

doi:10.3969/j.issn.2095-0411.2018.05.010

裂缝性地层坍塌压力分析

曹文科¹, 谭强², 何岩峰¹, 邓嵩¹, 高敏¹, 刘星辰¹, 汪洋¹

(1.常州大学石油工程学院,江苏常州 213016;2.中国石油大学(北京)石油工程学院,北京 102249)

摘要:钻井过程中钻遇裂缝性地层易发生井壁掉块、憋扭矩、卡钻等复杂现象,严重阻碍钻井进程,裂缝性地层井壁坍塌压力的确定尤其必要。根据裂缝性岩石的特点,将其分解为基质和裂缝面两种介质,岩石内部随机分布的裂缝面可视为具有不同倾斜角和倾向角的弱面,将井周基质与裂缝面的应力分布与 Mohr-Coulomb 强度准则进行比较,运用 Jaeger 弱面理论确定裂缝性岩石的坍塌压力。结果表明岩石可能发生基质剪切或者裂缝面剪切滑移两种形式的破坏,坍塌压力主要由岩石中裂缝面的产状决定。对顺北区块一口井钻遇的辉绿岩侵入体地层坍塌压力进行了计算,表明裂缝性地层坍塌压力分析模型对钻井工程具有指导价值。

关键词:坍塌;裂缝;井壁稳定;侵入岩

中图分类号:TE 24

文献标志码:A

文章编号:2095-0411(2018)05-0070-05

Collapse Pressure Study of Fractured Formation

CAO Wenke¹, TAN Qiang², HE Yanfeng¹, DENG Song¹, GAO Min¹, LIU Xingchen¹, WANG Yang¹

(1. School of Petroleum Engineering, Changzhou University, Changzhou 213016, China; 2. College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China)

Abstract: The wellbore instability problems like breaking down, holding torque and drilling pipe sticking are easily to take place when fractured formation is encountered, which will impede drilling process seriously. Therefore, it is particularly necessary to determine the wellbore collapse pressure. Fractured rock could be divided into two parts: matrix and fracture plane, fracture planes are regarded as weak planes with different dip angles and inclination angles. Compare stresses of rock matrix and fracture planes with Mohr-Coulomb failure criterion and collapse pressure could be determined using Jaeger's weak plane theory. The results show that fractured rock could break along matrix shear plane or fracture plane, the collapse pressure is mainly controlled by occurrence of fracture planes. A well drilled in Shunbei block is taken as an example, collapse pressure of diabase intrusion is analyzed, it shows that the model of fractured formation collapse pressure has

收稿日期:2018-06-06。

基金项目:973 计划项目(2015CB251202);国家自然科学基金项目(11502304);国家科技重大专项(2016ZX05009-004);常州大学启动基金项目(ZMF18020063)。

作者简介:曹文科(1984—),男,山东郓城人,博士,讲师。E-mail: caowenke@cczu.edu.cn

引用本文:曹文科,谭强,何岩峰,等.裂缝性地层坍塌压力分析[J].常州大学学报(自然科学版),2018,30(5):70-74, 80.

guiding value for drilling engineering.

Key words: break down; fracture; wellbore stability; intrusions

裂缝性地层坍塌是钻井过程中一种较为典型的失稳现象,若钻井液密度和性能使用不当,易造成严重的钻井时效和成本损失。众多国内外学者对裂缝性地层的井壁失稳问题进行了研究,Ehtesham Karatela^[1-2]建立离散元数值模型对裂缝性泥页岩地层井壁稳定性进行了研究,Zhang Jincai^[3]等将裂缝性地层视为双重孔隙介质,分别运用有限元和解析方法获得了井周应力分布,国内学者朱荣东^[4]探讨运用地层裂缝尖端的应力强度因子变化来判断井壁失稳情况,曹园^[5]运用直剪实验测定了裂缝面的黏聚力与内摩擦角,分析了力化耦合条件下裂缝性地层的坍塌压力。上述研究分别从数值模拟和实验的角度提出了裂缝性地层的井壁稳定分析方法,但该种分析方法涉及参数较多,计算过程较为复杂,影响到井壁失稳分析工程应用的及时性与便利性。本文拟根据裂缝性地层的特点,将岩石中随机分布的裂缝视为具有不同倾斜角和倾向角的弱面,通过理论分析、模型建立确定裂缝性地层坍塌压力的计算方法,最后运用现场实例验证分析方法的合理性。

