

利用数字化实验探究氢氧化铁胶体粒子的形成过程*

孙影^{1**} 信欣¹ 冯正午²

(1. 安徽师范大学化学与材料科学学院 安徽芜湖 241002; 2. 芜湖市第十二中学 安徽芜湖 241003)

摘要 利用数字化实验对氢氧化钠溶液和氯化铁溶液反应制备氢氧化铁胶体过程中电导率和浑浊度的变化进行探究, 得到电导率和浑浊度随氢氧化钠溶液滴加的变化规律。通过宏观、微观、符号和曲线四重表征深入分析, 阐明了胶体、溶液和浊液的本质区别是分散质粒子直径的不断增大, 从而帮助学生从微观上理解不同分散系的本质区别。

关键词 数字化实验 氢氧化铁胶体 四重表征 电导率 浑浊度

DOI: 10.13884/j.1003-3807hxjy.2017020065

1 问题的提出

$\text{Fe}(\text{OH})_3$ 胶体作为高中化学学习分散系的典型案例, 要求学生掌握其制备方法并且以此为例学习胶体的基本性质。人教版化学教材通过向沸水中滴加适量的饱和 FeCl_3 溶液制备 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 胶体, 但经过实践和查阅文献发现此方法的实验变量如: 沸腾时间、搅拌速度等不易掌握^[1], 并且该反应原理涉及到盐类水解的有关知识, 高一学生不易理解。教科书根据分散质粒子的大小, 将分散系分为溶液、胶体和浊液, 但利用丁达尔效应的检验方法停留在宏观层面, 不利于学生从微观上理解它们的本质区别。

综合分析大量文献并结合实践, 本研究将用适当浓度的 NaOH 溶液和 FeCl_3 溶液在搅拌的条件下直接混合制备 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 胶体^[2]。从溶液到胶体再到浊液, 其本质就是分散质粒子的不断增大, 运用数字化传感器监测该反应过程中的电导率和浑浊度变化, 由此推测出胶体粒子的大小变化。最终通过四重表征分析结果, 提高实验教学的有效性^[3], 帮助学生理解胶体粒子的形成本质, 便于学习胶体的其他性质(如介稳性、聚沉和电泳等)。

2 实验

2.1 实验目的

(1) 测量一定浓度的 FeCl_3 溶液与 NaOH 溶液反应过程中的电导率变化和丁达尔现象。

(2) 测量 FeCl_3 溶液、 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 悬浊液和不同 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 胶体的浑浊度。

2.2 实验仪器和药品

实验试剂: 10% 的 NaOH 溶液、 FeCl_3 (AR)、

蒸馏水、1 mol/L 盐酸。

实验仪器: 电脑、数据采集器、提存能手软件(Logger Pro)、电导率传感器、浑浊度传感器、磁力搅拌器、磁子、烧杯(100, 50 mL)、量筒、胶头滴管、玻璃棒、激光笔。

2.3 实验过程与装置

2.3.1 测量 FeCl_3 溶液与 NaOH 溶液反应过程中的电导率变化

(1) 取适量 1 mol/L 盐酸, 向其中加入 10 g FeCl_3 粉末, 配制 10% 的 FeCl_3 溶液, 待用。

(2) 在烧杯中加入 30 mL 蒸馏水, 加入磁子, 并放在磁力搅拌器上。

(3) 连接实验装置(见图 1)。

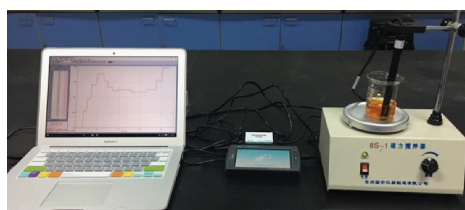


Fig 1 Experiment device

图 1 实验装置

(4) 打开电脑软件 Logger Pro, 开启磁力搅拌器, 点击采集按钮, 待示数稳定后, 向步骤(2)的烧杯中逐滴缓慢滴加 4 滴 10% 的 FeCl_3 溶液, 观察滴定过程中的电导率变化曲线, 结束后用激光笔照射, 观察丁达尔现象。

