

磁场对 NaCl 溶液电导率影响的实验研究^①

程树康^② 陈 磊^③ 李 楠 柴 凤

(哈尔滨工业大学电气工程系 哈尔滨 150001)

摘 要 实验研究了磁场对 NaCl 溶液电导率的影响。将 NaCl 溶液置于磁场中作用 1h, 测试磁场作用前后 NaCl 溶液电导率的变化。研究了不同磁场幅值作用时 NaCl 溶液电导率的变化规律, 比较了恒定磁场和交变磁场作用下 NaCl 溶液电导率的变化情况, 对比了不同浓度的 NaCl 溶液在同一磁场作用下电导率的变化趋势。对磁场作用下 NaCl 溶液电导率变化的机理进行了探讨。研究结果表明, 磁场促使水分子的磁矩偏转, 使其电子云发生极化, 破坏了离子水化层, 削弱了电解质溶液的电泳效应, 使其电导率升高。

关键词 磁场, NaCl 溶液, 电导率, 磁矩

0 引 言

国内外学者对磁场作用下水和水溶液物理化学性质的变化作了大量的研究。朱永辉等人通过分析水经过磁化器后的物理实验数据, 认为水的密度有所变化, 水的饱和溶解氧比普通水确有提高^[1]。湖南大学的朱元保等人对不同磁化条件下水的电导率、pH 值、密度、挥发性、溶解氧、紫外光谱、红外光谱、核磁共振谱及难溶盐的溶解度进行了一些研究^[2], 发现磁化水的 pH 值、溶解氧和难溶盐的溶解度均增加, 紫外吸收峰和密度降低, 挥发性加快, 电导率的变化与磁场强度和磁化时间有关, 并发现磁化水的电导率有滞后效应。

Chibowski 等人^[3]研究了 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 过饱和溶液在磁场作用下一些物理化学性质的变化, 发现溶液的 ζ 电位经磁处理后也下降。Holysz 等人^[4]证明了磁场不但对 ζ 电位有很显著的影响, 而且降低了溶液的表面张力。Eshaghi 和 Gholizadeh 用电导测定法研究了磁场对钾离子配合物稳定性的影响, 发现磁场作用后的钾离子配合物稳定性下降^[5]。Fujiwara 等人研究了顺磁性离子在磁场中的运动和扩散特性, 他们发现 Cu^{2+} 离子以水分子和 Cu^{2+} 离子组成的大分子团的形式移动^[6]。Lucyna Holysz 等人对恒定磁场作用下电解质溶液的变化进行了实验研究, 结果表明, 磁场作用后的电解质溶液电导率发生

了变化, 这种变化取决于溶液中离子水化层的厚度^[7]。

本文以 NaCl 溶液为例, 实验研究了恒定磁场和交变磁场作用下不同浓度 NaCl 溶液电导率的变化情况, 并对磁场作用下 NaCl 溶液电导率变化的机理进行了探讨, 为深入研究磁场对水和水溶液物理化学性质的影响及其作用机理做铺垫。

1 实验方法

1.1 实验对象

实验分别测试了 0.01、0.1、1mol/L 的 NaCl 溶液在恒定和交变磁场作用下的电导率变化, 磁场幅值的变化范围为 0 ~ 0.4T。

1.2 磁场发生装置

为了获取不同的恒定和交变磁场, 设计了磁场发生装置。该装置由一个 C 型的铁心和两个串联在一起的线圈组成, 如图 1 所示。

为了抑制磁场交变时铁心内的磁滞和涡流损耗, 铁心由 0.5mm 厚的硅钢片叠片形成; 铁心厚度 b 为 64mm, 高度 h 为 32mm。气隙 δ 宽度为 15mm, 如图 2 所示。两个线圈各 500 匝串联绕制于铁心上, 共计 1000 匝。当线圈中通以一定频率和幅值的电流时, 气隙处就会产生一定频率和幅值的磁场。

