

# 钻井液中无机盐对机械钻速的影响规律研究

高 飞, 赵雄虎, 周 超

(石油工程教育部重点实验室(中国石油大学(北京)),北京 102249)

**摘要:**改善钻井液性能来提高机械钻速,是目前降低钻井成本常用的技术手段之一。通过模拟恒压钻进试验,考察了钻井液中无机盐组分与砂岩岩石的相互作用及对机械钻速的影响,结合岩屑-溶液混合物的 $\zeta$ 电位,初步分析了其作用机理。结果发现,AlCl<sub>3</sub>和Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>具有较好的提速效果,AlCl<sub>3</sub>的浓度为0.01 mol/L时机械钻速能提高33.7%;通过 $\zeta$ 电位分析得出,Al<sup>3+</sup>能够使含岩屑溶液的 $\zeta$ 电位由负值变为0,再转为正值, $\zeta$ 电位大于-10 mV时提高机械钻速的效果明显。分析其主要原因是, $\zeta$ 电位接近于0时岩石表面具有较高的表面自由能,有利于岩石破碎,这对提高机械钻速、降低钻井成本具有一定的意义。

**关键词:**钻井液 盐 机械钻速  $\zeta$ 电势 岩石破碎

**中图分类号:**TE254<sup>+</sup>.4    **文献标识码:**A    **文章编号:**1001-0890(2011)04-0048-05

## Effect of Drilling Fluid Inorganic Salt on Rate of Penetration

Gao Fei, Zhao Xionghu, Zhou Chao

(MOE Key Laboratory of Petroleum Engineering (China University of Petroleum (Beijing)), Beijing, 102249, China)

**Abstract:** Optimizing the performance of drilling fluids to increase the rate of penetration (ROP) is one of the most effective ways to reduce drilling cost. Through constant pressure drilling experiments, this paper investigates the interactions between inorganic salts in drilling fluids and sandstones, and their influences on ROP. The preliminary mechanism was analyzed combined with  $\zeta$  potential of cutting-solution mixture. The results show that AlCl<sub>3</sub> and Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> can effectively increase the ROP. The ROP was increased by 33.7% with AlCl<sub>3</sub> concentration of 0.01 mol/L. The analysis of  $\zeta$  potential shows that Al<sup>3+</sup> can change the negative  $\zeta$  electrical potential in cuttings to zero and then to positive. With the  $\zeta$  electrical potential larger than -10 mV, the ROP is increased dramatically. With  $\zeta$  electrical potential close to zero, the rock surface possesses a relatively high surface free energy which helps rock breaking. Accordingly, it increases the ROP and lowers the drilling cost.

**Key words:** drilling fluid; salt; penetration rate; zeta electrical potential; rock breaking

## 1 概 述

一般认为,钻井液性能如密度、黏度、瞬时滤失量、固相含量(特别是亚微米颗粒含量)等对钻速影响较大<sup>[1]</sup>。屈沅治等<sup>[2]</sup>研究了国内外快速钻进钻井液技术,认为在钻井液中添加 ROP 增速剂也可有效提高机械钻速,其机理主要是改变金属表面的润滑性,降低扭矩,防止钻头泥包。文献<sup>[3-4]</sup>表明,水溶液会对岩石表面性质产生一定影响,岩石表面性质的变化与机械钻速存在密切关系,但迄今为止仅有少数学者对其进行了研究。20世纪80年代,At-

kinson 等<sup>[5]</sup>通过试验研究了去离子水、HCl、NaOH 对石英的裂隙扩展速率、应力强度因子和应力强度系数的影响,发现化学成分对裂隙的扩展具有控制

收稿日期:2010-07-01;改回日期:2011-03-28。

作者简介:高飞(1982—),男,山东德州人,2003年毕业于烟台大学生物工程专业,2005年获西安石油大学应用化学专业硕士学位,油气井工程专业在读博士研究生,主要从事油气田化学方面的研究工作。