1 裂缝性地层井周应力分析

层理性页岩的井壁失稳分析已较为成熟^[6-7],通常做法是将页岩视为横观各向同性介质,其结构包括基质和层理弱面(图1),页岩的强度取决于基质、弱面的强度和弱面的产状。裂缝性地层岩石与页岩在结构上有相似之处,裂缝面同样可视为弱面,只是地层岩石内的裂缝面分布并不规则,方向具有随机性(图2),因此可沿用 Jaeger^[8]弱面理论对裂缝性地层的失稳问题进行分析。

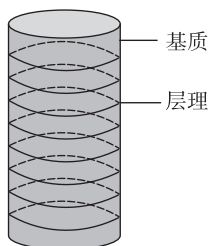


图1 层理性页岩

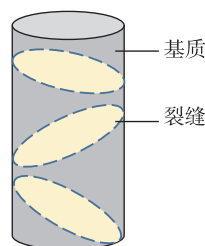


图2 裂缝性地层岩石

1.1 基质应力分析

井周应力状态是井壁稳定分析的基础,在已知远场地应力 $(\sigma_v, \sigma_H, \sigma_h)$ 情况下,可通过建立不同坐标系和运用坐标变换的方法获取井眼直角坐标系下的井周应力^[6,9] $(\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}, \sigma_{xy}, \sigma_{xz}, \sigma_{yz})$,所需的坐标系包括大地坐标系 $(X_g-Y_g-Z_g)$ 、地应力坐标系 $(X_s-Y_s-Z_s)$ 和井眼直角坐标系 $(X_b-Y_b-Z_b)$,各坐标系间的关系如图3, α_s 为水平最大主应力 σ_H 与正北方向夹角, α_b, β_b 分别为井眼方位角和井斜角。

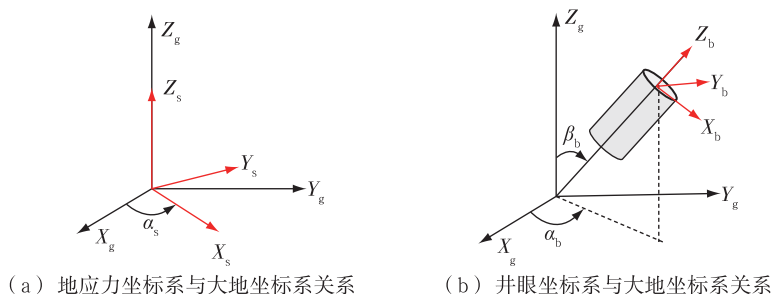


图3 各坐标系间关系

当井眼钻开之后,原有的地应力被干扰,井周发生应力集中,井眼柱坐标系下的井周应力可表示为^[10-11]

$$\left\{ \begin{aligned} \sigma_r &= \frac{R^2}{r^2}P + \frac{(\sigma_{xx} + \sigma_{yy})}{2}(1 - \frac{R^2}{r^2}) + \frac{(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})}{2}(1 + \frac{3R^4}{r^4} - \frac{4R^2}{r^2})\cos 2\theta + \\ &\sigma_{xy}(1 + \frac{3R^4}{r^4} - \frac{4R^2}{r^2})\sin 2\theta + \delta[\frac{\alpha(1-2\nu)}{2(1-\nu)}(1 - \frac{R^2}{r^2}) - \varphi](P - P_p) \\ \sigma_\theta &= -\frac{R^2}{r^2}P + \frac{(\sigma_{xx} + \sigma_{yy})}{2}(1 + \frac{R^2}{r^2}) - \frac{(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})}{2}(1 + \frac{3R^4}{r^4})\cos 2\theta - \\ &\sigma_{xy}(1 + \frac{3R^4}{r^4} - \frac{4R^2}{r^2})\sin 2\theta + \delta[\frac{\alpha(1-2\nu)}{2(1-\nu)}(1 - \frac{R^2}{r^2}) - \varphi](P - P_p) \\ \sigma_z &= \sigma_{zz} - \nu[2(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})(\frac{R}{r})^2\cos 2\theta + 4\sigma_{xy}(\frac{R}{r})^2\sin 2\theta] + \\ &\delta[\frac{\alpha(1-2\nu)}{1-\nu} - \varphi](P - P_p) \\ \sigma_{r\theta} &= \sigma_{xy}(1 - \frac{3R^4}{r^4} + \frac{2R^2}{r^2})\cos 2\theta \\ \sigma_{\theta z} &= \sigma_{yz}(1 + \frac{R^2}{r^2})\cos \theta - \sigma_{xz}(1 + \frac{R^2}{r^2})\sin \theta \\ \sigma_{zr} &= \sigma_{xz}(1 - \frac{R^2}{r^2})\cos \theta + \sigma_{yz}(1 - \frac{R^2}{r^2})\sin \theta \end{aligned} \right. \quad (1)$$

