



利用数字化实验系统探究铁的吸氧腐蚀实验

江 军*

(江苏省常州高级中学 213003)

摘要 分析教材中铁的吸氧腐蚀实验的影响因素, 围绕学生学习过程中的困惑, 通过改进传统的实验方法, 结合先进的数字化实验系统, 运用正交试验法进行定量研究, 对铁的吸氧腐蚀实验提供探究建议, 从而更有效地用实验解释吸氧腐蚀的原理。

关键词 铁的吸氧腐蚀 数字化实验 氧气传感器 实验探究

1 探究缘由

1.1 从实验现象看

苏教版《化学反应原理》设计了这样的活动与探究: 向还原铁粉中加入少量的炭粉, 混合均匀后, 撒入内壁用氯化钠溶液润湿过的具支试管中, 按图 1 组装好仪器。几分钟后, 打开止水夹, 观察、比较导管中水柱(在水中滴加几滴红墨水)的变化和试管中的现象^[1]。

图 1 中导管内水柱上升, 说明具支试管内有气体参加反应, 由于是空气, 反应的气体很可能是 O_2 , 即发生吸氧腐蚀。然而多次实验发现: 几分钟后打开止水夹, 导管内水柱有时上升, 但上升高度每次不同; 有时则没有明显上升; 甚至有时导管内液面低于试管内液面。实验现象为何如此呢? 实验发现可能的影响因素较多, 例如铁粉和炭粉的用量、氯化钠溶液浓度及用量、具支试管内壁受浸润

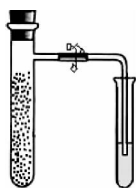


图 1 铁的腐蚀实验

程度、铁粉与炭粉的混合物撒入内壁后的附着程度等。由此, 教材编者虽然设计了该实验, 但对实验方案的表述不明确, 导致实验现象不理想, 故有必要深入探究此实验。

1.2 从学生困惑看

学生对钢铁在潮湿空气中容易生锈虽有所了解, 但对该现象是吸氧腐蚀、发生原电池反应却不易理解。例如, 他们常把负极反应写成 $Fe - 3e^- = Fe^{3+}$; 对正极反应的产物半信半疑, 有学生的想法是: 铁失电子, 接受电子的应该是溶液中的氢离子或金属阳离子, 对于 O_2 得电子则不理解。还有学生认为: 导管内水柱上升只能说明试管内气体减少, 实验未证明是 O_2 参加反应; 对于铁失电子后是 Fe^{2+} 还是 Fe^{3+} 也无法从实验中观察到。所以, 即使在教学中该实验现象与预期吻合, 但它还不能有效解答学生心中的这些困惑。析疑解惑的有效办法是实验探究, 若实验能有效地解释吸氧腐蚀的原理, 将会对学生的认知过程大有益处。

2 探究过程

2.1 探究设想

对实验存在的问题、学生的困惑进行梳理, 寻求相应的解决方案, 列表分析见表 1。

表 1 实验问题、学生困惑及其解决方案

序号	实验问题与学生困惑	设想的解决方案
1	实验现象重复性不好	用正交试验法进行定量研究
2	铁粉和炭粉的用量不明确	
3	氯化钠溶液浓度及用量不明确	
4	试管内壁受浸润程度、混合物撒入内壁后的附着程度	在试管内壁贴有吸收定量溶液的滤纸, 将混合物均匀撒在滤纸上
5	塞紧橡胶塞或插入夹上止水夹的导管对实验现象有影响	改用相对压强传感器测量体系压强变化
6	实验未证明是 O_2 参与反应、学生对 O_2 得电子不易理解	用氧气传感器测量体系中的 O_2 含量变化, 酚酞验证是否有 OH^- 生成
7	实验中无法观察到铁失电子后是 Fe^{2+} 还是 Fe^{3+}	Fe^{3+} 与 KSCN 溶液有血红色出现可检验 Fe^{3+} , Fe^{2+} 与 $K_3[Fe(CN)_6]$ 溶液生成滕氏蓝沉淀可检验 Fe^{2+}

* 通信联系人, E-mail: sczjiangjun@189. cn

2.2 探究设计

在本探究方案中氯化钠溶液的用量对实验影响不大, 则要探究的影响因素为铁粉和炭粉的质量、氯化钠溶液的浓度。根据正交试验法原理^[2], 在初步实验的基础上, 设计了三因素三水平进行探究, 见表 2。为了短时间内取得理想的实验效果, 将反应消耗完 O_2 所用的时间作为考察指标。

