

机械振动对油井水泥性能影响规律研究

王友文^{1,2} 袁进平¹ 王兆会¹ 尹宜勇¹ 王 微³

1. 中国石油集团工程研究院有限公司, 北京 102206;

2. 中国石油大学(北京)石油工程学院, 北京 102249;

3. 中国石油青海油田公司采油五厂, 青海 海西蒙古族藏族自治州 816400

摘 要:机械振动水泥浆是振动固井施工中常见的作业方式,可以有效提高固井质量。借助机械振动实验系统和研发的新型水泥石试件制备模具,研究了机械振动对水泥浆各项性能的影响规律。实验结果表明:机械振动在振幅 2.2 mm,振动时间 5 min,振动频率 6~21 Hz 的参数范围内,水泥浆流动性指数提高 7.20%,稠度系数下降 23.47%,不仅极大程度地改善水泥浆的流变特性,并将静胶凝强度过渡时间和凝结时间分别缩减 7.89% 和 5.65%,水泥石抗压强度提升 12.43%;振动后水泥浆体系的均质性和稳定性会受到扰动,其水泥石强度的波动幅度约为振动前的 6.62 倍,并初步确定了振动波作用的最佳范围应是处于激振点与远端的中间位置,为机械式振动固井技术的应用提供一定的理论依据及数据参考。

关键词:机械振动;水泥浆性能;微观分析;新型模具;最佳范围

DOI:10.3969/j.issn.1006-5539.2019.05.015

Study on the Effect of Mechanical Vibration on Performance of the Cement Slurry

Wang Youwen^{1,2}, Yuan Jinping¹, Wang Zhaohui¹, Yin Yiyong¹, Wang Wei³

1. CNPC Engineering Technology R & D Company Limited, Beijing, 102206, China;

2. College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum(Beijing), Beijing, 102249, China;

3. PetroChina Qinghai Oilfield Company No.5 Oil Production Plant, Qinghai Haixi Autonomous Prefecture, 816400, China

Abstract: It's a common operation method in vibration cementing to oscillate cement slurry by mechanical means. And the method could improve the cementing quality effectively. In this paper, the mechanical vibration experiment system and the mould for new cement stone test specimen are used to study the effect of vibration on the properties of the cement slurry. The experimental results show that the mechanical vibration can improve the properties of the cement slurry significantly under the vibration frequency range of 6~21 Hz, amplitude of 2.2 mm and vibration duration of 5 min. The fluidity index of the cement slurry increases by 7.20% and the consistency coefficient decreases by 23.47%. The rheological properties of the cement slurry are greatly improved, and the transition time and setting time of the static gel strength are reduced by 7.89% and 5.65% respectively. And the compressive strength of

收稿日期:2019-07-20

基金项目:中国石油天然气集团公司科学研究与技术开发项目“自动化与高效钻完井新装备新工具研制”(2016 B-4002)

作者简介:王友文(1992-),男,吉林白山人,硕士,主要从事油气井工程方面研究。

cement stone increases by 12.43% . At the same time, the scanning electron microscopy method and the mercury porosimetry method are used to analyze the microstructure from the qualitative and quantitative perspectives. It is verified that the vibration has a positive effect on the performance of the cement slurry. With the help of the self-designed new cement stone, a new conclusion is discovered that the homogeneity and stability of the cement slurry system will be disturbed after vibration. The strength volatility of the cement stone after vibration is about 6.62 times before the vibration. In addition, the best range of vibration wave action should be in the middle of the excitation point and the far end, which provides reference for the application of well cementing technology with mechanical vibration.

Keywords: Mechanical vibration; Performance of cement slurry; Micro-analysis; A new type of mould; Optimal range

0 前言

20 世纪 70 年代,美国人 Solum K W^[1] 发明了机械式内管振动装置,通过旋转内管带动弹性装置对套管产生径向冲击实现振动。此后,有关振动固井装置的专利成果不断丰富,技术类别也日益完善^[2-5]。直到 1988 年,美国埃克森美孚 Cooke C E 和 Chow T W 等人^[6-7] 正式提出机械式振动固井技术,通过室内实验证明机械振动可以有效提高胶结质量,防止环空气窜。相较于其他振动固井技术方法^[8-9],机械式振动作业流程更简单,成本更低廉,通过激振装置直接作用于套管处,激发产生的振动波经由套管柱传递至井眼环空流体中,改善水泥颗粒堆积形态^[10-14],使得水泥浆体系更加均匀致密,极大地改善了流变性和可泵送性,提高固井质量。

