文章编号:1673-5005(2017)05-0087-07 doi:10.3969/j.issn.1673-5005.2017.05.010

煤层气井固井泡沫水泥浆密度变化规律及应用

王楚峰[1,2], 王瑞和[1], 王方祥[1], 王成文[1]

(1. 中国石油大学石油工程学院,山东青岛 266580; 2. 中联煤层气有限责任公司,北京 100011)

摘要:针对泡沫水泥浆在井筒内的密度变化的不确定性和复杂性导致固井设计困难等问题,通过试验测试现场 1.10 和 1.20 g/cm^3 两种化学充氮泡沫水泥浆体系的密度变化,分析水泥石中泡沫尺寸变化特点以及固井液柱压力的变化,并进行 11 口井的现场应用。结果表明:泡沫水泥浆密度随温度和压力的变化符合 Boltzmann 函数;随着压力增加,水泥石中泡沫尺寸呈先急剧缩小、后变化较小的趋势。修正后的泡沫水泥浆密度计算公式对现场固井具有指导作用,固井优质率超过 96%,为煤层气泡沫水泥固井提供技术支撑。

关键词:泡沫水泥浆; 煤层气; 固井; Boltzmann 函数

中图分类号:TE 25 **文献标志码**:A

引用格式:王楚峰,王瑞和,王方祥,等. 煤层气井固井泡沫水泥浆密度变化规律及应用[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2017,41(5):87-93.

WANG Chufeng, WANG Ruihe, WANG Fangxiang, et al. Study and application of change law of foamed cement slurry density for coalbed methane[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science),2017,41(5):87-93.

Study and application of change law of foamed cement slurry density for coalbed methane

WANG Chufeng[1,2], WANG Ruihe[1], WANG Fangxiang[1], WANG Chengwen[1]

(1. *School of Petroleum Engineering in China University of Petroleum*, *Qingdao* 266580, *China*;
2. *China United Coaled Methane Company Limited*, *Beijing* 100011, *China*)

Abstract: Foamed cement slurry has been used in well completion in coalbed methane development due to its low density, high intensity and good anti-channeling ability. However, the density of the foamed cement slurry in borehole is instable and can be greatly affected by the well depth. In this study, laboratory experiments were carried out with the two foamed slurries of different densities (1.10 g/cm^3 and 1.20 g/cm^3), in order to investigate the density variation of chemical and nitrogen-filled foamed cement slurry at different pressures (i.e. well depths). The bubbles size in the cement stone was measured using the microstructure SEM diagrams. A cement displacement model using foamed cement slurry in coalbed methane wells was established in consideration of the cement displacement process and rheological properties of the cement slurry at different depth and pressure. The application of the model in 11 wells was conducted. The results show that the variation of the foamed cement slurry density with temperature and pressure is in accordance with the Boltzmann function. The bubbles size in the cement stone reduces sharply firstly with the increase of pressure and then its variation becomes smaller at high pressures. The qualification rate of the cementing process based on the model developed in this study can be 100% and the merit factor is more than 96%.

Keywords: foamed cement slurry; coalbed methane; well cementing; Boltzmann function

沁水盆地南部煤层气的主采煤层是 3#和 15#煤层[1],由于 3#和 15#煤储层压力低、裂缝及割理发育[2-3],对固井技术提出了挑战。目前国内外煤层气井固井技术主要有高强度低密度水泥浆[4-6]、分级固

收稿日期:2016-10-25

基金项目:国家科技重大专项(2011ZX05060,2016ZX05044);教育部创新团队发展计划项目(IRT_14R58)