① 国家自然科学基金(50877011)和科技部中俄国际合作项目(2008DFR60340)资助。

② 男, 1946 年生, 博士, 教授; 研究方向: 生态环境电磁学, 微特电机及其驱动控制, 电动车电驱动系统等; E-mail: cskee@hit.edu.cn

③ 通讯作者, E-mail: hitchenlei@hit.edu.cn

(收稿日期: 2009-10-15)

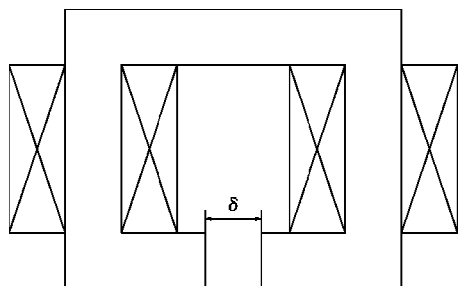


图 1 磁场发生装置示意图

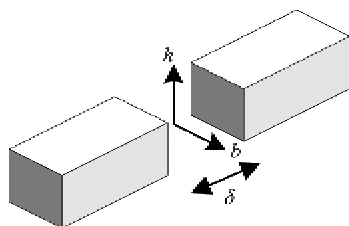


图 2 气隙及铁心尺寸示意图

实验时被测溶液将放置在气隙处被磁场作用,因此研究气隙处的磁场分布情况对实验至关重要。利用有限元方法对磁场发生装置的磁场进行了分析。当线圈通以直流 1.5A 电流时装置的磁通分布如图 3 所示。可以看出,气隙处的磁场分布并不是完全均匀的。为进一步分析气隙处的磁密分布,用高斯计对高度 h 和厚度 b 方向的磁密进行了实际测试。线圈通以 1.5A 直流电时,沿厚度 b 和高度 h 方向有限元仿真和实测的磁密幅值如图 4 和图 5 所示。

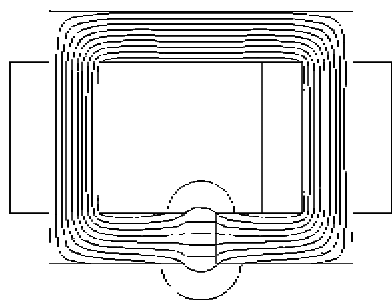


图 3 电流为直流 1.5A 时磁场发生装置磁通分布图

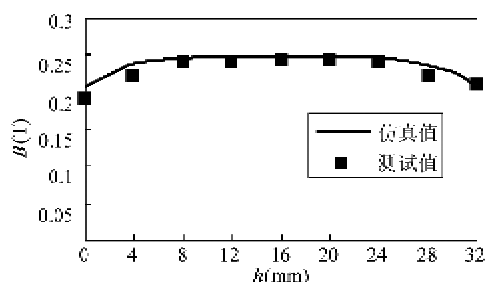


图 4 气隙沿高度方向的磁密分布

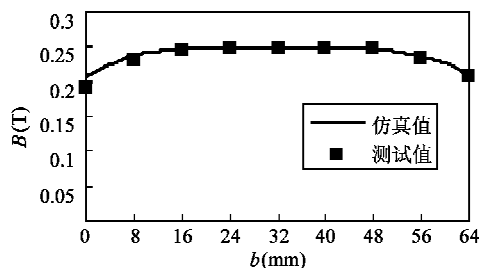


图 5 气隙沿厚度方向的磁密分布

可以看出,在气隙中心 $40\text{mm} \times 20\text{mm}$ 范围内,磁场分布均匀;而气隙边缘部分受到漏磁、加工误差等因素影响,磁密值有所下降。实验时只要保证放置溶液的容器在气隙中心处 $40\text{mm} \times 20\text{mm}$ 范围内,就可以保证溶液受到均匀磁场的作用。