表 2 影响实验的因素及水平

水平	因素		
	A 铁粉/g	B 炭粉/g	C $c(NaCl) / (mol/L)$
1	1.5	0.5	0.1
2	2.0	1.0	1.0
3	2.5	2.0	饱和

2.3 探究方案

(1) 用数据线连接计算机、数据采集器、氧气传感器、相对压强传感器。打开实验软件, 对氧气传感器校准, 相对压强传感器调零, 设置实验软件, 准备记录。

(2) 将滤纸 (11 cm×15 cm) 卷成圆筒状插入具支试管 ($\Phi 40\text{ mm} \times 200\text{ mm}$) 内, 使其在支管口下方并紧贴具支试管内壁。量取 0.1 mol/L NaCl 溶液 3 mL (使滤纸完全润湿的量) 倒入具支试管内, 倾斜并转动具支试管使溶液完全浸润滤纸。

(3) 将 1.5 g 铁粉和 0.5 g 炭粉 (以表 3 试验 1 为例) 混合均匀, 边抖动称量纸上的混合物边转

动倾斜的具支试管, 使其均匀撒入在具支试管内壁的滤纸上。

(4) 迅速在具支试管口插入氧气电极 (含配套胶塞), 将连有相对压强传感器的 T 型三通管用橡胶管接到具支管口, 夹上止水夹, 即组装成如图 2 所示的实验装置 (略去夹持部分)。

(5) 点击实验软件的“开始”, 自动采集具支试管中 O_2 含量和相对压强的数据, 数据采集到 O_2 含量降为 0。

(6) 按表 3 逐一对编排的条件进行实验。记录 O_2 含量降到 0 时所用时间, 同时记录此时的相对压强值在表 3。

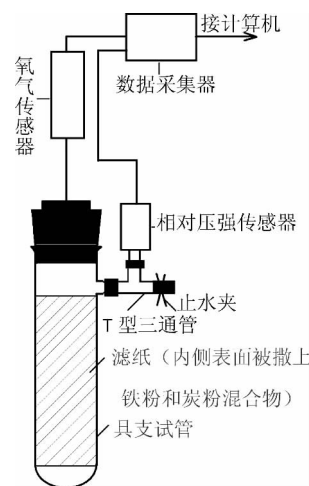


图 2 实验装置图

表 3 用 $L_9(3^4)$ 表安排的三因素三水平试验表

试验号	1 铁粉/g	2 炭粉/g	3 $c(NaCl) / (mol/L)$	时间/s	相对压强/kPa
1	1.5	0.5	0.1	1655	-19.24
2	1.5	1.0	1.0	474	-17.47
3	1.5	2.0	饱和	220	-14.76
4	2.0	0.5	1.0	1468	-19.86
5	2.0	1.0	饱和	646	-18.41
6	2.0	2.0	0.1	431	-18.10
7	2.5	0.5	饱和	3237	-19.14
8	2.5	1.0	0.1	608	-17.32
9	2.5	2.0	1.0	182	-14.84

3 探究分析

3.1 数据分析

分析表 3 的数据可知, 不同质量的铁粉和炭粉混合、不同浓度的 NaCl 溶液, 消耗 O_2 的速度不一, 故按教材方案实验时看到的现象就不一了。对

于导管内液面低于试管内液面, 还因为在组装仪器的过程中, 不管是先塞紧橡胶塞还是先插入夹上止水夹的导管, 都会使导管内液面下降, 造成水柱上升距离增加^[3]。表 3 中相对压强值均为负值, 说明反应体系中有气体参与反应, 从 O_2 含量的变化说明消耗的是 O_2 , 即发生吸氧腐蚀。实验测得相对

压强各值略有差异,且耗时越短相对压强变化越小。这可能一方面由于吸氧腐蚀放热对压强有影响,且不同条件下反应放出的热量不一;另一方面由于每次从混合物撒入滤纸到夹上止水夹所需的操作时间大致相同,但不同条件反应快慢不同,即在夹上止水夹的时候 O_2 的含量就已经不一致了。通过比较初始阶段测量到的 O_2 含量值也证实了这点。

