

◀ 钻井完井 ▶

doi:10.3969/j.issn.1001-0890.2012.05.009

大斜度井偏心环空注水泥顶替数值模拟研究

李明忠¹, 王成文¹, 王长权², 郭胜来¹, 方 群¹

(1. 中国石油大学(华东)石油工程学院, 山东青岛 266580; 2. 中国石油大庆钻探工程公司钻井四公司, 吉林松原 138000)

摘 要: 为了进一步了解大斜度井注水泥顶替机理, 提高注水泥顶替效率, 借助计算流体力学软件 Fluent, 建立了大斜度井环空三维模型, 采用流体体积法进行了水泥浆顶替钻井液的数值模拟研究。分析了井斜角、偏心度以及水泥浆与钻井液的密度差对顶替效率和顶替界面稳定性的影响规律: 增大井斜角会降低注水泥顶替效率; 在大斜度井偏心环空中, 随着水泥浆与钻井液密度差的增大, 顶替效率先增大后降低; 在大斜度井中, 套管偏心并不完全是降低顶替效率, 当套管具有一定偏心(建议偏心度取为 0.1~0.2)时, 可在一定程度上阻止由于正密度差造成的水泥浆在环空低侧窄间隙突进, 从而提高顶替效率。通过数值模拟, 总结了大斜度井与直井注水泥顶替机理的区别, 为大斜度井注水泥顶替参数设计提供了一定的参考和理论依据。

关键词: 大斜度井 顶替效率 顶替界面 井斜角 偏心度 密度差

中图分类号: TE256 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-0890(2012)05-0040-05

Numerical Simulation of Cement Displacement in Eccentric Annulus at Highly Deviated Wells

Li Mingzhong¹, Wang Chengwen¹, Wang Changquan², Guo Shenglai¹, Fang Qun¹

(1. School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (Huadong), Qingdao, Shandong, 266580, China; 2. No. 4 Drilling Company, Daqing Drilling & Exploration Engineering Company, CNPC, Songyuan, Jilin, 138000, China)

Abstract: In order to understand the displacement mechanism and improve displacement efficiency in highly deviated well, three-dimensional annular model was developed using the CFD software Fluent, and numerical simulation studied with drilling fluid displaced by cement slurry by means of VOF method. The paper studied the influences of deviation angle, casing eccentricity and density difference between cement slurry and drilling mud on displacement efficiency and stability of displacement interface. The simulation results indicated that wellbores with a high deviation angle have lower displacement efficiency; in an eccentric annulus at highly deviated section, the displacement efficiency first increases then decreases with the increase of density difference between cement slurry and drilling fluid; casing eccentricity is not absolutely a factor reducing displacement efficiency in highly deviated well. A certain casing eccentricity (eccentricity 0.1~0.2 proposed) can eliminate fingering caused by the density difference to some extent in narrow annulus at lower side, and improve displacement efficiency. After numerical simulation study on cement displacement, the displacement mechanism differences between highly deviated wells and vertical wells were identified, which provides reference and basis for optimizing displacement parameters in the design of cementing for highly deviated wells.

Key words: high angle deviated hole; displacement efficiency; displacement interface; deviation angle; eccentricity; density difference

油气井固井时, 水泥浆“替净”钻井液是保证固井质量的先决条件, 但在顶替过程中, 经常存在由于顶替界面“失稳”造成水泥浆与钻井液掺混及钻井液窜槽问题^[1], 影响顶替效率, 甚至导致固井失败。垂直井注水泥顶替时, 水泥浆的密度和表观黏度比钻井液高时, 顶替界面较为稳定。提高套管的居中程度, 或

收稿日期: 2011-12-13; 改回日期: 2012-08-06。

作者简介: 李明忠(1988—), 男, 山东莱芜人, 2010年毕业于中国石油大学(华东)石油工程专业, 在读硕士研究生, 主要从事油气井工程流体力学方面研究。