1.3 实验方法

用二次蒸馏水配置一定浓度的 NaCl 溶液。控制恒温水槽的水温在 $(25 \pm 0.1)^\circ\text{C}$, 取 10ml 溶液在恒温水槽中水浴恒温测试其电导率的初始值。将磁场发生装置的线圈引出线与可编程电源连接,调节可编程电源的电流和频率来调节气隙磁场的磁密幅值和频率,并用高斯计测试气隙处的磁密。将溶液注入约 $40\text{mm} \times 20\text{mm} \times 10\text{mm}$ 的玻璃容器,将容器密封后放入电磁发生装置的气隙中心处磁化作用 1h,取出仍然放置于 $(25 \pm 0.1)^\circ\text{C}$ 的水浴条件下测试其电导率。磁化作用过程保持环境温度在 $(25 \pm 2)^\circ\text{C}$ 。实验过程中涉及的仪器和试剂见表 1。

表 1 实验涉及的仪器和试剂

仪器或试剂名称	测试精度及主要技术指标	生产厂家
电导率仪	精度 0.2%	上海精密科学仪器有限公司
可编程电源	电流精度 $\pm 0.1\text{A}$ 频率精度 $\pm 0.1\text{Hz}$	致茂 (Chroma) 电子股份有限公司
高斯计	精度 2%	上海亨通磁电科技有限公司
恒温水槽	控温精度 $\pm 0.1^\circ\text{C}$	上海一恒科技有限公司
NaCl	分析纯	天津耀华化学试剂公司
二次蒸馏水	电导率 $< 2\mu\text{S}/\text{cm}$	—

2 实验结果和讨论

2.1 实验的重复性

在测试各浓度 NaCl 溶液在磁场作用下的电导

率变化之前,首先测试了 0.01mol/L NaCl 溶液在幅值为 0.138T、频率为 15Hz 的磁场下作用 1h 的电导率变化,实验共重复进行了 8 次,如图 6 所示。

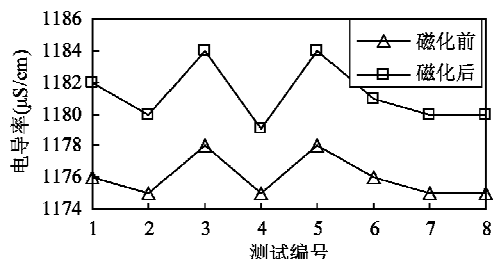


图 6 0.01mol/L NaCl 溶液磁场作用前后电导率变化

从图 6 中可以看出,在磁化作用后的 NaCl 溶液电导率均有所上升。尽管电导率初始值的方差(1.714)略高,但电导率变化值的方差(0.500)较低。这表明,初始值的细小偏差并不影响电导率的变化值,而本文关注的恰恰是电导率的变化值。多次同一实验电导率的变化值方差低,表明实验的可信度和可重复性高。初始值的测量偏差可能是由于溶液在获取、转移、注入容器过程中,有微少的离子溶进了溶液造成的。

2.2 磁场作用下 NaCl 溶液电导率的变化

为了研究恒定磁场对 NaCl 溶液电导率的影响,选取几点不同的磁密幅值分别测试了磁场作用前后 NaCl 溶液电导率的变化。为与恒定磁场进行对比,选取与恒定磁场相同的幅值进行测试,交变磁场的频率为 15Hz,磁场波形为正弦。为了保证实验的准确性,对每个点都进行了反复测试。保证测试值的方差不超过 2.1 节所述的方差。

图 7-图 9 表示各浓度 NaCl 溶液在恒定磁场和交变磁场作用下电导率的变化。在恒定和交变磁场作用下 NaCl 溶液的电导率均有所升高。而且电导率变化的趋势也基本相同,在磁密较低时电导率变化小,随着磁密的增加,电导率的变化增大,值得注

