

工业固体废弃物中硫化钠的资源化利用研究进展



宋易^{1,2,*}

¹ 贵州轻工职业技术学院, 贵州贵阳 561100

² 华东理工大学化学与分子工程学院, 上海 200237

摘要: 硫化钠, 俗称硫化碱, 化学式为 Na_2S , 是一种白色或淡黄色结晶性粉末, 具有强烈的刺激性气味。硫化钠具有多种物理和化学性质, 如还原性、氧化性、吸附性等, 因此在许多领域得到广泛应用。在传统工业中, 硫化钠通过提高造纸、印染和橡胶制品的生产效率, 同时减少废物的产生。环保领域内, 硫化钠有效处理含重金属废水, 实现资源回收, 并在烟气脱硫中发挥作用, 减少污染物排放。在电池制造中, 硫化钠促进了钠硫电池等新能源技术的发展, 提高了电池回收利用的可能性。农业上, 硫化钠用于土壤改良和重金属固定, 提升了土壤质量, 减少了农业固废。医药领域也利用硫化钠进行药物合成和生物检测, 推动了固废的资源化利用。近年来, 随着经济技术的快速发展, 硫化钠产业也取得了显著成果。随着对环保的重视, 硫化钠在固废利用方面的研究与发展将更加注重环境保护和资源循环利用, 推动实现工业生产的绿色化和可持续发展。本文对硫化钠的主要应用领域进行综述, 包括传统工业、新能源、环保、农业、医药等方面, 旨在为中国硫化钠产业的发展提供参考。

关键词: 硫化钠; 资源利用; 固体废物; 电池

DOI: 10.57237/j.res.2024.03.003

Research Progress on the Resource Utilization of Sodium Sulfide in Industrial Solid Waste

Song Yi^{1,2,*}

¹ Guizhou Light Industry Vocational and Technical College, Guiyang 561100, China

² School of Chemistry and Molecular Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China

Abstract: Sodium sulfide, commonly known as sodium sulfide, with the chemical formula Na_2S , is a white or pale yellow crystalline powder characterized by a strong pungent odor. Sodium sulfide possesses a variety of physical and chemical properties such as reducibility, oxidizability, and adsorbability, which have led to its widespread application in numerous fields. In traditional industries, sodium sulfide enhances the production efficiency of papermaking, dyeing, and rubber products while reducing waste generation. Within the environmental protection sector, sodium sulfide effectively treats heavy metal-containing wastewater, facilitating resource recovery and playing a role in flue gas desulfurization to diminish pollutant emissions. In battery manufacturing, sodium sulfide has promoted the development of new energy technologies

基金项目: 贵州轻工职业技术学院 2024 院级项目 (No. 24QY40).

*通信作者: 宋易, 945514095@qq.com

收稿日期: 2024-08-05; 接受日期: 2024-08-28; 在线出版日期: 2024-09-09

<http://www.resenvsci.org>

such as sodium-sulfur batteries, improving the potential for battery recycling and reuse. In agriculture, sodium sulfide is utilized for soil improvement and heavy metal immobilization, enhancing soil quality and reducing agricultural solid waste. Additionally, in the pharmaceutical field, sodium sulfide is employed in drug synthesis and biological detection, driving the resource utilization of solid waste. In recent years, with the rapid development of economic technology, the sodium sulfide industry has also achieved significant progress. With the increasing emphasis on environmental protection, research and development of sodium sulfide in solid waste utilization will focus more on environmental protection and resource recycling, promoting the greenization and sustainable development of industrial production. This paper provides a review of the primary application areas of sodium sulfide, including traditional industries, new energy, environmental protection, agriculture, and pharmaceuticals, aiming to offer a reference for the development of China's sodium sulfide industry.