近年来,国内外的科研精力大多集中于振动固井工具和装备的研发上^[15-20],关于机械振动对水泥浆性能的影响效果尚无明确规律,由于缺乏足够的理论指导和室内实验数据支撑,机械式振动固井技术的现场应用受到严重制约。为此,本文通过室内实验研究机械振动对油井水泥各项性能的影响规律,并自主设计加工一套新型水泥石试件制备模具,探索了振动作用的最佳范围,以期机械式振动固井技术的应用提供一定的理论依据及数据参考。

1 振动对水泥浆常规性能的影响

1.1 实验方案

1.1.1 实验材料

实验用水泥浆为常规密度体系(密度:1.90 g/cm³),

表 1 水泥浆性能测试数据表

振动频率 /Hz	黏度计读数(Φ 300/Φ 200/Φ 100/Φ 6/Φ 3)	流性指数	稠度系数	静胶凝过渡时间 /min	凝结时间 /min	抗压强度 /MPa
0	256 /185 /123 /52 /46	0.667	7.822	114.0	177.0	17.7
6	258 /194 /117 /51 /43	0.720	5.664	100.5	161.0	20.1
11	258 /203 /120 /53 /47	0.697	6.538	98.0	166.0	19.5
16	273 /212 /122 /35 /34	0.733	5.527	109.5	170.5	20.3
21	266 /208 /122 /34 /33	0.710	6.216	111.0	163.5	19.7

外加剂与外掺料均为国内市场常见材料,所用配比为实验室自主研发,配方为:

四川嘉华 G 级水泥 + 5.5% 增强剂 DRB - 1 S + 4% 防窜剂 DRT - 100 S + 4% 增韧剂 DRE - 100 S + 3% 增韧防漏剂 DRN - 100 S + 1% 降失水剂 DRF - 100 S + 0.3% 分散剂 DRS - 1 S + 48% 水

水泥浆养护条件为:80 ℃ 下进行 24 h 的常压养护。

1.1.2 实验参数

自主设计的机械式振动实验系统见图 1,通过正交试验优选得到最佳振动参数^[21]:振动频率 6 ~ 21 Hz,振动幅值 2.2 mm,振动时间 5 min,以此进行控制变量实验,测试在此频率范围内振动对水泥浆性能的影响规律。

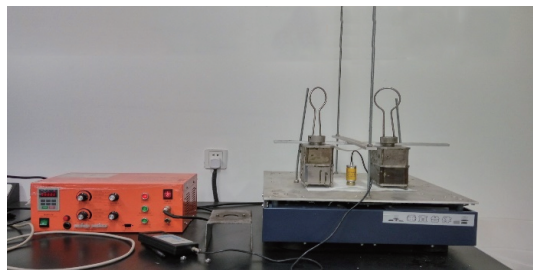


图 1 机械振动水泥浆实验系统照片

1.2 实验结果分析

实验结果见表 1。

在实验参数范围内,机械振动对水泥浆各项性能指标均有明显改善,为便于比较,计算得到各组数据平均值及相对应的变化幅度,见表 2。

表 2 水泥浆性能对比表

参数类别	流性指数	稠度系数	静胶凝过渡时间 /min	凝结时间 /min	抗压强度 /MPa
静置	0.667	7.822	114.0	177.0	17.7
振动	0.715	5.986	105.0	167.0	19.9
改善幅度	+7.20%	-23.47%	-7.89%	-5.65%	+12.43%

注：“+”代表提高，“-”代表下降。

1.2.1 机械振动对水泥浆流变性能的影响

水泥浆流性指数与稠度系数均获得显著改善,流性指数提高 7.20%,稠度系数下降 23.47%。同时,测得黏度计各转速下按递增次序和递减次序读数之比均略大于 1,表明振动使得水泥浆体系发生轻微沉降,因此,在振动施工作业的过程中要充分把控时间变量,防止沉降现象进一步恶化。

