

铬元素的应用

——机遇与挑战

作者：费转，白建新，蔡西友，刘思欢；Email: feizhuan123@163.com

背景介绍



①【图1】铬的双面性（图片来源于豆包 AI 生成）

对于元素“铬”，大家可能并不陌生。越王勾践剑、梵高的伟大作品《向日葵》、不锈钢刀具及锃亮的车身等等这些熟悉的物品背后都有着这位神秘物质铬元素的身影。然而，这位功臣，却也有它阴暗的一面，6价铬（Cr(VI)）被世界卫生组织列为最高等级致癌物（Group 1），对自然环境及生物体危害极大。面对矛盾的共同体（图1），我们又该如何应对它带来的挑战？让我们一同走进元素“铬”的世界。

1. 快速认识铬元素

铬在元素周期表中排行 24，相对原子质量为 51.9963 ± 0.0013 ，属于过渡金属，具有金属的典型特性，又有自身的独特性质。

铬有着坚硬美丽的外壳，受人青睐。在金属界中，有着耀眼的钢灰色光泽，有着自然界最高硬度“硬汉”之称，有着高温下依然桀骜不驯及保持稳定形态的特性。在空气中，会迅速生成一层致密的氧化膜，就像军人穿上了“铠甲”，阻止氧气的进一步进攻，即使在高温条件下也很难被氧化。在浓硝酸中，同样也会形成致密的氧化膜而钝化，阻止铬进一步被腐蚀。

铬有着特殊的磁性让科学家不断探索。基态铬原子的电子构型比较特殊，是周期表中第一个出现“反常”电子排布的元素，基态原子的电子组态为 $3d^5 4s^1$ 。铬的磁性是其最显著的特征，当温度高于 $38\text{ }^\circ\text{C}$ 时呈现顺磁性；而温度较低时，在室温或更低，它却是唯一呈现反铁磁有序性的元素^[1]。

铬有着多彩的颜色，吸引着大家。不同氧化态的铬化合物会显示出不同的颜色，铬的价态从 -2 到 +6 价都有，常见价态是 +3 和 +6 价（图 2）。这种颜色



图 2 不同氧化态的铬的化合物呈现的颜色（图片来源于豆包 AI 生成）

变化的奥秘，是由于不同价态下铬原子对光线的选择性吸收，而本质的原因是由电子构型差异与配位环境变化导致的光学响应。

2. 铬元素的发现及其认识

铬元素的发现和认识，基于色彩，充满了偶然，却又是文明进步的必然^[2]。

我国古代的西夏时期，工匠们喜欢用含铬的矿物（如红色铬铅矿）烧制鲜艳的釉下彩。匠人们实践中的灵光一现，成就了塞外风景中的一抹鲜红，而铬仍似待字闺中的处子，隐匿在神秘的面纱之下。但人类探索的脚步却从未停歇。1752 年，俄罗斯金矿中出现的红铅矿，因其绚丽的色

泽而被画师们视为瑰宝。1766 年，德国矿物学家莱曼被西伯利亚红铅的艳红吸引，他将矿石溶于盐酸后发现溶液呈绿色，误判其为含铅矿物——因此与历史命名权擦肩而过。1770 年，俄国院士帕拉斯将这种奇异矿石带至西欧，激发了化学界的研究热情。直至 1796 年，法国化学家沃克兰以超凡的洞察力和昼夜不停的实验，推测出矿石中隐藏着新元素。2 年后，他再次投入研究，将矿石用盐酸处理，以木炭高温还原，最终提炼出闪亮的金属铬单质，从此揭开了这位“多彩元素”的面纱。法国化学家孚克劳与矿物学者阿维因其化合物能呈现红、紫、黄和绿等变幻莫测的色

彩,所以以希腊文“Chrōma”(意为颜色)为它命名,Chromium(铬)由此正式步入元素殿堂。

铬元素要想真正获得科学的确认,不仅要到铬单质,还要精确测定其相对原子质量。这是一条从模糊走向精确的漫长之路:1810年英国科学家约翰·道尔顿预测的铬原子质量为氢原子的12倍、1814年瑞典化学家贝采利乌斯测得铬的相对原子质量为113.35,测出铬的相对原子质量与真实值都相差甚远;随着化学家对原子的不断认识和科技的进步,到了1819年师从贝采利乌斯的米希尔里希借同晶定律测得铬的相对原子质量为56.29,结果虽不太准确,却与真实值越来越靠近;在19世纪50年代末,意大利化学家康尼查罗测得铬的相对原子质量为53,该结果与现代数据非常接近;至1960年,美国人弗莱施与斯塔利利用同位素丰度,计算出铬的相对原子质量的精准值为 51.9963 ± 0.0013 ,次年以新基准测得的国际相对原子质量表中铬的相对原子质量为51.996,此后一直沿用至今。每一次数值的修正,不仅是技术的飞跃,更是人类向真理不断迈进的过程。