Keywords: Sodium Sulfide; Resource Utilization; Solid Waste; Battery

1 引言

硫化钠 (Sodium sulfide), 化学式为 Na_2S , 是一种无机化合物, 通常以无水物或含有不同数量水分子的水合物形式存在。其外观为无水硫化钠为白色或淡黄色结晶性粉末, 有强烈的硫化氢气味。硫化钠易溶于水, 溶解时放出大量的热。硫化钠具有强还原性, 可以与多种物质发生反应, 如与酸反应生成硫化氢气体, 与氧化剂反应生成硫酸盐。硫化钠在干燥空气中稳定, 在潮湿空气中易吸湿并逐渐分解, 放出硫化氢气体, 但是硫化钠有毒, 可以通过吸入、摄入或皮肤吸收对人体造成伤害[1]。

硫化钠是一种常见的工业副产物, 可通过以下方式产生。硫化氢处理: 在石油炼制、天然气净化和焦化等行业中, 常常需要对含硫化氢的气体进行处理。在这个过程中, 硫化氢可以通过碱液吸收法 (如石灰乳吸收法) 转化为硫化钠[2, 3]。硫磺与碱熔融: 在制碱工业中, 硫磺与氢氧化钠或氢氧化钾在高温下反应, 可以生产硫化钠或硫化钾, 同时副产硫化钠[4, 5]。硫化物矿石的焙烧: 在处理含硫化物的金属矿石时, 如铜、铅、锌等硫化矿的焙烧过程中, 会生成二氧化硫 (SO_2) 气体, 这些气体在后续的处理过程中可能会被转化为硫化钠。随后 SO_2 可以通过碱液吸收转化为硫化钠[6, 7]。煤的气化: 在煤气化过程中, 煤中的硫元素会转化为硫化氢, 硫化氢在后续的处理过程中可能被转化为硫化钠[8]。焦炭生产: 在焦炭生产过程中, 煤炭中的硫元素部分会转化为硫化氢, 这些硫化氢气体在煤气净化过程中可能被转化为硫化钠[9]。有机化学合成: 在有机化学合成过程中, 特别是在使用含硫化物作为原料或催化剂的情况下, 可能会产生硫化钠作为副产物[10-12]。



图 1 硫化钠的应用

Figure 1 Schem of sodium sulfide application

硫化钠的生产和应用需要严格的环境控制和安全 管理, 因为硫化钠具有较强的腐蚀性和毒性, 对环境 和人体健康可能造成危害。因此, 在生产过程中, 企业应 采取相应的措施减少副产物硫化钠的生成, 或者对副产 物进行有效的处理和利用。硫化钠作为一种重要的化工 原料, 其应用前景广阔。随着环保政策的日益严格和工 业生产的持续发展, 硫化钠在造纸、印染、电池、橡胶、 冶金、环保等领域的需求将持续增长特别是在烟气脱硫、 重金属离子去除等环保领域, 硫化钠发挥着不可替代的 作用。尤其近年来在电池行业钠硫电池得到重要关注,

新能源、新材料等新兴领域的发展使得硫化钠的潜在应用价值也将逐步显现，可为相关产业的发展提供有力支撑。未来，随着技术创新和产业升级，硫化钠的应用将更应该注重环保、高效和可持续性。

2 硫化钠的主要应用领域

2.1 传统工业

造纸工业：硫化钠在造纸工业中主要用于制浆过程，作为蒸煮剂和漂白剂，提高纸浆的产量和质量。硫化钠在高温高压的条件下与木材中的木质素发生化学反应，使木质素软化并溶解，从而释放出纤维素纤维。硫化钠还可用作漂白过程中的助剂，帮助去除纸浆中的有色物质，提高纸浆的白度[13, 14]。王键用棉秆烧碱—蒽醌法进行漂白，脱去木质素[15]。李许生通过增加预处理黑液中硫化钠浓度，在一定程度上改善了速生桉硫酸盐法蒸煮脱木素选择性[16]。薛国新等人的研究表明，用硫化钠溶液预处理后，脱木素速率较常规硫酸盐法蒸煮快得多，脱木素选择性也明显提高，浆料卡伯值较低时，硫化钠预处理硫酸盐法蒸煮浆料得率较常规硫酸盐法蒸煮高[17]。因此，硫化钠可用于制浆预处理，提高脱木素速率和选择性，改善漂白效果，提高浆料得率，优化造纸工艺。