1.2.2 机械振动对水泥浆静胶凝强度的影响

振动使得静胶凝强度发展过渡时间和凝结时间分别缩减了 7.89% 和 5.65%,这说明振动在一定程度上促进了水化历程,加速水泥浆凝结硬化成块,使水泥浆在由液态过渡到液塑态的过程中依然能够有效保障井底压力平衡状态,对于防止环空气窜的发生有积极影响。

1.2.3 振动对水泥石抗压强度的影响

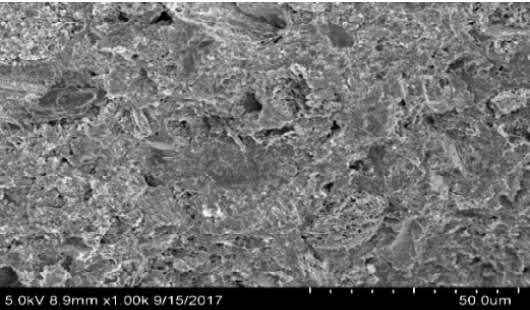
机械振动可以对水泥浆体系内部残存的气泡进行破坏,使整个体系更加均匀致密,最终表现为水泥石强度得到极大提升,实验结果显示振动后水泥石抗压强度提升 12.43%。水泥石力学性能是关乎井筒生命周期内完整性的关键参数,因此,通过施加机械振动提升水泥石强度是切实可行的。

2 微观结构分析

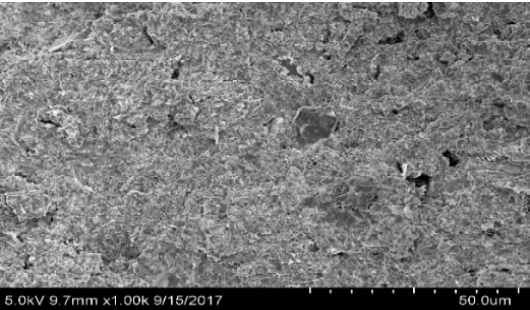
为进一步验证机械振动对水泥浆各项性能指标的作用效果,特采用扫描电镜和压汞孔隙度法进行定性和定量的微观分析。

2.1 断面扫描电镜

图 2 所示为在高真空条件下对水泥石样品断面放大 1 000 倍后的扫描图像。总体来看,水泥发生水化反应生成的大量 C-S-H 凝胶产物错落分布,充填在水泥颗粒间的孔隙中,呈现出较为明显的空间网状结构。如图 2-a) 所示,未经振动的水泥石样品多孔且结构疏松,水泥石样品层间分离非常明显,孔缝分布无规则。如图 2-b) 所示,振动后的水泥石样品内部分布有少量的颗粒状产物,说明振动影响了浆体内部结构,水泥石样品中 C-H-S 凝胶产物层叠生长,水化产物呈层状分布连接成统一整体,但也会有局部结构受到破坏产生剥离现象。总之,振动对因水化反应不完全而产生的有害孔缝均有改善,结构缺陷明显减少。



a) 静置



b) 振动

图 2 水泥石样品扫描电镜图

2.2 压汞法

对两种工况下的水泥石样品进行压汞法测孔隙度,测试数据见表 3。

表 3 压汞测试数据表

参数类别	总压汞量 / (mL·g ⁻¹)	渗透率 / (10 ⁻³ μm ²)	孔隙度	平均孔径 /nm	阈值压力 /MPa
静置	0.262 8	144.237	0.38	34.9	0.04
振动	0.225 3	87.073	0.33	25.9	0.17
改善幅度	-14.27%	-39.63%	-13.16%	-25.79%	—

注：“+”代表提高，“-”代表下降。

由表 3 可知,经过振动,样品总孔隙体积、渗透率和孔隙度均大幅下降,分别降低 14.27%、39.63% 和 13.16%,表明振动使得水泥石样品内部结构更加致密紧凑,而平均孔径下降 25.79%,则进一步证实振动对于消除有害大孔起到了积极作用,对于水泥石强度性能的提升至关重要。

由图 3 可知,本次实验用水泥石样品中,微孔和过渡孔占比在 90% 以上,静置样品孔径分布较为均匀,随着孔径增加孔隙体积呈跳跃式递增,并在 39.95 nm 孔径处达到峰值;而振动处理的样品孔径分布曲线呈现双峰形态,在 3.62、40.29 nm 两处出现峰值,在此特定数值附近孔径较为集中,分析认为,低孔径峰值主要是振动促使水泥浆体系趋于致密均匀,水泥石主要以微孔为主,而大孔径峰值可能振动导致部分结构发生破坏,部分水化产物脱离网架结构,这一结论与前一节断面扫描电镜实验结果相吻合。

