



高中化学 是什么

高 杰 徐晓斌 金 戈 著

清华大学出版社
北京

版权所有,侵权必究。举报:010-62782989, beiqinquan@tup.tsinghua.edu.cn。

图书在版编目(CIP)数据

高中化学是什么 / 高杰, 徐晓斌, 金戈著. -- 北京: 清华大学出版社,
2026. 4. -- ISBN 978-7-302-71514-6
I. G634.83
中国国家版本馆 CIP 数据核字第 2026W1Z530 号

责任编辑: 胡洪涛

封面设计: 邵一峰

责任校对: 薄军霞

责任印制: 刘 菲

出版发行: 清华大学出版社

网 址: <https://www.tup.com.cn>, <https://www.wqxuetang.com>

地 址: 北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编: 100084

社 总 机: 010-83470000 邮 购: 010-62786544

投稿与读者服务: 010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈: 010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者: 涿州汇美亿浓印刷有限公司

经 销: 全国新华书店

开 本: 145mm×210mm 印 张: 9.625 字 数: 267 千字

版 次: 2026 年 6 月第 1 版 印 次: 2026 年 6 月第 1 次印刷

定 价: 65.00 元

产品编号: 111922-01

高中化学,作为衔接初中化学启蒙与大学理科深造的核心枢纽,是理科学习生涯中承上启下的关键学科,承载着传授科学本质、培育核心思维、塑造科学精神的重要使命。它既是解码物质世界运行规律的钥匙,也是连接基础理论与生产实践的桥梁,更是落实立德树人根本任务、培养创新人才的重要载体。在这个阶段,大家将告别初中阶段对化学现象的感性观察与浅层记忆,逐步深入物质的微观结构,从核外电子的排布规律到化学键的成键,从化学反应的能量变化到平衡移动的内在逻辑,从无机世界的元素周期律到有机分子的结构与转化,高中化学的学习将引领大家走进一个更严谨、更系统、更具思辨性的科学天地。

学习高中化学不仅仅是一门学科知识的积累,更是一种科学思维的锤炼与科学素养的培育。它训练了学生的逻辑推理能力、辩证思维能力和问题解决能力,这些能力不仅是学好化学的关键,更是在日常生活和未来学习、工作中不可或缺的核心素养。通过高中化学的学习,大家将逐步构建起系统的化学知识框架,理解化学学科的本质,掌握科学的探究方法,为接下来更深层次的化学学习、其他理科门类的深造,乃至终身学习奠定坚实的基础,真正实现从“知其然”到“知其所以然”的跨越。

本书由北京四中化学教研组多名一线教师结合教育实践经验与创新人才培养经验编写而成,采用“深入浅出、兼顾科普与实用”的风格,既区别于传统教辅的刷题导向,也不同于纯科普书籍的理

论化倾向,而是精准贴合高中学生的认知发展规律与学习需求。本书涵盖但不限于以下三个方面的核心内容:高中化学核心知识的系统解析、化学思维与方法的提炼、高中化学学习与应试的科学指导。

对于高中化学核心知识的系统解析,本书跳出了教材章节的局限,站在全局视角俯瞰整个高中化学体系,帮助读者理清知识的来龙去脉与内在关联,而非孤立记忆零散知识点。例如,在学习“沉淀溶解平衡”时,我们由生活中真实的案例引入,带领学生迁移化学平衡和水溶液中的平衡问题,来系统认识沉淀溶解平衡中沉淀的生成、溶解和转化问题,让抽象的平衡原理变得可感可知;在讲解元素及其化合物时,我们以元素周期表为线索,串联起钠、铝、铁、氯、硫等常见元素的性质,让大家理解“结构决定性质、性质决定用途”的化学逻辑,实现知识的贯通与整合。这种讲解方式,既兼顾了科普的趣味性,又融入了科学史的相关视角,让大家在学习知识的同时,感受化学学科的发展历程与科学魅力。

高中化学思维与方法的提炼,不仅局限于具体知识点的应用,更注重引导大家建立化学学科的核心思维模式。例如,在讲解化学反应原理时,我们不仅介绍化学平衡、电离平衡的基本规律,更引导大家学会用“平衡思想”“守恒思想”分析问题,理解工业生产中化学反应调控的内在逻辑;在梳理有机化学知识时,我们以官能团为核心,串联起烃、烃的衍生物、高分子化合物的性质与转化,帮助大家掌握“分类归纳、类比迁移”的学习方法,打破不同模块知识的壁垒,实现思维的提升。

关于高中化学学习与应试的科学指导,本书立足学生的实际需求,兼顾准高一、高二、高三不同学段的学习特点。对于准高一学生,本书帮助大家快速了解高中化学与初中化学的区别,建立对高中化学的整体认知,平稳度过衔接期;对于高二、高三学生,本书重点指导大家深化对核心知识的理解,掌握构建化学知识体系的方法,明确高三复习的规划与重点。

化学是一门充满魅力的学科,它藏着星辰大海的物质起源,藏

着衣食住行的科学奥秘,更藏着人类探索未知的科学精神。希望同学们在高中化学的学习旅程中,时常翻开这本《高中化学是什么》,既能收获扎实的知识与实用的方法,也能发现化学学科的理性之美与应用价值,激发探索科学世界的热情,不断提升自身的化学素养与科学思维,在未来的道路上用化学的力量创造更多可能。

本书由高杰、徐晓斌、金戈总体设计和构思,高杰统稿。各章节编写工作分工如下:

高杰(8、20)

徐晓斌(12~17、21~23)

金戈(24~28)

孙博勋(4~7)

尹琛(9、10)

王晴飞(18、19)

刘伟(1)

余洁(2)

杨利军(3)

叶长军(11)

北京四中 高杰 徐晓斌

2026年5月

第一部分	元素世界探秘	1
01	常见的金属元素	4
	第1节 钠元素：从厨房到实验室的奇妙旅程	4
	第2节 铝元素：从易拉罐到航天器的华丽蜕变	12
	第3节 铁元素：从远古兵器到现代文明的钢铁脊梁	23
	第4节 铜元素：从古老钱币到5G时代的导电传奇	32
02	常见的非金属元素	43
	第5节 氯元素：从战场毒气到生命电解质的救赎故事	43
	第6节 硫元素：从火山喷发到工业多面手的进阶之路	48
	第7节 氮元素：从空气污染物到明星分子的双重身份	57
	第8节 硅元素：从沙滩砂砾到芯片大脑的时代跨越	67
03	解码元素化合物的三把钥匙	74
	第9节 离子反应：微观世界的奇妙邂逅	74
	第10节 氧化还原反应：电子的旅行	82
	第11节 元素周期表：元素的基因图谱	89
第二部分	带你了解化学反应原理	103
01	化学反应中的能量变化	104

	第 12 节 化学能与热能	105
	第 13 节 化学反应与电能	112
02	化学反应速率与化学平衡	139
	第 14 节 化学反应速率	140
	第 15 节 化学平衡	149
	第 16 节 化学反应的方向	172
	第 17 节 化学反应的调控	176
03	电解质溶液中的离子反应	185
	第 18 节 电离平衡	185
	第 19 节 盐类的水解	193
	第 20 节 沉淀溶解平衡	199
第三部分	揭秘物质结构与性质	209
	第 21 节 原子结构与元素性质	210
	第 22 节 分子结构与性质	221
	第 23 节 晶体的结构与性质	234
第四部分	多彩的有机世界	249
	第 24 节 烃	251
	第 25 节 烃的衍生物	265
	第 26 节 生物大分子与合成高分子	276
第五部分	高中化学怎样学	287
	第 27 节 如何构建高中化学知识体系	288
	第 28 节 高三化学复习的规划和方法	293

第一部分

元素世界探秘



亲爱的同学们,本部分将带你一起探索那些构成我们的世界的奇妙元素——从厨房里的食盐到手机中的芯片,从呼吸的空气到璀璨的宝石,都是由元素构成的。元素不仅是化学课本上的符号,更是我们生活中无处不在的伙伴。

化学的历史,就是人类认识元素、利用元素的历史。早在古代,人们就已经开始使用某些元素及其化合物。古埃及人用钠的化合物制作玻璃和肥皂;我国古代的炼丹术士在追求长生不老药的过程中,意外发现了许多化学反应;而阿拉伯炼金术士为我们留下了“alkali”(碱)这个词,它源自阿拉伯语中的“al-qaly”,意为植物灰。18世纪末,拉瓦锡推翻了燃素说,开启了现代化学的新纪元。随后,门捷列夫创造了元素周期表,为元素世界绘制了一幅精美的“地图”。从此,人类对元素的认识进入了快车道。

让我们来看看这些元素是如何在我们的日常生活中奏响化学交响曲的。

钠(Na):清晨,你用含氟化钠的牙膏刷牙;早餐时,你在食物中加入氯化钠(NaCl ,食盐的主要成分)调味。

铝(Al):你的易拉罐饮料瓶、教室的窗框、家里的厨房箔纸,都是铝的杰作。这种轻便耐用的金属制品,是现代生活的必需品。

铁(Fe):从古代的铁器到现代的钢铁大厦,铁元素见证了人类文明的进步。厨房的铁锅,你骑的自行车,都离不开铁。

铜(Cu):古老的青铜器,现代的电线,甚至你体内的某些酶,都含有铜元素。它是电的良好导体,也是生命必需的元素。

硅(Si):你手中的智能手机,教室里的电脑,家中的光纤网络,都依赖于硅元素。它是信息时代的基石。

氮(N):空气中78%是氮气(N_2)。它不仅是我们呼吸的“背景”,还是制造化肥的重要原料,支撑着现代农业。

硫(S):从古代的火药到现代的硫酸(H_2SO_4),硫元素在化学工业中扮演着重要角色。你用的火柴、某些药物中都含有硫。

氯(Cl):自来水中的消毒剂、游泳池的清洁剂,都是含氯化合物。它保护我们免受有害微生物的侵害。

这些元素不仅是过去的见证者,更是未来的开拓者。钠离子(Na^+)电池可能成为下一代储能设备^①,铝基复合材料正在航空航天领域大显身手,铁基超导体有望革新电力传输,硅基量子计算机可能开启计算新纪元,氮化镓半导体正在推动 5G 技术的发展……^②

亲爱的同学们,当你学习这些元素的知识时,你不仅在了解化学,更是在认识我们生活的世界,展望未来的无限可能。现在,让我们开始这段奇妙的元素之旅吧!在这段旅程中,你将会发现,化学不是枯燥的公式和方程式,而是一个充满惊奇和创造力的世界。这个世界就在你的身边,在你的生活中,在你的未来里。

准备好了吗?让我们一起打开元素世界的大门,开始这段精彩的化学探险吧!

① CHEN X, LI Y, WANG Z. Sodium-Ion Batteries: A Promising Alternative for Energy Storage[J]. Advanced Energy Materials, 2021, 11(23): 2100456.

② HARRIS P. Gallium Nitride Semiconductors in 5G Technology[J]. Electronics Today, 2021, 45(7): 78-85.

第1节 钠元素：从厨房到实验室的奇妙旅程

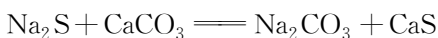
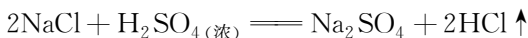
一、钠元素的发现

1. 早期的邂逅

在人类历史的长河中，钠元素早已悄然融入我们的生活。古埃及的工匠们，在尼罗河畔利用天然碳酸钠（主要成分 $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ）制作出精美的玻璃器皿。在玻璃制造过程中，碳酸钠（ Na_2CO_3 ）作为助熔剂，能够降低玻璃原料的熔点，促进玻璃的形成，那闪耀着神秘光泽的玻璃，便是钠元素早期的杰作。而在遥远的古罗马，人们用草木灰（主要成分碳酸钾，即 K_2CO_3 ）清洗羊毛衣物，却未曾知晓其中钠元素的奥秘—— Na_2CO_3 在水中水解呈碱性，也可促进油脂的水解，从而达到清洁的效果。那时的人们，就像在黑暗中摸索的行者，与钠元素频繁接触，却始终未能揭开它神秘的面纱。

2. 科学的曙光

1789年，吕布兰法的出现，让 Na_2CO_3 走进了千家万户，改变了人们的生活方式。吕布兰法以 NaCl 、 H_2SO_4 、煤[含碳(C)]和石灰石（碳酸钙， CaCO_3 ）为原料，经过一系列化学反应制备 Na_2CO_3 ，其主要反应过程如下：



1807年，是钠元素发现史上具有里程碑意义的一年。英国化学家汉弗里·戴维（Humphry Davy, 1778—1829），如图1-1所示，在伦敦皇家研究院的实验室里，利用伏打电堆产生的强大电流，对熔融的NaOH进行电解^①。其电解原理基于离子在电场中的定向移动， Na^+ 在阴极得到电子被还原为Na，电极反应式为 $\text{Na}^+ + \text{e}^- \longrightarrow \text{Na}$ ；



图 1-1 汉弗里·戴维

氢氧根离子(OH^-)在阳极失去电子被氧化，电极反应式为 $4\text{OH}^- - 4\text{e}^- \longrightarrow 2\text{H}_2\text{O} + \text{O}_2 \uparrow$ 。当电流通过那看似普通的液体时，奇迹发生了！电极末端出现了一颗颗银白色的金属珠，它们欢快地跳动着，仿佛在向世界宣告自己的诞生。这一刻，整个实验室“沸腾”了，人类终于成功捕获了钠元素，就像在黑暗中点亮了一盏明灯，开启了对钠元素深入探索的大门。

戴维将新元素命名为“sodium”，源自拉丁语“soda”（苏打），其化学符号“Na”则取自拉丁语“natrium”，这一命名方式体现了钠与天然碱的紧密关联。钠元素的发现，不仅是戴维个人的伟大成就，更是化学科学发展的重要转折点。它让人们开始意识到，这些看似普通的物质中，竟隐藏着如此神奇的元素，为后续的化学研究奠定了坚实的基础。

3. 发展的脉络

自钠元素被发现后，科学家对它的研究热情越发高涨。英国

^① DAVY H. On some new phenomena of chemical changes produced by electricity, in particular the decomposition of the fixed alkalies, and the exhibition of the new substances constituting their bases; and on the general nature of alkaline bodies[J]. Philosophical transactions of the royal society of London, 1808, 98: 1-44.