3. 铬的双面性

3.1 铬的应用价值

3.1.1 医学应用

在医学领域中,铬的作用不容忽视:在人体内,三价铬是必需的微量元素之一^[3],它参与脂肪、糖和蛋白质的代谢过程,促进造血过程,还能辅助治疗糖尿病等疾病,辅助维持人体血糖保持正常水平。其原理涉及激活胰岛素受体信号通路和促进细胞摄取葡萄糖,并可能通过抗氧化作用保护胰岛细胞,对维持正常血糖代谢至关重要,可以称得上是人体忠实的“血糖守护者”。在外科手术领域,钴铬钼合金广泛用作骨替代材料^[4]治疗疾病;而钕铬钇钽石榴石激光在口腔医学的成功应用,获得了显著的医疗效果^[5]。

3.1.2 工业应用及其它应用

铬元素在现代工业领域中被广泛应用。铬单质的特殊性质,让其在半导体制造、光学、电镀、冶金、合金和航空航天等多领域发挥着不可替代的作用。含铬化合物的应用是多种生产工艺的重要一环,在皮革制造业,铬盐是不可或缺的鞣制剂,能使皮革经历从坚硬粗糙到柔软细腻的神奇转变;在电镀工业中,铬酸如同“魔法药水”,可将坚硬的铬金属均匀镀在物品表面,让其具有闪亮的外观和卓越的耐腐蚀性;在印染行业及艺术、珠宝领域,含

铬的多种化合物因其绚丽的颜色赋予物质多彩的视觉享受,如:铬酸铅的黄色点燃梵高《向日葵》的炙热、铬绿渲染着莫奈《睡莲》里田田的叶子、一抹铬橙承载起雷诺阿心中的《小船》,三价铬离子一面为刚玉赋予红宝石的贵气,转身又为铍铝硅酸盐晶体凝固祖母绿的幽深,原理就是铬作为致色元素对光选择性吸收的结果。过去的酒精检测中,重铬酸钾溶液因在反应前后橙红色到灰绿色的颜色变化 $[2K_2Cr_2O_7$ (橙红色) $+ 3C_2H_5OH + 8H_2SO_4 = 2Cr_2(SO_4)_3$ (灰绿色) $+ 2K_2SO_4 + 3CH_3COOH + 11H_2O]$,为交通执法提供了重要依据;在电池领域中,以亚铬酸钠为材料的电池,大大提高了电池的续航时间^[6]。

3.2 铬污染带来的风险

随着工业的发展,铬污染带来的安全隐患也逐渐出现在大众视野。在铬矿的开采、冶炼,相关电镀行业、皮革鞣制及印染工业都会产生大量的含铬废水,不当排放可对周边水系及自然环境、生物体造成重大危害。在农业生产中,由于大范围使用农药、塑料薄膜等对土壤造成铬污染^[7],铬会干扰土壤中有益微生物的活性,抑制氮素转化和有机质分解,最终会引起土壤肥力下降^[8]。铬作为一种重金属元素,在特定

情形下会对人体造成诸多危害，其主要表现为皮肤过敏及溃疡、呼吸系统及消化系统损伤、引起脑膜炎和肺癌等^[9]。其危害程度因接触方式、剂量等因素而有所不同。六价铬(Cr(VI)) 毒性强且致癌性明确，被世界卫生组织列为最高等级(Group 1) 致癌物，并因其强氧化性可以破坏生物分子，如果与人类 DNA 结合可导致遗传损伤和干扰必需微量元素代谢等。而三价铬(Cr(III)) 虽然作为人体必需的微量营养素^[10]，参与人体三大代谢(糖类、脂类和蛋白质代谢)的生理过程，但超过其所需生理阈值也会产生毒性，长期过量接触 Cr(III) 可能引发皮肤过敏，且有研究提示其潜在致癌风险^[10]。随着工农业生产的发展以及人们对生命健康领域的愈发关注，国内外均针对铬污染问题出台了具体的相关举措，例如：欧盟国家规定 2020 年后禁止任何形式的铬排放，《中华人民共和国土壤污染防治法》明确将铬污染场地列为重点管控和修复对象，并对铬的排放标准规定为六价铬(Cr(VI)) 离子的浓度上限规定为 0.5 mg/L，总铬含量不得超过 1.5 mg/L^[11]。

4. 铬的华丽转身

铬在地壳中的含量位居第 17 位，据统计，全球铬资源丰富在

120 亿吨以上，可供人类数个世纪的使用，但铬矿资源主要集中在哈萨克斯坦和南非两个国家，我国铬资源严重不足。随着工业化生产，我国对铬资源的需求会日益旺盛，长期依赖进口的格局短期内难以改变。因此，铬的回收利用与绿色转型，是从源头解决资源困境的必由之路，也是摆脱其环境毒性阴影、实现可持续发展的关键所在。

