙度、渗透率、含油饱和度以及可动流体饱和度等评价参数;将参数与 T_2 弛豫图谱相结合,参照测井以及试油情况等资料,在某油田定性识别5口井,核磁共振录井解释与试油结论基本相符。因此,利用核磁共振 T_2 弛豫图谱与分析参数可以有效地定性评价储集层,为油田的勘探开发提供基础资料和数据。

关键词:核磁共振录井;定性识别;孔隙度;含油饱和度

DOI:10.3969/j.issn.1006-5539.2016.01.016

0 前言

早在20世纪90年代初中国就引进了国外核磁共振技术。多年来,各油田录井公司在应用核磁共振录井技术测试分析油气藏岩石样品、识别评价储层和孔隙流体方面取得突破,积累了丰富的经验。

2006年,宋超等人^[1-2]指出核磁共振 T_2 弛豫图谱包含了孔隙度、可动流体和流体性质等丰富的信息,根据 T_2 弛豫图谱特征与孔隙度、渗透率、可动流体等量化参数相结合,可以准确判断储集层性质和区分油气水层,阐述了稠油比稀油的弛豫时间短、核磁共振信号弱,分析了稠油储集层核磁共振录井的影响因素。2008年,尹军强等人^[3]将核磁共振录井技术应用于江苏油田水淹层解释中,证明了核磁共振录井技术在评价高黏度油层、高束缚水低阻油层、测井疑难层中起到了重要作用。2010年,申辉林等人^[4]对核磁共振录井 T_2 弛豫图谱截止值的确定方法及其适应性进行了研究,提出了一种利用 T_2 弛豫图谱几何均值(T_{2GM})求取 $T_{2cutoff}$ 的新方法,当含油饱和度小于40%时,该模型的精度较高,含油饱和度对模型精度影响较大。2013年,方锡贤等人^[5]分析了核磁共振录井技术在非常规油气储层的适应性。

1 原理与测量方式

核磁共振录井的主要研究对象是油气藏的岩心、岩屑和井壁取心样。根据岩样的不同,测量方法不同。本文重点研究井壁取心样,采用三次测量法,具体实验过程如下^[6-8]:

- 1) 按照核磁共振录井标准进行样品准备;
- 2) 根据实验所需测量全部岩样设计仪器的调试参数,对核磁共振仪器进行调试和定标;
- 3) 初始状态核磁共振测量,即第一次测量;
- 4) 抽真空加压饱和模拟地层水;
- 5) 饱和状态核磁共振测量,即第二次测量;
- 6) 岩样浸泡锰水,岩样浸泡在浓度为15 000 mg/L的氯化锰水溶液中,浸泡时间要足够长,保证消除岩样中水的核磁共振信号,通常普通岩样浸泡时间为24 h;
- 7) 泡锰状态核磁共振测量,即第三次测量。

三次测量分别得到干样信号、孔隙信号、油信号,见图1。通过计算可以得到测量岩样的孔隙度、渗透率、含油饱和度、可动流体饱和度等参数,而且可以测量岩样初始状态可动水饱和度、初始状态束缚水饱和度、初始状态含水饱和度、饱和状态可动水饱和度、饱和状态束

收稿日期:2015-10-08

基金项目:黑龙江省科学基金项目“致密砂岩导电规律与导电模型实验研究”(D 2015012)

作者简介:邓鑫(1990-),女,黑龙江绥化人,硕士研究生,主要从事地球探测与信息技术研究。

缚水饱和度以及饱和状态含水饱和度。

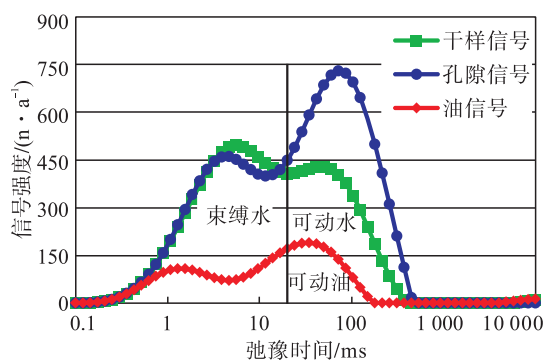


图 1 油藏三次测量法

2 测量参数

2.1 孔隙度

标准样是已知体积和孔隙度的岩样或模拟岩样,利用标准样进行定标,然后测量样品,根据样品的核磁共振信号幅度自动计算孔隙度。图 2 是某地区 20 块样品的核磁共振孔隙度与常规孔隙度的关系图,从图 2 中可以看出,相关系数为 0.903 2,核磁孔隙度略小于常规孔隙度^[9-13]。