联系方式: 18764219180, petroleumupc@163.com。

基金项目: 国家自然科学基金项目“水热合成型固井材料体系及其高温固化机理研究”(编号: 51174226)资助。

采用旋转套管等方法,可显著提高顶替效率^[2-5]。在大斜度井内,流体重力场主要作用在井眼的径向方向,导致其注水泥顶替机理与垂直井有所区别。因此,垂直井采用的一些顶替参数设计依据不适用于大斜度井^[6-7]。数值模拟方法是研究注水泥顶替的有效方法,能尽可能模拟真实的环空流动条件和流动特性。目前注水泥顶替数值模拟研究的对象主要是垂直井的注水泥顶替^[8-10],或是在套管居中条件下,以某一周向角处的环空间隙二维模型代替整个环空,无法得到环空内顶替界面整体形态^[11-12]。为此,笔者利用计算流体力学软件 Fluent,建立了大斜度井环空三维模型,对非牛顿流体之间的层流顶替过程进行数值模拟,讨论偏心度、密度差等因素对环空注水泥顶替界面整体形态和顶替效率的影响规律,分析大斜度井和垂直井注水泥顶替机理的区别。

1 三维环空模型构建和数值模拟方法

利用 Gambit 进行流动区域几何形状的构建、边界类型以及网格的生成,建立不同井斜角的环空三维模型,每一井斜角对应的套管偏心度为 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 和 0.6。环空三维模型的外径为 0.215 9 m, 内径为 0.177 8 m, 计算区域的长度为 1.000 0 m, 网格均采用六面体结构化网格。

启动 Fluent 求解器,导入环空三维模型。以三维非定常 N-S 方程作为控制方程^[13]:

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} = \mathbf{f} + \frac{1}{\rho} \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} \quad (1)$$

式中: \mathbf{v} 为速度, m/s; \mathbf{f} 为单位质量流体上的体积力, m/s²; ρ 为流体密度, kg/m³; $\boldsymbol{\sigma}$ 为总应力, Pa; t 为时间, s。

选择水泥浆直接接触并以层流顶替钻井液,借助流体体积法 (VOF) 进行流体界面的追踪与定位^[8-9]。VOF 定义了任意单元体内某种流体的体积分数 a_i ($i=1, 2$; 且 $a_1 + a_2 = 1$), 为满足质量守恒定律, a_i 应满足:

$$\frac{\partial a_i}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla a_i = 0 \quad (2)$$

水泥浆和钻井液的流变特性均可采用下式描述:

$$\eta_{av} = \eta_{pv} + \frac{\tau_d}{\gamma} \quad (3)$$

式中: γ 为剪切速率, s⁻¹; η_{av} 为表观黏度, Pa · s; η_{pv} 为塑性黏度, Pa · s; τ_d 为动切力, Pa。

模拟顶替时所用钻井液和水泥浆的基本性能参

数见表 1。

表 1 模拟顶替时钻井液和水泥浆的基本性能参数

Table 1 The performance parameters of drilling fluid and cement slurry used for numerical simulation

流 体	密度/ (kg · m ⁻³)	塑性黏度/ (Pa · s)	动切力/Pa
钻井液	1 300	0.015	1
水泥浆	1 900	0.070	2

边界条件:入口为速度边界条件,顶替速度为 0.5 m/s,保证水泥浆以层流顶替钻井液;出口为流出边界;壁面速度按无滑移边界条件处理;时间步长为 0.005 s。

模型求解时,采用单精度有限体积方法进行数值方程的离散^[9]。离散时,时间上采用隐格式,对流项用一阶迎风有限元离散格式,利用压力隐式分裂算子 (PISO) 方法进行压力速度场的耦合。

2 井斜角对顶替效率的影响

大斜度井环空内流体的受力与垂直井内的流体是不同的,不论是径向还是轴向均有重力存在,如图 1 所示。重力作用方向不同是造成大斜度井和垂直井注水泥顶替机理不同的主要原因^[7]。为研究注水泥顶替效率随井斜角的变化规律,建立了不同井斜角的偏心环空三维模型,假设套管偏心度为 0.3,模拟结果见图 2。