式中: r 为井眼半径, R 为井周距井眼中心距离, P 为泥浆液柱压力, P_p 为地层孔隙压力, θ 为井周角, ν 为地层泊松比, α 为有效应力系数, δ 为渗透相关系数。

1.2 裂缝面应力分析

对于裂缝性岩石的基质部分,可将井眼柱坐标下的井周应力代入破坏准则对井壁坍塌情况进行初步的判断,但对于岩石是否沿裂缝发生剪切滑移的判断还需要将井周应力做进一步的变换,以获取裂缝面对应的法向应力 σ_{zf} 和剪切应力 τ_{zf} (图 4)。为此,建立以裂缝面为基础的直角坐标系 (X_f - Y_f - Z_f) (图 5),设裂缝面的倾向角和倾斜角分别为 α_f , β_f ,则可首先将发生应力集中后的井眼柱坐标应力下的井周应力转换到井眼直角坐标系下,再通过一系列变换,最终转化为裂缝坐标系下的应力^[6],即可得到裂缝面法向应力 σ_{zf} 和面上的剪切应力 τ_{zxf} , τ_{zyf} , 裂缝面总剪应力为 $\tau_{zf} = \sqrt{\tau_{zxf}^2 + \tau_{zyf}^2}$ 。

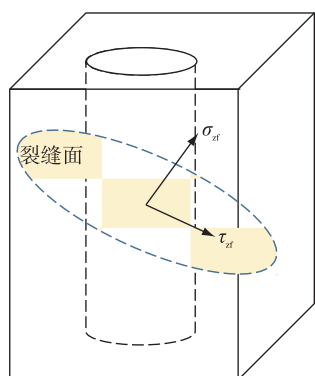


图 4 井眼钻开后的含裂缝地层

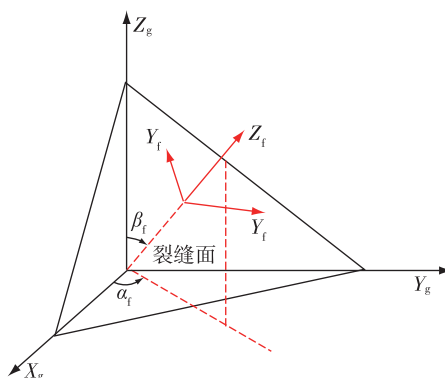


图 5 裂缝坐标系与大地坐标系

2 裂缝性岩石强度准则

含裂缝岩石的坍塌破坏准则采用经典的 Mohr-Coulomb 强度准则(式 2),岩石基质与裂缝面分别对应不同的强度参数,裂缝面对应的黏聚力、内摩擦角(C_f, φ_f)通常低于基质对应的相关参数(C_0, φ_0) (图 6),随着裂缝面产状(倾斜角与倾向角)的变化,岩石可能发生基质或者裂缝面的破坏(图 7),具体发生何种形式的破坏则取决于何者的应力分布优先满足强度准则。