印染工业：硫化钠在印染工业中起着重要作用，据悉，世界上 90% 以上的印染还原剂为硫化钠[18]，用于对染料进行还原处理，提高染色效果。硫化钠还可以将某些染料的颜色母体（色酚）还原成色基，色基能够溶于水并吸附到纤维上。在染色过程中，色基再被氧化恢复成原来的颜色，从而实现纤维的着色。硫化钠在染液中提供硫负离子（ S^{2-} ）这些硫负离子与染料分子中的氧原子反应，将其还原。提高染色效果：通过还原作用，硫化钠帮助染料更好地渗透到纤维内部，提高染色均匀性和深度。改善色光：还原后的染料色光更加鲜艳，有助于提高最终产品的色泽质量。固色作用：在某些情况下，硫化钠还可以帮助染料在纤维上固色，提高色牢度[18-20]。宗立新提出合理筛选硫化染料染色时的还原剂与硫化染料显色时的氧化剂/中和酸，可以实现硫化染料的环保染色，并可以获得硫化染料传统卷染工艺的色牢度[21]。Dong 等人将硫化钠与尿素、硅酸钠等成分混合，该文采用退浆，煮练和染色两步一浴的简单方式进行染色，与传统多步骤工艺相比，染色效果接近但工艺更简单，能耗更

低，是更具有环保的替代法[22]。

橡胶工业：硫化钠在橡胶工业中用作硫化剂，使橡胶制品具有优良的弹性和耐磨性[23]。在硫化过程中，硫化钠释放出的硫原子与橡胶分子中的不饱和双键发生化学反应，形成硫桥，连接不同的橡胶分子链。硫桥的形成导致了橡胶分子链之间的化学交联，增加了橡胶的弹性、强度、耐磨性和耐热性[24]。

2.2 环保领域

废水处理：硫化钠可用于处理含重金属离子的废水，通过沉淀反应将重金属离子去除[25]。硫化钠能与许多金属离子反应生成不溶于水的金属硫化物沉淀。在工业废水处理中，硫化钠用于沉淀和去除重金属离子，如铅（ Pb^{2+} ）、镉（ Cd^{2+} ）、汞（ Hg^{2+} ）、铜（ Cu^{2+} ）等，以减少对环境的污染[26, 27]。湿法冶金时在提取和精炼金属的过程中，硫化钠用于从溶液中沉淀出有价值的金属离子，以便进一步处理[28, 29]。Zhao 等人通过混合锯末与硫化钠。比较了生物炭和未改性木质生物炭（UBC）的除汞效率、净化机制和潜在成本，结果表明含硫官能团的引入和生物炭表面的沉淀是汞去除的主要原因。技术经济评估证明，SBC300 具有很高的成本效益比，从废水中去除成本为 1.74 美元/1 克汞，是工业生产和大规模应用的一种替代品[30]。

烟气脱硫：硫化钠可作为湿法脱硫的吸收剂，用于去除燃煤电厂、工业锅炉和其他燃烧设备排放的烟气中的二氧化硫（ SO_2 ）[31, 32]。硫化钠烟气脱硫技术是一种有效的污染控制方法，尤其适用于需要高脱硫效率的场合[33]。

2.3 新能源电池

钠和硫的低成本、丰富和高容量使它们成为有吸引力的电池材料。目前，对钠基技术的研究，包括钠离子电池、室温钠硫电池（RT-Na/S）和新型钠氧电池，由于其在低成本和丰富的钠资源方面的压倒性优势，已经获得了发展势头[34]。Luise 等人率先展示了基于原始硬碳（HC）阳极结合纳米结构 Na_2S/C 阴极组装的室温钠硫（RT Na-S）全电池，提出了在不同温度（660 至 1060 $^{\circ}C$ ）下利用 Na_2SO_4 的碳热还原制造 Na_2S/C 阴极的新方法[35]。钠金属硫化物电池在可持续和具有成本效益的应用方面具有很大的前景， Na_2S 是钠硫电池的关键材料[36]，采用 Na_2S 作为新兴阴极可以与各种安全的非碱金属阳极（包括硬碳）配对，从而提高室

温钠硫 (RT-Na/S) 电池的安全性[37]。Wang 等人通过一种空间受限的硫化策略来合成了 FeS@C ，该 Na/FeS@C 电池能够在 100 次循环后达到 545 mA h G^{-1} 的高容量[34]。Hu 等人提出了一种通过控制多硫化钠在所选电解质中的溶解来使本征金属硫化物在不溶于多硫化物的氟代碳酸乙烯酯电解质中稳定工作的新策略，该策略在溶于多硫化物的碳酸丙烯酯电解质中会快速衰减，颠覆性表明多硫化物穿梭效应是金属硫化物阳极降解的关键因素之一，超出了低电导率和体积膨胀的传统共识[38]。Liu 等人制造了具有 5wt% $\text{Na}_2\text{S/C}$ 和 5wt% 炭黑的 $\text{Na}_3\text{V}_2(\text{PO}_4)_3$ 电极，与具有 10% 含量的炭黑(未添加 $\text{Na}_2\text{S/C}$)的电极相比，其显示出 19 mAh g^{-1} 的初始充电比容量，在与硬碳阳极配对的全电池配置中实现了从 178 到 263 Wh kg^{-1} 的能量密度增加[39]。