人卡斯特纳在 1890 年用戴维的方法制备金属钠,他在电极之间设置镍网作隔膜以分离电解产物,防止生成的钠趋向阳极及在阳极所生成的水分进入阴极室(图 1-2)。此法的缺点是原料采用较纯的烧碱,因此成本比较高。1921 年,美国人唐斯以 NaCl 为原料,将 NaCl 与氯化钙(CaCl_2)按质量比约 1 : 2 混合,将 NaCl 熔点降低至 $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ (纯 NaCl 熔点 $801\text{ }^{\circ}\text{C}$),在 $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下电解。唐斯法因成本低、效率高,一段时间内成为现代工业生产钠的主要方法。

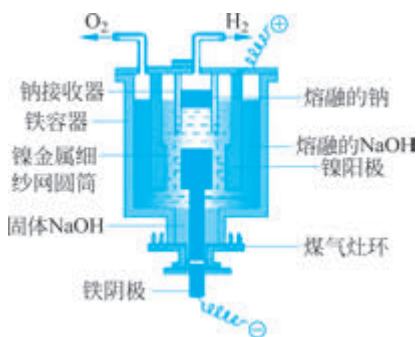


图 1-2 电解熔融 NaOH 制取钠单质装置示意图

从金字塔建造者使用的泡碱布袋,到核反应堆的高效导热剂(钠钾合金,常温下为液态),钠元素始终伴随着人类文明的发展,见证着科学的进步。

二、钠的奇妙性质

1. 金属钠的真面目

在化学实验室里,金属钠是一位极具个性的“明星”。当老师用小刀轻轻切开钠块时,你会看到切口处闪烁着耀眼的金属光泽,这是由于金属晶体中存在自由电子,当光线照射时,自由电子吸收并重新发射光线,呈现出金属光泽。然而,仅仅几分钟后,这闪亮的切口就会逐渐变得灰暗,如同被一层神秘的面纱笼罩。这是因为钠与空气中的氧气(O_2)在常温下迅速发生反应,生成了灰白色

的氧化钠(Na_2O), 化学反应方程式为 $4\text{Na} + \text{O}_2 = 2\text{Na}_2\text{O}$, 这一现象充分展示了钠的活泼性。

为了防止钠与空气和水接触发生反应, 我们通常将钠保存在煤油里。因为钠的密度(0.97 g/cm^3)比煤油(密度约为 0.8 g/cm^3)大, 比水(密度为 1 g/cm^3)小, 它会乖乖地沉在煤油底部, 与空气和水隔绝。在工业上, 对钠进行操作时, 必须在水无氧的环境中进行, 就像给钠打造了一个专属的“无菌空间”, 通常采用充入惰性气体(如氩气)的手套箱来实现这一操作环境。

2. 钠与水的奇妙反应

当我们把钠放进加有酚酞的水中时, 一场精彩绝伦的化学表演就开始了。钠就像一个调皮的孩子, 在水面上快速地乱窜, 同时熔化成一个闪亮的小球, 发出嘶嘶的声响, 最后留下一杯红色的溶液(图 1-3)。这一系列有趣的现象, 背后隐藏着怎样的化学奥秘呢?



图 1-3 金属钠与滴加了酚酞的水反应

钠漂浮在水面上, 说明它的密度比水小; 金属钠在与水反应的过程中迅速熔化, 这表明钠与水的反应是放热反应, 并且金属钠的熔点(97.7°C)较低; 钠在水面上乱

窜, 是因为反应放出了气体, 根据元素守恒及氧化还原反应的得失电子守恒规律, 我们可以推断出该气体为氢气(H_2), 反应的离子方程式为 $2\text{Na} + 2\text{H}_2\text{O} = 2\text{Na}^+ + 2\text{OH}^- + \text{H}_2 \uparrow$; 溶液变红, 则说明反应生成了碱性物质, 即 NaOH , 因为酚酞在碱性溶液中会变红。通过这个反应, 我们可以更直观地了解钠单质的化学性质, 感受化学的神奇魅力。

3. 钠的“变身”魔法

如果你仔细观察久置的金属钠, 会发现其表面常常覆盖着一

层淡黄色的物质,这可不是普通的 Na_2O ,而是过氧化钠(Na_2O_2)。 Na_2O_2 是 Na_2O 在空气中被缓慢氧化的产物,化学反应方程式为 $2\text{Na}_2\text{O} + \text{O}_2 = 2\text{Na}_2\text{O}_2$; 同时,它也是金属钠在空气中燃烧得到的产物,反应方程式为 $2\text{Na} + \text{O}_2 \xrightarrow{\text{点燃}} \text{Na}_2\text{O}_2$ 。这一现象体现了温度对化学反应的重要影响,在高中化学中,反应条件对于化学反应的调控是一个非常重要的知识点。

Na_2O_2 中的氧元素为 -1 价,这种特殊的化合价赋予了它强大的氧化性。它就像一个超级漂白剂,能轻松破坏色素的分子结构,让有色物质瞬间变得洁白无瑕。而且, Na_2O_2 还有一个神奇的本领,当它遇到水和二氧化碳(CO_2)时,会迅速反应,释放出 O_2 。与水反应的化学方程式为 $2\text{Na}_2\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} = 4\text{NaOH} + \text{O}_2$; 与 CO_2 反应的化学方程式为 $2\text{Na}_2\text{O}_2 + 2\text{CO}_2 = 2\text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{O}_2$ 。这一特性使得它在潜艇中发挥着关键作用,它作为换气剂,为潜艇里的人员提供呼吸所需的 O_2 ,保障大家的生命安全。

三、钠在元素周期表中的独特位置

1. 元素周期表中的“座位”

钠元素处于元素周期表的第 3 周期 I A 族,此位置决定了其独特的化学性质。钠原子的核外电子排布为 $1s^2 2s^2 2p^6 3s^1$,其最外层仅有一个电子,该电子在化学反应中具有较高的活性,易于失去。失去电子后,钠原子形成与氖(Ne)相同的稳定电子层结构,在化合物中通常呈现 $+1$ 价。为了更直观地了解钠在元素周期表中的位置,我们来看下面这张元素周期表的局部(表 1-1)。

表 1-1 第 3 周期部分元素

周期	IA	II A	III A	IV A	VA	VI A	VII A	0
3	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	Ar

从表中可以清晰地看到钠的位置以及它与其他元素的关系。

2. 碱金属家族的一员

I A 族元素除氢(H)以外,都被称作碱金属元素,它们都具有一个共同的特征,即在化学反应中极易失去最外层的电子,达到稳定的稀有气体结构。钠作为碱金属家族的重要成员,充分展现了这一族元素的活泼性。

然而,氢原子虽同样仅具有一个最外层电子,但其失电子能力显著弱于碱金属元素。这归因于氢原子的原子半径极小[氢(H), 0.037 nm; 锂(Li), 0.152 nm],使得原子核对外层电子的束缚作用更为显著。具体表现为,氢原子的第一电离能(1312 kJ/mol)远高于碱金属元素(如钠的第一电离能为 496 kJ/mol),并且第一电子亲和能也大于碱金属元素。综合考量这两组能量数据可知,氢元素在化合物形成过程中更倾向于吸引电子,此特性与高中阶段所学的电负性概念相符。氢元素的电负性(2.1)大于碱金属元素(如钠的电负性为 0.9),因此在氢化钠(NaH)中,Na 呈现+1 价,而 H 呈现-1 价。从这个例子中可以看出,核外电子数相同的元素,其化学性质不一定相似,还需要考虑原子半径等其他影响因素,这些现象体现了化学学科的复杂性和多样性,也让我们对元素周期律有了更深入的理解。

四、钠的广泛应用

1. 钠离子电池的潜力

在能源领域,钠离子电池正逐渐崭露头角。与我们熟悉的锂离子电池相比,钠离子电池具有独特的优势。目前制得的钠离子电池的能量密度低于锂离子电池,即单位体积或质量的电池储存的电量较少,导致钠离子电池在体积和质量上相对较大,但钠元素在地壳中的储量丰富,约占 2.74%,是锂元素储量的数千倍,这使得钠离子电池的成本更低。此外,钠离子电池还具有安全性高、低温性能好、快充能力强等优点。在一些对电池能量密度要求相对较低、对安全性和成本更为敏感的应用场景,如大规模电力储能领

域,钠离子电池具有广阔的应用前景。它可以储存太阳能、风能等可再生能源产生的电能,实现电力的稳定供应与调配。

为了更直观地比较钠离子电池和锂离子电池的性能,我们来看下面这张表格(表 1-2)。

表 1-2 钠离子电池和锂离子电池的性能比较

电池类型	能量密度/ (W·h/kg)	成本/ (元/W·h)	安全性	低温性能	快充能力
锂离子电池	100~260	0.6~1.2	一般	较差	较好
钠离子电池	50~150	0.3~0.8	高	好	强

从表中可以看出,钠离子电池在成本、安全性和低温性能等方面具有明显优势,随着技术的不断进步,有望在未来的能源市场中占据重要地位。

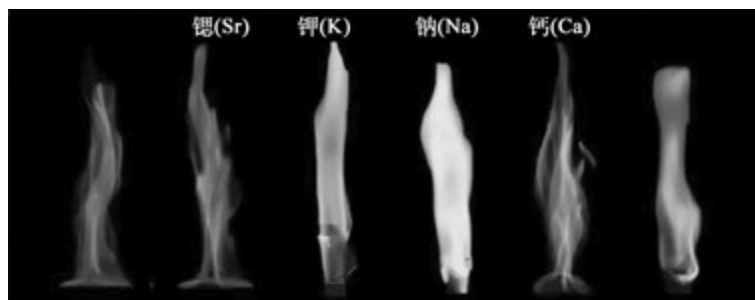
2. 钠灯的独特光芒

在照明领域,钠灯以其独特的黄色光芒备受青睐。钠灯能够发出穿透性强的黄色光,这一现象源于钠原子的电子跃迁。当钠原子吸收外来能量(如电能、光能或热能)时,原子中的电子会从低能量的基态($3s^1$)跃迁到高能量的激发态(如 $3p$)。由于激发态不稳定,电子会迅速从高能量的 $3p$ 轨道跃迁回低能量的 $3s$ 轨道,在此过程中,根据能量守恒定律,电子将以光子的形式释放出能量,并且释放的光子波长恰好为 589.3 nm ,对应于黄色光。这就是金属焰色试验的原理,不同金属原子中各原子轨道间的能量差不同,因此电子跃迁后放出的光子的能量也不同,呈现出不同的颜色,黄色是钠元素焰色试验的特征颜色(图 1-4)。

这一特性不仅应用于照明领域,还在天文学研究中发挥了重要作用。天文学家通过分析天体发出的光谱中是否存在钠元素特有的黄色谱线,来判断遥远星球上是否存在钠元素,这为探索宇宙物质组成提供了重要依据。

3. 钠盐在生活中的应用

在日常生活中,钠盐无处不在。最常见的钠盐就是食用



彩图 1-4

图 1-4 不同金属的焰色试验

盐——NaCl,它是我们餐桌上必不可少的调味品,不仅能让食物变得美味,还在人体中发挥着重要作用。成年人每日适宜的食盐摄入量为 3~5 g,NaCl 在人体生理过程中发挥着多种重要作用。它能够维持细胞内外的渗透压平衡,确保细胞的正常形态和功能;参与神经信号的传导,保证神经系统的正常运作(图 1-5);氯离子(Cl^-)是胃酸[主要成分是盐酸(HCl)]的重要组成部分,有助于食物的消化;钠离子与碳酸氢根(HCO_3^-)结合形成碳酸氢钠(NaHCO_3),中和代谢产生的酸性物质(如乳酸),调节体液的酸碱平衡。

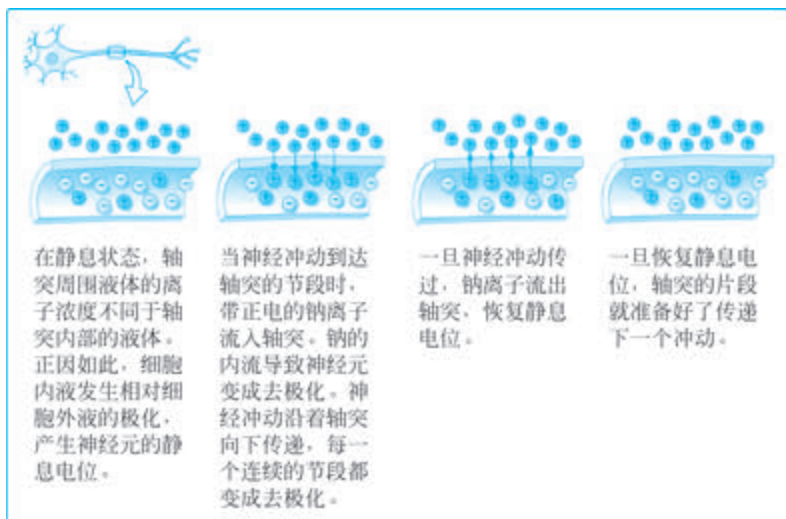


图 1-5 钠离子参与神经信号的传导

除 NaCl 外, Na_2CO_3 和 NaHCO_3 也是常见的钠盐。 Na_2CO_3 , 俗称纯碱、苏打, 常用于油污的去除, 在厨房中作为去污剂使用。其去污原理是 Na_2CO_3 在水中水解呈碱性, 油脂在碱性条件下发生皂化反应, 生成可溶于水的高级脂肪酸钠盐和甘油。在纺织工业中, Na_2CO_3 用于纤维的脱脂、脱胶以及印染过程中的固色和酸碱度调节; 在造纸工业中, Na_2CO_3 用于稳定纸浆的 pH, 提高纸张的质量和生产效率。

NaHCO_3 , 俗称小苏打, 它可以用于治疗胃酸过多, 通过与胃酸中的 HCl 反应, 中和胃酸, 缓解胃酸过多引起的不适, 化学反应方程式为 $\text{NaHCO}_3 + \text{HCl} = \text{NaCl} + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$ 。同时, NaHCO_3 在受热时会分解产生 CO_2 气体, 这一特性使其成为焙制糕点时常用的膨松剂, 能够使糕点在烘焙过程中膨胀松软, 分解反应方程式为 $2\text{NaHCO}_3 = \text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$ 。

第 2 节 铝元素：从易拉罐到航天器的华丽蜕变

同学们, 你们知道吗? 我们日常使用的手机屏幕, 运动鞋的减震气囊, 甚至口香糖包装里, 都藏着一位“化学界的变形金刚”——铝元素! 这个地壳中含量第三的金属, “变身”本领令人惊叹, 既能化身轻量冠军翱翔天际, 又能变身为净水卫士守护生命之源, 还能在胃药里充当“酸碱中和大师”, 给卫星铸就“耐高温铠甲”。为什么铝元素在不同领域能有如此多的应用?

