

污水中Cr(VI)的化学治理方法

刘雪芳¹, 夏宝国¹, 阿成·阿德力别克², 刘天宝^{3*}, 闫秀玲^{1*}

¹伊犁师范大学化学化工学院, 新疆 伊宁

²伊犁师范大学法学院, 新疆 伊宁

³东北石油大学化学化工学院, 黑龙江 大庆

收稿日期: 2023年7月3日; 录用日期: 2023年8月8日; 发布日期: 2023年8月28日

摘要

六价铬离子由于其毒性大、不可生物降解和生物富集等特点, 重金属铬污染已被确定为全球水生态系统的威胁。本文综述了现在广泛用于处理重金属铬废水的方法, 包括离子交换法、溶剂萃取法、电解法、生物法以及吸附法等。目前, 铬元素的治理仍需持续关注, 以防止铬污染事件的发生, 从而保护人们免受铬污染的危害。

关键词

铬污染, 水处理, 化学治理

Progress in the Treatment of Cr(VI) in Wastewater

Xuefang Liu¹, Baoguo Xia¹, Acheng Adelibieke², Tianbao Liu^{3*}, Xiuling Yan^{1*}

¹College of Chemistry and Chemical Engineering, Yili Normal University, Yining Xinjiang

²Law College, Yili Normal University, Yining Xinjiang

³College of Chemistry and Chemical Engineering, Northeast Petroleum University, Daqing Heilongjiang

Received: Jul. 3rd, 2023; accepted: Aug. 8th, 2023; published: Aug. 28th, 2023

Abstract

Hexavalent chromium pollution has been identified as a threat to the global aquatic ecosystem because of its toxicity, non-biodegradable and bioaccumulation characteristics. This paper provides a review of the methods that are widely used for treating heavy metal chromium wastewa-

*通讯作者。

文章引用: 刘雪芳, 夏宝国, 阿成·阿德力别克, 刘天宝, 闫秀玲. 污水中 Cr(VI)的化学治理方法[J]. 材料科学, 2023, 13(8): 778-785. DOI: 10.12677/ms.2023.138085

ter, including ion exchange, solvent extraction, electrolysis, biological methods, and adsorption. Currently, it is crucial to continue to focus on the treatment of chromium to prevent the occurrence of chromium pollution incidents and to protect people from the harm caused by pollution.

Keywords

Chromium Pollution, Water Treatment, Chemical Treatment

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着金属制造业、电镀业、制革业等工业的快速发展，人们发现铬污染对环境构成了严重的威胁。由于六价铬是重金属元素，被认为是具有毒性和致癌性的物质且六价铬易形成沉淀，毒性比三价铬更强是三价铬的 100 倍。因此我国将其列入水环境污染物的黑名单。自 2006 年起，美国毒物管理局就开始研究六价铬对人的危害，2008 年发现含有六价铬的生活用水会使实验室的小白鼠患癌症。目前，仅有加州制定了饮用水中六价铬含量不得超过 1×10^{-8} 的标准，但这项规定仍然是加州环境与健康危害测评标准量 (0.02 ppb) 的 500 倍。此外，一项实验的研究也表明，长时间接触六价铬的人更容易患上胃癌。因此，对于水中铬的处理，亟需新型的技术。

2. 含铬重金属工业废水的来源及危害

重金属离子约有 60 种。而硒和砷的某些性质和毒性与重金属相似，因此也被称为重金属元素。[1] 重金属元素不易在水中降解，[2] 如果与其他物质结合，会产生毒性较大的无机或有机重金属污染。[3] 制革厂、金属冶炼业等都是重金属工业用水被污染的重要来源。而废水和废水之间所含有的重金属的种类、形态和含量也会有所差别。且水体中所含的重金属的浓度会随着温度、pH 值的变化而改变。重金属元素或离子进入水体后，仅有小部分被水体生物消耗，大部分重金属元素则会出现聚沉现象。含有重金属的元素的工业污水、残渣排入土壤地表中，会抑制生物或植物的发育成长，因此重金属元素的污染将会使农业和林业出现减产现象。重金属污染对人们的健康安全危害也非常大，如铬、铅、锡等，较少剂量就能使人的代谢功能紊乱，从而引发许多疾病，如身体的衰老周期将会提前，身体的某些功能会退化，危害人体健康，甚至会死亡。[4] 因此，如何有效地防治重金属的污染是现今环境保护领域中的一个重要问题。