作者简介:王楚峰(1969-),男,博士研究生,研究方向为油气井固完井工程、油层保护和油田化学。E-mail:2637282889@qq.com。

通讯作者:王成文(1975-),男,副教授,博士,研究方向为油气井固完井工程、油层保护和油田化学。E-mail:wangcw@upc.edu.cn。

井、塞流顶替技术等[7]。泡沫水泥浆具有密度低、强度高、防漏失能力强等优点[8-10],已在低压地层、低压枯竭油藏、深水等领域进行了广泛应用[11-13]。近年来,化学充氮泡沫水泥浆技术不断成熟与完善,其既能保证泡沫水泥浆优秀的性能,又具有成本低的优势,符合煤层气低成本开发战略,在煤层气固井领域展现出广阔应用前景。泡沫水泥浆体系中含有大量气泡,在一定温度、压力下,气泡体积会随着温度、压力发生改变,泡沫水泥浆在油气井环空中的密度随井深的不同而变化,导致环空各深度的静液柱压力分布复杂,对易漏层的液柱压力计算不准确。因此,研究泡沫水泥浆在井内的密度变化规律具有重要意义。许多学者对泡沫水泥浆随井深变化的密度模型进行了研究[14-21],所建立的模型是基于气体状态方程,然后通过试验数据对所建模型拟合系数进行适当的修正,却没有考虑泡沫稳定性、聚合物外加剂和现场工艺等因素对泡沫水泥浆密度的影响。为此,笔者利用山西沁水盆地南部煤层气固井现场试验使用的 1.10 和 1.20 g/cm^3 两种密度的化学充氮泡沫水泥浆体系,通过不同温度和压力条件下水泥浆密度变化试验,探讨浆体密度和水泥石中泡沫尺寸的变化。

1 煤层气泡沫水泥浆体系及性能

以 G 级油井水泥为基础,水灰比 0.50,通过低温发气剂 LTPN 体系在水泥浆中产生氮气实现化学充氮目的,以蛋白质复合类高效稳泡剂 SC-1 形成稳定的泡沫体系,利用磺化醛酮类分散剂 CM-D、非离子聚乙烯类降失水剂 CM-L 和复合钾盐类早强剂 FC-A 进一步调节水泥浆流变性能、失水量和稠化时间等工程性能。经过大量室内测试试验,最终确定出密度为 1.10 和 1.20 g/cm^3 的新型泡沫低密度水泥浆体系(NFLC),其具体成分和组成如表 1 所示。

表 1 新型泡沫低密度水泥浆体系组成

Table 1 System compositions of novel foamed cement slurry

编号	水泥	发泡剂 LTPN/%	稳泡剂 SC-1/%	分散剂 CM-D/%	降失水剂 CM-L/%	早强剂 FC-A/%	水/%	密度/(g·cm^{-3})
1	G 级	1.80	1.2	0.35	1.3	2.5	50	1.10
2	G 级	1.60	1.1	0.30	1.3	2.0	50	1.20

经室内试验测试,该两种泡沫水泥浆体系具有良好的流动性能、无游离液、沉降稳定性好、API 失水量小于 50 mL/30 min、稠化时间合理等特点,且形成的水泥石具有较高的早期抗压强度,后期水泥石强度不断增加,满足煤层气固井的封固要求。

2 泡沫水泥浆密度变化试验

根据研究,认为泡沫水泥浆密度主要受温度和压力两个因素的影响。基于此,本试验从温度、压力、温度与压力综合作用三个方面研究泡沫水泥浆密度的变化。

2.1 温度对泡沫水泥浆密度的影响

在试验压力一定(常压)的情况下,测试不同温度条件下密度 1.10 和 1.20 g/cm^3 两种新型泡沫水泥浆 NFLC 体系的密度,结果如图 1 所示。

从图 1 可知,常压下,随着温度的升高,两种泡沫水泥浆的密度均呈现出线性减小的趋势,密度为 1.10 g/cm^3 的泡沫水泥浆在 80 ℃时密度降为 1.04 g/cm^3;密度为 1.20 g/cm^3 的泡沫水泥浆在 80 ℃时密度降为 1.13 g/cm^3。这是因为当温度升高时,由于气体体积膨胀,导致泡沫水泥浆密度减小。