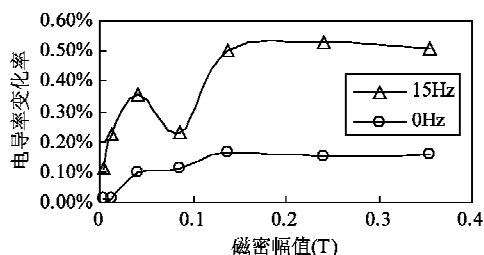


图 7 0.01mol/L NaCl 溶液在恒定和交变磁场下电导率的变化

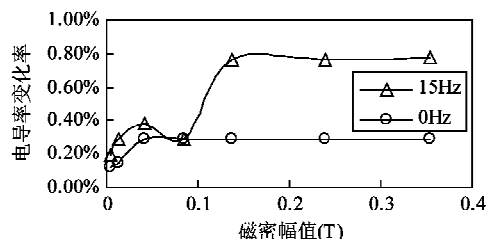


图 8 0.1mol/L NaCl 溶液在恒定和交变磁场下电导率的变化

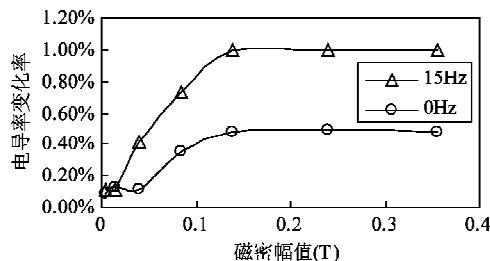


图 9 1mol/L NaCl 溶液在恒定和交变磁场下电导率的变化

意的是,当磁密增加到一定程度时,电导率的增加达到饱和状态,不再随着磁场的增加而增加。

电解质溶液的导电能力主要取决于溶液中离子的浓度和离子的电迁移率。电解质溶液中存在溶质离子和溶剂分子,它们之间存在着相互作用,影响着离子的电迁移率,从而影响着电导率。根据“离子氛”理论^[8],由于异号离子相互吸引,一个阳离子(中心离子)周围有较多的阴离子,形成一种带负电的“离子氛”。同样,一个阴离子(中心离子)周围有较多的阳离子,形成带正电的“离子氛”。在电场作用下,中心离子和离子氛将向相反方向运动,因此中心离子不是在一个静止的介质中运动,其运动必然受到逆流的相反离子运动的影响。在水溶液中,由于水分子是极性分子,受离子-偶极能影响,离子是水化的^[9]。因此离子氛的运动也带动水分子运动,故中心离子是在逆流的水中运动,而中心离子在运动时所受到的摩擦力就大于其在静止介质中运动时的摩擦力。此额外摩擦力被称为电泳力,这个作用即是电泳效应(electrophoretic effect)^[10]。在运动时,中心离子和逆流运动的水分子相碰撞,因为损失部分动能,显然电泳效应的存在将导致离子电导率的下降。

物质中原子核的自旋、电子的自旋和电子绕原子核的旋转都形成微观电流,每形成的微观电流都成为一个磁偶极子而具有一定的磁矩。在外磁场中,偶极子将受到力矩的作用,具体地分为两种情况:对于绕核旋转的电子产生的磁矩,当存在外磁场

时,运动的电子受到洛伦兹力的作用,洛伦兹力的方向为 $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ 的方向($\mathbf{v}$ 为电子运动的方向);对于与 $\mathbf{B}$ 的方向一致的磁矩,电子所受洛伦兹力的方向将沿旋转圆周运动的半径向外。于是向心力将比不存在磁场时要小些。当旋转圆周的半径不变时,运动速度将减小,因此洛伦兹力作用的效果是使与 $\mathbf{B}$ 方向相同的磁矩减小。而对于 $\mathbf{B}$ 方向相反的磁矩,洛伦兹力作用的效果是使磁矩增加。所以,洛伦兹力的总效果是在逆着外磁场的方向上产生磁矩,可以理解为电子绕核旋转的磁矩在外磁场作用下将向外磁场相反的方向偏转。而电子自旋的磁矩在外磁场作用下将转向外磁场方向^[11]。

在磁场作用下,水分子内电子产生的磁矩会向着磁场方向或逆着磁场方向转向,从而使水分子的电子云发生极化,使离子水化层受到破坏。这样减弱了离子的水化作用,使中心离子在运动时的摩擦力减小,溶液的电导率升高。而当磁场较弱时,磁矩偏转不明显,这时电导率变化也不明显;随着磁场的增强,磁矩分子偏转加强,电导率也随之增加;而当磁场增加到一定程度,磁矩偏转到接近磁场正向和逆向时,再增加磁密,磁矩也不会再偏转,从而电导率也不再增加。