另一方面，由于硫化钠具有低反应活性，Zhang 等

人通过对 Na_2S (n) 团簇的理论计算，研究了单原子催化剂催化分解硫化钠，给出了钠离子在 FeN_4 和 FeN_2 上扩散的能量分布。提高低硫化钠反应性能和电极溶胀，直接使用硫化钠作为阴极可以很好地控制最终产物硫化钠的体积溶胀，并开发了一种特殊的阴极结构来克服 Na_2S 的“惰性”问题[40]。Wang 等人通过将空心 Na_2S 阴极与锡基阳极配对，展示了不含钠金属的 Na-S 电池，为室温高倍率钠硫电池的成功提供了合理的材料设计指导[41]。

因此，钠硫资源的有效使用推动了新能源电池行业的发展，包括了直接用硫化钠作阴极，优化电池设计；室温钠硫电池采用 $\text{Na}_2\text{S/C}$ 阴极，提高安全性；通过新策略提高电池性能，如空间受限硫化合成 FeS@C ，控制多硫化钠溶解稳定性，以及特殊阴极结构克服 Na_2S “惰性”成为研究热点。

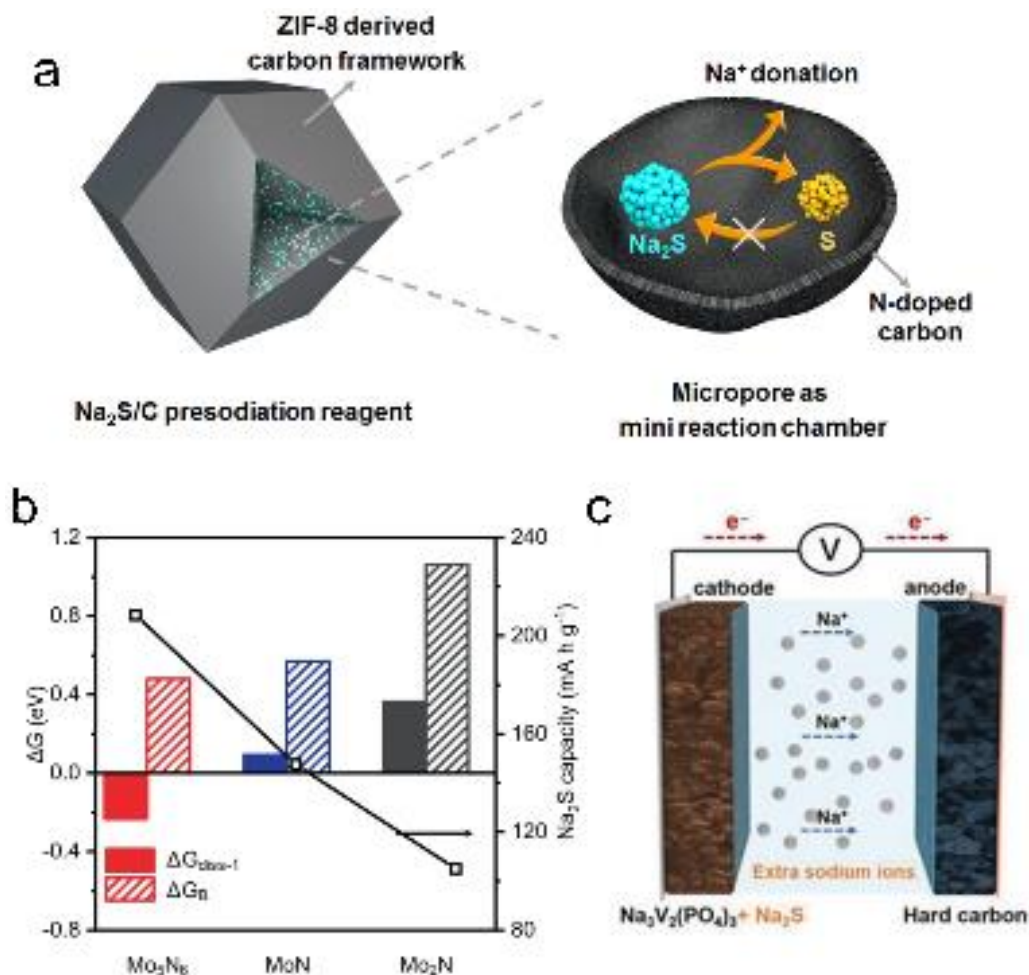


图 2 Na_2S 电池示意图：a：碳纳米多面体中的超细硫化钠团簇[39] b：电容积计算[42]；c：NVP- Na_2S -4 全电池组装示意图[43]

Figure 2 Schematic diagram of the Na_2S battery; a: Ultrafine sodium sulfide clusters in carbon nanopolyhedra [39]; b: Calculation of electrical capacitance [42]; c: Schematic illustration of the assembly of the NVP- Na_2S -4 full battery [43]

2.4 农药领域

农药生产：硫化钠可用于合成有机硫农药，如杀虫剂、杀菌剂等[44]。硫化钠主要是通过供给“硫”源，合成一系列的杀农药产品。例如，为了快速清除听小骨中的汞元素，与氯化钠溶液相比，研究表明使用流动溶剂 Na_2S 可以更快提取汞[45]。