(5) 待示数稳定后, 继续向烧杯中逐滴缓慢滴加 NaOH 溶液, 每滴完 1 滴后用激光笔照射, 观察丁达尔现象。

* 安徽师范大学博士科研启动基金项目(2016XJJ111); 校科研培育计划项目(2015xmpy17); 2016年安徽省高等学校省级质量工程教学研究项目(2016jyxm0416)

** 通信联系人, E-mail: syw963@mail.ahnu.edu.cn

(6) 记录实验现象和数据, 整理仪器。

2.3.2 FeCl₃ 溶液、Fe(OH)₃ 胶体和 Fe(OH)₃ 悬浊液的浑浊度测量

(1) 将烧杯置于磁力搅拌器上, 加入 30 mL 蒸馏水, 放入磁子。

(2) 连接实验装置。

(3) 打开磁力搅拌器, 向步骤 (1) 的烧杯中滴加 4 滴 10% 的 FeCl₃ 溶液, 然后取适量烧杯中液体于比色皿中测量浑浊度, 记录浑浊度数据。

(4) 上一步测量完毕后, 将比色皿中的溶液

倒回烧杯中, 然后在搅拌条件下向其中缓慢滴加 10% 的 NaOH 溶液 1 滴, 然后再取适量烧杯中液体于比色皿中, 同上记录浑浊度数据。

(5) 重复步骤 (4), 共滴加 5 滴 NaOH 溶液, 逐步检测, 记录浑浊度数据。

3 实验现象与分析

3.1 测量电导率

3.1.1 实验现象与数据记录

实验现象见表 1 和图 2。

实验数据记录见表 2。

表 1 FeCl₃ 溶液与 NaOH 溶液反应过程中的丁达尔现象记录

Table 1 Tyndall phenomena in the reaction of FeCl₃ solution with NaOH solution

NaOH 溶液滴数	0	1	2	3	4	5
实验现象	液体呈浅黄色; 无丁达尔现象	液体颜色加深, 呈浅黄色; 丁达尔现象不明显	液体颜色加深, 呈浅黄色; 丁达尔现象明显	液体颜色加深, 呈黄色; 丁达尔现象较明显	液体颜色加深, 呈黄色; 丁达尔现象很明显	开始析出沉淀, 无丁达尔现象

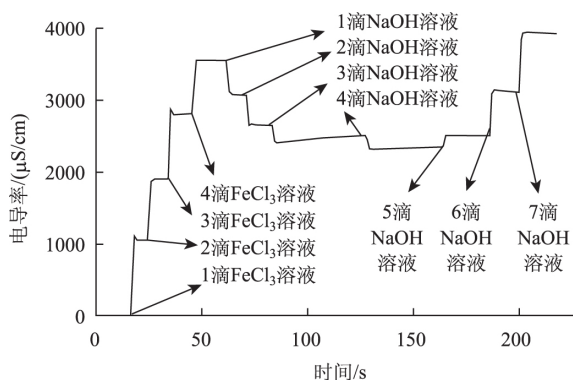


Fig. 2 Change curve of conductivity

图 2 电导率变化曲线

表 2 FeCl₃ 溶液与 NaOH 溶液反应过程中的电导率数据记录

Table 2 Data record of conductivity in the reaction of FeCl₃ solution with NaOH solution

10% 的 NaOH 溶液滴数	时间/s	FeCl ₃ 溶液的电导率/(μS/cm)	电导率变化值/(μS/cm)
0	59	3 553	0
1	60	3 071	-482
2	71	2 647	-424
3	83	2 505	-142
4	127	2 331	-174
5	163	2 504	173
6	186	3 116	612
7	200	3 936	820

注: 电导率变化值为相邻电导率的差值。

初始时, 向蒸馏水中滴加 4 滴 10% 的 FeCl₃ 溶液, 溶液电导率持续增加, 最大值为 3 553 μS/cm, 此时滴加第 1 滴 10% 的 NaOH 溶液, 溶液电导率