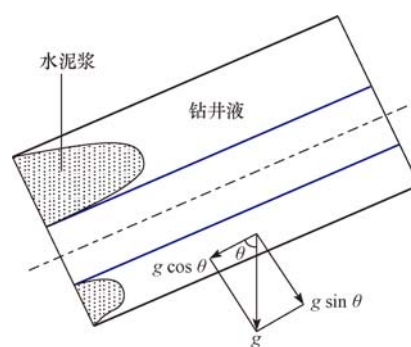


图 1 倾斜井眼内流体的受力分析

Fig. 1 Force analysis of the fluid in deviated wells

从图 2 可看出,随着井斜角增大,顶替效率降低。主要原因是由于井斜角增大,流体的重力逐渐由轴向转向径向,导致沿井眼轴向方向促进顶替钻井液的浮力效应减弱,同时水泥浆和钻井液的分层流动越来越明显,水泥浆越来越倾向于沿环空的低边突进,使顶替界面伸长,注水泥顶替效率降低。

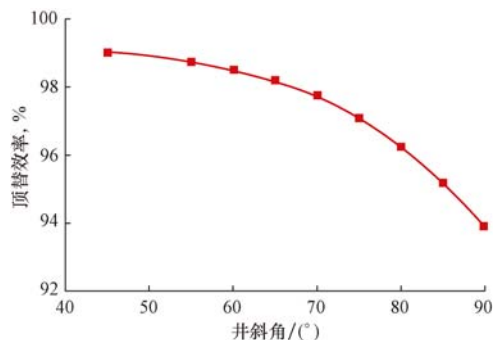


图2 井斜角对顶替效率的影响规律

Fig. 2 Effect of deviation angle on displacement efficiency

因此,在相同注替条件下,大斜度井和水平井的注水泥顶替效率要比垂直井差。

3 密度差对顶替效率的影响

目前,国内许多学者研究了垂直井水泥浆与钻井液密度差对注水泥顶替的影响规律,认为水泥浆密度大于钻井液时,注水泥顶替界面稳定,顶替效率高,这主要是因为正密度差产生的浮力作用是注水泥顶替的主要动力之一^[14]。但是有关大斜度井水泥浆与钻井液密度差对顶替效率影响规律的研究则比较少,基本来自于理论分析和试验研究。文献[7, 15]提出,大斜度井偏心环空内的顶替应采用无密度差注水泥技术。文献[16]认为,套管居中时小密度差或无密度差的顶替效果最好,而套管偏心时,一定的正密度差有利于顶替效率的提高。经分析,文献[12, 15]建立的顶替理论模型只能求解环空某一周向角的两平板间顶替界面的分布,忽略了环空各间隙内流体所受阻力的不同,无法获得环空内顶替界面的整体形态;而试验研究采用的水泥浆与钻井液密度差范围较小,只能定性地评价注水泥顶替效果,难以得到全面客观的结论。

在前人研究基础上,笔者分别建立了井斜角为75°、偏心度为0,井斜角为75°、偏心度为0.3及垂直井、偏心度为0.3等3种情况的环空三维模型,并采用不同的密度差模拟注水泥顶替的过程,结果如图3和图4所示。

由图3和图4可看出:大斜度井套管居中时,随着水泥浆与钻井液密度差的增大,顶替效率会降低;当套管向下偏心时,随着密度差的增大,顶替效率先增大后降低;垂直井套管偏心注水泥顶替时,增大密度差总是有利于顶替效率的提高。

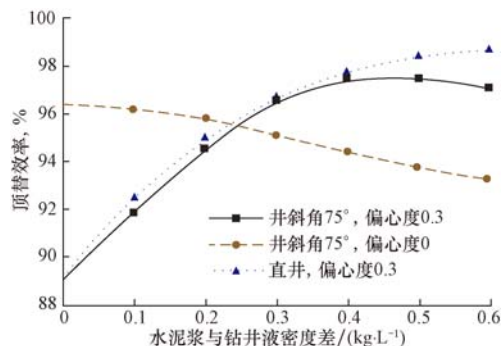


图3 不同井斜角和套管偏心度下密度差对顶替效率的影响

Fig. 3 Effect of density difference on displacement efficiency under the circumstances of different deviation angles and eccentricity

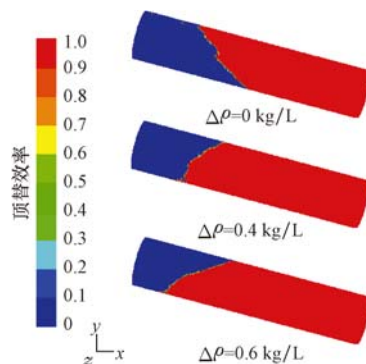


图4 井斜角为75°、偏心度0.3时,密度差对注水泥顶替界面的影响

Fig. 4 Effect of density difference on displacement interface with the deviation angle of 75° and eccentricity of 0.3