在本节, 你将化身“化学侦探”, 亲手完成会冒泡的铝箔实验、见证纳米铝粉的“自燃魔术”, 还能通过解密胃药标签上的化学方程式, 深入探索铝元素这些神奇特性背后的科学奥秘, 揭开它的神秘面纱。

一、铝的科学史：从帝王珍宝到太空金属

1. 被“封印”千年的神秘金属

在 18 世纪之前, 铝元素仿佛被施加了魔法, 始终藏匿在矿物

之中。古罗马人发现明矾 $[\text{KAl}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}]$ 具有止血的功效,却不知其中含有铝元素。对神秘金属热切渴望的炼金术士试图从矿物中提炼出铝,但由于氧化铝(Al_2O_3)熔点比铁还高,最终只能在烈火中得到玻璃状的残渣。直到 1754 年,德国化学家马格拉夫(A. S. Andreas Sigismund Marggraf, 1709—1782),如图 1-6 所示,从明矾中提取出白色 Al_2O_3 粉末,科学家才意识到,原来泥土里竟潜藏着一种未知的金属,铝元素也由此走进了人类的视野。



图 1-6 马格拉夫

2. 戴维的遗憾与维勒的突破

1808 年,发现钾钠钙元素的英国化学家戴维,试图用电解法从 Al_2O_3 溶液中分离出铝,当电流通过 Al_2O_3 溶液时,阴极处出现了金属颗粒,然而经过检验全都是杂质。直到 1827 年,德国化学家维勒另辟蹊径,采用还原法,将 Al_2O_3 气体导入熔融的钾中,终于得到了米粒大小的铝珠。维勒写信给朋友:“它轻得像羽毛,亮得像星星。”这些铝珠的出现,瞬间令整个欧洲为之沸腾。

3. 拿破仑的铝盔甲梦

1855 年,在巴黎世博会上,出现了引人注目的一幕,一块铝锭竟然与象征着无上尊贵的法国王冠并列展出,足以彰显当时铝在人们心中的珍贵地位。拿破仑三世不惜用重金支持炼铝,计划用铝打造士兵盔甲。然而当时生产 1 kg 铝需要燃烧 300 kg 木炭,其成本奇高,最终法国将军也只能戴着铝制胸针充当门面,真正的铝盔甲未能出现在战场上。

4. 两个青年的电解奇迹

1886 年 2 月 14 日(情人节),这个浪漫的日子意外成了铝工业发展历程中的一个重大转折点。美国大学生霍尔在简易的木棚实验室,将 Al_2O_3 溶解在熔化的冰晶石中,通电后得到了液态铝! 无独有偶,几乎在同一时期,法国工程师埃鲁也独立发明了相同的方

法。这对从未谋面的“电解法双子星”，使得铝的售价从 1 200 美元/kg 暴跌到 0.6 美元/kg。铝瞬间从一种稀世珍宝变成了能够广泛应用于各个领域的常见金属，进而为现代工业的蓬勃发展奠定了坚实基础。

5. 宇宙飞船与易拉罐

进入 20 世纪，从航空航天到日常消费领域，铝全方位改变了人类生活的每一个角落。20 世纪 30 年代，工程师们发现，将铜、镁等元素加入铝形成铝合金，其强度竟超过钢铁，成为制造飞机的理想材料。1969 年，探月成功的阿波罗飞船采用的燃料罐正是由铝合金制成。20 世纪 50 年代，铝制易拉罐的诞生改变了饮料等产品的包装形式，极大地推动了食品安全升级和生活便利性的提升(图 1-7)。



图 1-7 1959 年，艾马尔·克林安·弗雷兹发明了易拉罐

二、铝的原子结构：铝的“外交基因”

1. 电子排布图里的秘密

铝的电子排布图是理解铝原子结构、性质以及在元素周期表中位置的重要依据，它揭示了铝在化学反应中表现出的各种行为和特性的本质原因。

铝位于第 3 周期ⅢA 族，原子核外有 13 个电子，分层排布为 $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^1$ ，最外层电子处于 3s 和 3p 轨道，与同周期的其他

元素相比,其原子半径相对较大,使得原子核对最外层电子的吸引作用相对较弱,电子更容易参与化学反应,因此,最外层的3个电子决定了其化学特性。这3个电子既不像钠、镁那样容易全部失去,也不像硅那样倾向于完全共享,而是处于一种中间态。

铝在元素周期表中处于金属与非金属的过渡区域。左侧的钠、镁是典型的金属元素,而右侧的硅已呈现出较为显著的非金属特性,铝则兼具两者的部分特性,既能表现出金属的导电性和延展性,又能与非金属元素形成化合物,在化学性质上展现出独特的多样性。

铝的第一电离能为 578 kJ/mol ,比同周期的镁(737 kJ/mol)低,但远高于非金属元素,因此,铝在化学反应中具有独特性。其既能与酸反应生成 H_2 (如与 HCl 反应: $2\text{Al} + 6\text{HCl} = 2\text{AlCl}_3 + 3\text{H}_2 \uparrow$),又能与强碱溶液反应生成 H_2 (如与 NaOH 反应: $2\text{Al} + 2\text{NaOH} + 6\text{H}_2\text{O} = 2\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4] + 3\text{H}_2 \uparrow$)。铝原子在失去最外层的3个电子后,会形成稳定的 Al^{3+} 离子,而要进一步失去第4个电子,需要突破内层电子屏障,所需能量很高,因此铝在绝大多数化学反应中主要呈现+3价。

2. 元素周期律的活教材

在元素周期表这座化学大厦中,铝元素犹如一本生动翔实、内容丰富的“活教材”,淋漓尽致地展现了元素周期律的奥秘,为我们深入理解化学元素的性质递变规律提供了经典范例。

在第3周期元素中,从钠到铝,金属性呈现出逐渐减弱的趋势。这种差异在与水的反应中表现十分明显。钠极为活泼,遇冷水即发生剧烈反应;镁的活泼性相对较弱,须加热才能与水反应;而铝的化学性质相对稳定,几乎不与冷水反应。此外,它们的氧化物碱性也依次递减。 NaOH 在水溶液中能够完全电离出 OH^- ,具有很强的碱性;氢氧化镁 $[\text{Mg}(\text{OH})_2]$ 属于中强碱,碱性相对较弱;氢氧化铝 $[\text{Al}(\text{OH})_3]$ 则呈现出两性的特点,它既能与酸反应生成铝离子(Al^{3+}),又能与强碱反应生成 $[\text{Al}(\text{OH})_4]^-$ 。

同主族元素中,铝与硼同属ⅢA族,但两者的物理性质有显著的差异。硼是一种脆性非金属元素,其莫氏硬度高达9.5,硬度较大;而铝是延展性金属,莫氏硬度仅为2.75^①,相对较软。然而,有趣的是,两者的氧化物,Al₂O₃和B₂O₃却均具有两性,并且在古代都曾被用作助熔剂,这显示出同主族元素在某些化学性质上的相似性。

根据对角线规则,铝与位于第2周期ⅡA族的铍(Be)具有相似的化学性质。尽管相隔1个周期,但铍离子(Be²⁺)半径为0.027 nm,Al³⁺半径为0.039 nm,两者的电荷/半径比相近^②,使得它们的氢氧化物均具有两性。

三、单质铝：两性金属的智慧

1. 物理性质四重奏

通过与铁、铜的物理性质对比(表1-3),我们可以发现铝应用于众多领域的关键所在。

表 1-3 与铁、铜的物理性质对比

金属	密度/(g/cm ³)	导电性(以银作标准)	延展性	熔点/℃
铝	2.7	61	良好,仅次于金、银、铜	660.32
铁	7.86	17	良好	1 538
铜	8.96	99	优良	1 083.4

由于铝的密度远小于铁和铜,其在轻量化制造领域具有巨大的优势。2022年,北京冬奥会和冬残奥会的火炬“飞扬”采用了航天级铝合金材质,不仅实现了轻量化,还能保证火炬在传递过程中的稳定性,让火炬手能够更轻松地完成传递任务(图1-8)。

铝的导电性不如铜,但价格更为低廉。在高压电缆的应用中,

① 张祖德. 无机化学[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2008.

② 宋天佑,程鹏,徐家宁,等. 无机化学:上册[M]. 4版. 北京: 高等教育出版社, 2019.

相同质量的铝线和铜线相比,铝线的长度更长,能够覆盖更大的范围,还能在保证一定导电性能的前提下,大幅降低成本。此外,通过合理的设计和工艺改进,如采用钢芯铝绞线等结构,可以进一步提高铝电缆的强度和导电性,使其在电力传输中得到广泛应用。

铝具有良好的延展性,可以被加工成很薄的铝箔。铝箔具有相对致密的结构,能够有效地阻隔空气、水分和细菌,保持食物的新鲜度,防止食物变质。与铜、铁相比,铝箔更美观实用,因而在食品包装领域也得到了广泛应用。



图 1-8 北京冬奥会和冬残奥会火炬“飞扬”

2. 化学性质的双面人生

铝化学性质的两面性是由其原子结构和所处的化学环境决定的,在不同的条件下,铝会表现出不同的化学性质,这也是铝在各个领域有着广泛应用和独特地位的重要因素。

知道厨师为什么不用铝锅煮番茄吗? 因为时间久了,铝锅表面逐渐失去光泽,变得粗糙,还可能会出现一些小坑洼。其根本原因在于,番茄中含有多种有机酸,如柠檬酸、苹果酸等。当用铝锅煮番茄时,酸在溶液中会电离出氢离子(H^+), H^+ 具有氧化性,能够与铝发生氧化还原反应,铝原子失去电子变成 Al^{3+} 进入溶液,使得锅体表面被腐蚀。

当铝遇到浓 H_2SO_4 或浓硝酸(HNO_3)时,会立即“装睡”。这是由于铝原子会与浓酸发生反应,在铝表面迅速生成一层致密的 Al_2O_3 薄膜,这层 Al_2O_3 薄膜结构紧密,能够阻止浓 H_2SO_4 进一步与内部的铝发生反应,从而使铝“钝化”。利用这个特性,化工厂通常采用铝罐运输浓 HNO_3 ,既安全又节约成本(图 1-9)。

疏通下水道专业人员尝试将一些碱性物质(如 $NaOH$)倒入下水道,然后加入水,再放入铝片或铝箔,铝会与 $NaOH$ 溶液发生反应,反应过程中会产生大量的 H_2 ,同时放出热量, H_2 产生的压力



图 1-9 运输浓 HNO_3 的铝罐车

有助于将堵塞物冲走,释放的热量则有助于使管壁的油脂等物质熔化,从而达到疏通下水道的目的。上述反应过程中,铝首先与水反应生成 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 和 H_2 ,然后 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 再与 NaOH 反应生成 $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$ 和水。 $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$ 是铝与碱反应的重要产物,其生成需要具备一定的条件。首先必须在强碱性环境中,一般以 NaOH 溶液较为常见。只有在足够强的碱性条件下,铝与水反应生成的 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 才能进一步与 OH^- 反应,生成 $[\text{Al}(\text{OH})_4]^-$ 。其次必须有铝单质存在。铝是生成 $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$ 的关键物质,在上述反应中,铝在碱性条件下失去电子,经过一系列反应最终生成 $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$ 。

专业人员在利用该反应进行下水道疏通等操作时,会非常注意 H_2 的爆炸危险。 H_2 在空气中的爆炸极限范围是 $4.0\% \sim 75.6\%$ (体积分数)。当 H_2 与空气混合达到这个浓度范围时,遇到火源就会发生爆炸。所以在相关操作和实验中,需要保持通风,远离火源,合理控制铝和碱的用量,避免产生过多的 H_2 ,以降低安全风险。

3. 铝热反应:野外的金属焊接术

在铁路作业中,常利用铝热反应来进行钢轨的焊接等工作。铝热反应是铝粉与某些金属氧化物(如 Fe_2O_3)在高温条件下发生的剧烈氧化还原反应,反应时会放出大量的热,使生成的金属以液

态形式出现,同时伴随耀眼的光芒和飞溅的火花,就像“钢花雨”一样(图 1-10)。以铝与 Fe_2O_3 的反应为例,其化学反应方程式为

$$2\text{Al} + \text{Fe}_2\text{O}_3 \xrightarrow{\text{高温}} \text{Al}_2\text{O}_3 + 2\text{Fe}。$$


图 1-10 铁路作业中的“钢花雨”

在设计反应装置时,通常将铝粉和 Fe_2O_3 粉末均匀混合后放在纸漏斗中(纸漏斗内衬有镁条和氯酸钾),底部有一个小孔,下方放置盛有沙子的容器,用于承接反应生成的液态金属。当点燃镁条后,镁条燃烧产生的热量使氯酸钾分解产生 O_2 ,促进镁条更剧烈燃烧,进而引发铝热反应,反应产生的高温使生成的铁熔化,从漏斗底部小孔流到沙子中,从而完成焊接等工作。