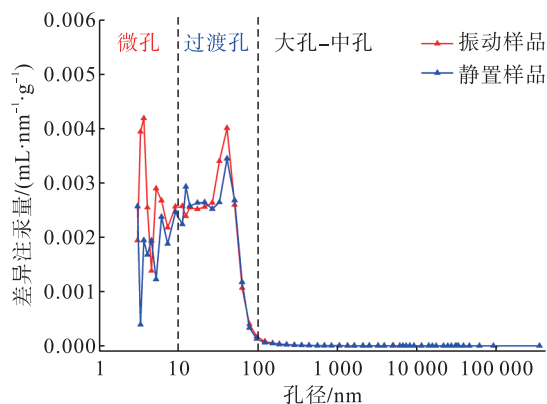


图3 孔径分布图

3 振动波最佳作用范围

设计一种新型水泥石试件制备模具,在不改变原有实验操作及样品制备流程的基础上,将水泥石均匀等分为上、中、下三部分,通过对各部分样品的力学测试数据,探索机械振动对水泥浆体系稳定性的影响规律,装置结构见图4。

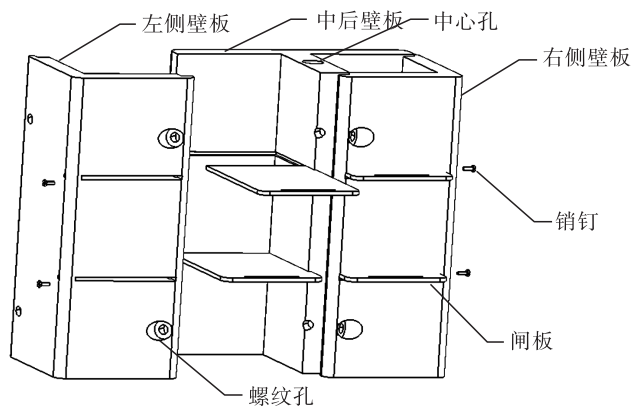
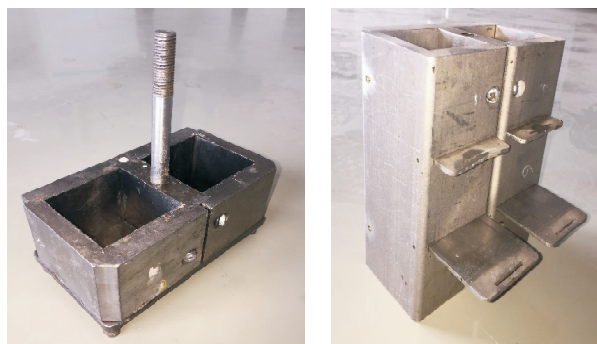


图4 新型水泥石试件制备模具结构图

新型模具分为对称的左右两个部分,可同时生成6块标准水泥石试件,实验过程中,模具一侧水泥浆先进行振动实验,另一侧静置水泥浆作为对照组,不参与振动,如此便可实现两种实验条件下相同参数的同层比较,消除误差。新型模具主要由本体、底板、提杆、闸板和顶盖五个部分组成,组件均为不锈钢金属材料,耐腐蚀。水泥石试件制备模具实物见图5。



a) 通用水泥石模具

b) 新型水泥石模具

图5 水泥石试件制备模具实物照片

为探究振动对水泥浆体系的扰动规律,依据式(1)计算每组样品上、中、下三层中强度最大值相对最小值的变化幅度,以此来衡量水泥浆纵向上的均匀程度,计算结果见表4。

$$\delta = \frac{P_{\max} - P_{\min}}{P_{\text{mid}}} \times 100\% \quad (1)$$

式中: δ 为波动幅度,无量纲; $P_{\max}$ 为同组中水泥石强度最大值,MPa; $P_{\min}$ 为同组中水泥石强度最小值,MPa; P_{mid} 为同组中水泥石强度平均值,MPa。

表4 新型模具测试数据表

工况类别	上层强度 / MPa	中层强度 / MPa	下层强度 / MPa	波动幅度 / (%)
静置	16.5	16.3	16.2	1.22
振动	16.6	18.0	17.4	8.08
提升幅度	0.61%	10.49%	7.41%	—