上述结果的出现,是因为注水泥顶替界面是由套管偏心造成的环空阻力效应和密度差产生的重力差异综合作用的结果。套管偏心造成在不同间隙处流体受到的阻力不同,使环空内水泥浆顶替钻井液的速度不均匀;同时由于水泥浆与钻井液密度不同,在倾斜的井眼环空内,重力差异导致两种流体存在分层流动的趋势。因此,当水泥浆密度稍大于或等于钻井液密度时,在环空窄间隙处流体受到的阻力较大,于是水泥浆沿环空高侧的宽间隙处突进;密度差较大时,两种流体的分层流动现象明显,水泥浆沿环空窄间隙一侧发生突进,如图4所示。沿低边或高边的突进对提高顶替效率都是不利的,只有设计合适的密度差,才能获得平稳的顶替界面。

4 偏心度对顶替效率的影响

套管的偏心程度可用偏心度衡量,偏心度 e 定

义为:

$$e = \frac{\varepsilon}{R - r} \quad (4)$$

式中: R 和 r 分别为井眼半径和套管外半径, cm; ε 为偏心距, cm。当套管倾向于井眼低侧时, 称之为向下偏心。笔者在此研究的是套管向下偏心的情况。

前人普遍认为, 套管偏心是注水泥时顶替界面失稳、钻井液窜槽的主要原因^[17], 但通过上述分析发现, 顶替界面的形态受套管偏心和两种流体密度差的共同作用。当水泥浆与钻井液之间存在合适的密度差时, 大斜度井偏心环空内的注水泥顶替界面是稳定的, 顶替效率最高。为确定顶替界面稳定的条件, 需要进一步分析偏心度对顶替界面影响的规律。

为研究偏心度对顶替效率的影响, 笔者模拟了: 井斜角分别为 0° 、 60° 、 75° 、 80° 和 90° , 水泥浆和钻井液的密度差为 0.6 kg/L 时, 顶替界面及顶替效率随

偏心度的变化情况, 结果见图 5 和图 6; 水泥浆与钻井液的密度差分别为 0 、 0.2 、 0.4 、 0.6 kg/L , 井斜角为 75° 时, 顶替效率随偏心度的变化情况, 结果见图 7。

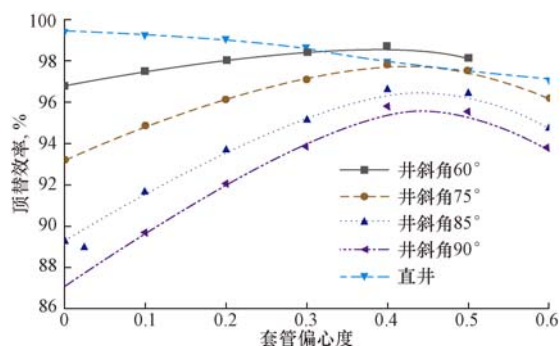


图5 不同井斜角下套管偏心度对顶替效率的影响

Fig. 5 Effect of casing eccentricity on displacement efficiency with different deviation angles

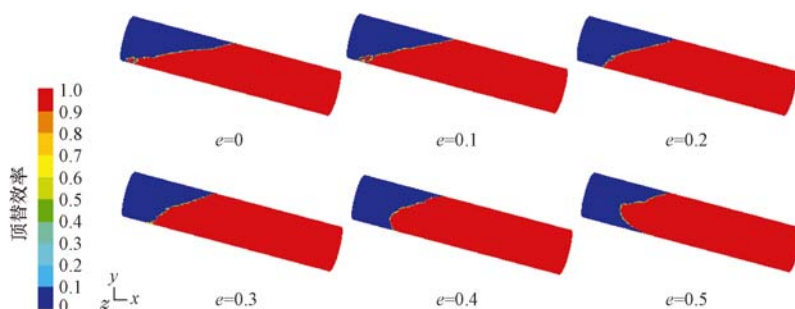


图6 偏心度对大斜度井(井斜角为 75°)顶替界面的影响

Fig. 6 Effect of casing eccentricity on displacement interface in highly deviated wells (deviation angle is 75°)