迅速降低, 变化值为 -482 μS/cm, 溶液颜色加深, 但仍澄清透明, 有丁达尔现象但不明显。继续滴加 NaOH 溶液, 体系颜色逐渐加深, 保持澄清透明, 电导率减小幅度逐渐降低, 丁达尔现象逐渐明显。当滴入第 5 滴 NaOH 溶液时, 体系瞬间出现大量红褐色沉淀, 电导率增加 173 μS/cm。之后继续滴加 NaOH 溶液, 体系电导率持续升高。

3.1.2 理论分析

在溶液中电流的形成是自由离子的定向移动, 电导率传感器通过电极之间的电流来测量溶液的电导能力。一定范围内, 强电解质溶液的电导率随浓度的增加 (即导电粒子数的增多) 而升高。故 0~60 s 内, 随 FeCl₃ 溶液的滴加, 溶液电导率持续增加至 3 553 μS/cm。

在配制 10% 的 FeCl₃ 溶液时, 采用 1 mol/L 的盐酸, 60 s 时溶液组成为 30 mL 蒸馏水、4 滴 10% 的 FeCl₃ 溶液 (25 滴为 1 mL)。经过计算得出此时 (含 4 滴 10% 的 FeCl₃ 溶液) 体系中共含有 H⁺ 的物质的量为 1.6×10^{-4} mol, Fe³⁺ 的物质的量为 1.1×10^{-4} mol (不考虑 Fe³⁺ 的水解), 则 H⁺ 和 Fe³⁺ 完全反应需要 OH⁻ 的物质的量 n_1 为 4.9×10^{-4} mol。NaOH 溶液的质量分数为 10%, 经过计算每滴 NaOH 溶液 (25 滴为 1 mL) 含有 OH⁻ 的物质的量 n_2 为 1.1×10^{-4} mol。其中 $n_1/n_2 = 4.5$, 所以如果完全反应至少需要 5 滴 NaOH 溶液。由此可知, 当滴加 4 滴 NaOH 溶液时 Fe³⁺ 几乎完全反应, 剩余少量有可能附着在胶粒周围以维持体系

稳定,此时丁达尔现象最明显。滴加 5 滴 NaOH 溶液时 Fe^{3+} 反应完全,过量 OH^- 剩余,体系稳定性被破坏, $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 胶粒聚集,析出大量红褐色沉淀,电导率随之增大。

从图 3 曲线中可以看出,85 s 至 127 s 之间,即滴加第 3 滴 NaOH 溶液时,电导率突然下降之后又有略微上升,而此时 Fe^{3+} 并没有反应完全,所以该现象并不是 NaOH 溶液过量而导致。因为胶体具有介稳性,胶粒可以通过吸附离子而带有电荷,同种胶体粒子的电性相同,通常情况下,它们之间的相互排斥阻碍了胶体粒子的变大,使它们不易聚集。此外,胶体粒子所做的布朗运动也使得它

们不容易聚集成质量较大的颗粒而沉降下来。所以搅拌、加热等外界因素会破坏胶体的稳定性,使其发生聚沉。根据多组平行实验及对实验现象的分析,上述反应过程中滴加 4 滴 NaOH 溶液时,所形成的胶体丁达尔现象最明显,且存放数天都能稳定存在。而滴入 3 滴 NaOH 溶液时,体系并不稳定,搅拌等外界条件,可能会破坏体系原来的稳定状态,吸附在胶粒上的离子有可能又重新回到溶液中,这就导致了电导率的略微上升。