四、铝的化合物：刚柔并济的舞台

1. 氧化铝：自然界的变形金刚

Al_2O_3 的“双面性”源于其晶体结构的多样性。从自然界中最坚硬的 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ (刚玉)到机械性能差、高温不稳定的 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$,共有 7 种常见的晶体结构。采用六方密堆积结构,氧离子层以 ABAB 序列排列, Al^{3+} 占据其中 2/3 的八面体空隙,这种致密排列使其莫氏硬度达到 9 级,仅次于钻石。人造蓝宝石手机屏正是利用了这一特性,在 2 000 $^{\circ}\text{C}$ 高温下熔融 Al_2O_3 ,通过垂直温度梯度法生长出的单晶 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$,其抗划伤性能是普通玻璃的 10 倍,但光线透过率仅降低 7 个百分点(原 92%,后 85%)。 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 则展现

出截然不同的特点,立方尖晶石结构中存在大量阳离子空位,形成3~5 nm的介孔结构,比表面积高达300 m²/g。这种“分子筛”特性使其成为汽车尾气净化器的核心载体,1 g γ -Al₂O₃ 可负载0.1 g 铂催化剂,在600 ℃高温下将CO转化为CO₂的效率达98%。

蓝宝石的主要成分是Al₂O₃,其晶体结构为 α -Al₂O₃,属于三方晶系。在该结构中,氧离子近似于六方最密堆积,Al³⁺则填充在由氧离子形成的八面体空隙和四面体空隙中。具体来说,每3个氧离子形成一个八面体空隙,两个Al³⁺占据其中的2/3八面体空隙,形成了稳定的晶体结构^①。这种紧密且规则的晶体结构赋予了蓝宝石许多优良的性能,如高硬度、高透明度、良好的化学稳定性等,使其成为手机屏等高端显示领域的理想材料。

为了验证Al₂O₃的两性,即既具有酸性又具有碱性,同学们可以设计以下实验。

(1) 与酸反应:取少量Al₂O₃粉末于一支试管中,向试管中逐滴加入稀HCl,观察现象。可以看到Al₂O₃粉末逐渐溶解,发生反应($\text{Al}_2\text{O}_3 + 6\text{HCl} = 2\text{AlCl}_3 + 3\text{H}_2\text{O}$),证明Al₂O₃能与酸反应,表现出碱性。

(2) 与碱反应:另取少量Al₂O₃粉末于另一支试管中,向试管中逐滴加入NaOH溶液,观察现象。发现Al₂O₃粉末也逐渐溶解,反应方程式为 $\text{Al}_2\text{O}_3 + 2\text{NaOH} + 3\text{H}_2\text{O} = 2\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$,说明Al₂O₃能与碱反应,表现出酸性。

Al₂O₃作为工业中常用的催化剂载体,在物理和化学性质上具有显著的优势。一方面,其具有较高的比表面积,能为催化活性组分提供丰富附着位点;孔结构良好,孔径、孔容和孔分布可调控,能满足不同催化反应需求;机械强度合适,能承受工业生产中的环境变化;热稳定性高,高温下能保持晶体结构和物理性质稳定,保证催化性能。另一方面,Al₂O₃化学稳定性良好,在许多反应体系中不会与反应物、产物或催化剂活性组分发生反应;表面性

① 罗谷风. 结晶学导论[M]. 北京:地质出版社,1989.

质可调变,通过预处理或掺杂改性调节表面酸碱性和表面电荷,能适应不同的催化反应;与活性组分相互作用良好,能使活性组分均匀分散且不削弱其活性。

2. 氢氧化铝: 胃药里的缓冲大师

在我们的身体里,胃就像一个忙碌的“食物加工厂”,胃酸则是其中的“强力工人”,帮助消化食物。但如果这位“工人”太过卖力,胃酸分泌过多,就会让“加工厂”陷入混乱,引发胃痛、烧心、反酸等一系列问题。这时,我们就需要 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 来帮忙。

$\text{Al}(\text{OH})_3$ 的智慧在于其动态电离平衡^①。

碱式电离平衡: $\text{Al}(\text{OH})_3 \rightleftharpoons \text{Al}^{3+} + 3\text{OH}^-$ ($\text{pH} < 4$ 时主导)。

酸式电离平衡: $\text{Al}(\text{OH})_3 + \text{OH}^- \rightleftharpoons [\text{Al}(\text{OH})_4]^-$ ($\text{pH} > 10$ 时主导)。

在胃液环境($\text{pH} = 1.5 \sim 3.5$)中,它通过碱式电离释放 OH^- 中和过量胃酸,化学反应方程式为 $\text{Al}(\text{OH})_3 + 3\text{H}^+ = \text{Al}^{3+} + 3\text{H}_2\text{O}$ 。这种 pH 缓冲能力与其胶体特性密切相关,直径 $1 \sim 100 \text{ nm}$ 的 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 胶粒表面带有正电荷(等电点 $\text{pH} = 8.1$),能通过静电吸附带负电的胃蛋白酶。

现代胃药采用镁铝硅酸盐缓释技术,将药物分解速度控制在 0.25 mg/min ,使中和作用能持续 $4 \sim 6 \text{ h}$ (图 1-11)。其原理是利用 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 难溶性,它在水中溶解度小,进入胃部后缓慢与胃酸发生中和反应,随着反应进行,不断溶解释放 OH^- 中和胃酸;其次, $\text{Al}(\text{OH})_3$ 在胃内形成凝胶层,附着于胃黏膜表面,既隔离胃酸对胃黏膜的刺激和腐蚀,又能缓慢释放持续中和胃酸。不但利于胃部疾病治疗恢复,而且减少了患者用药频率。



图 1-11 复方氢氧化铝片

① 华彤文,陈景祖,卞江,等. 普通化学原理[M]. 北京: 北京大学出版社,2013.

3. 铝盐家族：生活中的化学魔术

铝盐家族的化学魔术主要建立在 Al^{3+} 的水解特性之上。

明矾净水是利用了胶体的聚沉原理。它在水中可以完全电离,生成钾离子(K^+)、 Al^{3+} 和硫酸根离子(SO_4^{2-}), Al^{3+} 会发生水解反应, $\text{Al}^{3+} + 3\text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{Al}(\text{OH})_3 + 3\text{H}^+$, 生成 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 胶体,其粒子具有较大的比表面积,能吸附水中的悬浮杂质,如泥土、细菌等。这些被吸附的杂质颗粒在胶体粒子的作用下相互聚集,形成较大的颗粒,当颗粒的重力超过浮力时,就会沉淀到水底,从而达到净水的目的。

油条制作中常用的膨松剂一般含有铝盐,如硫酸铝钾 $[\text{KAl}(\text{SO}_4)_2]$ 和 NaHCO_3 等。当油条面团遇水后,铝盐和 NaHCO_3 发生复分解反应,其化学方程式为 $2\text{KAl}(\text{SO}_4)_2 + 6\text{NaHCO}_3 = \text{K}_2\text{SO}_4 + 3\text{Na}_2\text{SO}_4 + 2\text{Al}(\text{OH})_3 \downarrow + 6\text{CO}_2 \uparrow$ 。反应产生大量的 CO_2 气体,这些气体在面团中形成许多微小的气泡,随着油条的油炸过程,气泡膨胀,使油条变得蓬松多孔、口感酥脆。生成的 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 可以中和面团发酵过程中产生的酸,调节面团的酸碱度,使油条的口感更好。

泡沫灭火器中通常装有硫酸铝 $[\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3]$ 溶液和 NaHCO_3 溶液,它们分别装在不同的容器中,当灭火器倒置或按下开关时,两种溶液混合在一起。 $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ 中的 Al^{3+} 发生水解生成 H^+ , NaHCO_3 中水解生成 HCO_3^- 。当两种溶液混合时, H^+ 和 HCO_3^- 结合生成碳酸,碳酸不稳定,迅速分解产生 CO_2 气体。同时 Al^{3+} 和 HCO_3^- 发生双水解反应,离子方程式为 $\text{Al}^{3+} + 3\text{HCO}_3^- = \text{Al}(\text{OH})_3 \downarrow + 3\text{CO}_2 \uparrow$, 反应产生的大量 CO_2 气体和 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 胶体,它们一起以泡沫的形式喷出,覆盖在燃烧物表面, CO_2 气体可以隔绝空气,阻止 O_2 与燃烧物接触,从而达到灭火的目的^①。

^① 宋天佑,程鹏,徐家宁,等.无机化学:下册[M].4版.北京:高等教育出版社,2019.

从维勒历经艰难获得珍贵的铝珠,到如今 SpaceX 火箭凭借先进的铝基材料实现太空探索,铝元素的发展历程告诉我们,科学发现绝非偶然间的灵光乍现,而是无数科研人员前赴后继,持续接力破解自然奥秘的漫长过程。当我们下次拉开易拉罐时,听到“吡”的一声轻响,那正是跨越两个世纪的化学智慧在回响。

第3节 铁元素：从远古兵器到现代文明的钢铁脊梁

一、铁元素的来龙去脉

1. 地球上的踪迹

铁元素在地球的地壳中含量相当可观,排名第四,紧紧跟在氧、硅、铝这3位“大佬”之后。不过,你很难在自然界中发现大块的纯铁,铁大多以化合物的形式广泛分布。像赤铁矿,那可是较为常见的铁矿石之一,呈现出鲜艳的红棕色,主要成分是 Fe_2O_3 ; 还有磁铁矿,具有神奇的磁性,主要成分是四氧化三铁(Fe_3O_4),能像小磁针一样被磁铁吸引; 菱铁矿的主要成分为碳酸亚铁(FeCO_3),它则像是大自然藏起来的宝藏,默默等待着人们去发现开采。而游离态的铁,也就是纯铁,在地球上那可是相当罕见,只有从天而降的陨铁中才能觅得它的踪影。

2. 人类的探索历程

追溯历史,我国古代劳动人民的智慧令人惊叹。早在春秋初年,先辈们就已经掌握了炼铁技术,开启了利用铁制造工具、兵器等的新篇章。时光流转到现代,炼铁早已步入工业化时代。在高大的炼铁高炉里,每天都在上演一场神奇的“变身秀”,利用焦炭产生的 CO 作为还原剂,将铁矿石中的铁氧化物一步步还原出来,最终得到滚烫的铁水,铸就了现代钢铁工业的根基。

二、铁及其化合物的性质

1. 铁单质：化学反应的“活跃分子”

纯铁呈现出银白的色泽，泛着金属特有的光泽。它的熔点高达 $1535\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，沸点更是达到 $2750\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，这使得它在高温环境下依然能保持固态，为许多工业高温工艺提供了可能。不仅如此，铁还具有良好的延展性，同时，它也是电和热的“好朋友”，能够高效地传导电流和热量，所以在电线、暖气片等生活设施的制造中，铁材料也经常出境。还有一个有趣的特性，铁能够被磁化，小小的铁钉遇到磁铁，瞬间就会被吸引过去，变成一个临时的“小磁针”，这背后可是有着复杂而奇妙的微观磁畴原理呢。

1) 与非金属“共舞”

当铁遇到 O_2 时，在常温下，铁就像是一个慢性子，只是慢慢地生锈，表面生成一层疏松的铁锈（主要成分是 $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ ），这是铁与空气中的 O_2 、水发生的缓慢氧化反应。但要是温度升高，在纯氧中点燃铁丝，你会看到剧烈燃烧火星四射的景象，铁与 O_2 迅速反应生成黑色 Fe_3O_4 ，那场面就像是夜空中绽放的烟火，十分壮观。

要是把加热后的铁丝伸进氯气(Cl_2)的“怀抱”，铁会迅速与 Cl_2 发生反应，剧烈燃烧，生成棕黄色的氯化铁(FeCl_3)烟雾，这展示了 Cl_2 极强的氧化性，能一下子将铁氧化到+3价。

而当铁与硫粉混合加热时，反应相对温和一些，生成黑色的硫化亚铁(FeS)，硫的氧化性比 Cl_2 弱，只能将铁氧化到+2价，就好像硫只是给铁披上了一层不太厚的“黑衣”。

2) 与酸的邂逅

把铁丢进 HCl 或者稀 H_2SO_4 的溶液里，立刻就能看到气泡“欢快”地往上冒，就像铁在“喝汽水”一样。这是因为铁比氢活泼，它会置换出酸中的氢，生成 H_2 和亚铁盐，化学方程式为 $\text{Fe} + 2\text{HCl} = \text{FeCl}_2 + \text{H}_2 \uparrow$ 、 $\text{Fe} + \text{H}_2\text{SO}_4 = \text{FeSO}_4 + \text{H}_2 \uparrow$ 。不过这里生成的是亚铁离子(Fe^{2+})，因为在非氧化性酸的环境下，铁优先

失去两个电子。

3) 与盐溶液的“置换游戏”

要是把铁放入硫酸铜(CuSO_4)溶液中,过一会儿,你会惊奇地发现,原本蓝色的 CuSO_4 溶液颜色逐渐变浅,而铁的表面慢慢附上了一层红色的铜,就好像铁施展了“魔法”,把铜从溶液里“召唤”了出来。这其实是铁置换出了 CuSO_4 溶液中的铜,发生的化学反应为 $\text{Fe} + \text{CuSO}_4 = \text{FeSO}_4 + \text{Cu}$,在这个过程中,铁也变成了 Fe^{2+} 进入溶液。

4) 挑战水蒸气

在高温的环境下,铁还敢向水蒸气发起挑战。当炽热的铁与水蒸气相遇时,它们会发生一场激烈的“化学反应大战”,最终生成 Fe_3O_4 和 H_2 ,化学方程式为 $3\text{Fe} + 4\text{H}_2\text{O}(\text{g}) = \text{Fe}_3\text{O}_4 + 4\text{H}_2$ 。不过这个反应条件比较苛刻,需要高温环境,一般在实验室或工业特定装置中才能实现。

2. 铁的氧化物:多彩的含铁颜料

1) 氧化亚铁:低调的黑色精灵

氧化亚铁(FeO)是一种黑色粉末,就像煤炭粉末一样不起眼,但又有着自己独特的性质。它几乎不溶于水,仿佛与水“老死不相往来”。而且它的性子不太稳定,在空气中加热的时候,就像是一个胆小的孩子,害怕被氧化,赶紧与 O_2 结合,迅速变成 Fe_3O_4 ,试图给自己穿上一层更“坚固”的氧化外衣。