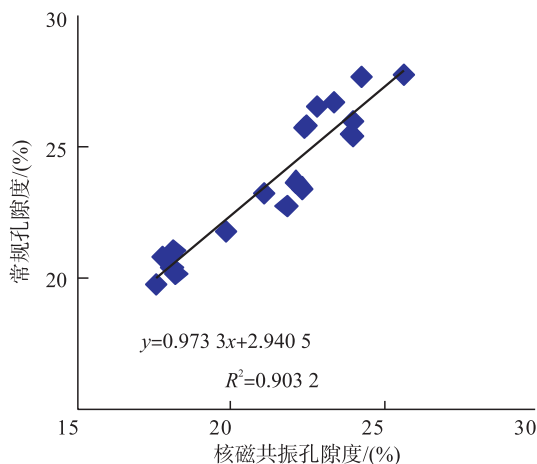


图 2 核磁共振孔隙度与常规孔隙度关系图

2.2 渗透率

利用核磁共振录井技术测量渗透率时,首先需要测量核磁共振孔隙度等参数,然后根据核磁共振渗透率模型进行计算。核磁共振渗透率模型是在理论和实验的基础上总结出来的经验公式。

各地区油田多采用 Coates 模型计算渗透率:

$$K_{\text{nmr}} = \left(\frac{\phi_{\text{nmr}}}{C} \right)^4 \left(\frac{BVM}{BVI} \right)^2$$

式中: BVM 为可动流体百分数,%; BVI 为束缚流体百分数,%; ϕ_{nmr} 为核磁共振孔隙度,%; K_{nmr} 为核磁共振渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; C 为渗透率系数,无量纲,是一个与岩石样品相关的系数,不同地层的岩样有不同的 C 值。

2.3 含油饱和度

图 3 是含油岩样泡锰前后核磁共振 T_2 弛豫图谱,饱和和地层水后测量的孔隙信号是孔隙中油和水共同作用得到的信号,总面积为 A ;泡锰后测量的信号只是孔隙中油的作用结果,面积记为 A_1 ;因此 $S_o = \frac{A_1}{A} \times 100\%$ 。

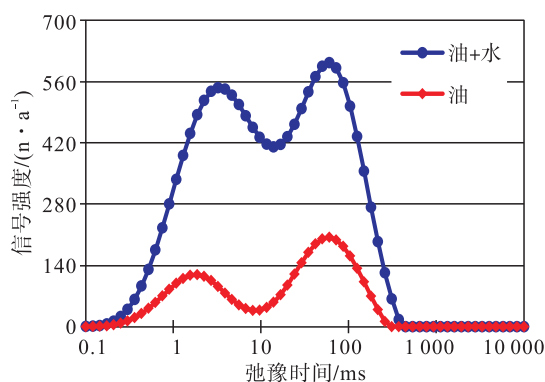


图 3 含油岩样泡锰前后核磁共振 T_2 弛豫图谱

3 油水层定性识别方法

不同性质流体具有不同的响应特征,运用岩心分析、试油分析等资料在油气层与邻近岩性、物性相似的水层对比和分析,总结出了不同流体性质储层在核磁共振测量 T_2 弛豫图谱的不同响应特征,可以利用 T_2 弛豫图谱定性识别水淹层,见图 4,砂岩的 T_2 截止值一般采用 33 ms。

3.1 干层特征

三种信号均在 10 ms 以内,不出现分析情况。

3.2 油层特征

在 T_2 截止值右侧干样信号与油信号曲线重合较好,油峰峰值高、位置靠后。表现为较高的含油饱和度和较低的可动水饱和度。

3.3 油水同层特征

在 T_2 截止值右侧干样信号与油信号曲线开始分离,油峰峰值开始降低、位置逐渐靠前。表现为可动水的增加和含油饱和度的降低。

3.4 水层特征

在 T_2 截止值右侧干样信号与油信号曲线分离程度特别大,油峰峰值低、位置靠前;起伏不明显。表现为大孔隙中充满了可动水,含油饱和度很低^[14-20]。

4 应用

在某油田,利用核磁共振录井分析参数以及 T_2 弛豫图谱,定性识别 5 口井储层性质,表 1 是核磁共振录井解释与试油结论比较,可以看出,利用 T_2 弛豫图谱定性识别储层性质具有较高的准确性。