3.2 测量浊度

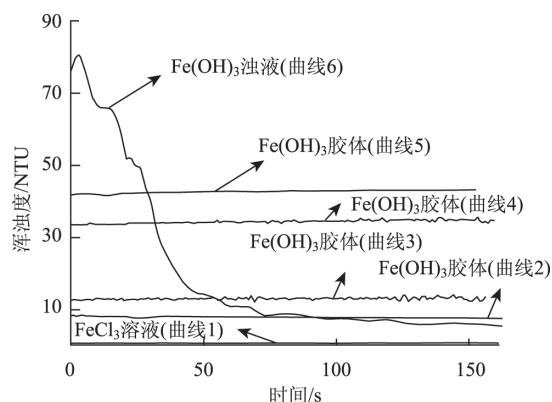
3.2.1 实验现象与数据分析

数据记录与实验现象见表 3 和图 3。

表 3 不同体系浊度数据记录

Table 3 Data record of turbidity of different systems

种类	FeCl_3 溶液	$\text{Fe}(\text{OH})_3$ 胶体				$\text{Fe}(\text{OH})_3$ 浊液
		曲线 2	曲线 3	曲线 4	曲线 5	
浊度/NTU	0.1~0.3	7.5~8.5	11.9~14.0	33.4~35.6	41.6~43.2	5.4~80.5
平均值/NTU	0.2	7.9	13.1	34.4	42.7	18.4



注:曲线 1 代表 FeCl_3 溶液,曲线 2 代表向 FeCl_3 溶液中滴加 1 滴 NaOH 溶液,曲线 3 代表向 FeCl_3 溶液中滴加 2 滴 NaOH 溶液,曲线 4 代表向 FeCl_3 溶液中滴加 3 滴 NaOH 溶液,曲线 5 代表向 FeCl_3 溶液中滴加 4 滴 NaOH 溶液,曲线 6 代表向 FeCl_3 溶液中滴加 5 滴 NaOH 溶液。

Fig. 3 Change curve of turbidity

图 3 浊度变化曲线

从图 3 可得 FeCl_3 溶液的浊度稳定在 0.2 NTU 附近, $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 胶体的浊度随 NaOH 溶液的增加不断增大,且在一定时间段内保持稳定,说明了胶体的介稳性。根据上述理论计算可知,当滴加第 5 滴 NaOH 溶液时, Fe^{3+} 恰好反应完全,过量 OH^- 剩余,体系稳定性被破坏,所以此时析出大量红褐色沉淀,曲线 6 浊度从 80.5 NTU 降低到 5.4 NTU,说明浊液的不稳定性。

3.2.2 理论分析

浊度传感器的工作原理是红外线照进样本比

色皿,由于水中的颗粒大小不同,光线发生不同程度的散射和折射。由光敏二极管组成的探测器与光源成 90° 角,它可以检测到被散射和折射的光线,并将光强度转化为电压数据再经过数据处理变成混浊度数据。当光线射入分散系统时,可能发生 3 种情况,即光的反射或折射、光的散射以及光的吸收。若分散相粒子小于入射光波长,主要发生光的散射,溶胶粒子的半径一般在 $1 \sim 100 \text{ nm}$ 之间,符合散射条件。根据 Rayleigh (瑞利) 研究的散射作用可得,当入射光波长、分散介质与分散相之间的折射率差值相同时,可以写成 $I = K'cr^3$, 其中 K' 为常数, c 代表分散相粒子浓度, r 代表溶胶粒子半径。由此可以看出散射光的强度与粒子浓度和粒子半径的立方成正比^{[4]425-426}。在用上述方法制备 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 胶体的过程中,可发现体系浊度逐渐增大。若假设 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 胶体粒子的浓度变化不大,则说明 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 胶体粒子的半径不断增大。

另外,曲线 4 与曲线 5 相比较波动较大,说明滴入 3 滴 NaOH 溶液所形成的胶体稳定性较差。也进一步证明电导率曲线中滴入 3 滴 NaOH 溶液后的稍微上升,是由于此时体系本身的不稳定加上搅拌等外界因素的影响。图中曲线 3 波动也较大,同样说明此时胶体不稳定。但此时溶液中 Fe^{3+} 含量较多,与 OH^- 结合的趋势较大,所以对应的电导率曲线并没有出现上升。

3.3 四重表征分析

四重表征能够有效解决学生曲线表征与宏观表征、微观表征、符号表征脱节等学习问题^[5]。综合

以上实验进行四重表征分析(见表4),使实验结论更加形象直观,便于理解。

表4 NaOH溶液和FeCl₃溶液反应的四重表征

Table 4 Tetra-representation of reaction between NaOH solution and FeCl₃ solution