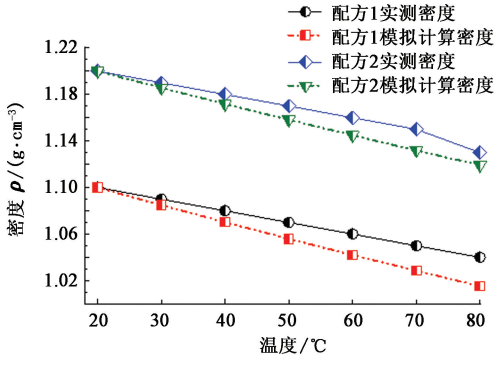


图 1 温度对新型泡沫水泥浆密度的影响

Fig. 1 Influence of temperature on density of foamed cement slurry

真实气体状态方程及泡沫水泥浆密度计算式为

$$pV_g = znR(273.15+t), \quad (1)$$

$$\rho_{ll} = m_c/[znR(273.15+t)/p+V_c]. \quad (2)$$

式中,p 为压力,MPa;t 为温度,℃;V_c 为水泥浆的基浆体积,mL;ρ_{ll} 为泡沫水泥浆理论密度,g/cm^3;m_c 为泡沫水泥浆总质量,g;z 为氮气的压缩因子;n 氮气物质的量,mol;R 为常数,8.314 J·K^{-1}·mol^{-1}。

由式(1)、(2)可知,氮气体积 V_g 与温度成正比,但试验温度 t 对气体体积影响有限,即对泡沫水

泥浆的密度影响较小,与试验测试结果一致。

2.2　压力对泡沫水泥浆密度的影响

采用自制高度 450 mm、直径 76.2 mm 的钢圆柱养护模具,将泡沫水泥浆倒入模具,浆体液面高度超过模具高度 5/6,然后将前置液缓慢加入到模具中并装满,密封后用清水加压养护 48 h,通过泡沫水泥浆凝固前后体积变化推算密度变化。在试验温度一定的情况下,测试压力对泡沫水泥浆密度的影响,结果如图 2 所示。

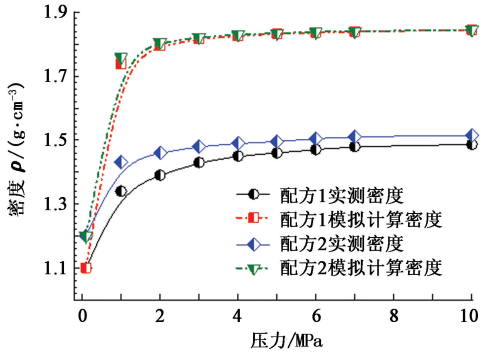


图 2　压力对新型泡沫水泥浆密度的影响

Fig. 2　Influence of pressure on density of foamed cement slurry

从图 2 可看出,当压力为 0 ~ 2 MPa 时,泡沫水泥浆密度变化明显,随着压力增加密度呈快速增大的趋势;当压力大于 2 MPa 后,密度受压力变化的影响较小,泡沫水泥浆的密度随压力增加呈较缓慢增长的趋势。由式(1)、(2)可知,气体体积 V_g 与试验压力 p 成反比,在其他条件不变的情况下,泡沫水泥浆密度 ρ 与试验压力 p 的关系如式(2)。

在本次试验压力测试范围 0 ~ 10 MPa 内,密度分别为 1.10 和 1.20 g/cm^3 的新型泡沫水泥浆的密度分别增大到 1.505 和 1.585 g/cm^3,密度分别增加了 36.82% 和 32.08%。

2.3　模拟现场固井温度和压力对泡沫水泥浆密度的影响

根据上述温度和压力对泡沫水泥浆密度影响的规律,可知泡沫水泥浆的密度随着温度和压力的变化而不断变化,为了进一步反映新型泡沫水泥浆在现场井下的密度变化情况,根据以往煤层气井测井资料,分别测试密度为 1.10 和 1.20 g/cm^3 新型泡沫水泥浆的密度变化情况,测试结果如表 2 所示。

试验测试结果表明:随着温度和压力的不断增加,泡沫水泥浆密度不断增大,当温度和压力从室温条件下的 20 ℃、常压变化到模拟井下 40 ℃、12 MPa 条件时,泡沫水泥浆密度从 1.10 g/cm^3 增大到 1.482 g/cm^3,从 1.20 g/cm^3 增大到 1.502 g/cm^3,其在 40 ℃、12 MPa 条件下的密度分别相对室温(20 ℃)条件下的密度增加了 34.73% 和 25.17%。