表 4 考察指标分析计算表

计算值	因素		
	A 铁粉/g	B 炭粉/g	C $c(NaCl) / (mol/L)$
K_1	2349	6360	2694
K_2	2545	1728	2124
K_3	4027	833	4103
$k_1 = K_1/3$	783	2120	898
$k_2 = K_2/3$	848.3	576	708
$k_3 = K_3/3$	1342.3	277.7	1367.7
$R = k_{\max} - k_{\min}$	559.3	1842.3	659.7
备注	把各因素中所有对应水平 1 的指标(时间)相加,就得到该因素的 K_1 值。 K_2 、 K_3 的计算类似。		

由表 4 的结果分析可知,跟 B 对应的 R 最大,表明炭粉的质量对消耗完 O_2 的时间影响最大,氯化钠溶液的浓度和铁粉的质量影响次之。联系表 3 也可发现,当铁粉质量相同时,无论氯化钠溶液浓度如何,都是炭粉的质量越大耗时越短。这可能一方面由于炭粉具有较好的吸附作用;另一方面由于增加炭粉的质量,即增加炭粉的颗粒数,从而导致铁和碳之间形成的微小原电池数量增多。反之,在试验 1、4、7 中铁粉与炭粉的质量比分别是 3:1、4:1、5:1,其相应耗氧时间都比较长。由此实验说明教材中“向还原铁粉中加入少量的炭粉”的表述不妥,实验现象不佳的主因也在于此。

3.2 条件分析

由表 4 中各因素的 $k_{\min}$ 找出铁粉为 1.5 g、炭粉为 2.0 g、NaCl 溶液为 1.0 mol/L 是较好的反应条件组合,经再次实验测得此条件的耗时为 187 s,但比试验中耗时最短的方案 9 略多些。这是由于找出的 A、B 两因素最佳点都在试验范围的边界,应扩大范围进一步进行试验,寻求更佳的条件组合。因增加铁粉质量有利于提高吸氧腐蚀的速率,故以铁粉为 2.0 g 做对比实验,结果见表 5。

表 5 寻求铁粉、炭粉最佳用量的对比实验

试验号	铁粉/g	炭粉/g	$c(NaCl) / (mol/L)$	时间/s
10	2.0	2.0	1	212
11	2.0	2.5	1	162
12	2.0	3.0	1	184

比较试验 10、11,增加炭粉质量缩短耗时;比较试验 11、12,增加炭粉质量反而增加耗时。这说明对于一定量的铁粉,炭粉并非越多越好。可能因为过多的炭粉不仅没有参与形成铁和碳的微小原电池,反而覆盖在已经形成的微小原电池上,阻碍了空气中的 O_2 向反应界面的扩散。

对于选出的 NaCl 溶液为何不是饱和溶液? 1.0 mol/L 又是不是最佳浓度呢? 笔者又做了一组对比实验,结果见表 6。

表 6 寻求 NaCl 溶液最佳浓度的对比实验

试验号	铁粉/g	炭粉/g	$c(NaCl) / (mol/L)$	时间/s
13	2.0	2.5	0.5	206
14	2.0	2.5	1.5	162
15	2.0	2.5	2.0	173
16	2.0	2.5	饱和	203

表 5 和表 6 中实验对比发现 NaCl 溶液浓度在 1.0 mol/L 和 1.5 mol/L 时耗时同为最小。当浓度小于 1.0 mol/L 时,耗时随 NaCl 溶液浓度的增加而减少,此时 NaCl 溶液除起着电解质溶液的作用外,还由于 Cl^- 的增加促进了阳极反应所造成的。但随着 NaCl 溶液浓度的增加 O_2 的溶解度降低^[4],而 O_2 需要溶解在水膜中才能参与原电池反应,所以当 NaCl 溶液浓度大于 1.5 mol/L 时腐蚀耗时反而增加。

综上所述,最佳反应条件组合为铁粉 2.0 g、炭粉 2.5 g、NaCl 溶液 1.0 mol/L。另外,实验发现若再增加铁粉质量也会再缩短耗时,但所需炭粉也更多,对于所用滤纸的表面来说,已不能再吸附更多的反应混合物,且此反应条件下耗时为 162 s,已能满足教与学的实验要求。