联系方式:(010)89733428,ggoofee@126.com。

网络出版时间:2011-06-12T17:43:00。

网络出版地址:<http://www.cnki.net/kcms/detail/11.1763.TE.20110612.1743.001.html>

作用; Feucht 等<sup>[6]</sup>对 NaCl、CaCl<sub>2</sub>、Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 溶液作用下含预制裂纹的砂岩试件进行了三轴压缩试验, 研究了不同溶液对裂纹面摩擦系数和摩擦强度的影响; Watson 和 Engelmann 等<sup>[7-11]</sup>在美国矿物局资助下研究了化学方法强化钻井, 进行了化学添加剂钻井的室内和现场试验, 发现钻井性能与溶液-岩石界面的  $\zeta$  电位之间存在密切关系, 当  $\zeta$  电位等于 0 时, 机械钻速最快, 钻头寿命最长; Ishido 等<sup>[12]</sup>研究了岩石表面裂纹增长、钻进效率与  $\zeta$  电位之间的关系, 并指出当  $\zeta$  电位等于 0 时, 岩石材料脆性增强, 抗压强度最低, 亚临界裂纹扩展速度将提高 1 个数量级以上。

在国内, 对化学环境与岩石相互作用研究仅围绕岩石应力和破裂韧度展开<sup>[13]</sup>, 使用的化学溶液也多是从 pH 值角度进行选择, 不适用于钻井液体系的研究。而针对钻井液-岩石的相互作用对岩石性质及机械钻速影响的系统研究还未见报道。为此, 笔者使用岩心钻取机模拟恒压钻进过程, 考察不同无机盐及浓度对机械钻速的影响, 比较了钻井液-岩屑混合物的  $\zeta$  电位与机械钻速的关系, 初步分析了其作用机理。

## 2 试验材料及方法

### 2.1 仪器和材料

试验仪器: 经改装的 TZ-2 型岩心钻取机(江苏海安县石油科技仪器厂生产), Model 501 激光  $\zeta$  电位测量仪(美国 Penkem 公司生产), 增压泵(台州温岭大溪明通水泵厂生产)。

试验材料: NaCl(分析纯, 北京双环化学试剂厂生产), KCl(分析纯, 北京化学试剂厂生产), MgCl<sub>2</sub>(分析纯, 北京双环化学试剂厂生产), 结晶氯化钙(分析纯, 北京双环化学试剂厂生产), 结晶氯化铝(分析纯, 北京双环化学试剂厂生产), Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>(分析纯, 北京双环化学试剂厂生产), 砂岩岩心(灰白色, 厚 5 cm、半径为 12 cm 的圆形岩心)。

### 2.2 试验方法

试验模拟现场实钻, 岩心固定在试验台上, 使用取心钻头在恒定压力下对岩样进行连续旋转磨削, 同时使用增压泵将钻井液恒速泵入钻头与岩心的接触面, 保证钻井液与岩心充分接触。TZ-2 型岩心钻取机是该试验的最主要设备, 将其传递机械压