表 2　新型泡沫水泥浆密度变化

Table 2　Change of foamed cement slurry with density

温度/℃	压力/MPa	新型泡沫水泥浆的密度/(g·cm^{-3})	
		初始密度 1.10	初始密度 1.20
20	常压	1.100	1.200
23	2	1.385	1.440
27	5	1.448	1.489
30	8	1.476	1.494
35	10	1.480	1.499
40	12	1.482	1.502

2.4　新型泡沫水泥浆的密度变化

为了进一步探讨新型泡沫水泥浆的密度变化规律,在上述试验测试结果的基础上进行数值拟合。

密度 1.10 g/cm^3 泡沫水泥浆的拟合方程为

$$y=A_2+(A_1-A_2)/(1+\exp((x-x_0)/dx)). \quad (3)$$

其中 $A_1=-299.1494$,$A_2=1.47521$,$x_0=-9.15758$,$dx=1.38458$。校正决定系数为 0.99119。

密度 1.20 g/cm^3 泡沫水泥浆的拟合方程为

$$y=A_2+(A_1-A_2)/(1+\exp((x-x_0)/dx)). \quad (4)$$

其中 $A_1=-234.39689$,$A_2=1.49717$,$x_0=-7.66806$,$dx=1.16374$。校正决定系数为 0.99791。

由拟合结果可知,受压力与温度的共同影响,在 25 ℃、常压到 40 ℃、12 MPa 范围内,新型泡沫水泥浆的密度变化比较符合 Boltzmann 函数[22]。

2.5　新型泡沫水泥浆密度的修正

在模拟现场固井温度、压力条件下,将试验所测试新型泡沫水泥浆的密度与式(2)理论模拟计算的密度相比较,结果如表 3 所示。

表 3　新型泡沫水泥浆密度变化规律对比

Table 3　Comparison of change rules of density of foamed cement slurry

温度/℃	压力/MPa	泡沫水泥浆的密度/(g·cm^{-3})			
		初始密度 1.10		初始密度 1.20	
		实测值	理论计算值	实测值	理论计算值
20	常压	1.100	1.100	1.200	1.200
23	2	1.382	1.798	1.438	1.805
27	5	1.448	1.830	1.488	1.831
30	8	1.471	1.841	1.496	1.841
35	10	1.479	1.842	1.501	1.845
40	12	1.481	1.845	1.502	1.850

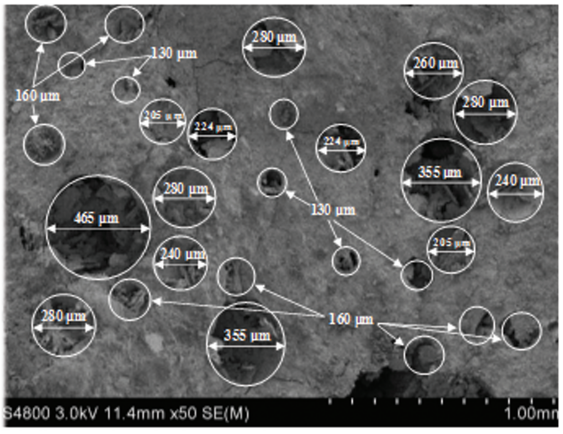
从表 3 可知,新型泡沫水泥浆体系的实测密度与计算密度相差较大,这说明对于复杂的泡沫多相流体,气泡中的气体体积变化并不遵从真实气

体的状态方程,气泡体积变化除了与压力和温度有关外,还与浆体中的固相水泥颗粒、液相黏度等因素密切相关,这是导致实测密度(ρ_{sj})与模拟计算密度偏差大的主要原因。为更好地指导现场泡沫水泥浆密度设计,根据试验结果对理论模拟计算密度值进行修正,