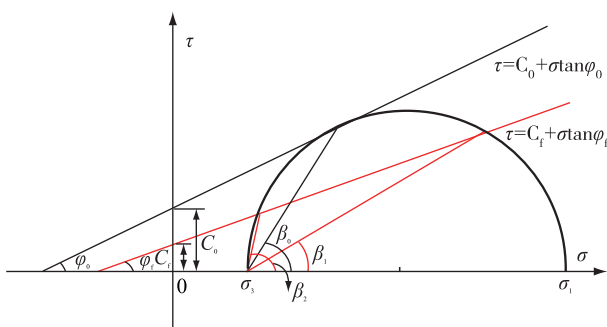


图 6 Mohr-Coulomb 强度准则示意图

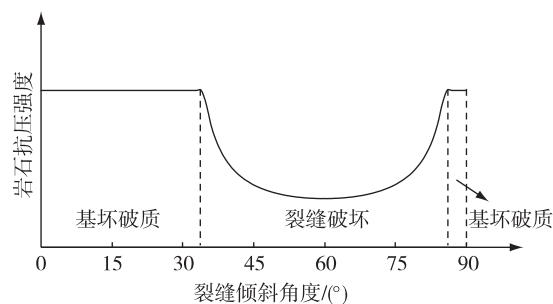


图 7 岩石强度随裂缝倾斜角变化规律

$$\begin{cases} \tau = C_0 + \sigma \tan \varphi_0 & (0^\circ \leq \beta \leq \beta_1 \text{ 或 } \beta_2 \leq \beta \leq 90^\circ) \\ \tau = C_f + \sigma \tan \varphi_f & (\beta_1 \leq \beta \leq \beta_2) \end{cases} \quad (2)$$

式中： β_0 为岩石基质的剪切破坏面倾斜角度； β_1 与 β_2 为沿裂缝面发生剪切破坏时的裂缝临界倾斜角度。坍塌压力的计算是首先给予钻井液密度较小的初始值，然后运用试算方法判断井周应力和裂缝面应力是否满足强度破坏准则，若满足条件，则增大钻井液密度进行循环试运算，直至满足岩石基质和裂缝面均不发生破坏，此时对应的钻井液密度即为裂缝性地层的坍塌压力(图 8)，该方法可避免直接求取破坏面倾斜角的繁琐过程，且易于实现编程运算。

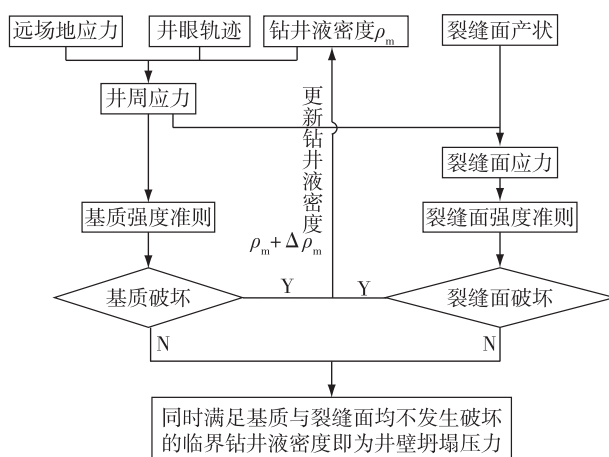


图 8 裂缝性地层坍塌压力求解流程图

3 实例分析

顺北区块 S1 井钻遇奥陶系桑塔木组辉绿岩地层，钻井过程中发生井壁坍塌，井底返出大量岩屑，井底取芯表明该地层裂缝较为发育，且裂缝走向、倾向杂乱(图 9)。考虑到辉绿岩水化膨胀性较弱与滚动回收率较高的特点^[12-17]，判断辉绿岩基质理化性较弱、稳定性较好，因此对于辉绿岩地层稳定性的分析可忽略其化学失稳特性，只考虑其力学稳定性。

S1 井为直井，取辉绿岩侵入体深度为 6 910 m，辉绿岩基质黏聚力为 30 MPa，内摩擦角为 35° ，裂缝面黏聚力为 7.5 MPa，内摩擦角为 30° 。固定井眼的井斜角和方位角，改变裂缝面的倾向角与倾斜角，可得到不同裂缝产状下的井壁坍塌压力分布(图 10)，结果表明裂缝性辉绿岩地层坍塌压力当量密度约为 $1.42 \sim 1.76 \text{ g/cm}^3$ ，其中辉绿岩基质坍塌压力当量密度对应 1.42 g/cm^3 ，考虑到裂缝产状分布的随机性，可取最高值作为该深度地层的坍塌压力，即 1.76 g/cm^3 。在 S1 井实际钻井过程中，当钻井液密度