力的手动升降手柄改装成圆形转盘, 悬挂质量一定的重物模拟恒定钻压。图 1 为钻进试验装置示意图。

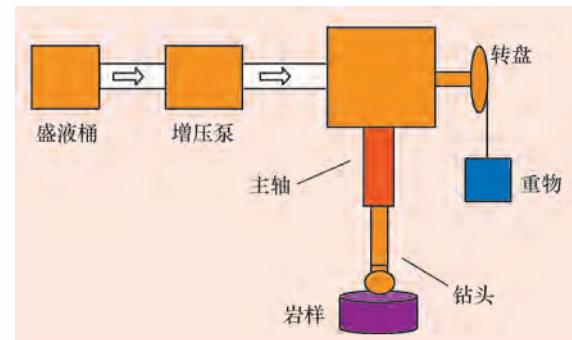


图 1 钻进试验装置示意

Fig. 1 Schematics of drilling devices

每次钻进前使用蒸馏水做空白试验, 然后按溶液中添加剂浓度从低到高依次做钻进试验。试验选择重物质量 3.08 kg, 此时平均钻速在 4 mm/min 左右, 钻井液泵入速度 10 mL/s, 在恒定钻压、流速和转速的条件下, 对大块、均质的砂岩岩样进行钻进试验, 30 s 记录一次进钻距离, 连续记录 180 s。同组钻进试验使用同一块岩心, 以保证同组试验的可比性; 不同组试验之间以蒸馏水做空白钻进试验。试验过程中多次随机地进行重复性钻进, 取平均值, 以减小误差, 保证试验结果的可信性。为直观表现不同组分及其浓度对机械钻速的影响, 以钻速提高率来表示钻速提高程度, 试验测得的钻速提高率  $\eta$  均为室内试验结果。钻速提高率的计算公式为:

$$\eta = \left( \frac{V_i^j - V_0}{V_0} \right) \times 100\% \quad (1)$$

式中:  $\eta$  为钻速提高率, %;  $V_i^j$  为  $i$  组分溶液在  $j$  浓度时的机械钻速, mm/min;  $V_0$  为蒸馏水做钻井液时的机械钻速, mm/min。

钻进试验结束后, 收集含钻屑的固/液混合物, 静置 15 min 后使用 Model 501 激光电位测量仪测定其  $\zeta$  电位, 该测得值可作为钻进时岩石/钻井液组分溶液界面  $\zeta$  电位的参考。

## 3 试验结果与讨论

### 3.1 钻井液组分及浓度与钻进距离的关系

试验选择了 NaCl、KCl、MgCl<sub>2</sub>、CaCl<sub>2</sub>、AlCl<sub>3</sub> 和 Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> 等 6 种无机盐作为钻井液组分。图 2 为在钻井液体系中分别加入不同浓度的上述 6 种无机盐时, 其钻进距离与钻进时间的关系曲线。