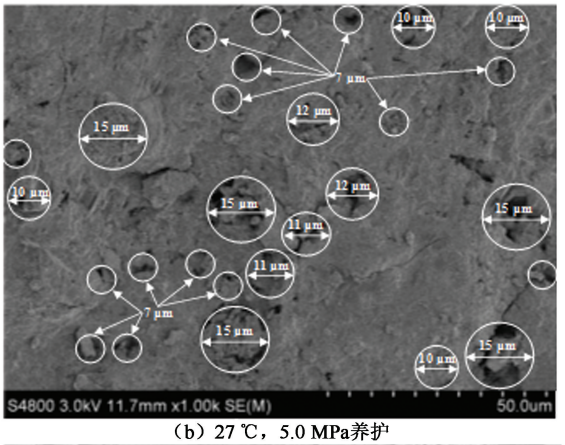
$$\rho_{sj}=1.036\,655\times10^{-5}\exp(\rho_{ll}/0.176\,765)+1.142\,99. \tag{5}$$

3　水泥石的微观结构 SEM 表征

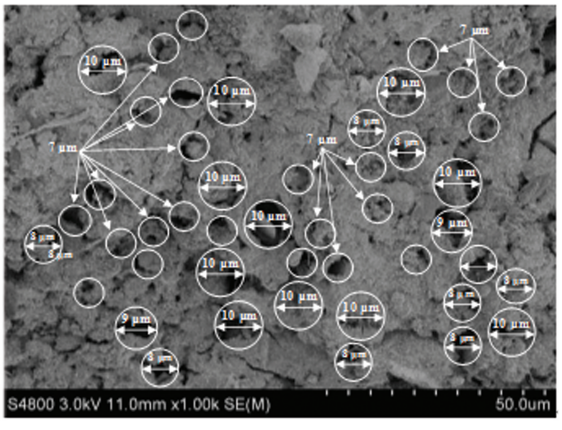
为了进一步分析化学充氮泡沫水泥浆的影响,利用扫描电子显微镜对密度 1.20 g/cm^3 的泡沫水泥浆在不同温度、压力条件下凝固后的水泥石微观结构进行分析。图 3 为密度 1.20 g/cm^3 的化学充氮泡沫水泥浆在不同温度、压力下养护 48 h 后的水泥石微观结构 SEM 图。