另外值得注意的是,在图 7 中,在磁密幅值为 0.1T 附近,0.1mol/L 和 0.01mol/L 的 NaCl 溶液电导率变化率出现了电导率随着磁密的增加陡降的情况。从曲线上看,0.1T 附近正好是曲线趋向饱和的拐点位置,因此猜测这种现象可能与磁矩转向引起电导率变化的临界值有关。而 1mol/L NaCl 溶液测试中未出现此现象,原因有待进一步研究。

2.3 交变和恒定磁场作用下 NaCl 溶液电导率的变化差异

从图 7-图 9 中可以看出,在磁密较小时,电导率变化不明显,交变与恒定磁场作用的区别不大;随着磁密幅值的增加,交变磁场作用后的 NaCl 溶液电导率变化明显大于恒定磁场。

恒定磁场作用于 NaCl 溶液时,磁矩会在磁场的作用下往磁场正逆向偏转,而正弦交变磁场的磁场方向周期性变化,因而磁矩也随着磁场方向周期性转向,在这种磁矩的周期性转向过程中,水分子的动能提高,使得水分子运动加剧,加大了对离子水化层的破坏,进一步提高了溶液的电导率。

2.4 不同浓度 NaCl 溶液受磁场作用后的电导率变化差异

不同浓度 NaCl 溶液受交变磁场和恒定磁场作

用后曲线分别见图 10 和图 11。可以看出,在同一磁场作用下,高浓度的 NaCl 溶液的电导率变化率要大于低浓度。这可以从电解质溶液的摩尔电导率得到解释。电解质溶液的摩尔电导率 Λ_m 定义为

$$\Lambda_m = \frac{\kappa}{c} \quad (1)$$

式中 κ 为电解质溶液的电导率; c 为电解质溶液物质的量浓度。

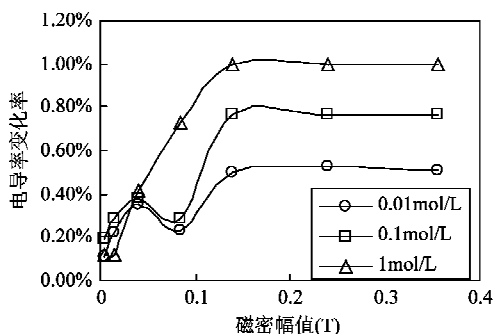


图 10 不同浓度 NaCl 溶液在交变磁场下的电导率变化

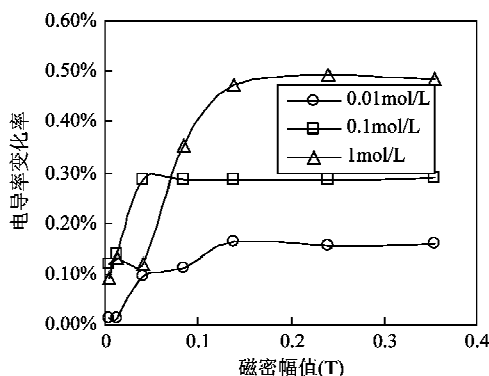


图 11 不同浓度 NaCl 溶液在恒定磁场下的电导率变化

电解质溶液的摩尔电导率随浓度增大而下降,其原因是离子间作用随浓度的上升而上升^[12],也即随着溶液浓度的提高,影响电导率的电泳效应会更加明显,而如 2.2 节所述,磁场作用恰恰可以削弱电泳效应。故对于浓度高的电解质溶液,由于其电泳效应强,在磁场作用后,电导率提升的空间也大。

3 结论

本文研究了磁场对 NaCl 溶液电导率的影响。实验结果表明,磁场作用后 NaCl 溶液的电导率升高,且随着磁场幅值的增加,溶液电导率的变化率出现了饱和现象,而且交变磁场作用后的 NaCl 溶液电导率变化率大于恒定磁场作用后的 NaCl 溶液。磁