2.1. 含铬废水的主要来源

环境中重金属 Cr 离子的污染主要是由于各个工业产业所导致的，金属制造业、印染产业等，除此之外燃料燃烧所产生废弃物中含有大量的铬离子，这些是水污染和大气污染的原因。当今在我国，有一些地表水已经被重金属铬严重污染，铬污染地下水也极为普遍，因此地表水和地下水、土壤和沉积物等所受到的铬污染极其受到关注。[5]

20 世纪以来，我国的工业废水中含铬的废弃物排放量达 1 千万吨左右。[6] 由于我国的金属矿山的加工与采选工业产生出大量的废渣和废水，其造成的污染，变成了限制矿业废弃物资源化的最主要问题。金属矿山在采矿和选矿过程中，也产生了大量含铬、镉、锌等重金属的废水和废渣。[7]

2.2. 含铬废水的危害

六价铬属于国际上公认的致癌重金属之一，它能够引起细胞突变甚至致癌。[8]三价铬是人与生物生存所必需的微量元素之一，并且三价铬不易在动物的肾、肝、脾中积累，但会储存在肺中，对肺造成危害。[9] Cr(VI)的毒性却是 Cr(III)毒性的 100 倍，致畸性甚至达到上千倍。

铬与它的化合物对人的皮肤有很大的损伤作用，如果皮肤接触它将会引起皮炎等过敏症，还可能引发“铬疮”，如果不及时去治疗，会有强烈刺痛感，且愈合较慢。[9]它还对呼吸系统也有着很大的伤害，易引起肺炎、气管炎等疾病，总而言之铬对人的健康安全和生活环境产生了极大的危害，这使得人们开始越来越关注铬污染问题。

3. 含铬废水处理的研究及治理

重金属离子的废水都含有毒性，不会分解，难以降解。它可以通过食物链的积累作用于人体的某些器官。这不仅会导致人体功能紊乱，还会影响人体新陈代谢的方面。由于重金属离子的不可分解的性质，人们只能改变其自身的化学形态，或者与其他离子形成络合物，从而被吸附或从被污染的水中分离出来。

重金属污染由于其毒性大、不可生物降解和生物富集等特点，近几十年来已被确定为全球水生生态系统的威胁。生物吸附剂由于其高效、低成本、良好的可回收性、易于储存和分离等优点，在水体污染方面，重金属处理方法具有广阔的应用前景。现在广泛用于处理重金属废水的方法，主要有离子交换法、溶剂萃取法、电解法、生物法以及吸附法等。[10]

3.1. 离子交换法

离子交换法是通过交换树脂与重金属的离子交换，降低重金属的浓度，净化水质的方法。[11]它的优点是：既能去除废水中的负离子，又能去除废水中的正离子，这样很自然使废水水质达到较高的标准；其缺点是此方法易被污染，吸附剂再生存在一定困难。因此，离子交换法在大型工业废水处理工程中应用较少。

曾婧[12]通过实验采用了 201 × 7 的阴离子交换法(强碱性)处理含 Cr(VI)废水，去除重金属离子铬的效果非常的显著，清除铬的能力将近达到 99%，且符合废水排放的规格。朱冰韧、王彦波等[13]利用大量的阴离子交换树脂 D296 去吸附 HAc-NaAc 缓冲液中的六价铬离子，该实验在处理废水的研究上又多了一种可能性，通过实验可知，此方法吸附 Cr(VI)时能够达到最大的吸附量： $325.8 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 。通过以上两种实验的验证，进一步体现了离子交换法对于废水的处理能力的强劲，同时这两种实验也为该方面的研究提供了有效的数据如曾婧的数据提供了废水处理的最佳条件为：废水 pH 值 = 4、交换时间为 60 min、交换温度为 45℃、树脂投加量为 0.9 g。而朱冰韧、王彦波等的的数据则提供了对应方法的最大吸附量。这些数据都将为未来处理废水相关问题时，提供有力的证明。