体系电导率/ ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	宏观表征	微观表征(胶粒模型以及 对应的浑浊度/NTU)	曲线表征		符号表征 (涉及离子反应)
			电导率变化	浑浊度变化	
3 553	淡黄色溶液,无丁达尔现象	无胶粒;浑浊度:0.1,保持稳定	先下降,后上升	曲线水平,基本稳定	$\text{Fe}^{3+}, \text{H}^+, \text{Cl}^-$
3 071	随氢氧化钠溶液的加入,电导率下降,体系颜色逐渐加深,出现丁达尔现象,光路逐渐清晰明亮	开始形成胶粒;浑浊度:7.1,保持稳定			$\text{H}^+ + \text{OH}^- = \text{H}_2\text{O};$ $\text{Fe}^{3+} + 3\text{OH}^- = \text{Fe}(\text{OH})_3(\text{胶体})$
2 647		胶粒逐渐增大;浑浊度:13.0,基本稳定			$\text{Fe}^{3+} + 3\text{OH}^- = \text{Fe}(\text{OH})_3(\text{胶体})$
2 477		胶粒逐渐增大;浑浊度:34.4,基本稳定			$\text{Fe}^{3+} + 3\text{OH}^- = \text{Fe}(\text{OH})_3(\text{胶体})$
2 331		胶粒逐渐增大;浑浊度:42.7,基本稳定			$\text{Fe}^{3+} + 3\text{OH}^- = \text{Fe}(\text{OH})_3(\text{胶体})$
2 504	析出大量红褐色沉淀,电导率升高	析出沉淀;浑浊度:5.4~80.5,不稳定		曲线呈现下降趋势	$\text{Fe}^{3+} + 3\text{OH}^- = \text{Fe}(\text{OH})_3 \downarrow$

从电导率曲线的下降阶段,可以看出反应过程中 OH^- 与 Fe^{3+} 的不断结合;从浑浊度曲线的变化情况,可以得出生成的 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 胶粒不断增大,二者结合很好地诠释了这一动态反应过程。胶体本身也是物质以一定的分散程度而存在的一种状态,是一个介于宏观世界与微观世界之间的介观领域^{[4]404-405}。

4 思考与展望

本实验运用电导率传感器和浑浊度传感器,在氢氧化铁胶体的制备过程中清晰地呈现了胶体粒子直径逐渐增大的过程,帮助学生理解教科书中对分散系进行分类的标准,有力地说明了胶体是一种处于溶液和浊液之间的介观领域。启发化学教师运用

发展的、动态的眼光教授新知,并逐步渗透从量变到质变的哲学观念。四重表征相结合,可以展现胶粒逐渐增大的过程,从本质上分析胶体与溶液和浊液的区别。启发学生运用宏、微观相结合的视角分析和解决问题,培养学生宏观辨识与微观探析的核心素养。

参 考 文 献

- [1] 阮秀琴,尹家卉.化学教育,2015,36(10):29-31
- [2] 孙影,许凯旋.化学教育,2011,32(3):59-62
- [3] 林建芬,盛晓婧,钱扬义.化学教育,2015,36(7):1-6
- [4] 傅献彩,沈文霞,姚天扬,等.物理化学(下册).5版.北京:高等教育出版社,2014
- [5] 刘建祥.化学教育,2013,34(7):31-35

Inquiry on the Formation of Ferric Hydroxide Colloid Particles by Digital Experiments

SUN Ying^{1**} XIN Xin¹ FENG Zheng-Wu²

(1. College of Chemistry and Materials Science, Anhui Normal University, Wuhu 241002, China;

2. Wuhu No. 12 Middle School, Wuhu 241003, China)

Abstract This paper studied the changes of conductivity and turbidity during the preparation of ferric hydroxide colloid from NaOH solution and FeCl₃ solution by digital experiments. Then this paper clarified that the essential difference among solution, colloid and turbid liquid was the increasing of diameter of dispersoid particles from tetra-representation (macroscopic, microscopic, symbol and curve), which would help students understand the essence of dispersion system from the micro level

Keywords digital experiment; ferric hydroxide colloid; tetra-representation; conductivity; turbidity