4.1 点石成金：铝铬渣变身高端耐火材料

曾被视为“化学定时炸弹”的铝铬渣，是冶金过程中的棘手固废。如今，它却在耐火材料领域焕发新生。铝铬渣是铝热反应高温制备金属铬时产生的有色冶金炉渣，主要成分为氧化铬和氧化铝，因其产量大、难降解且环境风险高，常被当作工业垃圾，但潜在的环境危害使其如同埋藏在生态系统中的“化学定时炸弹”。20 世纪 70 年代末，铝铬渣的无害化研究成果实现回收再利用，工业化生产，使其在耐火材料领域“变废为宝”。刘昭等^[12]用铝铬渣制备高温性能以及耐侵蚀冲刷性的复合砖，在降低窑炉内衬成本的同时，增加了铝铬渣的消化途径。王宇泽^[13]以铝铬渣和棕刚玉为主要原料，添加剂用 TiO₂，结合剂用 Al(H₂PO₄)₃ 溶液，

制出铝铬质耐火材料，研究发现，制得的耐火材料性能优异，如力学性能、高温性能及抗渣侵蚀性能等，且这一技术为有色冶金、玻璃纤维炉、煤气化炉、炭黑反应器和固废焚烧炉中的资源化利用提供了科技创新。

4.2 坚盾护核：铬涂层守护核安全

在核能领域，铬展现出“硬核守护者”的一面。核燃料包壳是核反应堆安全系统的关键组件，能密封核燃料芯块、防止放射性物质泄漏，相当于给核燃料穿上了“防护衣”。但当核电站出现极端事故时，锆合金燃料包壳就会存在极大的风险，可能会像黄油般熔化，而使物质泄漏。铬的特性：硬度高、耐腐蚀性强、传热快和抗高温等，可有效提升锆合金包壳的抗高温强度以及抗高温氧化性，由此成为事故燃料包壳涂层材料的研究热点^[14]。黄景昊等^[15]研究不同基体偏压的 Cr 涂层对 Zr-4 合金高温抗氧化性能的影响，发现基体偏压为 -100 V 时，制备的 Cr 涂层对 Zr-4 合金的保护效果最佳，生成的 Cr₂O₃ 氧化层可显著提高其高温抗氧化性。任峥豪等^[16]采用电弧离子镀膜技术在 Zr 合金表面制备 Cr 涂层，结果显示：较高的电弧电流能在单位时间内形成较厚的 Cr 涂层，且当电弧电流为 80 A 时，涂

层表面最光滑，膜基结合性能也最优。

4.3 催化魔术：铬催化剂助力碳中和

CO₂ 引起的温室效应，让科学家们头疼不已。在碳中和舞台上，含铬的催化剂正扮演着关键角色，悄悄上演废物变宝的魔术，让 CO₂ 与低碳烷烃发生脱氢反应。研究发现，科学家通过调控含铬催化剂介孔结构与活性中心，提高了 CO₂ 氧化乙苯脱氢制备苯乙烯的转化率和选择性，为绿色化工提供了新路径和方法^[17-18]。

4.4 化污为材：铬污染土重塑建材

面对铬污染土壤，资源化利用是解决困境的新思路。孔令军^[19]以人工制备铬污染土为研究对象，在实现铬污染土有效固化后，将其制成核壳型免烧结人造骨料，

替代部分天然骨料制成人造骨料混凝土，既避免了传统烧结过程中产生的 CO₂ 排放，又实现了铬污染土的资源化利用，为污染场地治理与建筑资源循环提供了可行方案。

5. 未来挑战

铬元素既在工农业生产及国计民生中发挥着举足轻重的作用，同时又因其毒性对自然环境及生物体的安全隐患，成为制约可持续发展的双刃剑。在铬元素大量应用的同时，科学家正绞尽脑汁扬长避短，在充分利用铬元素带来福利的同时，规避其危害，使工农业生产中出现的有害副产物无毒化或成为可循环及持续应用的绿色资源，而不是环境炸弹。

然而，在实际生产中仍面临着许多现实挑战：制革工业中铬

利用率低^[20]，合成高效可降解的铬鞣助剂以减少对环境的污染势在必行^[21]；铬涂层在某些极端条件下的稳定性需要进一步提升以适应生产工艺的更高要求^[22]；开创理论到实践的历程，使铬的污染土壤资源化利用真正实现从实验室模拟走向真实场地；助力碳中和的铬催化剂的大规模应用成本问题及工业化生产可行性仍停留在实验室阶段，可行性论证仍在持续进行中；发展中国家及第三世界对于含铬原料及废渣、废料的处理及无毒化、再利用问题仍突出并亟待解决等等。