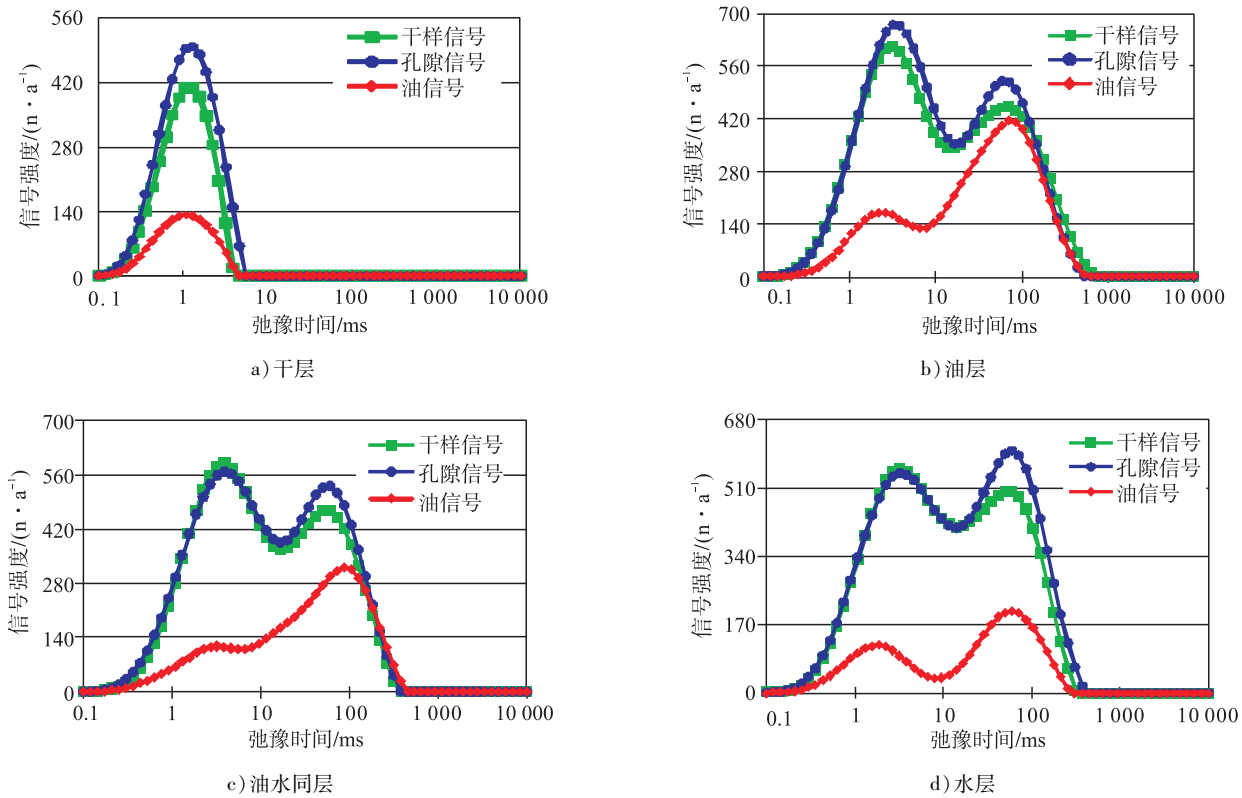


图 4 不同流体性质 T_2 弛豫图谱

表 1 核磁共振录井解释与试油结论对比

井名	井段 /m	核磁共振录井分析参数				核磁解释	试油情况		
		孔隙度 / (%)	渗透率 / ($10^{-3}\mu\text{m}^2$)	含油饱和度 / (%)	含水饱和度 / (%)		油 / m^3	水 / m^3	试油结论
Z 43-4	1853.3 – 1874.4	7.34	0.47	25.23	74.77	油水同层	1.0	1.4	油水同层
S 20-74	2010.4 – 2011.4	20.11	1.55	12.34	87.66	油干层	2.1	–	油层
CJ 1	2134.0 – 2150.0	18.39	61.68	26.99	73.01	含水油层	4.4	3.1	含水油层
G 6-111	2089.9 – 2099.6	6.04	0.02	26.69	73.31	油干层	压后 10.4	压后 8.8	油水同层
ZJ 4	2220.4 – 2240.3	20.77	35.76	18.95	81.05	水层	1.9	5.0	含油水层