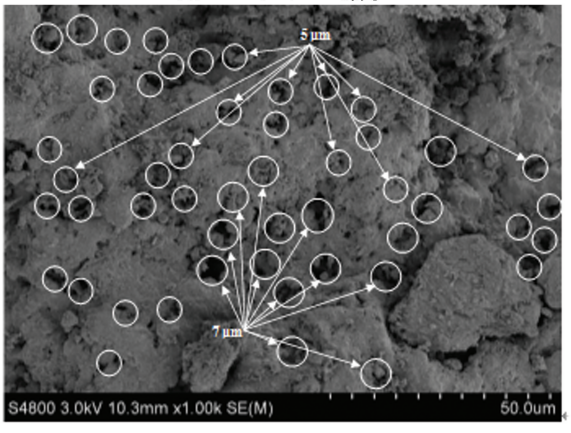
(a) 25 ℃，常压养护



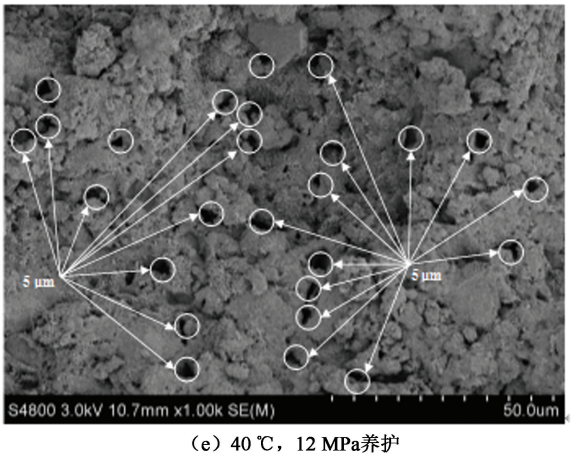
(b) 27 ℃，5.0 MPa养护



(c) 30 ℃，8.0 MPa养护



(d) 35 ℃，10 MPa养护



(e) 40 ℃，12 MPa养护

图 3　1.20 g/cm^3 泡沫水泥石的微观结构

Fig. 3　SEM of foamed cement matrix (1.20 g/cm^3) at difference curing conditions

从图 3 中可看出:在 25 ℃、常压养护条件下,水泥石中的泡沫最大尺寸为 465 μm,其中直径为 200 ~280 μm 的泡沫最多;在 27 ℃、5.0 MPa 养护条件下,虽然泡沫孔隙被水化产物和 $Ca(OH)_2$ 晶体占据,但仍可看出水泥石中泡沫最大尺寸急剧变小,泡沫直径主要为 7 ~15 μm;在 30 ℃、8.0 MPa 养护条件下,水泥石中泡沫最大尺寸缩小为 10 μm,并且直径为 7 μm 的泡沫最多;在 35 ℃、10 MPa 和 40 ℃、12 MPa 养护条件下,水泥石中泡沫直径从 7 μm 逐渐减小到 5 μm。从水泥石微观结构中的泡沫直径变化可看出,当压力增大到一定程度后,水泥石中泡沫直径随压力增加而变小的趋势急剧减弱,这与泡沫水泥浆的实测密度变化规律一致。

4　现场应用

TS53-1D 井位于山西省沁水县柿庄镇,目的煤层为二叠系下统山西组 3# 煤层,煤层深度为 1 112.00 ~1 118.80 m,该井完钻井深为 1 164 m,井底静止温度为 39.1 ℃,井底循环温度为 27.4 ℃,井底压力为 14.33 MPa,井身结构如表 4 所示。

为了有效保护煤储层、提高固井质量,对 TS53-1D 井采用泡沫水泥浆固井,设计的水泥浆地面密度为 1.20 g/cm^3,附加量为 15%。根据泡沫水泥浆密度与温度、压力的关系,计算得到泡沫水泥浆密度在井内的分布,如图 4 所示。

表 4　TS53-1D 井身结构

Table 4　Well structure of TS53-1D

开钻次序	钻头尺寸×井深/(mm×m)	套管尺寸×下深/(mm×m)	封固井段/m
表层套管	311.15×90.3	244.5×89.76	0 ~89.76
生产套管	215.9×1 112	139.7×1 157.98	912 ~1 157.98

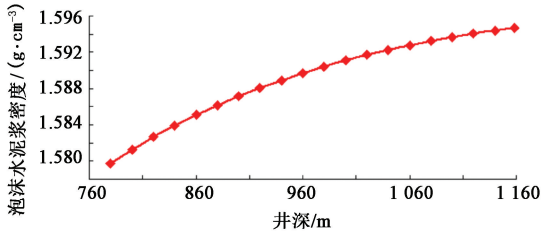


图 4　泡沫水泥浆密度随井深的变化

Fig. 4　Change of density of foamed cement slurry with well depth

由图 4 可以看出,随着井深的增加,泡沫水泥浆密度逐渐增大,地面密度为 1.20 g/cm^3 的水泥浆注到井底后密度增大到 1.60 g/cm^3。须根据水泥浆在井底的实际密度计算井内薄弱地层的压力。根据注水泥顶替理论及注水泥流变学设计理论[23-24],编制煤层气泡沫水泥浆固井顶替设计与动态模拟程序,对 TS53-1D 井进行固井顶替过程的模拟计算,其对应的注水泥施工参数如表 5 所示,计算得到煤储层液柱压力的变化曲线如图 5 所示。

表 5　TS53-1D 井注水泥施工参数

Table 5　Cement construction parameters of TS53-1D

施工程序	流体类型	密度/(g·cm^{-3})	用量/m^3	排量/(L·min^{-1})	施工时间/min
注前置液	前置液	1.05	4.0	500	8
注水泥浆	注水泥基浆	1.85	8.9	800	11
	注发泡剂	1.01	1	90	11
压胶塞	—	—	—	—	5
注顶替液	注顶替液	1.0	14.8	460	32