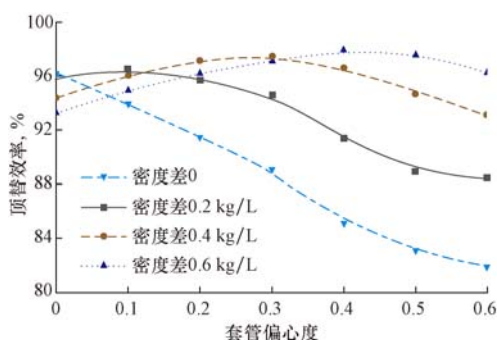


图7 不同密度差下偏心度对顶替效率的影响

Fig. 7 Effect of casing eccentricity on displacement efficiency under different density difference

由图 5—7 可以看出:

1) 在任意井斜角的大斜度井内, 顶替效率随着套管偏心度增大先增大后减小。即套管具有一定程度的偏心时, 顶替界面在环空内保持稳态, 顶替效率最高。在垂直井内, 随偏心度的增大, 顶替界面伸长, 顶替效率降低。大斜度井内的套管居中或是偏

心程度较小时, 环空各间隙处的阻力相差不大, 由密度差造成的流体分层流动起主要作用, 水泥浆在环空低边窄间隙处突进, 顶替界面伸长。随着偏心度增大, 由于环空窄间隙处的阻力增大, 水泥浆在窄间隙突进受到限制, 顶替界面逐渐由伸长状态向稳态转变; 随着偏心度进一步增大, 水泥浆在环空其它位置发生突进, 顶替界面再次失稳(见图 6), 也就是说, 套管偏心能在一定程度上阻止由密度差造成的水泥浆在窄间隙处的突进。在垂直井内, 由于重力只作用在轴向方向, 套管偏心导致不同间隙内流体轴向速度分布不均。因此, 随着偏心度的增大, 垂直井环空内的顶替界面逐渐由稳态向非稳态转变。

2) 在大斜度井内, 钻井液和水泥浆的密度差不同时, 对应顶替效率最大时的套管偏心度也是不同的。在大斜度井内, 水泥浆与钻井液的密度差越大, 水泥浆在环空低边突进越明显, 通过适当增加环空窄间隙处流体流动的阻力可抑制水泥浆突进。因此, 水泥浆和钻井液的密度差越大时, 为获得高的顶

替效率,套管偏心程度应增大。相关标准规定,固井水泥浆的密度一般应比同井使用的钻井液密度高 0.24 kg/L [18]。另外考虑到窄间隙处钻井液能被替走以及水泥环强度要求,建议大斜度井套管向下的偏心度为 $0.1 \sim 0.2$ 。