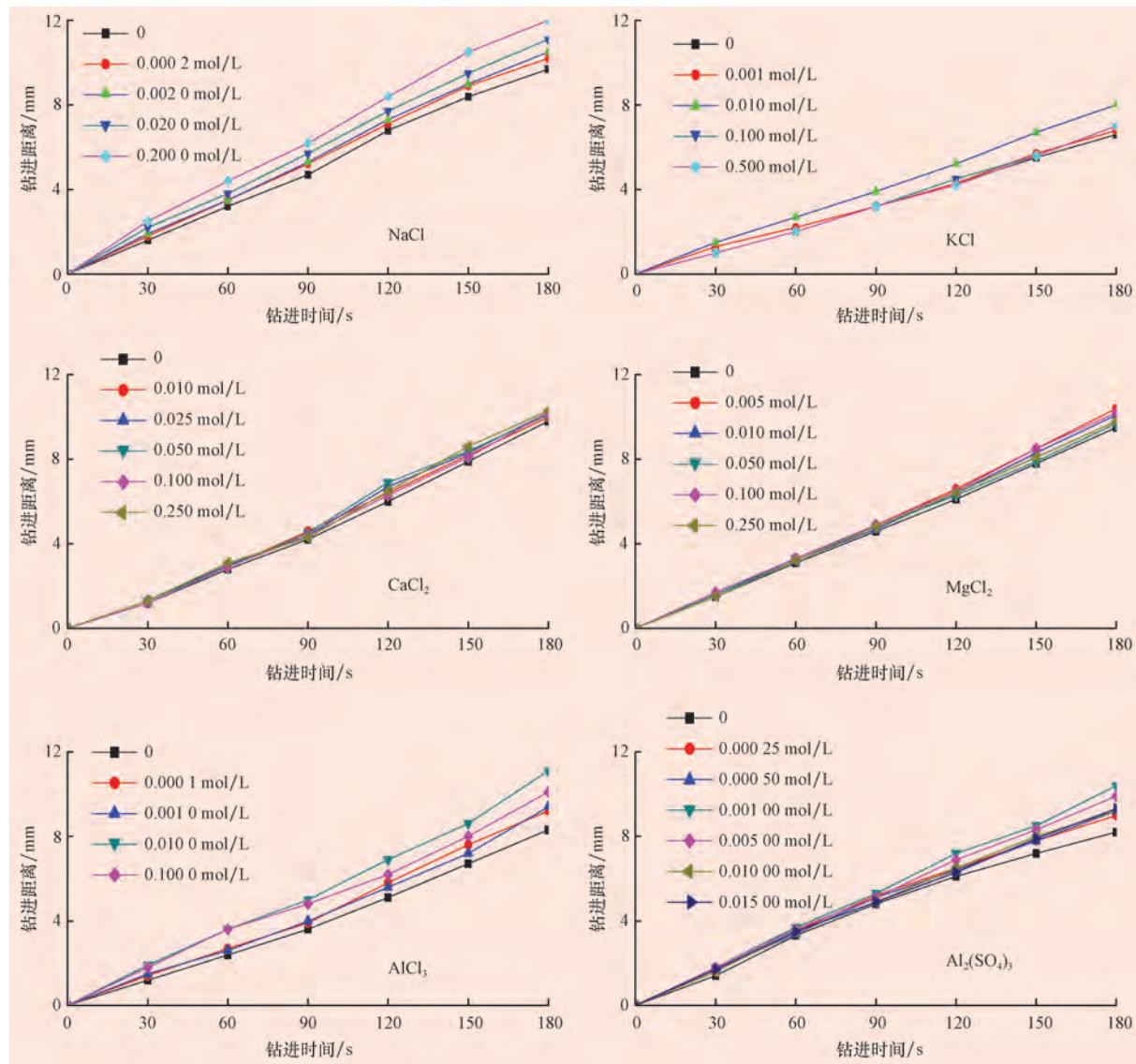


图 2 钻进距离与钻进时间的关系

Fig. 2 The relationship between time and drilling depth

从图 2 可以看出,整个钻进过程中钻进距离与时间近似呈线性关系,机械钻速基本恒定,压持效应对钻进速度的影响很小。6 种无机盐中除 CaCl<sub>2</sub> 和 MgCl<sub>2</sub> 提速效果较差外,其他 4 种都有一定的提速效果,其中 NaCl 在 0.2 mol/L、KCl 在 0.01 mol/L、AlCl<sub>3</sub> 在 0.01 mol/L、Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> 在 0.001 mol/L 时,钻速提高幅度都较大。这说明无机盐溶液与岩石接触后,由于离子吸附等作用使部分表面岩石物化性质发生改变,在钻进试验中表现为钻速提高。但由于离子半径及化合价不同,提速效果亦不同。

### 3.2 添加剂类型及浓度对岩屑-溶液混合物 $\zeta$ 电位的影响

$\zeta$  电位是固液相对移动的切动面与溶液内部的

电位差,根据 Stern 双电层模型可知,  $\zeta$  电位的值取决于吸附层滑动面上的净电荷数量,也就是取决于扩散层中的离子数量,因此  $\zeta$  电位的数值受电解质浓度和化合价的影响。苏长明等<sup>[14]</sup>研究了钻井液中  $\zeta$  电位的变化规律,提出了钻井液电性的转变方法。无机盐具有压缩双电层的作用,交换阳离子价越高,水化膜越薄,  $\zeta$  负电位越小,抑制性越强。阳离子处理剂具有提高钻井液  $\zeta$  正电位的作用,能使黏土-水分散体系的电性发生反转。

由于直接测量岩石-溶液界面的  $\zeta$  电位比较困难,于是选择测量岩屑-溶液混合物的  $\zeta$  电位,以此作为岩石-溶液界面  $\zeta$  电位的参考。由于 Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> 溶液在极低浓度时  $\zeta$  电位急速上升,因此绘制  $\zeta$  电位与浓度 C 的对数关系图,能够更清楚地显示 Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>