由表4可知,静置时水泥石强度各层相对变化较小,平均波动幅度仅为1.22%,而振动后强度波动幅度变化很大,平均波动幅度可达8.08%,约为振动前的6.62倍,由此充分说明机械振动的确对水泥浆体系造成扰动,振动波在破碎水泥浆内部残存气泡的同时,也会不可避免地迫使水泥颗粒产生不同程度的震颤和混窜,使得水泥石强度在纵向上发展不均衡。

图6为同层位间静置与振动两种情况下水泥石强度对比图,总体来看各层强度均有不同程度提高,但各层之间振动前后水泥石强度差异显著,中层提升幅度最大为10.49%,其次为下层增幅7.41%,上层水泥石强度变化最微弱,提升幅度仅为0.61%,中层样品强度增幅为下层样品的1.42倍,却是上层样品的17.20倍,实验结果充分表明机械振动的最佳作用范围有限,振动波在水泥浆中的衰减非常迅速,作用效果最佳的位置应在激振处与远端的中间区域。

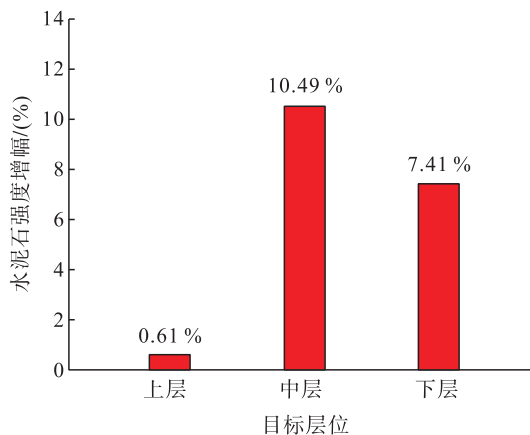


图6 水泥石强度同层比较图

4 结论

1) 通过控制变量实验法测试机械振动对水泥浆各项性能的改善效果: 流性指数提高 7.20%, 稠度系数下降 23.47%, 静胶凝强度发展过渡时间和凝结时间分别缩减了 7.89% 和 5.65%, 水泥石抗压强度提升 12.43%。

2) 通过扫描电镜和压汞法对水泥石结构进行微观分析, 振动后样品总孔隙体积、渗透率、孔隙度和平均孔径分别降低 14.27%、39.63%、13.16% 和 25.79%, 从微观角度验证了振动对于改善水泥石微观结构的积极效果。

3) 发明一套新型水泥石制备模具, 发现振动后水泥石强度波动幅度约为振动前的 6.62 倍, 证实振动对水泥浆体系稳定性存在扰动。机械振动的最佳作用范围非常有限, 作用效果最佳的位置应在激振处与远端的中间区域。

参考文献:

- [1] Solum K W, Solum J R. Method and Apparatus for Vibrating and Cementing A Well Casing: 3557875 [P]. 1971-01-26.
- [2] Bodine A G, Gregory J N. Sonic Cementing: 4640360 [P]. 1987-02-03.
- [3] Kompanek H W, Ligman J R, Plambeck E D. Downhole Transducer System: 4658897 [P]. 1987-04-21.
- [4] Haberman J P, Delestati M, Brace D G. Method and Apparatus to Improve the Displacement of Drilling Fluid by Cement Slurries During Primary and Remedial Cementing Operations, to Improve Cement Bond Logs and to Reduce or Eliminate Gas Migration Problems: 5377753 [P]. 1995-01-03.
- [5] Haberman J P, Wolhart S L. Reciprocating Cement Slurries After Placement by Applying Pressure Pulses in the Annulus [C] // SPE/IADC Drilling Conference, 4-6 March, 1997. Amsterdam, Netherlands. New York: SPE, 1997.
- [6] Cooke C E, Gonzalez O J, Broussard D J. Primary Cementing Improvement by Casing Vibration During Cement Curing Time [J]. SPE Production Engineering, 1988, 3 (3): 339-345.
- [7] Chow T W, McIntire L V, Kunze K R, et al. The Rheological Properties of Cement Slurries: Effects of Vibration, Hydration Conditions, and Additives [J]. SPE Production Engineering, 1988, 3 (4): 543-551.
- [8] 李玉海, 赵立新, 王军荣. 振动固井技术综述[J]. 石油钻采工艺, 1994, 16(6): 40-43.
- Li Yuhai, Zhao Lixin, Wang Junrong. Overview of Vibration Cementing Technology [J]. Oil Drilling & Production Technology, 1994, 16 (6): 40-43.
- [9] 韩玉安, 孙艳龙, 王洪潮, 等. 国内外振动固井技术的发展现状[J]. 钻采工艺, 2000, 23(4): 27-30.
- Han Yu'an, Sun Yanlong, Wang Hongchao, et al. Developing Status Quo of Vibration Cementing Technique both in China and Abroad [J]. Drilling & Production Technology, 2000, 23 (4): 27-30.
- [10] 覃毅, 徐梓刚, 田宝振, 等. 高密度水泥浆粒度级配在水泥浆抗压强度和流变性的影响[J]. 非常规油气, 2017, 4(3): 87-92.
- Qin Yi, Xu Zigang, Tian Baozhen, et al. Effect of High Density Cement Slurry Grading Size on Compressive Strength and Rheology Properties of Cement [J]. Unconventional Oil & Gas, 2017, 4 (3): 87-92.
- [11] 刘慧婷, 刘硕琼, 齐奉忠. 紧密堆积优化固井水泥浆体系研究进展[J]. 硅酸盐通报, 2014, 33(9): 2269-2274.
- Liu Huiting, Liu Shuoqiong, Qi Fengzhong. Research Progress of Cement Slurry System Optimized by Dense Packing Theory [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2014, 33 (9): 2269-2274.
- [12] 丁士东, 张克坚, 高德利, 等. 新型井口脉冲振动固井装置的研制与应用[J]. 石油机械, 2006, 34(11): 51-53.
- Ding Shidong, Zhang Kejian, Gao Deli, et al. Development and Application of a New Type of Wellhead Pulse Vibration Cementing Device [J]. China Petroleum Machinery, 2006, 34 (11): 51-53.
- [13] 薛亮, 李帮民, 刘爱萍, 等. 振动固井对泥饼的剪切作用机理研究[J]. 石油钻探技术, 2011, 39(4): 53-56.
- Xue Liang, Li Bangmin, Liu Aiping, et al. Study on Mechanism of Cake Shear Failure in Hydraulic Vibration Cementing [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2011, 39 (4): 53-56.
- [14] 王友文, 袁进平, 王兆会, 等. 套管柱在钻井液-水泥浆耦合系统中振动特性的数值模拟[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2019, 34(3): 88-93.
- Wang Youwen, Yuan Jinping, Wang Zhaohui, et al. Numerical Simulation of Vibration Characteristics of Casing String in Drilling Fluid-Cement Slurry Coupling System [J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 2019, 34 (3): 88-93.
- [15] 韩崇福, 田锡君, 王冠军. 振动固井技术在辽河油田的试验应用[J]. 石油钻采工艺, 1999, 21(4): 24-29.
- Han Chongfu, Tian Xijun, Wang Guanjuan. Pilot Application of Vibration Cementing Technique in Liaohe Oilfield [J]. Oil Drilling & Production Technology, 1999, 21 (4): 24-29.
- [16] 王恩合, 王学良, 王学成, 等. 动态振动固井技术研究及现