由于核磁共振录井是直接分析地层的岩心、岩屑,测量得到的各项参数能更直接反映储集层性质,解释方面更具有独特的作用。如 Z 43-4 井 1 853.3-1 874.4 m 井段,选取具有代表性的 1 874.4 m 处岩心的核磁共振录井 T_2 弛豫图谱,见图 5,孔隙度为 7.34 %,渗透率为 $0.47 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,含油饱和度为 25.23 %,含水饱和度为 74.77 %,在 T_2 截止值右侧,干样信号与油信号曲线有一定分离,油峰峰值不高,可动水饱和度为 30.71 %,可动油饱和度为 10.33 %,综合分析核磁解释为与油水同层。试油情况:日产液 2.4 m^3 ,油 1 m^3 ,含水 58.3 %,试油结论为油水同层。核磁解释与试油结论相符合。

5 结论

1)核磁共振录井技术具有样本用量少、速度快、成本低、岩样无损、参数多、准确性高、连续性强、可随钻分

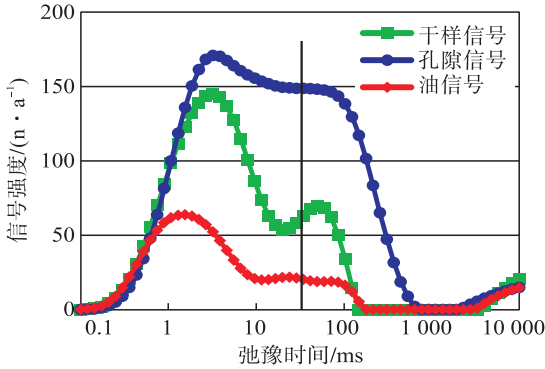


图 5 Z 43-4 井 1 874.4 m 核磁共振 T_2 弛豫图谱

析等优点。
2)核磁共振可提供孔隙度、渗透率、可动流体及含油饱和度等准确评价油气层的重要参数。
3)利用核磁共振 T_2 弛豫图谱结合核磁共振分析参数定性识别储层性质准确性较高,在某油田的应用效果

非常理想。

4)但核磁共振对于储层中油水同时存在的情况,定性识别含油水层、油水同层、含水油层的具体界限没有明确确定。

参考文献:

- [1] 宋超,宋明会,吴德龙. T_2 弛豫谱在核磁共振录井解释中的应用[J]. 录井工程, 2006, 17(3): 49-52.
Song Chao, Song Minghui, Wu Delong. Application of T_2 Relaxation Spectra in NMR Logging Interpretation [J]. Mud Logging Engineering, 2006, 17 (3): 49-52.
- [2] 宋超. 核磁共振录井技术在稠油领域的应用[J]. 录井工程, 2007, 18(3): 9-12.
Song Chao. Application of NMR Logging Technology in the Viscous Field [J]. Mud Logging Engineering, 2007, 18 (3): 9-12.
- [3] 尹军强,朱巨义. 核磁共振录井技术在江苏油田的应用[J]. 岩性油气藏, 2008, 20(2): 102-107.
Yin Junqiang, Zhu Juyi. Application of NMR Logging Technology in Jiangsu Oilfield [J]. Lithologic Reservoirs, 2008, 20 (2): 102-107.
- [4] 申辉林,朱伟峰,刘美杰. 核磁共振录井 T_2 谱截止值确定方法及其适应性研究[J]. 录井工程, 2010, 21(2): 39-42.
Shen Huilin, Zhu Weifeng, Liu Meijie. The Method of Determining T_2 Cutoff Value in NMR Logging and Study on Its Applicability [J]. Mud Logging Engineering, 2010, 21 (2): 39-42.
- [5] 方锡贤,姚芳虎,张淑琴,等. 非常规油气储集层录井技术应用与发展思考[J]. 录井工程, 2013, 24(2): 22-26.
Fang Xixian, Yao Fanghu, Zhang Shuqin, et al. Application and Development of Mud Logging Technology for Unconventional Hydrocarbon Reservoirs [J]. Mud Logging Engineering, 2013, 24 (2): 22-26.
- [6] 刘卫,刑立,顾兆斌,等. 核磁共振录井[M]. 北京:石油工业出版社, 2011.
Liu Wei, Xing Li, Gu Zhaobin, et al. Nuclear Magnetic Resonance Logging [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2011.
- [7] 刘美杰. 江苏油田核磁共振录井综合应用研究[D]. 东营: 中国石油大学(华东), 2010.
Liu Meijie. The Comprehensive Application Research of NMR Mud Logging in Jiangsu Oil Field [D]. Dongying: China University of Petroleum (EastChina), 2010.
- [8] 王为民,赵刚,谷长春,等. 核磁共振岩屑分析技术的实验及应用研究[J]. 石油勘探与开发, 2005, 32(1): 56-59.
Wang Weimin, Zhao Gang, Gu Changchu, et al. Experiment and Application of NMR Technology on Cuttings [J]. Petroleum Exploration and Development, 2005, 32 (1): 56-59.
- [9] 王志战. 核磁共振岩石物性录井技术新进展[J]. 录井技术, 2002, 13(2): 8-16.
Wang Zhizhan. The New Development in NMR Petrophysical Property Mud Logging Technology [J]. Mud Logging Engineering, 2002, 13 (2): 8-16.
- [10] 王志战. 核磁共振录井技术进展与展望[J]. 录井工程, 2011, 22(4): 12-15.
Wang Zhizhan. The Progress and Prospects of Nuclear Magnetic Resonance Logging [J]. Mud Logging Engineering, 2011, 22 (4): 12-15.
- [11] 王守军,慈兴华,王志战,等. 核磁共振录井技术在胜利油田的应用[J]. 录井工程, 2007, 18(1): 24-27.
Wang Shoujun, Ci Xinghua, Wang Zhizhan, et al. Application of NMR Logging Technique in Shengli Oilfield [J]. Mud Logging Engineering, 2007, 18 (1): 24-27.
- [12] 王守军,孙丕善,郭明科,等. 核磁共振录井技术影响因素分析与实验研究[J]. 录井工程, 2007, 18(4): 17-21.
Wang Shoujun, Sun Peishan, Guo Mingke, et al. The Analysis and Experimental Study for the Affecting Factors on NMR Logging Technology [J]. Mud Logging Engineering, 2007, 18 (4): 17-21.
- [13] 李海波. 岩心核磁共振可动流体 T_2 截止值实验研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院(渗流流体力学研究所), 2008.
Li Haibo. Core Experimental Study of NMR T_2 Cutoff Value [D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences (Research Institute of Porous Flow and Fluid Mechanics), 2008.
- [14] 王志战,许小琼. 利用核磁共振录井技术定量评价储层的分选性[J]. 波谱学杂志, 2010, 27(2): 214-220.
Wang Zhizhan, Xu Xiaoqiong. Quantitative Evaluation of Reservoir Separation with MR-ML Technology [J]. Chinese Journal of Magnetic Resonance, 2010, 27 (2): 214-220.
- [15] 王志战,许小琼,周宝洁. 孔隙流体核磁共振弛豫特征及油水层识别方法[J]. 油气地质与采收率, 2011, 18(2): 41-44.
Wang Zhizhan, Xu Xiaoqiong, Zhou Baojie. Pore Fluid NMR Relaxation Characteristics of Oil and Water Layer Identification Method [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2011, 18 (2): 41-44.
- [16] 何庆铭. 核磁共振录井技术在松辽盆地西部斜坡区萨尔图油层组的应用[J]. 录井工程, 2013, 24(4): 24-27.
He Qingming. NMR Logging Technology for Saertu Reservoir in West Clinoform Region of Songliao Basin [J]. Mud Logging Engineering, 2013, 24 (4): 24-27.
- [17] 赵宏波,满百胜,陈堂所. 鄂尔多斯盆地低电阻率油层录