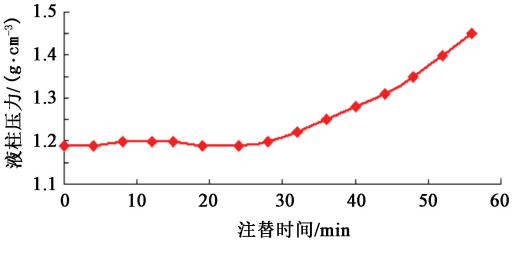


图 5　煤储层液柱压力变化

Fig. 5　Change of liquid column pressure in coal reservoir

由图 5 可以看出,煤储层液柱压力为 1.45 g/cm^3,小于该区块煤层的破裂压力 1.6 g/cm^3,满足平衡压力固井条件。依据泡沫水泥浆及其配套技术在山西沁水盆地南部进行了 11 口煤层气井的现场试验,CBL/VDL 固井质量检测结果表明,固井合格率 100%,一、二界面胶结质量优质率超过 96%。

5　结　论

(1)随着温度和压力的不断增加,泡沫水泥浆密度呈现先急剧增大后变化较小的趋势,密度变化规律符合 Boltzmann 函数。

(2)新型泡沫水泥石中的泡沫直径随试验压力的增加,呈先急剧减小后变化较小的趋势,与密度变化趋势一致,揭示了泡沫水泥浆密度变化机制。

(3)TS53-1D 井的泡沫水泥浆固井试验,证实了煤层气固井泡沫水泥浆密度变化规律对固井工程

的指导作用,为煤层气泡沫水泥浆固井技术提供理论指导。

参考文献:

[1] 孙强,孙建平,张健,等. 沁水盆地南部柿庄南区块煤层气地质特征[J]. 中国煤炭地质,2010,22(6):9-12.
SUN Qiang, SUN Jianping, ZHANG Jian, et al. CBM geological characteristics in Shizhuang South Block, Southern Qinshui Basin[J]. Coal Geology of China, 2010,22(6):9-12.

[2] 左景栾,孙晗森,吴建光, 等. 煤层气超低密度固井技术研究与应用[J]. 煤炭学报,2012,37(12):2076-2082.
ZUO Jingluan, SUN Hansen, WU Jianguang, et al. Study and application of ultra-low density cementing technology for coalbed methane[J]. Journal of China Coal Society, 2012,37(12):2076-2082.

[3] 孟召平,田永东,李国富. 沁水盆地南部地应力场特征及其研究意义[J]. 煤炭学报,2010,35(6):975-981.
MENG Zhaoping, TIAN Yongdong, LI Guofu. Characteristics of in-situ stress field in Southern Qinshui Basin and its research significance[J]. Journal of China Coal Society, 2010,35(6):975-981.

[4] KULAKOFSKY D, PAREDES J L, MORALES J M. Ultra-light weight cementing technology sets world record for liner cementing with a 5.4 lbm/gal slurry density [R]. SPE 98124, 2006.

[5] DROCHON B, KEFI S. Very low-density cement slurry: 20040112255 [P]. 2004-06-17.

[6] TAN B, LANG M, HARSHAD D. High-strength, low-density cement pumped on-the-fly using volumetric mixing achieves cement to surface in heavy loss coal seam gas field[R]. SPE 158092,2012.

[7] 丁士东. 塔河油田紊流、塞流复合顶替固井技术[J]. 石油钻采工艺,2002,24(1):20-22.
DING Shidong. Combination displacement cementing of turbulent and plug flow in Tahe Oilfield[J]. Oil Driling & Production Technology, 2002,24(1): 20-22.

[8] 王楚峰,王瑞和,杨焕强,等. 煤层气泡沫水泥浆固井工艺技术及现场应用[J]. 煤田地质与勘探,2016,44(2):116-120.
WANG Chufeng, WANG Ruihe, YANG Huanqiang, et al. Cementing technology of foam cement slurry for coalbed methane well and its application[J]. Coal Geology & Exploration, 2016,44(2):116-120.

[9] GLOSSER D, KUTCHKO B, BENGE G, et al. Relationship between operational variables fundamental physics and foamed cement properties in lab and field generated foamed cement slurries[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2016,145:66-76.