场引起了水分子的磁矩转向,使其电子云发生极化,破坏了溶液中离子的水化层,削弱了溶液的电泳效应,从而使溶液的电导率增加。但随着磁场的增强,磁矩的偏转角度不再发生变化,从而使电导率的变化率出现了饱和现象。交变磁场作用下的水分子磁矩随着磁场方向周期性偏转,使水分子的动能增加,能进一步破坏离子的水化层,使溶液的电导率升高。同一磁场作用时,高浓度 NaCl 溶液的电导率增加得多,这与电解质溶液离子间作用随浓度的上升而上升有关。

限于篇幅,磁场作用时其他因素的影响,如磁场作用时间、交变磁场的频率对溶液电导率的影响、磁场对流动的 NaCl 溶液的电导率的影响等研究将另文介绍。

参考文献

- [1] 朱永辉,成善生,吕其生等. 磁化水的检测及评价. 理化检验-化学分册, 2001, 37(6): 279
- [2] 朱元保,颜流水,曹祉祥等. 磁化水的物理化学性能. 湖南大学学报(自然科学版), 1999, 26(1): 21-25
- [3] Chibowski E, Holysz L, Szczes A. Time dependent changes in zeta oitential offreshly precipitated calcium carbonate. *Colloids and Surfaces A*, 2003, 222: 41-54
- [4] Holysz L, Chibowski B M, Chibowski E. Time-dependent changes of zeta potential and other parameters of in situ calcium carbonate due to magnetic field treatment. *Colloids and Surfaces A*, 2002, 208: 231-240
- [5] Eshaghi Z, Gholizadeh M. The effect of magnetic field on the stability of (18-crown-6) complexes with potassium ion. *Talanta*, 2004, 64: 558-561
- [6] Fujiwara M, Mitsuda K, Tanimoto Y. Movement and Diffusion of Paramagnetic Ions in a Magnetic Field. *The Journal of Physical Chemistry B*, 2006, 110: 13965-13969
- [7] Lucyna Holysz, Aleksandra Szczes, Emil Chibowski. Effects of a static magnetic field on water and electrolyte solutions. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2007, 316: 996-1002
- [8] Debye, P and Hückel. Zur theorie der electrolyte. *International Journal of Physics Z*, 1923, 24: 185
- [9] Stokes R H, Robinson R A. Standard Solutions for Humidity Control at 25°C. *Journal of Solution Chemistry*, 1973, 2(2/3): 173-186
- [10] Robinson R A, Stokes R H. *Electrolyte Solutions*. 2nd ed. London: Butterworth, 1959. 122-123
- [11] 邹继斌等. 磁路与磁场. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,1998. 19-21
- [12] 李以圭,陆九芳. 电解质溶液理论. 北京:清华大学出版社,2005. 383

Experimental reasearch on effects of magnetic fields on the conductivity of NaCl solutions

Cheng Shukang, Chen Lei, Li Nan, Chai Feng

(Department of Electrical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

Abstract

The effects of magnetic fields on the conductivity of NaCl solutions were studied through expriment. NaCl solutions were exposed for 1h to magnetic fields to measure the change of the conductivity of the NaCl solutions. The change of the conductivity of the NaCl solutions under amplitude-differernt magnetic fields was studied, the change of the conductivity of the NaCl solutions under the sationary magnetic field was compared with that of the solutions under the alternating magnetic field, and the change of the conductivity of the NaCl solutions which are different in concentration and exposed to the same magnetic field was researched. The priciple of the effects of magentic fields on the conductivity of NaCl solutions was discussed. The study shows that the electron cloud of the water molecules is polarized by the deflection of their magnetic moment caused by the magnetic field, and the hydreated layer of the ion is broken. On the basis of this, the electrophoretic effect in electrolyte solutions is weakened, so the conductivity of the solution is increased.

Key words: magnetic field, NaCl solution, conductivity, magnetic moment