- 井识别方法[J]. 录井工程, 2012, 23(2): 14-18.
 - Zhao Hongbo, Man Baisheng, Chen Tangsuo. Mud Logging Methods in the Identification of Low Resistivity Oil Layers in Ordos Basin [J]. Mud Logging Engineering, 2012, 23(2): 14-18.
 - [18] 滕工生, 张波, 魏明巍, 等. 核磁共振录井技术在高显示水层评价中的应用[J]. 录井工程, 2011, 22(2): 42-46.
 - Teng Gongsheng, Zhang Bo, Wei Mingwei, et al. The Application of the Nuclear Magnetic Resonance Logging Technology in the Water Zones with High Show [J]. Mud Logging Engineering, 2011, 22(2): 42-46.
 - [19] 贾翠竹. 核磁共振录井在辽河油田 SH 2 区块的应用[J]. 录井工程, 2008, 19(4): 59-61.
 - Jia Cuizhu. Application of Nuclear Magnetic Resonance Logging in SH2 Block of Liaohe Oilfield [J]. Mud Logging Engineering, 2008, 19(4): 59-61.
 - [20] 宋明会, 苑洪瑞, 王爱霞, 等. 核磁共振录井技术在辽河油田 N 74 区块的应用[J]. 录井工程, 2006, 17(3): 47-48.
 - Song Minghui, Yuan Hongrui, Wang Aixia, et al. Application of NMR Logging Technology in Block N74 of Liaohe Oilfield [J]. Mud Logging Engineering, 2006, 17(3): 47-48.

(上接第 48 页)

 - in Triethylene Glycol (TEG) Purity via Hydrocarbon Solvent Injection to a TEG + Water System in a Batch Distillation Column [J]. Energy Fuels, 2011, 25(11): 5126-5137.
 - [11] Isa M A, Eldemerdash U, Nasrifar K. Evaluation of Potassium Formate as a Potential Modifier of TEG for High Performance Natural Gas Dehydration Process [J]. Chemical Engineering Research and Design, 2013, 91(9): 1731-1738.
 - [12] Saidi M, Parhoudeh M, Rahimpour M R. Mitigation of BTEX Emission from Gas Dehydration Unit by Application of Drizo Process: A Case Study in Farashband Gas Processing Plant, Iran [J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2014, (19): 32-45.
 - [13] 郝 蘊. 三甘醇脱水工艺探讨[J]. 中国海上油气: 工程, 2001, 13(3): 22-29.
 - Hao Yun. Discuss of the TEG Dehydration Process [J]. China Offshore Oil and Gas, 2001, 13(3): 22-29.
 - [14] 刘家洪, 周平. 浅析 HYSYS 软件在三甘醇脱水工艺设计中的应用[J]. 天然气与石油, 2000, 18(1): 18-20.
 - Liu Jiahong, Zhou Ping. Elementary Analysis of Application of HYSYS Software in TEG Dehydration Processing Design [J]. Natural Gas and Oil, 2000, 18(1): 18-20.
 - [15] Netusil M, Dittl P. Comparison of Three Methods for Natural Gas Dehydration [J]. Journal of Natural Gas Chemistry, 2011, 20(5): 471-476.
 - [16] Darwish N A, Al-Mehaideb R A, Braek A M, et al. Computer Simulation of BTEX Emission in Natural Gas Dehydration Using PR and RKS Equations of State with Different Predictive Mixing Rules [J]. Environmental Modelling & Software, 2004, 19(10): 957-965.
 - [17] Rouzbahani A N, Bahmani M, Shariati J, et al. Simulation, Optimization, and Sensitivity Analysis of A Natural Gas Dehydration Unit [J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2014, 21: 159-169.
 - [18] 陈 曦, 邓道明, 万宇飞. CO₂ 的三甘醇脱水分析[J]. 石油与天然气化工, 2014, 43(6): 585-589.
 - Chen Xi, Deng Daoming, Wan Yufei. Analysis of Dehydration from CO₂ by TEG [J]. Chemical Engineering of Oil and Gas, 2014, 43(6): 585-589.
 - [19] 雷宝刚, 李学坤, 范 峥, 等. 天然气脱水系统模拟及主要设备优化[J]. 化学工程, 2013, 41(2): 74-78.
 - Lei Baogang, Li Xuekun, Fan Zheng, et al. Simulation of Natural Gas Dehydration System and Optimization of Main Equipment [J]. Chemical Engineering, 2013, 41(2): 74-78.
 - [20] 袁宗明, 王 勇, 贺 三, 等. 三甘醇脱水的计算机模拟分析[J]. 天然气与石油, 2012, 30(3): 21-26.
 - Yuan Zongming, Wang Yong, He San, et al. Analysis on Computer Simulation of TEG Dehydration [J]. Natural Gas and Oil, 2012, 30(3): 21-26.