5 结论与建议

1) 在相同注替条件下,一般大斜度井注水泥顶替效果要比垂直井差。

2) 大斜度井注水泥顶替,当套管居中时,为提高顶替效率,建议采用无密度差注水泥顶替技术;当套管向下偏心时,水泥浆与钻井液要有一定的正密度差。

3) 在大斜度井环空内,套管偏心能在一定程度上阻止由于正密度差造成的水泥浆在环空低侧窄间隙处的突进,有助于顶替效率的提高;在垂直井内,套管偏心会加剧界面失稳。

4) 为获得较好的注水泥顶替效果且满足水泥环强度要求,建议大斜度井在注水泥顶替时,套管具有 $0.1 \sim 0.2$ 的向下偏心度。

参 考 文 献

References

- [1] Frigaard I A, Allouche M, Gabard-Cuoq C. Setting rheological targets for chemical solutions in mud removal and cement slurry design[R]. SPE 64998, 2001.
- [2] 杨建波, 邓建民, 黎泽寒, 等. 低速注水泥过程中密度差对顶替效率的影响[J]. 石油钻探技术, 2007, 35(5): 79-82.
Yang Jianbo, Deng Jianmin, Li Zehan, et al. Effect of density difference on displacement efficiency during low-rate cementing [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2007, 35(5): 79-82.
- [3] Lockyear C F, Hibbert A P. Integrated primary cementing study defines key factors for field success[J]. JPT, 1989, 41(12): 1320-1325.
- [4] Lockyear C F, Ryan D F, Gunningham M M. Cement channeling: how to predict and prevent[J]. SPE Drilling Engineering, 1990, 5(3): 201-208.
- [5] Couturier M, Guillot D, Hendriks H, et al. Design rules and associated spacer properties for optimal mud removal in eccentric annuli[R]. SPE 21594, 1990.
- [6] Keller S R, Crook R J, Haut R C. Deviated-wellbore cementing: part 1: problems [J]. JPT, 1987, 39(8): 955-960.
- [7] 郑永刚. 定向井层流注水泥顶替的机理[J]. 石油学报, 1995, 16(4): 133-139.
Zheng Yonggang. Displacement mechanism of laminar flow cementing in deviated wells[J]. Acta Petrolei Sinica, 1995, 16(4): 133-139.
- [8] 杨建波, 邓建民, 冯予淇, 等. 低速注水泥时密度差对顶替效率影响规律的数值模拟研究[J]. 石油钻探技术, 2008, 36(5): 62-65.
Yang Jianbo, Deng Jianmin, Feng Yuqi, et al. Numerical simulation of effect of density difference on displacement efficiency at low cement slurry velocity[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2008, 36(5): 62-65.
- [9] 高永海, 孙宝江, 刘东清, 等. 环空水泥浆顶替界面稳定性数值模拟研究[J]. 石油学报, 2005, 26(5): 119-122.
Gao Yonghai, Sun Baojiang, Liu Dongqing, et al. Numerical simulation on stability of cement displacement interface in annulus[J]. Acta Petrolei Sinica, 2005, 26(5): 119-122.
- [10] 周仕明, 李根生, 方春飞. 元坝地区 $\phi 146.1 \text{ mm}$ 尾管固井技术难点与对策[J]. 石油钻探技术, 2010, 38(4): 41-44.
Zhou Shiming, Li Gensheng, Fang Chunfei. Difficulties and countermeasures for $\phi 146.1 \text{ mm}$ liner cementing in Yuanba Area[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2010, 38(4): 41-44.
- [11] 王斌斌, 王瑞和, 步玉环. 不同流态下水泥浆环空顶替的数值模拟研究[J]. 钻井液与完井液, 2010, 27(3): 76-78.
Wang Binbin, Wang Ruihe, Bu Yuhuan. Numerical simulation on cementing displacement in different flow patterns [J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2010, 27(3): 76-78.
- [12] Eduardo S S Dutra, Mônica F Naccache, Paulo R Souza Mendes. Analysis of interface between Newtonian and non-Newtonian fluids inside annular eccentric tubes; ASME 2004 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Anaheim, California, November 13-19, 2004[C].
- [13] 李兆敏, 蔡国琰. 非牛顿流体力学[M]. 东营: 石油大学出版社, 2001: 50-52.
Li Zhaomin, Cai Guoyan. Non-Newtonian fluid mechanics [M]. Dongying: Petroleum University Press, 2001: 50-52.
- [14] 刘希圣. 钻井工艺原理: 下册[M]. 东营: 石油大学出版社, 1988: 106-111.
Liu Xisheng. Drilling technology: II [M]. Dongying: Petroleum University Press, 1998: 106-111.
- [15] 郑永刚, 刘孝良, 陈英, 等. 大斜度井及水平井注水泥顶替机理实验研究[J]. 石油钻探技术, 1993, 21(1): 22-25.
Zheng Yonggang, Liu Xiaoliang, Chen Ying, et al. A experimental study of displacement mechanical in highly deviated wells and horizontal wells[J]. Petroleum Drilling Techniques, 1993, 21(1): 22-25.
- [16] 范伟华. 定向井、水平井注水泥顶替规律研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2008.
Fan Weihua. Study on the law of cementing displacement in directional wells and horizontal wells[J]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2008.
- [17] 刘崇建, 黄柏宗, 徐同台, 等. 油气井注水泥理论与应用[M]. 北京: 石油工业出版社, 2001: 292-296.
Liu Chongjian, Huang Bozong, Xu Tongtai, et al. Theories and applications of oil and gas well cementing[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2001: 292-296.
- [18] Q/SH 0014—2007 川东北天然气井固井技术规范[S].
Q/SH 0014—2007 Cementing specification for gas well in the northeast of Sichuan[S].