溶液 $\zeta$ 电位的变化。图3为添加剂类型及浓度与岩屑-溶液混合物 $\zeta$ 电位的关系曲线。

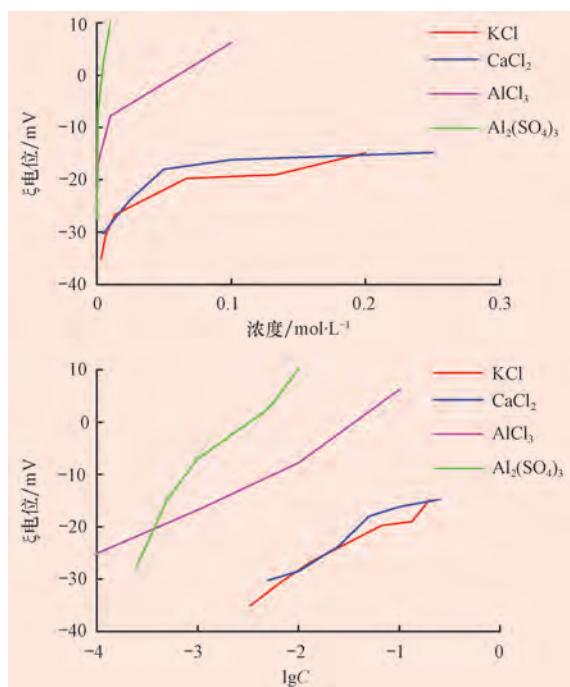


图3  $\zeta$ 电位与浓度的关系曲线

Fig. 3 The relationship between the  $\zeta$  potential and concentration

由图3可知,无机阳离子能够压缩岩石-溶液界面的双电层,提高 $\zeta$ 电位。KCl和CaCl<sub>2</sub>溶液 $\zeta$ 电位为负值,随着其浓度的增大, $\zeta$ 电位绝对值逐渐变小。而AlCl<sub>3</sub>溶液和Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>溶液中存在吸附性能极强的Al<sup>3+</sup>,能够使含岩屑溶液的 $\zeta$ 电位由负值变为零,再转为正值。

### 3.3 机械钻速与 $\zeta$ 电位的关系

图4所示为机械钻速提高率 $\eta$ 和无机盐浓度 $C$ 、-lgC及 $\zeta$ 电位的关系曲线。

从图4可以看出,除CaCl<sub>2</sub>对机械钻速提高率影响较小外,其他3种添加剂对机械提高机械钻速都有一定的效果。图4(b)中,在- $lgC$ 介于2~3之间时,机械钻速提高率都较大,此时AlCl<sub>3</sub>溶液中Al<sup>3+</sup>的浓度约为0.01 mol/L,Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>中Al<sup>3+</sup>的浓度为0.0075~0.0090 mol/L,这说明提高机械钻速起主要作用的离子为Al<sup>3+</sup>,同时阴离子(Cl<sup>-</sup>和SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)会对Al<sup>3+</sup>的吸附过程产生一定影响,影响机械钻速的提高率。

从图4(c)可以看出,当 $\zeta$ 电位小于-20 mV时,机械钻速提高率受影响较小。较大的机械钻速提高率出现在-15~5 mV之间,其中AlCl<sub>3</sub>溶液 $\zeta$ 电位