[10] AHMED R M, TAKACH N E, KHAN U M, et al. Rheology of foamed cement[J]. Cement and Concrete Research, 2009,39:353-361.

[11] 王瑞和,王成文,步玉环,等. 深水固井技术研究进展[J]. 中国石油大学学报(自然科学报),2008,32(1):77-81.
WANG Ruihe, WANG Chengwen, BU Yuhuan, et al. Research development of deepwater cement technique [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2008,32(1):77-81.

[12] HARMS W M, FEBUS J S. Cementing of fragile-formation wells with foamed cement slurries[J]. Journal of Petroleum Technology, 1985,37(6):1049-1057.

[13] AHMED E S, ABDEL A A, OMAR K, et al. Improving deep-well cconomics with foamed-cementing solutions [R]. SPE 128239, 2010.

[14] MARTINS A L, CAMPOS W. A model to design the foam cement job [R]. SPE 23644, 1994.

[15] Jr GARCIA H, MAIDLA E E, ONAN D L. Annular pressure predictions throughout foam cement operations [R]. SPE 25439, 1993.

[16] 卞先孟,王铭,唐威,等. 欠平衡钻井泡沫水泥浆静液柱压力分析[J]. 钻采工艺,2006,29(2):28-29,36.
BIAN Xianmeng, WANG Ming, TANG Wei, et al. Hydrostatic fluid column pressure analysis for foam slurry in underbalanced drilling[J]. Drilling & Production Technology, 2006,29(2):28-29, 36.

[17] 朱礼平,杨雄,刁素,等. 泡沫水泥固井施工参数优化设计[J]. 石油钻探技术,2009,37(2):45-47.
ZHU Liping, YANG Xiong, DIAO Su, et al. optimization of cementing with foamed cement slurry[J]. Petroleum Drilling Technology, 2009,37(2):45-47.

[18] 吴事难,张金龙,丁士东,等. 井下泡沫水泥浆密度计算模型修正[J]. 石油钻探技术,2013,41(2):28-33.
WU Shinan, ZHANG Jinlong, DING Shidong, et al. Revision of mathematical model of foamed cement slurry density under down-hole conditions [J]. Petroleum Drilling Technology, 2013,41(2):28-33.

[19] 顾军,向阳,何湘清,等. 井下泡沫水泥密度变化规律研究[J]. 石油与天然气化工,2002,31(1):35-36.
GU Jun, XIANG Yang, HE Xiangqing, et al. Research on variational regularity of foamed cement slurry density in well down[J]. Chemical Engineering of Oil and Gas, 2002,31(1):35-36.

[20] 顾军,尹会存,高德利,等. 泡沫水泥稳定性研究[J]. 油田化学,2004,21(4):307-309.

GU Jun, YIN Huicun, GAO Deli, et al. A study on foam-admixtured oil well cement[J]. Oilfield Chemistry, 2004,21(4):307-309.

[21] 屈建省,杜慧春,肖苑,等. 压力、温度对泡沫水泥密度的影响[J]. 钻井液与完井液,1995,12(1):66-68.
QU Jiansheng, DU Huichun, XIAO Yuan, et al. The influence of pressure and temperature on the density of foam cement[J]. Drilling Fluid and Completion Fluid, 1995,12(1):66-68.

[22] 郭照立,郑楚光. 格子 Boltzmann 方法的原理及应用[M]. 北京:科学出版社,2009.

[23] 王瑞和,李明忠,王成文,等. 油气井注水泥顶替机理研究进展[J]. 天然气工业,2013,33(5):69-76.
WANG Ruihe, LI Mingzhong, WANG Chengwen, et al. Research progress in the cementing displacement mechanism[J]. Natural Gas Industry, 2013,33(5):69-76.

[24] 王斌斌. 固井水泥浆流变特性研究与应用[D]. 青岛:中国石油大学,2011.
WANG Binbin. Research and application on rheological property of cement slurry[D]. Qingdao:China University of Petroleum, 2011.

(编辑　李志芬)