2) 氧化铁:鲜艳的红色巨人

氧化铁(Fe_2O_3)可是大名鼎鼎,它那红棕色的粉末俗称铁红,是颜料世界里的“明星”。从古至今,无论是宫殿的墙壁、陶瓷的彩绘,还是现代的油漆、涂料,都能看到它的身影,它我们的生活增添了一抹抹鲜艳的色彩。它属于碱性氧化物,这意味着它能像一个“酸的克星”,与酸发生中和反应,生成对应的铁盐和水。在炼铁工业中,它更是核心原料,被焦炭等还原剂逐步还原,释放出铁元素,为钢铁生产立下汗马功劳。

3) 四氧化三铁：神秘的磁性卫士

四氧化三铁(Fe_3O_4)有着独特的黑色晶体外观,仿佛是来自神秘宇宙的物质。它还有个特别的俗称——磁性氧化铁,这是因为它天生自带磁性,能被磁铁牢牢吸引,就像是磁铁的忠诚卫士。它不溶于水,内部结构十分有趣,可以看作由一个 FeO 和一个 Fe_2O_3 组合而成,这种特殊的结构赋予了它独特的物理和化学性质,既有着 FeO 的部分还原性,又有着 Fe_2O_3 的氧化性,在如磁性材料、电子工业等许多领域都有着广泛应用。

3. 铁的氢氧化物：变色的神奇粉末

1) 氢氧化亚铁：脆弱的白色天使

氢氧化亚铁 $[\text{Fe}(\text{OH})_2]$ 刚诞生的时候,是洁白无瑕的白色固体,就像冬日里的初雪。但它的“生命”极其脆弱,因为它具有很强的还原性,在空气中就像一个毫无防备的天使, O_2 轻易地就能“伤害”到它。它一接触空气,表面就迅速被氧化,先是变成灰绿色,这是 $\text{Fe}(\text{OH})_2$ 与氢氧化铁 $[\text{Fe}(\text{OH})_3]$ 混合的过渡颜色,随后很快就会完全变成红褐色的 $\text{Fe}(\text{OH})_3$,具体的颜色变化如图 1-12 所示。这个过程中对应的反应为 $4\text{Fe}(\text{OH})_2 + \text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} = 4\text{Fe}(\text{OH})_3$ 。在实验室制备它的时候,为了尽量减少 O_2 的干扰,需要把溶液煮沸驱赶 O_2 ,再用特殊的滴管将 NaOH 溶液滴加到亚铁盐溶液中,试图为它营造一个短暂的“安全空间”。



彩图 1-12

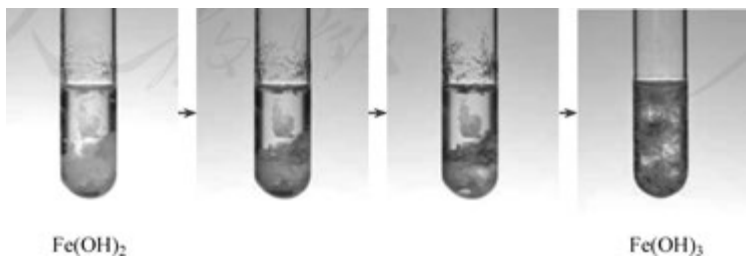


图 1-12 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 和 $\text{Fe}(\text{OH})_2$ 的颜色状态^①

^① 普通高中教科书化学：必修：第一册[M]. 北京：人民教育出版社，2020.

2) 氢氧化铁：沉稳的红褐色卫士

氢氧化铁 $[\text{Fe}(\text{OH})_3]$ 是红褐色的固体,看起来就很沉稳。它难溶于水,就像一座坚固的小山,稳稳地待在溶液底部。当给它加热的时候,它就像一个被唤醒的战士,开始分解,生成 Fe_2O_3 和水,化学方程式为 $2\text{Fe}(\text{OH})_3 \xrightarrow{\quad} \text{Fe}_2\text{O}_3 + 3\text{H}_2\text{O}$ 。在与酸的对抗中,它表现得很顽强,能与 HCl 、 H_2SO_4 等酸发生中和反应,生成对应的铁盐和水,守护着溶液的酸碱平衡。

4. 铁盐和亚铁盐：离子世界的“变色侦探”与“转化大师”

1) 铁离子和亚铁离子的检验：火眼金睛辨真假

在化学实验室里,想要区分 Fe^{3+} 和 Fe^{2+} ,科学家们有个巧妙的办法。当向含有 Fe^{3+} 的溶液中滴加硫氰化钾(KSCN)溶液时,溶液瞬间变成血红色,是因为发生了反应 $\text{Fe}^{3+} + 3\text{SCN}^- \rightleftharpoons \text{Fe}(\text{SCN})_3$,生成的血红色 $\text{Fe}(\text{SCN})_3$ 就好像 Fe^{3+} 在大声宣告自己的身份。 Fe^{2+} 则比较低调,直接向亚铁盐溶液中滴加 KSCN 溶液,溶液几乎没有变化,还是保持原来的颜色。但要是给 Fe^{2+} 加点“料”,先滴加 KSCN 溶液,让它潜伏起来,再滴加氯水等氧化剂,这时候 Fe^{2+} 就会被氧化成 Fe^{3+} ,溶液也会迅速变红,就像一个隐藏的特工突然暴露身份,通过这种方法就能精准地检验出 Fe^{2+} 的存在。当然, Fe^{2+} 也有其对应的特征检验试剂铁氰化钾 $[\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6]$,当向含有 Fe^{2+} 的溶液中滴加 $\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$ 溶液时,溶液瞬间产生特征蓝色沉淀。^①

2) 铁离子和亚铁离子的性质和转化：化学世界的平衡术

Fe^{3+} 的氧化性： Fe^{3+} 可是个“氧化高手”，它像一个饥饿的掠夺者，遇到一些还原性较强的物质，就会迫不及待地抢夺电子。例如，把铁粉放入含有 Fe^{3+} 的溶液中， Fe^{3+} 会迅速将铁粉氧化，自己则被还原成 Fe^{2+} ，溶液由黄色(Fe^{3+} 的颜色)逐渐变为浅绿色(Fe^{2+} 的颜色)，化学方程式为 $2\text{Fe}^{3+} + \text{Fe} \rightleftharpoons 3\text{Fe}^{2+}$ 。同样，当遇到铜片

^① 普通高中教科书化学选择性必修1[M]. 北京：人民教育出版社，2020.

时, Fe^{3+} 也会毫不留情地氧化铜, 使铜溶解, 自身变为 Fe^{2+} , 这就是电路板腐蚀的化学原理, 利用 Fe^{3+} 的氧化性将铜线路腐蚀掉, 留下需要的电路图案, 化学方程式为 $2\text{Fe}^{3+} + \text{Cu} \longrightarrow 2\text{Fe}^{2+} + \text{Cu}^{2+}$ 。

Fe^{2+} 的还原性: Fe^{2+} 则像是一个怀揣宝藏(电子)的行者, 在氧化剂的世界里很容易被盯上。当向亚铁盐溶液中通入 Cl_2 时, Cl_2 就像一个强盗, 瞬间抢走 Fe^{2+} 的电子, 将 Fe^{2+} 氧化成 Fe^{3+} , 溶液颜色由浅绿色变为黄色, 化学方程式为 $2\text{Fe}^{2+} + \text{Cl}_2 \longrightarrow 2\text{Fe}^{3+} + 2\text{Cl}^-$ 。此外, 像过氧化氢(H_2O_2)、 O_2 等氧化剂, 也都能轻易地将 Fe^{2+} 氧化, 让它完成从+2价到+3价的“蜕变”。

铁及其化合物就像是一个充满奥秘的化学宝库, 从它们的存在、性质到相互转化, 每一个知识点都承载着人类对物质世界的探索成果, 也为我们打开了一扇扇通往更广阔科学天地的大门。

三、探秘黑木耳里的铁元素

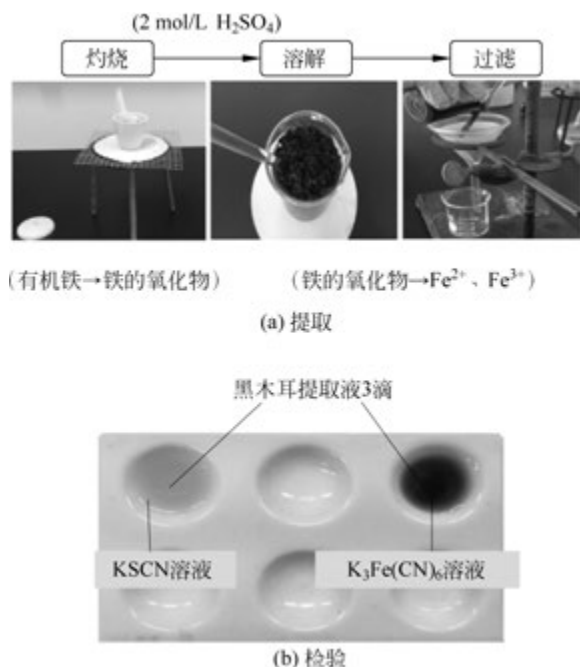
在日常生活中, 我们常听闻“黑木耳含铁量丰富, 是补铁佳品”的说法。但这究竟是真的吗? 今天, 就让我们像侦探一样, 运用高中化学知识, 一步步揭开黑木耳铁含量的神秘面纱。

1. 定性检验: 寻找铁元素的“蛛丝马迹”

我们从市场买来黑木耳, 将其浸泡 24 h 后检测浸取液, 在浸取液中没有发现铁元素的影子。这不禁让人疑惑: 是黑木耳根本不含铁, 还是铁元素隐藏得太深, 简单浸泡无法将其“引出”?

查阅大量资料后我们得知, 原来, 黑木耳中蕴含着有机铁等多种物质。有机铁在灼烧时会发生奇妙的“变身”, 转变为铁的氧化物。与此同时, 灼烧还能让黑木耳中的有机物转化为 CO_2 和水, 如此一来, 灰分中的铁元素就相当于被巧妙地“浓缩”了。受此启发, 我们设计了一个巧妙实验, 取一定量黑木耳充分灼烧, 冷却后加入稀 H_2SO_4 溶解、浸泡, 使铁从氧化物转化为离子, 过滤得到滤液。最后, 利用 Fe^{2+} 和 Fe^{3+} 的专属检验试剂来判断。当向滤液中加入黄色 $\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$, 神奇的事情发生了, 滤液中出现了蓝色沉淀(因

蓝色与黄色混合显绿色)；再加入无色 KSCN,溶液变成红色。这清楚地表明,黑木耳中确实含有铁元素(图 1-13)。



彩图 1-13

图 1-13 黑木耳中铁元素的提取及检验

2. 定量测定铁元素：给铁元素“称体重”

确认黑木耳含铁后,新的问题来了——其中铁元素含量究竟有多少?于是,我们开启了定量测定之旅。

1) 测质量的尝试

我们依据 Fe^{3+} 与 Fe^{2+} 的化学特性来设计方案。当向黑木耳浸泡液中加入足量的 NaOH 溶液时,溶液中发生了奇妙的化学反应, Fe^{3+} 与 OH^- 迅速结合,生成了红褐色的 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 沉淀,对应的离子方程式为 $\text{Fe}^{3+} + 3\text{OH}^- = \text{Fe}(\text{OH})_3 \downarrow$; Fe^{2+} 也“不甘示弱”,与 OH^- “携手”形成白色的 $\text{Fe}(\text{OH})_2$ 沉淀,其离子方程式为

$\text{Fe}^{2+} + 2\text{OH}^- = \text{Fe}(\text{OH})_2 \downarrow$ 。不过, $\text{Fe}(\text{OH})_2$ 沉淀极不稳定, 它会迅速与空气中的 O_2 以及溶液中的水发生反应, 历经“白色—灰绿色—红褐色”的奇妙变色过程, 最终全部转化为 $\text{Fe}(\text{OH})_3$, 化学方程式为 $4\text{Fe}(\text{OH})_2 + \text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} = 4\text{Fe}(\text{OH})_3$ 。实验的下一步, 我们将生成的沉淀过滤出来, 为了确保沉淀的纯净, 还对其进行了仔细的洗涤操作。随后, 把洗净的沉淀放入加热装置中进行灼烧, 此时, $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 又发生了分解反应: $2\text{Fe}(\text{OH})_3 = \text{Fe}_2\text{O}_3 + 3\text{H}_2\text{O}$, $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 转变为红色的 Fe_2O_3 。精确称量 Fe_2O_3 的质量, 再依据铁元素在 Fe_2O_3 中的占比, 理论上便能计算出黑木耳中铁元素的含量。

然而, 实验的进程并非一帆风顺。在实际操作中, 我们惊讶地发现, 溶液中产生了大量白色沉淀, 经严谨判断, 极有可能是氢氧化钙 $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ 。这一“不速之客”的出现打乱了我们的计划, 由于当前缺乏有效的手段将沉淀中的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 与铁的氢氧化物分离开来, 我们通过测质量进行定量分析的首次尝试遗憾地以失败告终。

2) 测浓度的新方法

在沉淀反应测质量的方法遭遇其他离子产生沉淀的干扰后, 实验仿佛陷入了迷雾之中, 我们该如何突出重围呢? 别担心, 此时, 宛如拥有神奇魔力的“电子眼睛”的色度计闪亮登场, 为我们指引新的方向。

色度计的工作原理非常奇妙。先精心配制一系列已知 Fe^{3+} 浓度的标准比色溶液, 就像搭建了一组精准的“参考坐标”。同时, 将黑木耳浸取液进行氧化处理, 确保其中的铁元素都以 Fe^{3+} 的形式存在。接着, 在标准比色溶液和氧化后的黑木耳浸取液中分别加入等量的 KSCN 溶液。神奇的事情发生了, 溶液迅速变色, 而且颜色的深浅有着独特的奥秘。颜色越深, 色度计测量得到的数值就越大, 并且 Fe^{3+} 的浓度与这个数值呈现出完美的正相关关系, 就像两个默契的伙伴, 携手为我们揭示铁元素浓度的秘密。利用这种关系, 我们就能轻松地计算出其中铁元素的浓度。经过一系列严