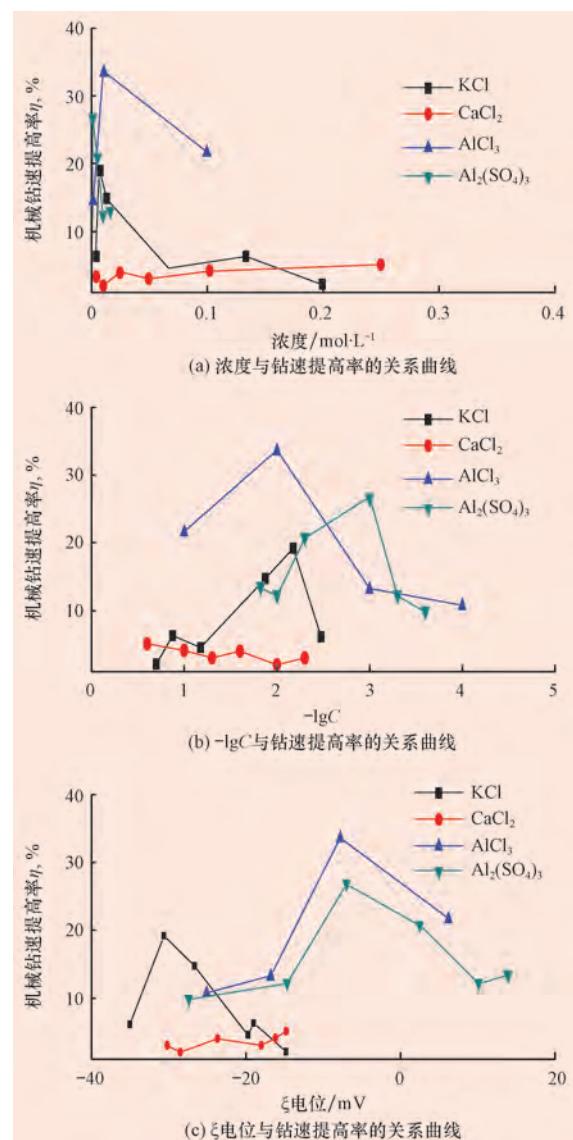


图4 钻速提高率 $\eta$ 与浓度 $C$ 、-lgC和 $\zeta$ 电位的关系曲线

Fig. 4 The relationship curves between the increased ROP and the concentration, -lgC, and  $\zeta$  potential

为-7.8 mV时,机械钻速提高率达到33.7%,Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>溶液 $\zeta$ 电位为-7.0 mV时,机械钻速提高率为26.8%,此后随着 $\zeta$ 电位增大为0并转为正值,机械钻速提高率有所下降,但一直保持较高的水平。综上说明, $\zeta$ 电位在一定程度上影响机械钻速,特别是当其数值大于-10时, $\zeta$ 电位对机械钻速的影响比较明显,机械钻速提高率整体上大于20%,这也从侧面说明岩石表面的物化性质受 $\zeta$ 电位的影响。

## 4 机理分析

$\zeta$ 电位反映了岩石表面的带电状态,表面带电

状态的改变会引起表面张力变化。通常表面带电状态的改变用电极电势的变化来表示, 表面张力  $\sigma$  随电极电势  $\varphi$  的变化而变化的现象称为电毛细现象。其变化规律可用 Lippmann 方程来表示, 即:

$$\frac{\partial\sigma}{\partial\varphi} = -q \quad (2)$$

式中,  $q$  表示表面过剩电荷。

在表面过剩电荷为 0 时, 表面张力达到最大, 此时固体表面自由能最大。而岩石裂缝的生长过程首先需要岩石表面微裂缝生长成为破坏性裂缝, 此过程需要岩石表面自由能达到一个临界值才能发生。由于在岩石表面电荷为 0 时表面自由能最大, 此时只需要做较少的功就能够突破裂缝生长的能量壁垒, 即较高的表面自由能降低了裂缝破裂的能量壁垒, 使表面岩石更容易破碎, 从而有利于钻井。

这种  $\zeta$  电位的变化反映在岩屑-溶液界面  $\zeta$  电位时会有一定的差距, 但从整个试验来看, 岩屑-溶液界面  $\zeta$  电位的变化在岩屑-溶液混合物  $\zeta$  电位上会有所表现, 两者之间有一定规律可循。

## 5 结 论

1) 利用 Lippmann 方程得出, 岩石表面过剩电荷为 0( $\zeta$  电位为 0) 时表面张力最大, 此时岩石破裂所需能量最少, 最有利于钻进。

2) 机械钻速受岩石-溶液界面  $\zeta$  电位影响, 并可由岩屑-溶液的  $\zeta$  电位反映。试验中岩屑-溶液  $\zeta$  电位在  $-15 \sim 5$  mV 之间时, 机械钻速提高率均大于 20%。