土壤改良方面：硫化钠一方面可提高土壤的硫含量，改善土壤结构，促进作物生长[46, 47]。土壤重金属超标会带来环境污染，Amanullah 等人用 Na_2S 处理土壤发现，土壤上部对 Pb 的吸收显著增加[48]。Liu 等人研究了硫化钠 (Na_2S) 和二乙基二硫代氨基甲酸钠 (DDTCNa) 在土壤中对 Cu (II) 和 Zn (II) 的固定化潜力。通过 X 射线衍射测量和化学平衡分析，系统研究了金属硫化产物的形成和固定化机理。试验结果表明，以硫化剂为固定剂时，污染土壤中重金属的还原率较高[49]。Xiao 等人用硫化钠从重金属铅污染土壤和洗土废水中提取铅。上清液中铅的浓度从 65.46mg kg^{-1} 降至 0.03mg kg^{-1} ，铅的沉淀率高达 99.8%。因此，复合淋洗和硫化物沉淀法相结合，实现了对重金属铅污染土壤和洗土废水的综合解毒，具有高效、温和的特点[50]。

2.5 其他领域

硫化钠还广泛应用于选矿[56]、电镀[57]、制革[58]、染发剂[59]等众多领域。

3 发展趋势与展望

硫化钠作为工业副产物，有着腐蚀性、毒性、稳定性差等缺点，但是其稳定性较差容易在空气中吸潮产生强碱性物质与有毒性气体，所以需要无害化处理。如上述文献表明硫化钠的应用较为广泛，涵盖了工农业等领域，但是硫化钠在操作时需要严格的安全措施，包括个人防护和良好的通风条件。未来可以从硫化钠的纯度、拓展应用领域、开发绿色环保替代品等方面妥善处理硫化钠资源。一方面可以提高产品品质，针对不同应用领域，优化生产工艺，提高硫化钠的产品品质。另一方面可以拓展应用领域，加大研发力度，探索硫化钠在新兴产业中的应用，如新能源、材料科学等。但是关键性不能忽略的问题是环保与资源利用，在使用中务必要注重硫化钠生产过程中的环保问题，

提高资源利用率，实现可持续发展。

4 结论

硫化钠广泛应用于多个领域，其主要应用场景包括：在传统工业中，硫化钠在造纸工业中作为蒸煮剂和漂白剂，提高纸浆产量和质量；在印染工业中，作为还原剂用于染料处理，提升染色效果和色牢度；在橡胶工业中，作为硫化剂，赋予橡胶制品良好的弹性和耐磨性。在环保领域，硫化钠用于处理含重金属离子的废水，沉淀去除重金属离子，减少环境污染；同时，它也作为湿法脱硫的吸收剂，去除烟气中的二氧化硫，有效控制污染物排放。在电池制造领域，硫化钠作为关键材料，推动了钠硫电池等新能源电池的发展，提高了电池的安全性和能量密度。在农业领域，硫化钠用于合成有机硫农药，改善土壤结构，促进作物生长，以及固定化土壤中的重金属，减轻环境污染。在医药领域，硫化钠用于生产磺胺类药物和局部麻醉剂，参与药物反应中的自由基生成与清除，以及用于生物检测和成像。