尽管前路漫漫、任重道远，但随着技术的持续突破，我们化学工作者有理由相信，铬元素有望在更多领域发挥重要作用，实现绿色科技的可持续发展。

参考文献

- [1] 马建功, 邱晓航. 铬元素的前世今生——第54届国际化学奥林匹克试题第2题解析[J]. 大学化学, 2022, 37(12): 12-16.
- [2] 达璇, 袁振东. 从铬铅矿到铬同位素：铬元素的发现及其概念的发展[J]. 化学教育（中英文）, 2024, 45(20): 123-128.
- [3] Coetzee J J, Bansal N, Chirwa E M N. Chromium in environment, its toxic effect from chromite-mining and ferrochrome industries, and its possible bioremediation[J]. Exposure Health, 2020, 12(1): 51-62.
- [4] 鲍善芬, 赵霖, 孙燕群, 等. 置入钴铬钼合金人工髋关节后犬毛、肝、肾中有关元素的含量及影响[J]. 中国人民解放军军医进修学院学报, 1987(4): 326-328.
- [5] 吴剑锋, 苗博, 李欢. 钼铬钇钽石榴石激光在口腔医学中的应用[J]. 中国医学装备, 2021, 18(12): 163-167.

- [6] Haixia R, Yu L, Qiao N, et al. Unraveling anionic redox for sodium layered oxide cathodes: Breakthroughs and perspectives[J]. *Adv Mater*, 2021, 34(8): 2106171.
- [7] Wan Y, Liu , Zhuang Z, et al. Heavy metals in agricultural soils: Sources, influencing factors, and remediation strategies[J]. *Toxics*, 2024, 12(1): 63. DOI:10.3390/toxics12010063.
- [8] 郭可欣, 李天元, 宋繁永, 等. 土壤-作物中重金属生物有效性和可给性研究进展[J]. *中国环境科学*, 2023, 43(8): 4164-4174.
- [9] 魏振枢. 铁氧体法处理含铬废水工艺条件探讨[J]. *化工环保*, 1998, 18(1): 33-36.
- [10] Zhang R S, Tian Y Q. Characteristics of natural biopolymers and their derivative as sorbents for chromium adsorption: A review[J]. *J Leather Sci Eng*, 2020, 2(1): 24.
- [11] 杜蛟. 磁性分离回收处理含铬工业废水及人工神经网络模型研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2023.
- [12] 刘昭, 袁林, 叶国田, 等. 铝铬渣复合砖在锶反射炉中的应用研究[C]//2015耐火材料综合学术年会暨第十三届全国不定形耐火材料学术会议和2015耐火原料学术交流会论文集. 2015: 554-557.
- [13] Wang Y Z, Zhao H Z, Zhang H, et al. High-temperature performance in $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Cr}_2\text{O}_3$ refractories: Effect of Al_2TiO_5 [J]. *Ceramics Int*, 2022, 48(3): 3912-3922.
- [14] 王瑶, 李金山, 陈波, 等. Cr涂层钎合金耐事故燃料包壳材料高温蒸汽氧化行为研究进展[J]. *稀有金属材料与工程*, 2024, 53(11): 3271-3280.
- [15] 黄景昊, 余清远, 肖魏魏, 等. 电弧离子镀基体偏压对铬涂层Zr-4合金高温抗氧化性能的影响[J]. *核动力工程*, 2021, 42(S1): 121-127.
- [16] 任峥豪, 陈海桥, 杨晨, 等. 电弧离子镀电弧电流对铬涂层钎合金高温抗氧化性能的影响[J]. *粉末冶金工业*, 2023, 33(2): 38-44.
- [17] 朱雅丽. 铬基氧化物的可控制备及其催化 CO_2 氧化乙苯脱氢的研究[D]. 西安: 陕西师范大学, 2019.
- [18] 张文婷, 敬方梨, 黎志敏, 等. 负载型SBA-15铬基催化剂的制备及其催化 CO_2 氧化乙烷脱氢性能[J]. *合成化学*, 2019, 27(6): 470-475.
- [19] 孔令军. 铬污染土制备人造骨料性能及应用研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2025.
- [20] 陈勇波, 王俊超, 李开军, 等. 聚乙二醇化多环氧共聚物的清洁化铬鞣应用[J]. *皮革科学与工程*, 2023, 33(3): 37-43.
- [21] 白波涛, 韩庆鑫, 杨广育, 等. 含铬废水和污泥中铬的处理研究进展[J]. *皮革科学与工程*, 2024, 34(3): 38-44.
- [22] 杨健乔, 恽迪, 刘俊凯. 铬涂层钎合金耐事故燃料包壳材料事故工况行为研究进展[J]. *材料导报*, 2022, 36(1): 102-113.