3) 模拟钻进试验表明,  $\text{CaCl}_2$  和  $\text{MgCl}_2$  提速效果较差,  $\text{NaCl}$ 、 $\text{KCl}$ 、 $\text{AlCl}_3$  和  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  在合适的浓度下都具有一定的提高机械钻速的作用, 其作用机理还有待进一步研究。

4)  $\text{Al}^{3+}$  具有强吸附特性, 能够使含岩屑溶液的  $\zeta$  电位由负值变为 0, 再转为正值。 $\text{AlCl}_3$  浓度在 0.01 mol/L 时机械钻速提高率为 33.7%, 此时  $\text{AlCl}_3$  溶液的  $\zeta$  电位为  $-7.8$  mV。

## 参 考 文 献

- [1] 鄢捷年. 钻井液工艺学[M]. 东营: 石油大学出版社, 2001; 57-105.  
Yan Jienian. Drilling fluids technology[M]. Dongying: Petroleum University Press, 2001; 57-105.

- [2] 屈沉治, 孙金声, 苏义脑. 快速钻进钻井液技术新进展[J]. 钻井液与完井液, 2006, 23(3): 68-72.  
Qu Yuanzhi, Sun Jinsheng, Su Yinao. Advances of faster penetration drilling fluids[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2006, 23(3): 68-72.
- [3] 徐小荷, 余静. 岩石破碎学[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1984: 45-90.  
Xu Xiaohe, Yu Jing. Rock breaking technology[M]. Beijing: Coal Industry Press, 1984: 45-90.
- [4] 刘希圣. 钻井工艺原理: 破岩原理[M]. 北京: 石油工业出版社, 1988: 32-57.  
Liu Xisheng. The principle of drilling technology: rock breaking theory[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1988: 32-57.
- [5] Atkinson B K, Meredith P G. Stress corrosion cracking of quartz: a note on the influence of chemical environment[J]. Tectonophysics, 1981, 77(1/2): 1-11.
- [6] Feucht L J, Logan J M. Effects of chemically active solutions on shearing behavior of a sandstone[J]. Tectonophysics, 1990, 175(1/2/3): 159-176.
- [7] Watson P J, Engelmann W H. Chemically enhanced drilling: an annotated tabulation of published results[M]. Washington: US Department of the Interior, Bureau of Mines, 1985.
- [8] Engelmann W H, Watson P J, Tuzinski P A, et al. Electrochemical effects on rock drilling[J]. Journal of the Electrochemical Society, 1988, 135(4): 1043-1044.
- [9] Watson P J, Pahlman J E, Tuzinski P A, et al. Enhanced drilling performance with polymer solutions at zero surface charge conditions[M]. Washington: US Department of the Interior, Bureau of Mines, 1986.
- [10] Pahlman J E, Engelmann W H, Tuzinski P A, et al. Zero-surface-charge-controlled drilling for enhanced penetration and extended bit life[M]. Washington: US Department of the Interior, Bureau of Mines, 1989.
- [11] Watson P J, Tuzinski P A. Study of zeta potential for material particles in chemical additive solutions[M]. Washington: US Department of the Interior, Bureau of Mines, 1988.
- [12] Ishido T, Mizutani H. Experimental and theoretical basis of electrokinetic phenomena in rock-water systems and its applications to geophysics[J]. Journal of Geophysical Research, 1981, 86(B3): 1763-1775.
- [13] 冯夏庭, 丁梧秀, 姚华彦, 等. 岩石破裂过程的化学-应力耦合效应[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 2-10.  
Feng Xiating, Ding Wuxiu, Yao Huayan, et al. Coupled chemical-stress effect on rock fracturing process[M]. Beijing: Science Press, 2010: 2-10.
- [14] 苏长明, 付继彤, 郭宝雨. 粘土矿物及钻井液电动电位变化规律研究[J]. 钻井液与完井液, 2002, 19(6): 1-4.  
Su Changming, Fu Jitong, Guo Baoyu. Research on the changing tendency of zeta potential of the clay minerals and drilling fluid[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2002, 19(6): 1-4.