- 场试验[J]. 石油钻探技术, 2011, 39(4): 57-60.
- Wang Enhe, Wang Xueliang, Wang Xuecheng, et al. Research and Field Experiment of Dynamic Vibrating Cementing Technique [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2011, 39(4): 57-60.
- [17] 张 鹏, 吴文瑞, 董海鹏, 等. 振动固井井下水力震荡装置的研究[J]. 辽宁化工, 2010, 39(10): 1069-1070.
- Zhang Peng, Wu Wenrui, Dong Haipeng, et al. Study on Downhole Hydraulic Concussion Generator in Well Cementing [J]. Liaoning Chemical Industry, 2010, 39(10): 1069-1070.
- [18] 梅明佳, 江 维, 魏周胜. 偏心机械式振动固井技术在长庆油田的应用[J]. 钻井液与完井液, 2016, 33(4): 97-100.
- Mei Mingjia, Jiang Wei, Wei Zhousheng. The Application of Eccentric Mechanical Vibration Cementing Technique in Changqing [J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2016, 33(4): 97-100.
- [19] 尹宜勇, 王兆会, 任 星, 等. 井下螺杆马达双向振动固井工具的研制[J]. 石油机械, 2017, 45(1): 10-14.
- Yin Yiyong, Wang Zhaohui, Ren Xing, et al. Development of Downhole PDM Bidirectional Vibration Cementing Tool [J]. China Petroleum Machinery, 2017, 45(1): 10-14.
- [20] 曲 刚, 李亚伟, 尹文波, 等. 移动式振动固井装置的研制与现场试验[J]. 石油钻探技术, 2017, 45(5): 43-47.
- Qu Gang, Li Yawei, Yin Wenbo, et al. Development and Field Test of Mobile Vibration Cementing Device [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2017, 45(5): 43-47.
- [21] 王友文, 袁进平, 王兆会, 等. 机械振动对固井水泥石强度影响规律实验研究[J]. 天然气勘探与开发, 2018, 41(1): 96-100.
- Wang Youwen, Yuan Jinping, Wang Zhaohui, et al. Experimental Study on the Effect of Mechanical Vibration on Cement Strength During Cementing [J]. Natural Gas Exploration and Development, 2018, 41(1): 96-100.

(上接第84页)

- 组页岩气储集层矿物组成特征及意义[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2016, 35(5): 957-965.
- Zhang Jizhen, Li Xianqing, Wang Gang, et al. Mineral Compositions of Upper Permian Longtan Formation Shale in Southern Sichuan Basin and Its Significance for Gas Reservoir [J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2016, 35(5): 957-965.
- [17] 王 佟, 王庆伟, 傅雪海. 煤系非常规天然气的系统研究及其意义[J]. 煤田地质与勘探, 2014, 42(1): 24-27.
- Wang Tong, Wang Qingwei, Fu Xuehai. The Significance and the Systematic Research of the Unconventional Gas in Coal Measures [J]. Coal Geology & Exploration, 2014, 42(1): 24-27.
- [18] 牛光亮. 石屏一矿岩溶暗河发育特征及示踪试验[C] // 国际管理科学与工程协会. 水资源管理与工程国际学术会议论文集. 郑州: 国际管理科学与工程协会, 2011.
- Niu Guangliang. Development Characteristic and Tracer Test of Karst Underground River in Shiping No. 1 Mine [C] // International Association of Management Science and Engineering Technology. Proceedings of the International Conference on Water Resources Management and Engineering. Zhengzhou: International Association of Management Science and Engineering Technology, 2011.
- [19] 陈立官, 王洪辉, 陆正元, 等. 川南地区古岩溶与阳新统天然气局部富集关系的探讨[J]. 成都地质学院学报, 1992(4): 99-106.
- Chen Liguan, Wang Honghui, Lu Zhengyuan, et al. Discussion on the Relationship Between Local Gas Accumulation and Paleokarst in the Yangxin Limestones in Southern Sichuan [J]. Journal of Chengdu College of Geology, 1992, 19(4): 99-106.
- [20] 秦 勇, 郑长东, 王博洋, 等. 基于等温吸附曲线的煤储层产气潜力定量评价——以黔北地区长岗矿区为例[J]. 天然气工业, 2018, 38(9): 40-47.
- Qin Yong, Zheng Changdong, Wang Boyang, et al. Quantitative Evaluation on the Gas Production Potential of Coal Reservoirs Based on Isothermal Adsorption Curves: A Case Study of the Changgang Field, Northern Guizhou, China [J]. Natural Gas Industry, 2018, 38(9): 40-47.
- [21] 安 林, 韩保山, 卢昭阳. 芦岭井田单煤层产气潜力定量评价[J]. 中国煤炭地质, 2019, 31(3): 23-25.
- An Lin, Han Baoshan, Lu Zhaoyang. Single Coal Seam Gas Production Potential Quantitative Assessment in Luling Minefield [J]. Coal Geology of China, 2019, 31(3): 23-25.
- [22] 孟艳军, 汤达祯, 许 浩, 等. 煤层气解吸阶段划分方法及其意义[J]. 石油勘探与开发, 2014, 41(5): 612-617.
- Meng Yanjun, Tang Dazhen, Xu Hao, et al. Division of Coalbed Methane Desorption Stages and Its Significance [J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 41(5): 612-617.