谨的操作和计算,最终,我们欣喜地得出结论:购买的黑木耳中铁元素含量为 0.124 mg/g。

这次对黑木耳铁含量的探究之旅,就像一场充满惊喜与挑战的冒险。通过这次经历,我们学会了如何灵活运用化学知识解决实际问题,仿佛掌握了一把开启科学大门的钥匙,在未来的探索之路上更加自信、更加坚定。

四、生活中与铁及其化合物知识相关的例子

1. 补铁剂:身体的“补血小卫士”

你知道吗?人体一旦缺铁,就可能陷入缺铁性贫血的困境。想象一下,身体里的红细胞就像一个个勤劳的小快递员,负责将 O_2 运输到身体各处。而铁元素,就是这些小快递员的“能量核心”。当缺铁时,红细胞工作效率降低,人就容易感到疲倦、头晕。一些补铁剂里含有硫酸亚铁($FeSO_4$)等亚铁化合物,它们巧妙地利用了亚铁盐的溶解性以及 Fe^{2+} 能被人体吸收的特性,就像给身体这个大工厂输送了急需的“零件”,有效补充人体所需的铁元素。但 Fe^{2+} 有个“小脾气”,特别容易被氧化。为了保护它,补铁剂通常会被密封得严严实实,就像给它穿上了一层坚固的铠甲。而且,医生还常常建议补铁剂搭配维生素 C 一起服用。这是因为维生素 C 是一个“忠诚卫士”,具有很强的还原性,它能时刻守护 Fe^{2+} ,防止其被氧化成不易被人体吸收的 Fe^{3+} ,让补铁效果更出色。

2. 污水处理:污水净化的“魔法大师”

在工业污水处理的世界里,硫酸铁 $[Fe_2(SO_4)_3]$ 等铁盐就像一位拥有神奇魔法的“大师”。当铁盐投入污水中时, Fe^{3+} 就开始了它们的“魔法表演”。在水中, Fe^{3+} 会水解生成 $Fe(OH)_3$ 胶体, $Fe^{3+} + 3H_2O \rightleftharpoons Fe(OH)_3(\text{胶体}) + 3H^+$ 。这些胶体就像一个个微小的“吸尘器”,具有强大的吸附性。污水中那些悬浮的杂质,就像一个个“小脏东西”,在 $Fe(OH)_3$ 胶体面前无处遁形。胶体能够轻松地将它们吸附起来,随着时间推移,这些被吸附的杂质逐渐聚

集,沉淀到水底,使原本浑浊的污水变得清澈透明,成功达到净化水质的目的,让污水重新焕发生机,回归自然。

3. 磁性材料: 医疗战场上的“精准导弹”

在医疗领域, Fe_3O_4 这位具有磁性的“小战士”,被制成了磁性纳米材料,宛如医疗战场上的“精准导弹”。这些磁性纳米材料可以作为药物的载体,想象一下,它们就像一个个装满药物的“小飞船”。在外部施加的磁场引导下,这些“小飞船”能够精准地朝着病变部位飞去。到达病变部位后,释放出所携带的药物,对病变组织进行精准打击,大大提高了药物的治疗效果。同时,因为是精准定位给药,减少了药物对正常组织的伤害,让治疗更加高效、安全^①。

第4节 铜元素: 从古老钱币到5G时代的导电传奇

约4万年前,一场大火意外开启了人类文明的金属篇章。原始先民在焦土中发现,那些曾经点缀在山岩间的孔雀绿色矿石[地质学家后来将其命名为孔雀石,主要成分为碱式碳酸铜, $\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$],经烈火淬炼后,竟蜕变为暗红色金属物质,这是自然界首次向人类展示金属冶炼的奥秘。当山火温度突破 $800\text{ }^\circ\text{C}$ 时,矿石发生分解反应, $\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2 \longrightarrow 2\text{CuO}(\text{氧化铜}) + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 \uparrow$,随后氧化铜(CuO)接触木炭不完全燃烧的产物 CO ,生成人类最早提炼的金属铜, $\text{CuO} + \text{CO} \longrightarrow \text{Cu} + \text{CO}_2 \uparrow$ 。这种红色金属硬度逊于石器,却展现出可延展、可塑形的特质。保加利亚瓦尔纳遗址出土的公元前5000年的红铜器(纯度达99.7%)印证了早期“冷锻法”的智慧。火光照耀下,人类跨越了石器时代的桎梏,用第一簇冶金之火点亮了红铜文明的曙光,为后续青铜时代的辉煌奏响了序曲。

^① SUN C, LEE J S H, ZHANG M, et al. Magnetic nanoparticles in MR imaging and drug delivery[J]. Advanced drug delivery reviews, 2008, 60(11): 1252-1265.

一、铜单质

自原始人拾取第一块天然铜块开始,这种金属便与人类文明紧密相连。考古证据显示,新石器时代晚期(约公元前 5000 年)人类已开始冷加工天然铜,而青铜时代铜锡合金的发明更推动文明跨越式发展。从商周青铜礼器到古罗马输水管道,从唐代“夫以铜为镜,可以正衣冠”到现代人用铜做导线、家具和轴承,铜始终以其独特的物理化学特性推动着技术进步。

提到铜,人们第一反应就是那与众不同的颜色。的确,在众多金属中,铜的一抹红色可以说是一道亮丽的风景线。除具有美丽的颜色外,铜还具有出色的导电性和导热性,这种性质使得铜在电气行业大放光彩。铜本身硬度不高,但当它与锌形成合金(俗称黄铜)之后,其耐磨性会有显著的提高,这也是铜锌合金能够大规模应用的原因之一(图 1-14)。

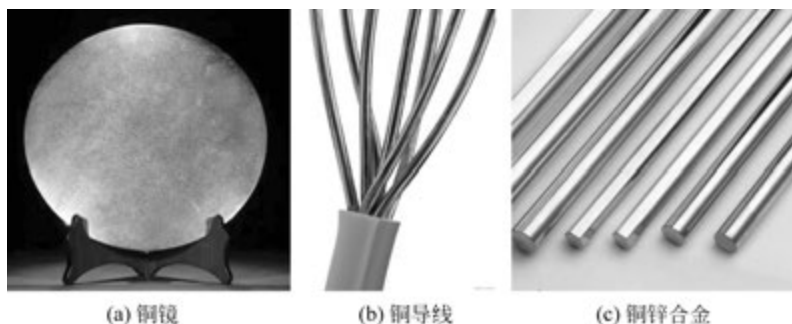


图 1-14 铜镜、铜导线和铜锌合金(黄铜)

那么铜为什么在这么多方面具有优异的性能呢?这要从铜的电子结构说起了。它最外层仅有一个电子,但次外层 18 电子结构的屏蔽效应使其金属活动性位列氢之后。如果把元素周期表比作一艘船,其“船头”和“船尾”部分称为主族元素,“船舱”部分则称为副族元素(又称为过渡元素),而铜元素就位于这个地方(图 1-15)。

族	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
IA	IIA	IIIA	IVA	VA	VIA	VIIA	VIIIA	VIIIA	VIIIA	VIIIA	VIIIA	VIIIA	VIIIA	VIIIA	VIIIA	VIIIA	VIIIA	VIIIA
1	H 1.008	He 4.003																Ne 20.18
2	Li 6.941	Be 9.012	B 10.81	C 12.01	N 14.01	O 16.00	F 18.998	Ne 20.18										Ar 39.95
3	Na 22.99	Mg 24.31	Al 26.98	Si 28.09	P 30.97	S 32.07	Cl 35.45	Ar 39.95	K 39.10	Ca 40.08	Sc 44.96	Ti 47.88	V 50.94	Cr 52.00	Mn 54.94	Fe 55.85	Ni 58.69	Zn 65.38
4	K 39.10	Ca 40.08	Sc 44.96	Ti 47.88	V 50.94	Cr 52.00	Mn 54.94	Fe 55.85	Ni 58.69	Cu 63.55	Zn 65.38	Ga 69.72	Ge 72.64	As 74.92	Se 78.96	Br 79.90	Kr 83.80	
5	Rb 85.47	Sr 87.62	Y 88.91	Zr 91.22	Nb 92.91	Mo 95.94	Tc 98.91	Ru 101.07	Rh 102.91	Pd 106.42	Ag 107.87	Cd 112.41	In 114.82	Sn 118.71	Sb 121.76	Te 127.60	I 126.91	Xe 131.29
6	Ba 137.33	La-Lu 138.91	Hf 178.49	Ta 180.95	W 183.85	Re 186.21	Os 190.23	Ir 192.22	Pt 195.08	Au 196.97	Hg 200.59	Tl 204.38	Pb 207.2	Bi 208.98	Po 209	At 210	Rn 222	
7	Fr 223	Ra 226	Ac-Lr 227	Rf 261	Db 262	Sg 266	Bh 264	Hs 277	Mt 268	Ds 271	Rg 272	Cn 285	Nh 286	Fl 289	Lv 293	Ts 294	Og 294	

元素周期表

注：1. 元素周期表是元素周期律的体现，也是化学研究的重要工具。
2. 元素周期表是元素周期律的体现，也是化学研究的重要工具。
3. 元素周期表是元素周期律的体现，也是化学研究的重要工具。

图 1-15 铜在元素周期表中的位置

57 La 镧系	58 Ce 铈	59 Pr 镨	60 Nd 钕	61 Pm 钷	62 Sm 钐	63 Eu 铕	64 Gd 钆	65 Tb 铽	66 Dy 镝	67 Ho 铈	68 Er 铈	69 Tm 铈	70 Yb 镱	71 Lu 镱
89 Ac 锕系	90 Th 钍	91 Pa 镤	92 U 铀	93 Np 镎	94 Pu 钚	95 Am 镅	96 Cm 锔	97 Bk 锫	98 Cf 锪	99 Es 铈	100 Fm 钐	101 Md 镆	102 No 镎	103 Lr 镱

根据结构化学知识,我们可以知道,铜的最外层仅有一个电子,而次外层有 18 个电子,其原子结构示意图如图 1-16 所示。



图 1-16 铜的原子结构示意图

铜最外层仅有一个电子,但次外层 18 电子结构的屏蔽效应使其金属活动性位列氢之后。在常温下,铜能与 O_2 缓慢反应生成致密氧化膜, $4Cu + O_2 = 2Cu_2O$, 这层仅数纳米厚的保护层,正是故宫铜缸历经 600 余年风雨仍屹立不倒的奥秘所在。即使在更加恶劣的环境下,经过更长的时间,铜与 O_2 、 CO_2 和 H_2O 反应生成的 $CuCO_3 \cdot Cu(OH)_2$, $2Cu + O_2 + CO_2 + H_2O \rightarrow CuCO_3 \cdot Cu(OH)_2$ 。这种特殊结构使得铜具有特殊的稳定性,让它既是古老智慧的见证者,又是现代科技的参与者。

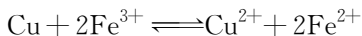
铜原子的最外层只有一个电子,这个电子很容易在整个铜块中自由移动。整个铜块的这些电子构成一个像气体一样的环境,称为“电子气”。实际上,所有金属都具有这样的性质,为了表示这种相对分子间作用力更强的作用,我们将其称为“金属键”。这种特殊结构赋予铜 3 个“绝技”: ①自由电子在电场中定向迁移形成电流,使其导电性仅次于银; ②受热时电子与原子剧烈碰撞传递热能,导热效率高; ③电子云反射特定波长的光线,呈现出独特的玫瑰金属光泽。

这种电子气使得金属具备很多特有的性质,如在电场的作用下,电子可以发生定向移动而形成电流,即金属具有导电性;在一端被加热的时候,电子运动速度快,会迅速传递至整块金属并不断撞击离子导致整块金属的微粒运动加快,即金属具有导热性;光子不能通过电子气,所以金属不透明,如果将金属打磨光滑,金属还会具有金属光泽。

最外层仅有一个电子也使得铜元素具有 +1 价(如氧化亚铜, Cu_2O),但因为第 3 层轨道部分电子的能量与最外层电子的能量相近,+1 价的铜有可能失去第二个电子从而到达 +2 价(如

CuSO_4),甚至继续失去电子达到更高的化合价。此外,也正是由于第3层轨道部分电子的能量与最外层电子的能量相近,铜、银和金即使最外层只有一个电子,也不像碱金属钠一样有失去电子的“紧迫感”,它们性质都比较稳定。

这也比较符合我们对铜的一般印象,铜比较稳定,不会和 HCl 、稀 H_2SO_4 这样的非氧化性酸直接发生反应。但在溶液中,铜也可以算是一个相对比较强的还原剂,因为即使是中等强度的氧化剂,如 Fe^{3+} 也可以溶解掉铜。



这个反应可以被用于刻蚀电路板。利用这个反应的时候,我们可以先用疏水材料(如油墨)在电路板上画出所需要的电路,此时这些疏水材料会将铜保护起来。然后将电路板浸入 FeCl_3 溶液中,一段时间后,未经保护的铜就会被 FeCl_3 溶解。此时取出电路板,用水稍加清洗,然后再洗去疏水材料就可以获得一张完整的、刻蚀之后的电路板了。

正是这种“动静相宜”的特性,让铜既能以千年青铜器的姿态见证文明,又能化身精密电路中的电流使者。当你触摸古铜器上的斑驳铜绿,或是手机主板上的镀铜电路时,实际上正在感受电子在时间维度上的奇妙共舞。

二、+2 价铜

在初中阶段我们就知道了很多铜盐,它们都是以+2价存在于水溶液或晶体中的。例如,在刚刚接触化学的时候我们就接触过一种蓝色的盐,即五水合硫酸铜($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$),这种令人惊艳的蓝色就来自其中的 Cu^{2+} 。 $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 是最常见的铜盐,因为它具有一定的苦味,所以有另外一个名字“胆矾”(图 1-17)。

与其他带有苦味的物质一样, $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 也具有一定的毒性,但毒性与那些剧毒的生物碱相比算是比较低的,而且 $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 会强烈刺激消化道,所以 $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 可以作为催吐剂使