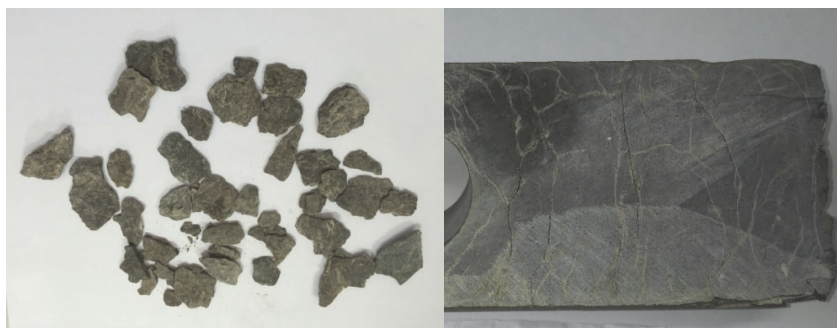


图9 辉绿岩井底岩屑与岩芯

为 1.65 g/cm^3 时钻柱扭矩波动较大,出现憋停顶驱现象,井眼扩大率超过 40% ,后将钻井液密度提高至 1.85 g/cm^3 ,则顺利钻穿该层,井眼较为规则。

4 结 论

1) 运用坐标变换方法分析了井周应力与裂缝面应力分布,建立了基于 Jaeger 弱面理论的裂缝性地层坍塌压力求解模型,表明岩石裂缝产状对井壁坍塌压力具有重要影响。

2) 以顺北区块一口井为例对裂缝性辉绿岩地层的坍塌压力进行了计算,表明钻井液密度应不低于不同角度裂缝对应的地层坍塌压力的上限值,计算结果与工程实践相吻合。

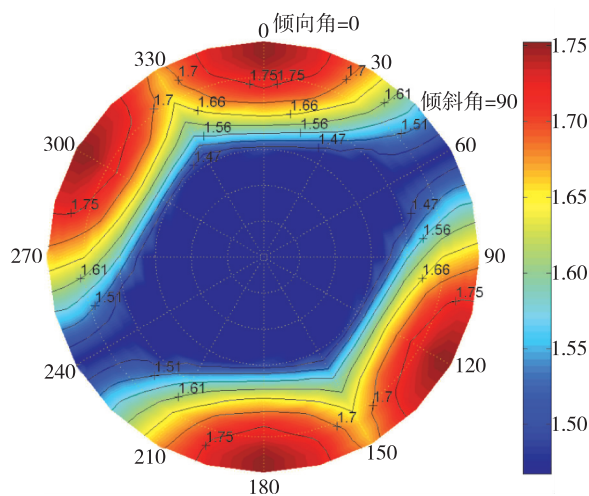


图10 辉绿岩地层坍塌压力随裂缝产状分布规律

参考文献:

- [1] KARATELA E, TAHERI A. Three-dimensional hydro-mechanical model of borehole in fractured rock mass using discrete element method[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2018, 53: 263-275.
- [2] KARATELA E, TAHERI A, XU C, et al. Study on effect of in-situ stress ratio and discontinuities orientation on borehole stability in heavily fractured rocks using discrete element method[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2016, 139: 94-103.
- [3] ZHANG J. Dual-porosity approach to wellbore stability in naturally fractured reservoirs[D]. Norman: University of Oklahoma, 2002.
- [4] 朱荣东, 陈平, 夏宏泉, 等. 裂缝井壁力学稳定性研究[J]. 断块油气田, 2007(5): 56-58.
- [5] 曹园, 邓金根, 蔚宝华, 等. 钻井液密度对裂缝性泥页岩地层坍塌压力影响的力化耦合研究[J]. 科技导报, 2014, 32(25): 40-45.
- [6] 曹文科, 邓金根, 蔚宝华, 等. 页岩层理弱面对井壁坍塌影响分析[J]. 中国海上油气, 2017(2): 114-122.
- [7] 谭强, 邓金根, 张勇, 等. 各向异性地层定向井井壁坍塌压力计算方法[J]. 断块油气田, 2010(5): 608-610.
- [8] JAEGER J C. Shear failure of anisotropic rocks[J]. Geological Magazine, 1960, 97(1): 65-72.