而 Heming Wang 等[14]使用了离子交换法对铬进行吸附，则与上面两种不同，不是再主要关注所用树脂和条件，而是在实验研究中对铬的去除进一步的分析为阴极还原、膜上吸附以及膜对阳极室的渗透。并发现 BPM 实现最佳的性能去除 Cr(VI)： $99.4\% \pm 0.2\%$ ，其次是 AEM： $97.9\% \pm 0.8\%$ 和 CEM： $95.6\% \pm 0.8\%$ ，尽管 PEM 不能很好地保持最稳定的 pH 值和电导率导致阳极性能和铬去除效率最低。而铬在 AEM 上的吸附量为 $91.1\% \pm 0.7\%$ ，远高于其他三种膜。铬的透过率均小于 0.2%，可以忽略不计。

Fumihiko Ogata 等[15]在 500℃或 1000℃下制备了生麦麸(WB)和煨烧麦麸(WB500 或 WB1000)，研究了它们的物理性质与其化学性质对 Cr(VI)的吸附性能。铬离子的吸附量大小为 $\text{WB} < \text{WB500} < \text{WB1000}$ 。实验结论表明，铬离子的吸附与生麦麸的表面特性有关。从水溶液中去除 Cr(VI)的最佳 pH 条件在 2 左右。最后，WB1000 可用于以 $1000 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ (至少有 5 次)的 NaOH 溶液重复 Cr(VI)吸附和解吸。结果表明，

WB1000 具有利用 NaOH 溶液从水溶液中吸附和回收铬离子的潜力。

3.2. 溶剂萃取法

由于在水和有机相中的含有着重金属离子的溶解度的差异，溶剂提取可以在有机相上溶解重金属离子，在提取溶剂和重金属之间引起某些复杂的反应，在碱性条件下进行逆提取。由于水和有机相中重金属离子的溶解度的差异，此方法的设备结构比较简单，操作也比较方便；缺点：萃取剂价钱稍贵，回收使用成本较高。李昭、王宝庆等[16]应用溶剂萃取法对某个工业废水进行处理，通过使用不同的萃取剂，不一样的萃取工艺条件，最终阐明比较萃取结果，研究结果表明铬的去除率达到 96.47%，可见其效果比较好，但萃取后的废水仍然没有达到国家所规定的废水排放标准，这就需要再次使用其他有效方法去处理。

R. Rama [17]合成了一种基于 Aliquat 336 的新型功能化离子液体羧乙酸甲基三辛基铵 ([A336]+[NAA]-表示)，并对其进行了各项的表征。得知，([A336]+[NAA]-作为萃取剂溶解在分子稀释剂(甲苯)中，在 pH 为 3 时，Cr(VI)的萃取率为 99.5%；Temitayo E. Oladimeji [18]通过实验研究了溶剂萃取吸附法处理废润滑油过程的影响，对所选三种溶剂的性能进行了研究和比较，并根据某些参数进行了介绍和讨论。此外还确定了通过温度的升高可以改善所获得的油的质量，直到高于此温度 50℃时，观察到油的质量较差；N. Rajesh 等[19]提出了一种简单的固相萃取铬离子的方法，采用 Amberlite-XAD-4 树脂柱吸附二苯碳酰二肼络合物，建立了固相萃取铬离子的方法。详细研究了酸度、色谱柱稳定性、样品体积和干扰离子等影响，不同离子的影响因素对分离效果的影响不同，最后通过对加标水样和电镀废水中铬的回收试验，验证了方法的有效性。