4 探究建议

4.1 最佳方案

用 1.0 mol/L 氯化钠溶液 3 mL 湿润紧贴具支试管内壁的滤纸,在滤纸的 3 个侧面分别滴 2 滴酚酞溶液、0.1 mol/L KSCN 溶液、0.1 mol/L $K_3[Fe(CN)_6]$ 溶液。将 2.0 g 铁粉和 2.5 g 炭粉混合均匀,边抖动称量纸上的混合物边转动倾斜的具支试管,使其均匀撒入在具支试管内壁的滤纸上。

按图 2 组装好仪器。观察 O_2 含量和相对压强的变化以及试管内壁滤纸上的现象。

4.2 实验现象与解释

如图 3 所示, O_2 含量在 162 s 内从最初的 21% 逐渐下降到 0, 相对压强降到 -15.4 kPa, O_2 含量和相对压强的变化曲线相似, 说明具支试管内减少的气体是 O_2 , 发生了铁的吸氧腐蚀。实验中观察到滤纸上颜色的变化: 滴有酚酞溶液的部位显红色, 证明有 OH^- 生成, 即接受电子的是溶液中的 O_2 而不是 H^+ ; 滴有 KSCN 溶液的部位没有显红色, 证明没有 Fe^{3+} 生成; 而滴有 $K_3[Fe(CN)_6]$ 溶液的部位出现蓝色, 证明有 Fe^{2+} 生成; 其他部位出现墨绿色并逐渐变成斑状褐色, 说明生成了 $Fe(OH)_2$ 进一步被 O_2 氧化成 $Fe(OH)_3$ 。用手触摸具支试管外壁, 能感到具支试管温度明显上升, 具支试管上部无滤纸处的内壁可以看到小水珠, 说明 $Fe(OH)_3$ 脱去一部分水生成 $Fe_2O_3 \cdot nH_2O$, 进而形成铁锈。

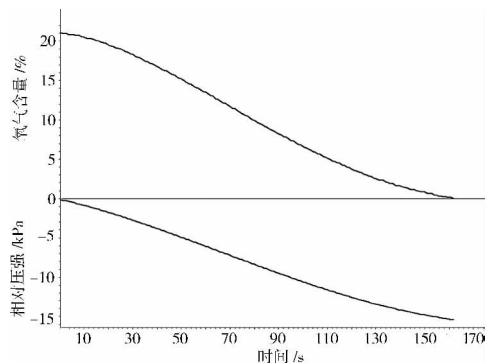


图 3 氧气含量和相对压强随时间的变化曲线

5 探究意义

(1) 创新化。在不断发现问题、解决问题的

探究过程中充分运用了创新的方法和技术。例如巧妙地利用滤纸作为反应载体, 既保证具支试管内壁受浸润的程度一样, 又使反应混合物能均匀吸附在滤纸上从而增加反应物的接触面积, 还可用酚酞溶液、KSCN 溶液、 $K_3[Fe(CN)_6]$ 溶液滴在滤纸上检验反应产物。

(2) 数字化。传统实验是给学生宏观认识, 而数字化实验系统的随时可视性以及动态变化, 让学生观察实验现象更形象生动、具体直观。用氧气传感器测量体系中的 O_2 含量变化, 让学生看到了名副其实的吸氧腐蚀。

(3) 最佳化。用正交试验法进行定量研究, 找出最佳的反应条件组合。在短时间内实现钢铁在自然界中缓慢的吸氧腐蚀现象, 用实验解决了学生困惑, 促进了学生对吸氧腐蚀原理的学习。同时探究发现了教材中“向还原铁粉中加入少量的炭粉”是实验现象不佳的主因, 也打破了“对于同一种电解质溶液, 电解质溶液浓度越大, 金属腐蚀越快”^[5]的错误认识, 从而完善了吸氧腐蚀实验的研究^[6-7]。

参 考 文 献

- [1] 王祖浩. 普通高中课程标准实验教科书: 化学反应原理. 第 4 版, 南京: 江苏教育出版社, 2009: 23-24
- [2] 郑长龙. 化学实验教学论. 北京: 高等教育出版社, 2002: 120-121
- [3] 但世辉, 李斌. 化学教学, 2012 (5): 63
- [4] 周枫, 赵晓栋, 施勤龙等. 科学时代, 2010 (4): 69-70
- [5] 贝帮洪. 中学化学, 2005 (3): 18
- [6] 罗仁达. 化学教育, 2014, 35 (3): 82
- [7] 刘昌华, 刘婷玉. 化学教育, 2012, 33 (11): 90