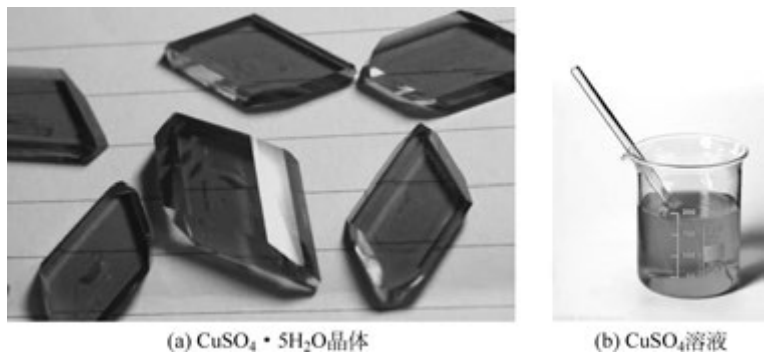
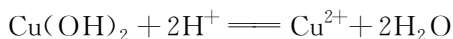


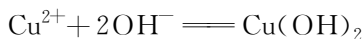
图 1-17 $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 晶体和 CuSO_4 溶液

用。要想解 Cu^{2+} 的毒也比较容易,与解其他重金属盐的毒一样,需要服用牛奶和蛋清即可解毒。

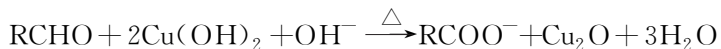
其他的铜盐,如氯化铜(CuCl_2)、硝酸铜 $[\text{Cu}(\text{NO}_3)_2]$ 等也大体上是这个颜色。制备方式也基本相同,即将+2价铜的氧化物 CuO 或氢氧化物 $\text{Cu}(\text{OH})_2$ 溶于对应的酸中即可制得。



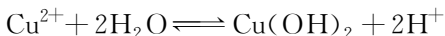
事实上,铜在水溶液中最主要的存在形式就是+2价铜。对于 Cu^{2+} 来说,能够与其反应的离子不少。反应大体上可以分为4类,即沉淀反应、水解反应、配位反应和氧化还原反应。 Cu^{2+} 可以与很多离子形成沉淀,如向 CuSO_4 中滴加 NaOH 溶液即可看到有蓝色沉淀生成。



实际上,很多金属离子,如镁离子(Mg^{2+})、 Fe^{3+} 等都可以与 OH^- 形成沉淀。但 $\text{Cu}(\text{OH})_2$ 与其他沉淀不同的是,它可以用于检测带有醛基的物质,尤其是葡萄糖。在碱性条件下,将新制备的 $\text{Cu}(\text{OH})_2$ 与带有醛基的物质混合并加热,便可观察到沉淀变为红色,这是因为醛基将 $\text{Cu}(\text{OH})_2$ 还原为+1价铜盐 Cu_2O 。



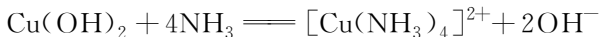
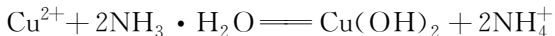
如果我们测试 CuSO_4 水溶液的 pH, 会发现其 $\text{pH} < 7$ 。这是因为有少量 Cu^{2+} 可以结合水中的 OH^- , 使得水中的 H^+ 多于 OH^- 。总方程式如下:



这一现象称为水解。由于 $\text{Cu}(\text{OH})_2$ 是弱碱, 溶液中的 Cu^{2+} 有结合水中的 OH^- 的能力, 但由于 SO_4^{2-} 没有结合 H^+ 的能力, CuSO_4 溶液呈现酸性。像这种阳离子可以结合 OH^- 发生水解, 而阴离子不能结合 H^+ 发生水解的盐有很多, 如氯化镁 (MgCl_2)、 FeCl_3 、硝酸铵 (NH_4NO_3) 等, 它们由强酸和弱碱中和而成, 统称为强酸弱碱盐, 这些盐的水溶液都呈现酸性。反之, 像 Na_2CO_3 这样阳离子不结合 OH^- , 阴离子可以结合 H^+ 的盐称为强碱弱酸盐, 这些盐的水溶液都呈现碱性。

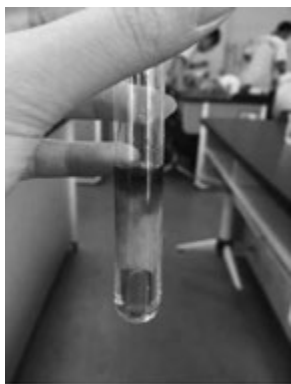
如果向 CuSO_4 溶液中逐滴滴入氨水, 在加入少量氨水时, 会生成蓝色的 $\text{Cu}(\text{OH})_2$ 沉淀。但接下来, 我们会发现沉淀逐渐溶解, 生成了一种蓝色的溶液。

在这个反应的过程中, 氨水溶解了 $\text{Cu}(\text{OH})_2$, 生成了一种全新的物质。这种深蓝色的溶液中含有一个全新的离子——四氨合铜离子 $[\text{Cu}(\text{NH}_3)_4]^{2+}$ 。在 $[\text{Cu}(\text{NH}_3)_4]^{2+}$ 中, 氨 (NH_3) 提供孤电子对, Cu^{2+} 提供空轨道, 二者形成配位键 (详情请参考本书第三部分), 于是就形成了这样美丽的颜色 (图 1-18)。



对于 +2 价的铜来说, 另一类非常重要的反应是氧化还原反应。在通常状况下, 铜的最高化合价为 +2 价, 这就意味着 Cu^{2+} 几乎没有还原性, 只可能具有氧化性。而溶液中的亚铜离子 (Cu^+) 不稳定, 所以 Cu^{2+} 的还原产物只能是单质铜。 Cu^{2+} 的氧化性并不强, 在通常状况下, Cu^{2+} 只能夺取一些比较活泼的金属的电子, 即氧化一些比较活泼的金属, 如 Cu^{2+} 可以将单质铁氧化至 Fe^{2+} 。





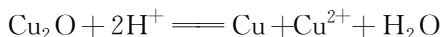
彩图 1-18

图 1-18 向 CuSO_4 溶液中滴加氨水过程中生成的 $\text{Cu}(\text{OH})_2$ 和 $[\text{Cu}(\text{NH}_3)_4]^{2+}$

可以看出,这个反应就是我们初中学过的置换反应。

三、亚铜

在初中的时候我们学过铜有+1价和+2价,但+1价的铜我们很少见到,这是因为 Cu^+ 在水溶液中极不稳定。如果将砖红色的 Cu_2O 加入稀 H_2SO_4 中,刚刚生成的 Cu^+ 会立即氧化自身,即发生歧化反应,生成 Cu^{2+} 和单质铜,我们会观察到沉淀逐渐变为红色,溶液逐渐变蓝。



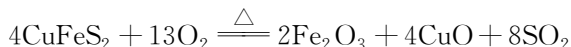
所以在溶液中是不存在简单的 Cu^+ 的,+1价的铜要想存在,要么找一个配体,如 NH_3 ,使其形成如 $[\text{Cu}(\text{NH}_3)_2]^+$ 这样的配合物;要么找一个能够与它形成沉淀的阴离子,如 OH^- 、 Cl^- 等,形成黄色的氢氧化亚铜(CuOH)或白色的氯化亚铜(CuCl)沉淀。所以我们看到的+1价铜化合物绝大多数是沉淀。

四、矿藏与冶炼

铜在自然界中的储量不高,但因为部分矿石具有比较鲜艳的

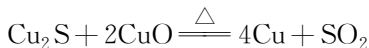
颜色,人们发现铜的时间很早。铜矿石根据元素组成可以大致分为两类,即碱式碳酸盐类[如主要成分为 $\text{Cu}_2(\text{OH})_2\text{CO}_3$ 的孔雀石和主要成分为 $\text{Cu}_3(\text{OH})_2(\text{CO}_3)_2$ 的蓝铜矿]和硫化物类(如主要成分为 Cu_2S 的辉铜矿和主要成分为 CuFeS_2 的黄铜矿)。

铜属于比较活泼的金属,所以想要把铜从化合物转化为单质一般采用 CO 、 H_2 这样的还原剂对其氧化物进行还原,这种方法称为热还原法。所以得到氧化物就是冶炼铜的第一个步骤。对于碱式碳酸盐来说这一过程比较简单,我们只需要将矿石加热分解即可得到黑色的 CuO 。然后通过热还原法即可得到粗铜。但对于硫化物来说,处理的过程要稍微麻烦一些,因为硫化物虽然可以燃烧生成 CuO ,其中的硫会转化为二氧化硫(SO_2)逸散到空气中,不但会污染环境,还会导致硫元素的原子利用率降低。



所以,在实际工业生产中,一般会将这些废弃的 SO_2 收集起来,用于生产 H_2SO_4 作为副产品。实际上,很多有色金属,如银、汞的主要矿藏为硫化物,这些硫元素最终的归宿一般是 H_2SO_4 。在我国,约有 40% 的 H_2SO_4 就是用这种方法生产的。

得到 CuO 之后,下一步应该就是热还原了。还原剂当然也可以使用 H_2 或 CO ,但通过刚才展示的方程式,大家是否发现更好的选择呢? 没错,就是矿石本身。工业上也是这样做的:



总方程式如下:



这个方程式相当于 Cu_2S 的不完全燃烧,可以直接得到粗铜。

但用矿石直接冶炼后得到的粗铜纯度只有 98%~99%,达不到工业对铜的需求,我们还需要对铜进行进一步的提纯。工业上通常采用电解法进行提纯。所谓电解法,就是将粗铜和精铜分别

与电源的正极(在电解池中称为阳极)和负极(在电解池中称为阴极)相连,以 CuSO_4 溶液作为电解液来进行电解。反应装置示意图如图 1-19 所示。

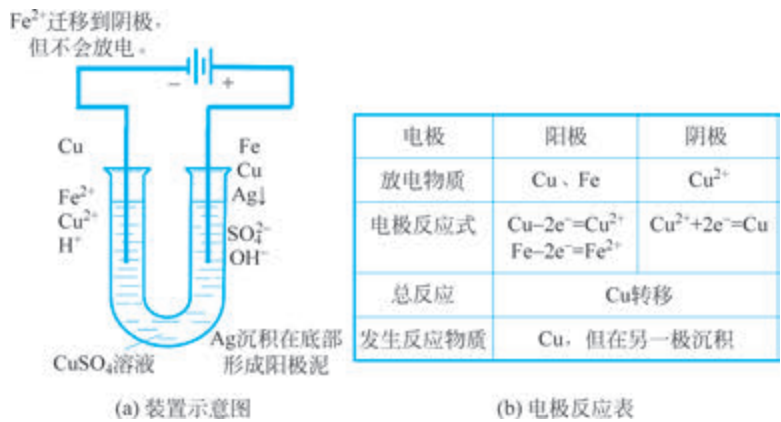


图 1-19 电解精炼铜示意图

粗铜中混有的杂质可以大致分为两类,一类是比铜活泼的金属,如锌、铁等,另一类是比铜稳定的金属,其中含量最高的是银。开始通电后,阳极的粗铜开始失去电子,由于越活泼的金属越容易失去电子,比铜活泼的金属会优先失去电子,变成离子进入溶液,这一过程称为放电。当活泼金属放电完毕后,铜开始放电,而比铜稳定的金属不会放电,会从粗铜阳极上掉落下来,称为阳极泥(图 1-20)。阳极泥中,主要成分为银和未参与放电即掉落的铜,其中还含有一些贵金属。

在阴极一侧的精铜本身不会得到电子,得到电子的是溶液中的 Cu^{2+} ,被还原为单质铜从而在阴极上析出。由于阳极一侧不断补充 Cu^{2+} ,溶液中的 Cu^{2+} 浓度在短时间内几乎保持不变。但是,在阳极被溶解的过程中也会产生一些活泼金属阳离子,如 Zn^{2+} 和 Fe^{2+} ,但因为 Cu^{2+} 的得电子能力更强,而且这些离子比 Cu^{2+} 浓度低得多,它们不会参与放电。不过随着电解的进行,活泼金属离子越来越多,这时就要定期更换电解液了。

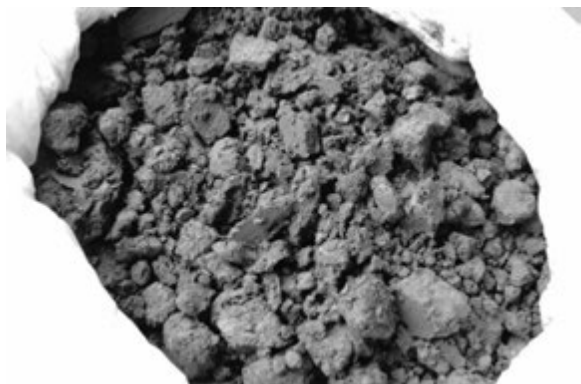


图 1-20 阳极泥

总之,这就是电解精炼铜的过程。其他对纯度要求较高的金属,如银、镍也可以用这种方法进行电解精炼。经过电解精炼,铜的纯度可以达到 99.95%,此时的铜即可满足工业需求。



第5节 氯元素：从战场毒气到生命电解质的救赎故事

2020年，人们为了对抗病毒使用了各种各样的消毒剂。在很多消毒剂中，会标注一个称为“有效氯含量”的指标，数字越大，消毒效果也就越好(图 1-21)。

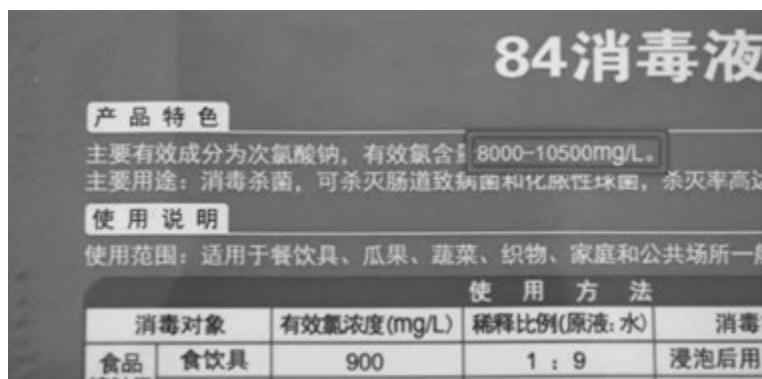


图 1-21 84 消毒液标签上标注的有效氯含量

提到氯，我们自然不陌生。食盐的主要成分是 NaCl ，氯也是人体必需的常量元素之一。那么，这个“有效氯含量”中的氯和 NaCl 中的氯是一样的吗？它们的性质又有什么区别呢？