而 Yao L [20]等人则采取了一种新的萃取方法，不同于以往的单一使用溶剂萃取法，其利用生物质并结合了光化学从废水中萃取脱毒后的 Cr(VI)，即在选择性提取 Cr 资源的同时还对 Cr(VI)进行了脱毒，其开发了一种在可见光照射下直接使用天然生物质(淀粉、几丁质和壳聚糖)高效选择性提取 Cr(VI)水溶液的新方法，无需任何进一步处理。残渣总 Cr 和 Cr(VI)浓度分别低至 0.25 mg·L⁻¹ 和 0.16 mg·L⁻¹，低于中国(GB 21900-2008)和美国环境保护署的废水排放限值。选择性提取的 Cr 可以回收为纯 Cr。且发现淀粉对 Cr(VI)水溶液的提取能力可高于 240 mg·g⁻¹。从真正的镀铬废水中成功提取和回收 Cr(VI)表明，这种无二次污染的经济高效的方法对于实际废水处理和资源回收具有很高的可行性。

3.3. 电解法

电解是通过电极的氧化还原反应，为了从金属盐溶液中分离重金属所污染的水资源，使用直流电的处理方法。[21]此方法不仅可以去处理重金属所污染的水资源外，还可回收纯金属，特别是贵金属，如金、银、铬、铅等。其优点无需添加任何絮凝剂等化学品，该工艺技术相对成熟，清除重金属离子的比例高，无二次污染，可回收重金属沉淀，但能耗高，污水处理效果差，处理成本比较昂贵。[22]

赵丽、王成端等[23]以电解法来处理含铬离子的废水，在实验研究中通过电解还原方法获得最佳实验条件：初始废水浓度≤ 600 mg·L⁻¹，含铬离子的废水 pH = 3，投加的 FeSO₄ 量 1.2 g，反应时间 40 min，换极周期 10 min，去除铬离子的比率达到 94%，而且符合废水排放的标准。对于电解法处理废水中的 Cr 提供了一个初步的思路。

而 Tao Xu, Yihui Zhou 等[24]使用电解法直流混凝(DCC)进一步的去进行研究，但是它存在着高能耗问题，其为了减少能源使用，提高 Cr(VI)的消除效率，采用正弦交流混凝 SACC 技术。使电极上的 Cr(VI)可以通过不溶性 Cr(III)化合物的形式沉积；Yasmine Ait. Ouaisa 等[25]研究了电凝聚(EC)与吸附(AD)联用对 COD 去除率、浊度降低率和残余 Cr(VI)量的影响。

不同于上面的几种方法,万旭兴等[26]则是换了一种思路,其采用碳钢为阴、阳极,柱状活性填料为第三电极,在极间距为 5 cm,入水 pH 值为 1~2,电流密度为 $0.2 \text{ A}\cdot\text{dm}^{-2}$ 的前提下电解 38 min,得到了 Cr(VI) 的去除率达 99.9% 的结论,其为电解法处理废水中的 Cr 提供了一种新的思路。(如图 1)

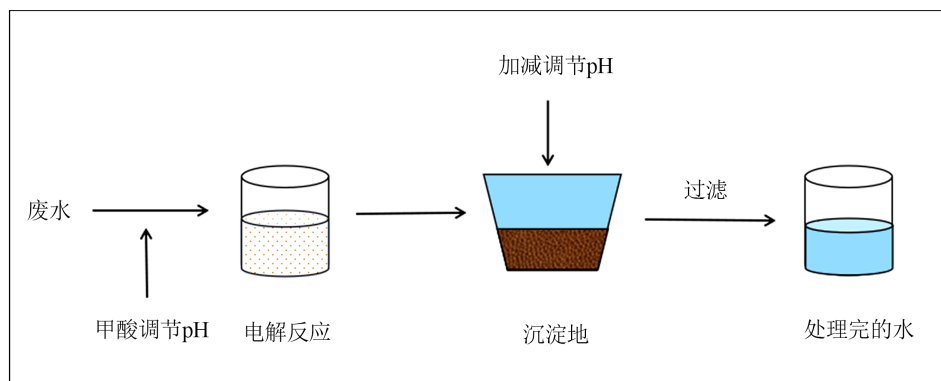


Figure 1. Flowchart of electrolytic treatment of chromium-contaminated water
图 1. 电解法处理铬污染水流程图