【下转第 80 页】

参考文献:

- [1]成景烨,邢漪冉,何岩峰,等.页岩气储层基质纳米孔隙渗流模型研究进展[J].常州大学学报(自然科学版),2017,29(2):86-92.
- [2]朱春明,王新根,董社霞,等.临兴区块致密气井油管直径优选研究[J].石油机械,2017,45(4):74-78.
- [3]李雪.低渗透油藏储层特征及形成机理分析[J].常州大学学报(自然科学版),2015,27(3):39-44.
- [4]HOLDITCH S A. Tight gas sands[J]. Journal of Petroleum Technology, 2006, 58(6):86-93.
- [5]FREEMAN C M, MORIDIS G, ILK D, et al. A numerical study of performance for tight gas and shale gas reservoir systems[J]. Journal of Petroleum Science & Engineering, 2013, 108(3):22-39.
- [6]李士伦,孙雷,杜建芬,等.低渗致密气藏、凝析气藏开发难点与对策[J].新疆石油地质,2004,25(2):156-159.
- [7]李宁,周克明,张清秀,等.束缚水饱和度实验研究[J].天然气工业,2002,22(s1):110-113.
- [8]桂婷婷,魏东,王继平,等.气藏束缚水饱和度实验测试与机理[J].大庆石油地质与开发,2017,36(1):81-84.
- [9]KHAN A H. Shear induced relative permeability changes in uncemented sands[D]. Austin: University of Texas at Austin, 2009.
- [10]SAMUEL O. Coupling of stress dependent relative permeability and reservoir simulation[D]. Edmonton: University of Alberta, 2012.
- [11]DONG C, PAN Z, LIU J, et al. An improved relative permeability model for coal reservoirs[J]. International Journal of Coal Geology, 2013,18(2):45-57.
- [12]COREY A T. The interrelation between gas and oil relative permeability[J]. Producers Monthly, 1954, 19(2):38-41.
- [13]朱华银,徐轩,安来志,等.致密气藏孔隙水赋存状态与流动性实验[J].石油学报,2016,37(2):230-236.
- [14]胡勇,朱华银,杨敏,等.致密砂岩气藏储层岩石孔隙水可动性评价[J].能源科学发展:中英文版,2013(2):16-21.
- [15]李奇,高树生,杨朝蓬,等.致密砂岩气藏阈值梯度对采收率的影响[J].天然气地球科学,2014,25(9):1444-1450.
- [16]宋春涛.考虑应力敏感和启动压力梯度的低渗透油藏数值模拟研究[J].科学技术与工程,2012,12(25):6319-6326.
- [17]王坤,张烈辉.考虑应力敏感超低渗油藏油水相对渗透率的计算[J].石油天然气学报,2011,33(11):117-119.

(责任编辑:殷丽莉)

【上接第 74 页】

- [9]LEE H, ONG S H, AZEEMUDDIN M, et al. A wellbore stability model for formations with anisotropic rock strengths[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2012, 96/97: 109-119.
- [10]邓金根,程远方,陈勉,等.井壁稳定预测技术[M].北京:石油工业出版社,2008:76-85.
- [11]陈勉,金衍,张广清.石油工程岩石力学[M].北京:科学出版社,2008.
- [12]刘厚彬,勐睿,孟英峰,等.辉绿岩地层井壁垮塌机理及主控因素实验研究[J].科学技术与工程,2017,17(8):121-127.
- [13]胡广强,白彬珍,柯珂.顺北区块辉绿岩井段井壁稳定性分析[J].中国海上油气,2017,29(5):119-125.
- [14]刘彪,潘丽娟,易浩,等.顺北含辉绿岩超深井井身结构优化设计[J].石油钻采工艺,2016(3):296-301.
- [15]赵志国,白彬珍,何世明,等.顺北油田超深井优快钻井技术[J].石油钻探技术,2017(6):8-13.
- [16]商森,王颖慧.顺北区块辉绿岩安全钻井技术[J].云南化工,2018(3):164.
- [17]辛泽宇.顺托1井钻遇含辉绿岩层位施工因素优选[J].内蒙古石油化工,2016(10):77-81.
- [18]赵波,王贵新,刘万纯.塔里木盆地顺北区块优快钻井模式研究[J].中国石油和化工标准与质量,2017(4):63-64.

(责任编辑:殷丽莉)