一、臭名昭著的毒气：氯气

1915年4月22日，第一次世界大战，第二次伊普尔战役。

作为协约国的英国也和法国组建联军，他们小心翼翼地挖着战壕，一边前进一边躲避那随时可能爆炸的炮弹。

突然，一股黄绿色的气体向英法联军的阵地扑面而来，首当其冲的便是那些战壕中的士兵。他们还没来得及反应，就被这刺鼻的气味呛得涕泗横流，然后就因为吸入了过多的毒气，倒在了战场上。

这是历史上第一次大规模使用毒气弹，也让 Cl_2 这样一种本应服务于人类的物质，因为出现在战场上而臭名昭著。

从以上示例可以看出 Cl_2 的一些性质，它是一种黄绿色、有强烈刺激性气味的有毒气体，密度比空气大。

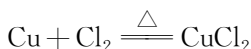
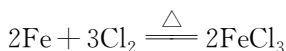
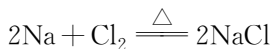


图 1-22 氯的原子结构示意图

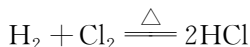
那么 Cl_2 为什么具有如此强烈的毒性呢？这需从 Cl_2 的结构说起。氯的原子结构示意图如图 1-22 所示。从图中我们可以看出， Cl_2 最外层电子数高达 7 个，也就是说，它距离最稳定的 8 电子结构仅一步之遥。而实现 8 电子结构的方法也很简单，只要从别的地方

得到一个电子就可以了。像这种容易得到电子的性质在化学上称为氧化性， Cl_2 的结构决定了它具有比较强的氧化性。吸入 Cl_2 的士兵肺部细胞的电子被 Cl_2 疯狂夺取，也难怪他们会中毒。

除体内的分子外， Cl_2 还可以夺取哪些物质的电子呢？大多数金属通常可以通过失去电子达到稳定结构，这种容易失去电子的性质称为还原性。如果金属把电子给 Cl_2 ，岂不是两全其美？于是，当金属遇到 Cl_2 的时候，它们之间就可以通过转移电子的方式形成稳定的化合物。实际上，很多金属可以在 Cl_2 中燃烧，常见的钠、铁和铜都可以在 Cl_2 中燃烧，并且因为 Cl_2 的强氧化性而呈现常见的高化合价。



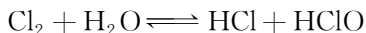
而一些同样具有还原性的非金属,如 H_2 也可以被 Cl_2 氧化。



这种氧化性也为我们检测 Cl_2 带来了一些方便。除单质外,一些元素的化合物也具有还原性。如碘化钾(KI)就可以被 Cl_2 氧化生成 I_2 ,而 I_2 可以通过淀粉进行检验。也就是说,如果我们将 KI 和淀粉混合在一起,遇到 Cl_2 的时候就会显现出 I_2 与淀粉的蓝色,这也是在实验室中检测氧化性气体的方法之一。



更加神奇的是, Cl_2 在一定条件下甚至可以氧化自身。如果将 Cl_2 通入水中,其中一部分 Cl_2 会被自身还原,变成 HCl ,从而让一部分氯满足 8 电子稳定结构。而另一部分 Cl_2 会失去电子,变成 +1 价的氯,这种物质称为次氯酸(HClO)。当然,由于 HClO 也是一种强氧化剂,这个反应进行得并不彻底,也就是说氯水中会同时存在 Cl_2 、 HCl 和 HClO ,而 Cl_2 的量要高于 HCl 和 HClO 。



所以我们在描述溶液中卤素置换反应的时候,一般用 Cl_2 作为反应物进行研究。

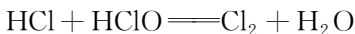
二、消毒液中的明星：次氯酸

HClO 是一个我们不太熟悉的物质,我们如何了解它的性质呢? 首先从名字来判断,它具有酸的通性,如可以与金属、碱和碱性氧化物等物质反应。其次, HClO 中的氯为 +1 价,0 价的 Cl_2 尚且具有很强的氧化性,那么 +1 价的 HClO 呢? 我们看一下 HClO 的分子结构(图 1-23),氯原子吸引电子能力比氧弱,所以 HClO 中的氯原子比 Cl_2 中的氯原子更渴望得到电子从而成为 8 电子稳定结构。



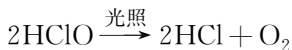
图 1-23 HClO 的球棍模型

所以 HClO 同样具有强氧化性, Cl_2 能够氧化的物质, HClO 同样可以氧化。除此之外, 它还能氧化 HCl, 成为 Cl_2 。这一反应便是 Cl_2 与水反应的逆反应。



HClO 氧化性的集中体现就是它还具有漂白性。如果将有色的物质放在干燥的 Cl_2 中, 物质不会褪色, 而放在氯水中会迅速褪色。很多有机物具有特殊的结构, 电子可以在不同能级之间跃迁, 吸收可见光从而显现出颜色, 这就是有机色素。HClO 恰恰可以破坏这样的结构, 将这种结构通过氧化的方式彻底“撕裂”, 这就是 HClO 的漂白性。除此之外, HClO 还是一种高效杀菌剂, 利用的也是 HClO 的强氧化性。

HClO 在漂白、消毒领域能大显身手, 可是本身并不稳定。如果将 HClO 长时间暴露在光照之下, 一段时间之后漂白性便会大打折扣。这是因为 HClO 分子中 +1 价的氯氧化性太强了, 甚至可以夺取分子内氧原子的电子, 自身得到电子后成为稳定的 +1 价。如果温度过高的话, 这一反应也会发生。



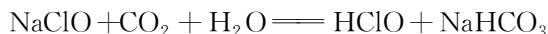
人们为了克服 HClO 不稳定的困难, 将 HClO 制成了次氯酸盐, 这样能够保证 +1 价氯存在的同时, 还能让 ClO^- 带有负电荷导致 +1 价氯氧化性降低(如果同学难以理解的话, 可以理解成还能让 +1 价氯稳定)。根据产物阳离子的不同, 漂白物质存在形式也有区别。其钠盐通常以溶液的形式售卖, 称为漂白水, 而钙盐通

常以粉剂的形式售卖,称为漂白粉。在制备过程中,通常将 Cl_2 通入碱溶液或悬浊液中,此时 Cl_2 溶于水形成的 HClO 即可和碱中和,生成对应的盐。



当然次氯酸盐也并非绝对稳定,在比较高的温度下, ClO^- 会继续歧化为 ClO_3^- (氯酸根),在更高的温度下还有可能发生分解产生 O_2 ,或者歧化为 ClO_4^- (高氯酸根),这些物质中氯为+5价或+7价。而 ClO_4^- 对应的酸高氯酸 HClO_4 则为中学化学中最强的酸。

可是,次氯酸盐几乎不具有漂白性,那如何将次氯酸盐转化为 HClO 呢? HClO 的酸性很弱,甚至比碳酸还要弱。所以水溶液中如果有 CO_2 ,次氯酸盐就会和碳酸反应重新生成 HClO ,此时的溶液同样具有漂白性。漂白液和消毒液中的“有效氯含量”指的就是能够通过反应生成 HClO 的量。



那如果加入更强的酸,如洁厕灵这种含有强酸的物质,这个反应岂不是能更彻底吗?千万不要这么做。因为漂白粉和漂白液中都有 Cl^- ,如果酸性过强, HClO 的氧化性会进一步提高以至于可以将 Cl^- 氧化为 Cl_2 ! 在新闻中经常报道这种事件,所以一定不要把漂白液或消毒液与强酸性物质混合。

三、无处不在的氯离子

相比于0价和正价氯来说,氯的最稳定化合价是-1价,其存在形式为 Cl^- 。最外层7个电子的氯原子在得到了一个电子之后,便成了最稳定的结构。但 Cl^- 的电子也存在得而复失的可能——只需要用一个更强的氧化剂夺取 Cl^- 的电子即可,如 HClO 就是一个可以在酸性条件下进一步夺取 Cl^- 电子的物质。

除 HClO 外,一些其他的强氧化剂也可以在一定条件下夺取 Cl^- 的电子,如高锰酸钾(KMnO_4)、重铬酸钾($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$),这也是实验室制备 Cl_2 常用的方法。而最经典的氧化剂是二氧化锰(MnO_2),当年舍勒就是用 MnO_2 和浓 HCl 共热,第一次制备出了 Cl_2 。但这样制备出来的 Cl_2 会不可避免地混有一些浓 HCl 挥发出来的氯化氢,为了除去氯化氢,一般采用饱和食盐水吸收氯化氢,再通过浓 H_2SO_4 除去水分即可得到比较纯净的 Cl_2 。由于 Cl_2 密度比空气大,可溶于水,一般采用向上排空气法收集。此外, Cl_2 毒性较强,所以过量的 Cl_2 需要进行尾气处理。处理方法也很简单,只要用碱溶液吸收就可以了。

在自然界中,海洋是绝大多数 Cl^- 的最终归宿,因为绝大多数的氯化物可溶于水。只有氯化银(AgCl)等极少数的氯化物水溶性较低,但这也给我们检测 Cl^- 带来了便利,因为 AgCl 是为数不多的不溶于酸的银盐沉淀。如果想要检测溶液中是否存在 Cl^- ,最方便的办法就是先向溶液中加入稀 HNO_3 ,保证溶液是酸性的前提下,再向溶液中加入硝酸银(AgNO_3)溶液,如果产生了白色沉淀则证明溶液中有 Cl^- 。

第6节 硫元素：从火山喷发到工业多面手的进阶之路

2023年,我国 H_2SO_4 总产量为 1.115 亿 t,位居世界第一,占比 33.2%。巨大的 H_2SO_4 产量也是我国发达的石油化工产业的标志。提起 H_2SO_4 ,大家一定不陌生,在初中阶段就知道它是一种常见的强酸,核心元素硫也是自然界中常见元素之一。那么自然界中的硫是以什么形式存在的?又如何用这些硫生产出应用广泛的 H_2SO_4 ? H_2SO_4 又有什么性质呢?

一、单质

印度尼西亚、爪哇岛、卡瓦伊真火山。

蓝色的火焰从火山口喷涌而出,一边燃烧,一边冒着刺鼻的气体,但这丝毫没有阻挡慕名而来的参观者们。众多游客穿着厚重的能够过滤废渣和毒气的防护服登上火山,就是为了亲眼看见蓝色火焰。

而在火山口附近,大片黄色的矿石裸露在地表。它们一触即碎,但因为这些矿石纯度很高,甚至可以做出工艺品来进行售卖,当地的矿工们即使冒着生命危险,也要采集这些矿石。

这些黄色的矿石便是硫(图 1-24),和 Cl_2 不同的是,硫可以在自然界中以单质,即游离态的形式存在。硫的原子结构示意图如图 1-25 所示。对于硫来说,其最外层有 6 个电子,需要得到两个电子才能达到 8 电子稳定结构,因此得电子的“意愿”并不强烈,也就是说,硫单质氧化性较弱。

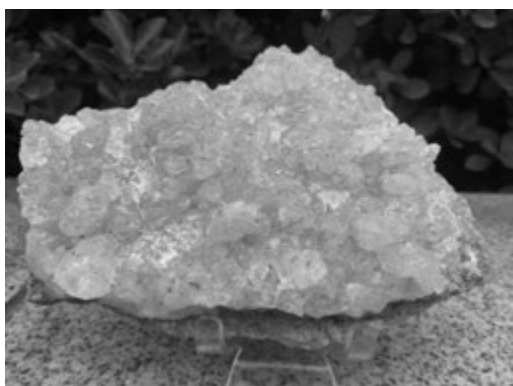


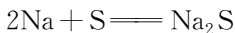
图 1-24 天然硫



图 1-25 硫的原子结构示意图

和 Cl_2 一样,硫也可以氧化一些金属。但和 Cl_2 不同的是,硫与金属反应通常生成低价金属硫化物。这是因为硫的氧化性较

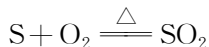
弱,无法将金属的价电子悉数夺走。



硫也可以将 H_2 氧化为硫化氢(H_2S)



和 Cl_2 不同的是,硫的最外层电子比氯容易失去,因此硫具有一定的还原性。不过要是想一次性失去 6 个电子也绝非易事,而且这种还原性仅仅体现在温度较高且遇到较强氧化剂的时候,如硫可以在空气中燃烧。

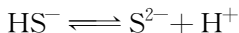
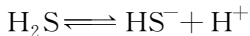


硫既不具备 Cl_2 那样强的氧化性,也不具备金属那样强的还原性,因此在自然界中得以以游离态存在。

二、神经毒剂硫化氢

硫的最低化合价为 -2 价,其典型代表便是 H_2S 。在厌氧环境下,鸡蛋中的蛋白质的硫元素便会被还原成 H_2S ,从而散发出一股臭鸡蛋的气味。 H_2S 毒性很强,在浓度过高的时候甚至可以麻痹神经从而让人闻不到气味,所以如果进行有可能产生 H_2S 的实验,一定要注意安全。

H_2S 可以以 $1:2.6$ 的比例溶于水,其水溶液呈酸性,又称为氢硫酸。



和 HClO 一样,氢硫酸也是一种极弱的酸,酸性弱于碳酸。所以如果将硫化钠(Na_2S)的水溶液置于空气中,会因为与碳酸的相互作用而产生 H_2S 气体,从而散发出一股臭鸡蛋的气味。此外, Na_2S 因水解具有较强的碱性,故 Na_2S 又称为“臭苏打”。