3.4. 生物法

生物法是指通过微生物及其代谢产物的吸附、絮凝和催化转化等作用来还原和富集重金属离子的方法。生物法主要有生物絮凝法等、生物吸附法等。[27]

(1) 生物絮凝法

生物凝集是指用微生物或他们的代谢物消除凝集和沉淀的方法。一般由微生物或其代谢产物是由粘多糖类、纤维素、糖蛋白等构成的。此方法的好处是安全可靠、无毒无害、絮凝范围广、活性高等。然而,能絮凝重金属的微生物种类有限,限制了生物絮凝的成长。[28]程永华等[29]证明了微生物絮凝剂对重金属离子有着很强的吸附效果,并且它不会造成二次污染。刘伟[30]提出使用自制生物絮凝剂同石灰石,在废水中处理镉、铅和铜等重金属时,发现:生物絮凝剂需要 $0.25 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$,实验反应时间 2/3 h,反应 pH = 10,重金属离子的剩余浓度均符合废水排放的标准。Yumei Li 等[31]发现来自节杆菌 B4 (B4-EPS) 的胞外多糖表现出良好的 Cr(VI) 去除效果,不需要任何 pH 调节,因此 $50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 Cr(VI) 可以被 $4 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 B4-EPS 完全去除。如果 Cr(VI) 的初始浓度低, Cr(VI) 消除的反应速度会加速。缩短反应时间至 6 h 以下。X 射线光电子能谱和紫外可见光谱表明,随着绿色反应产物的出现, B4-EPS 将 Cr(VI) 还原为 Cr(III)。此外,还提出了 B4-EPS 氧化絮凝解毒 Cr(VI) 的可行方案。

(2) 生物吸附法

一种通过细胞产生的吸附、离子交换作用、离子结合形成稳定的离子等作用来吸附废水或污水中的重金属离子的方法。生物吸附剂很常见,它的来源较广泛,像真菌、酵母、藻类等还有一些细胞的提取物。它具有适用范围广,处理效率比较高,成本低廉等优点,但在处理低浓度单一成分重金属废水时,吸附能力有限、适用范围有限等缺点。[32]吴乾菁、李昕等[33]使用 5 种分离及筛选的复合功能性的菌类,净化处理含重金属电镀废水,从实验中得知去除 Cr(VI) 是大于 99%,并且 Cr(III) 的去除率也达到了 99% 之上符合废水排放的规格,铬的回收率大于 85%;汪频等[34]利用硫酸盐还原菌对含铬离子的工业废水进行还原实验,经过探索与实验得知铬的去除率为 99.8%,去铬效率极高;李清彪等[35]通过实验发现白腐真菌对废水溶液中重金属铅的吸附情况很理想,研究表明在培养液中加入 Ca(II) 时,白腐真菌的菌丝对铅的吸附率从 65.65% 提高到 90% 以上。Caroline Bertagnolli 等[36]研究了巴西褐藻马尾藻中褐藻酸盐的生

物法去吸附铬。在 pH 为 2、3 和温度为 293 K 条件下分别进行批量的实验,测定该生物吸附剂对 Cr(VI) 和 Cr(III) 的吸附能力。利用 X 射线光电子能谱对金属结合前后的生物量进行表征,以确定铬生物吸附的机理。该生物吸附剂对三价铬和六价铬的吸附能力都很强,其吸附性能高于海藻酸对 Cr 的吸附量,分析结果还显示,与生物剂用量结合的 Cr(VI) 减少到 Cr(III)。

3.5. 吸附法

吸附法具有节能效果明显、经济效益高、效率高、可以重复使用、使用过程中比较便捷等优点。吸附技术在处置废水中重金属污染方面,拥有广阔的发展远景。物理吸附取决于吸附物质和被吸附物质的静电吸附的能力,溶液酸碱度的变化随着吸附效率,吸附效果的变化而变化,总之影响比较大。化学吸附是吸附质与表面分子之间电子的吸附和交换,形成吸附化学键。它是由于化学键、表面分子和原子的相互作用产生的。现在研究领域中最常用的吸附剂有活性炭、层状双金属氢氧化物、腐殖酸类吸附剂、石墨烯、生物炭等,这些吸附剂的外表有许多的孔洞、孔道等极其发达的孔状组织。其中生物炭因其特殊的化学性质和物理性质、独特的表面组织结构和廉价的成本成为探究的热点。它具有比较简单的操作过程和较高的处理效率等优点。但是现在的工业部门所使用的吸附剂价格普遍偏高,不能广泛的利用。为更好的处理水质污染,目前探索和实践的研究热点是寻找到有效的方法去降解水质的污染。

贾陈忠等[37]采用粉煤灰吸附所制备的含铬离子溶液。实验效果比较理想,含铬废水的 pH 值在 2.00~3.74 之间、吸附剂煤灰的使用量为 2 g、铬离子去除率大于 98%;赖国新,任乃林等[38]使用吸附法在未改性的壳聚糖中加入 Na₂S 溶液,使改性的壳聚糖分别处理含铬废水。得知最佳实验条件 pH = 1.0 时,去除率在 99% 以上,并且若含铬离子的废水的最初浓度越低,用 Na₂S 溶液改性的壳聚糖的吸附效果越明显,操作工艺简单,去除率显示较高;李英杰,纪智玲等[39]用吸附法,尝试综合静态实验和动态实验用活性炭处理含 Cr(VI) 废水,实验结果表明当含铬的废水 pH 为 3.00~4.00 之间,吸附平衡时间为 7 h,吸附等温方程式为:

$$q = 0.161\rho^{1.6661}$$

通过拟合研究数据作出的吸附等温线,可以知道含铬废水吸附符合佛罗因德利克理论;吸附剂被 1/5 的 H₂SO₄ 浸泡时,去 Cr(VI) 率 91.6%。

Danlian Huang 等[40]全面综述了从农林废弃物等低成本原料中提取的各类生物吸收率。使用了实验预处理或新方法对原料进行处理,采用合适的固定化方法不仅可以进一步提高生物吸附剂的吸附性能,而且有利于生物吸附剂与废水的分离。他强调吸附剂与催化技术的结合,为未来生物吸附剂的研究方向提供新的思路。

4. 结论

Cr(VI) 离子的污染对人类的健康和安全造成了很大的威胁,目前研究人员采用离子交换法、溶剂萃取法、电解法、生物法、吸附法等方法处理降解水中的重金属 Cr(VI) 离子取得了较好的成效和技术突破,但是各种方法都存在优劣,吸附法的成本低、效率高,但是铬离子去除率不理想,仅能达到 98%。生物去除法虽然去除率可达 99.8%,但是处理时间长,成本高,面对严重的铬污染,需要发展综合的水中铬处理技术。

(1) 课题组成员通过不断地文献调研,国内外最新降解方式大多采用光催化技术及电催化技术来治理因生产生活需要引起的重金属铬污染,鉴于调研基础,课题组将围绕光催化治理铬污染开展研究。

(2) 自国家有关污水治理的政策及水质监测指标的实施,有效的控制了水质污染,但依旧存在不规范

的排放, 这启发本课题组可以基于研究治理 Cr(VI)离子的污染的同时, 可设计针对 Cr(VI)离子污染监测的仪器且再研发水质-光-光催化剂自动化仪器, 以满足生产生活所需。

本文旨在通过调研国内外研究现状, 给予课题组研究课题开展方向, 进一步实施确立以有效治理水污染的科研项目。

参考文献

- [1] 孟紫强. 环境毒理学基础[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003.
- [2] 邱小香, 朱海燕. 水体重金属的污染及其处理方法[J]. 湖南农业科学, 2011(14): 34-35.
- [3] 于晓莉, 刘强. 水体重金属污染及其对人体健康影响的研究[J]. 绿色科技, 2011(10): 123-126.
- [4] 房晓红. 聚苯胺/碳复合材料的制备及去除水中重金属的性能研究[D]: [博士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2013.
- [5] 段建菊, 黄欣, 张强. 含铬废水的处理技术及相关研究进展[J]. 江西化工, 2015(6): 31-36.
- [6] 陈颖, 杨朝晖, 李小江, 等. 茶树菇废菌体对水中 Cr(VI)吸附的响应面优化及机理研究[J]. 环境科学学报, 2010, 30(8): 1593-1600.
- [7] 於方, 张强, 过孝民. 我国金属矿采选业废水污染特征分析[J]. 金属矿山, 2003, 327(9): 40-44.
- [8] 金政华, 张先斌. 高锰酸钾改性活性炭去除水中 Cr(VI)的试验研究[J]. 广州化工, 2016(5): 116-118.
- [9] 张汉池, 张继军, 刘峰. 铬的危害与防治[J]. 内蒙古石油化工, 2004, 30(1): 72-73.
- [10] 徐灵, 王成端, 姚岚. 重金属废水处理技术分析 with 优选[J]. 广州化工, 2006, 34(6): 44-46.
- [11] 雷兆武, 孙颖. 离子交换技术在重金属废水处理中的应用[J]. 环境科学与管理, 2008, 34(10): 82-84.
- [12] 曾婧. 离子交换法处理含铬废水的研究[J]. 江西化工, 2019(3): 108-110.
- [13] 朱冰初, 厉炯慧, 沈海云, 等. 大容量阴离子交换树脂 D296 对水中铬(VI)的吸附[J]. 高校化学工程学报, 2017, 31(3): 743-748.
- [14] Wang, H.M., Song, X.Y., Zhang, H.H., *et al.* (2020) Removal of Hexavalent Chromium in Dual-Chamber Microbial Fuel Cells Separated by Different Ion Exchange Membranes. *Journal of Hazardous Materials*, **384**, Article ID: 121459. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121459>
- [15] Ogata, F., Nagai, N., Itami, R., *et al.* (2020) Potential of Virgin and Calcined Wheat Bran Biomass for the Removal of Chromium(VI) Ion from a Synthetic Aqueous Solution. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, **8**, Article ID: 103710. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.103710>
- [16] 李昭, 王宝庆, 刘士琪, 等. 溶剂萃取法处理高浓度有机废水的研究[J]. 水处理信息报导, 2014(4): 21-23.
- [17] Rama, R. and Meenakshi, S. (2020) Synthesis of Trialkylammonium Naphthylacetate Ionic Liquid: Its Antimicrobial and Chromium Extraction Study. *Journal of Molecular Structure*, **1204**, Article ID: 127490. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2019.127490>
- [18] Oladimeji, T.E., Sonibare, J.A., Omoleye, J.A., *et al.* (2018) Data on the Treatment of Used Lubricating Oil from Two Different Sources Using Solvent Extraction and Adsorption. *Data in Brief*, **19**, 2240-2252. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2018.07.003>
- [19] Rajesh, N., Jalan, R.K. and Hotwany, P. (2008) Solid Phase Extraction of Chromium(VI) from Aqueous Solutions by Adsorption of Its Diphenylcarbazide Complex on an Amberlite XAD-4 Resin Column. *Journal of Hazardous Materials*, **150**, 723-727. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.05.025>
- [20] Yao, L., Shen, Z., Ji, Z., Hu, Y., Tang, D., Zhao, G. and Wang, X. (2022) Cr(VI) Detoxification and Simultaneous Selective Recovery of Cr Resource from Wastewater Via Photo-Chemical Extraction Using Biomass. *Science Bulletin (Beijing)*, **67**, 2154-2157. <https://doi.org/10.1016/j.scib.2022.10.013>
- [21] Wang, L.K., *et al.* (2007) Advanced Physicochemical Treatment Technologies. *Handbook of Environmental Engineering*, **4**, 67-68. <https://doi.org/10.1007/978-1-59745-173-4>
- [22] 张晓东. 离子交换法除去合成羟胺反应液中的铁、铬离子[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 中南大学, 2002.
- [23] 赵丽, 王成端, 赵诚, 等. 电解还原法处理含铬废水[J]. 科技导报, 2006, 240(11): 58-60.
- [24] Xu, T., Zhou, Y.H., Lei, X.P., *et al.* (2019) Study on Highly Efficient Cr(VI) Removal from Wastewater by Sinusoidal Alternating Current Coagulation. *Journal of Environmental Management*, **249**, Article ID: 109322. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109322>

- [25] Ouaisa, Y.A., *et al.* (2012) Integration of Electro Coagulation and Adsorption for the Treatment of Tannery Wastewater—The Case of an Algerian Factory, Rouiba. *Procedia Engineering*, **33**, 98-101. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.01.1181>
- [26] 万旭兴, 黄亚宁, 王梦芸, 等. 三维电极电解法处理含铬废水的研究[J]. 电镀与环保, 2019, 39(5): 68-72.
- [27] 李刘刚. 改性农林废弃物生物炭吸附 Cr(VI)的性能及机理研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 中南林业科技大学, 2018.
- [28] 程树培, 催益斌, 杨柳燕. 高絮凝性微生物育种生物技术研究与应用进展[J]. 环境科学进展, 1995, 3(1): 65-69.
- [29] 程永华, 闫永胜, 王智博, 等. 壳聚糖高效吸附处理含铬废水的研究[J]. 华中科技大学学报(城市科学版), 2005(4): 55-57.
- [30] 刘伟. 新型生物絮凝剂协同处理重金属废水的研究与应用[D]: [硕士学位论文]. 昆明: 昆明理工大学, 2017.
- [31] Li, Y.M., *et al.* (2015) Chromium(VI) Detoxification by Oxidation and Flocculation of Exopolysaccharides from *Arthrobacter* sp. B4. *International Journal of Biological Macromolecules*, **81**, 235-240. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2015.07.013>
- [32] 王小艳. 浅议含重金属废水处理技术[J]. 有色冶金设计与研究, 2008, 29(6): 41-42+56.
- [33] 吴乾菁, 李昕, 李福德, 等. 微生物治理电镀废水的研究[J]. 环境科学, 1997, 18(5): 49-52+96.
- [34] 汪频, 李福德, 刘大江. 硫酸盐还原菌还原铬(VI)的研究[J]. 环境科学, 1993, 14(6): 1-4+93.
- [35] 李清彪, 吴涓, 杨宏泉, 等. 白腐真菌菌丝球形成的物化条件及其对铅的吸附[J]. 环境科学, 1999, 20(1): 34-39.
- [36] Bertagnolli, C., Uhart, A., Dupin, J.-C., *et al.* (2014) Biosorption of Chromium by Alginate Extraction Products from *Sargassum filipendula*: Investigation of Adsorption Mechanisms Using X-Ray Photoelectron Spectroscopy Analysis. *Bioresource Technology*, **164**, 264-269. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.04.103>
- [37] 贾陈忠, 秦巧燕, 李克华, 等. 粉煤灰吸附处理含铬废水的研究[J]. 工业安全与环保, 2006, 32(3): 30-32.
- [38] 赖国新, 任乃林. 壳聚糖处理含铬(VI)废液的研究[J]. 化工时刊, 2005, 19(5): 44-46.
- [39] 李英杰, 纪智玲, 候凤, 等. 活性炭吸附法处理含铬废水的研究[J]. 沈阳化工学院学报, 2005, 19(3): 26-29.
- [40] Huang, D.L., Li, B., Ou, J., *et al.* (2020) Megamerger of Biosorbents and Catalytic Technologies for the Removal of Heavy Metals from Wastewater: Preparation, Final Disposal, Mechanism and Influencing Factors. *Journal of Environmental Management*, **261**, Article ID: 109879. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109879>