未来发展趋势显示，硫化钠的应用将更加注重环保和可持续发展。在工业生产中，优化硫化钠的使用效率和环保性能将是关键。在电池制造领域，硫化钠的研究将聚焦于提高电池性能和安全性，推动新能源技术的进步。在环保和农业领域，硫化钠的应用将更加注重土壤和水源的治理，以及农产品的质量提升。在医药领域，硫化钠的应用将拓展至更多药物的生产和生物检测技术。总体而言，硫化钠的应用将朝着高效、环保和可持续发展的方向发展。

参考文献

- [1] 高军, 沈伟, 元虎, 等. 含硫化钠废水制备无水硫化钠工艺研究 [J]. 当代化工研究, 2023, (11): 157-159.
- [2] 张宏, 李望, 赵和平, 等. 以废气中的硫化氢开发含硫化学品的研究进展 [J]. 化工进展, 2017, 36(10): 3832-3849.
- [3] 刘华彦, 卢晗锋, 陈银飞. 氢气还原法制硫化钠低温高活性催化剂研究 [J]. 化学反应工程与工艺, 2004, (04): 376-379.
- [4] 李伟达, 袁爱武, 吴桂荣. 柠檬酸盐-硫化钠法脱硫制硫磺工艺的工业应用 [J]. 硫酸工业, 2014, (05): 14-16.
- [5] 彭宇行, 贺建业, 黄光琳. 金属钠—硫磺法合成聚苯硫醚 [J]. 化学研究与应用, 1990, (01): 44-50.

- [6] 张喆秋, 袁露成, 黄林青, 等. 砷、锑、铋在铜冶炼过程中的分布及其在冶炼副产物中的回收综述 [J]. 有色金属科学与工程, 2019, 10(01): 13-19+27.
- [7] 王德秋, 董群, 邹丹, 等. 有机预硫化剂的合成 [J]. 化学工业与工程, 2008, (04): 302-305.
- [8] 李可鸿. 煤还原法硫化碱制黄片碱 [J]. 新疆化工, 1993, (1): 45-46.
- [9] 刘振冲, 杜昭, 马海彬. 硫化氢干法脱除技术及硫磺回收研究进展 [J]. 应用化工, 2023, 52(03): 911-916.
- [10] 荆小兵. 硫酸钡副产硫化碱蒸发器阻垢技术的应用研究 [J]. 无机盐工业, 2012, 44(01): 46-48.
- [11] 尚方毓, 吕红琴, 胡昉. 硫酸钡生产中的节能技术与应用 [J]. 无机盐工业, 2010, 42(03): 40-42+50.
- [12] 韩海霞, 陈英军. 硫酸钡废水的综合治理 [J]. 无机盐工业, 2005, (04): 36-37.
- [13] 朱宗伟, 李兵云, 李海龙. 竹龄对竹材化学成分及制浆造纸性能的影响 [J]. 中国造纸, 2023, 42(04): 8-13.
- [14] 王长建, 朱宏伟, 唐珏军, 等. 化学机械浆高浓废水经济性处理工艺 [J]. 中国造纸, 2023, 42(07): 165-168.
- [15] 王键. 棉秆制浆漂白新工艺及其机理的研究 [D]. 华南理工大学, 2006.
- [16] 李许生. 速生桉硫酸盐法蒸煮黑液预处理技术及其脱木素动力学研究 [D]. 广西大学, 2005.
- [17] 薛国新, 郑建文, 洪启清. 硫化钠预处理大叶相思树硫酸盐法深度脱木素蒸煮技术 [J]. 中国造纸学报, 1999, (S1): 10-14.
- [18] 郑明远. 硫化染料染色新型氧化还原体系的应用 [D]. 河北科技大学, 2014.
- [19] 游韶玮, 张欣, 毛祥, 等. 工业废碱处理及再利用研究进展 [J]. 湿法冶金, 2023, 42(02): 107-115.
- [20] 上海绒布厂染料回收小组. 印染废水中回收硫化、还原染料 [J]. 印染, 1980, (04): 31-34.
- [21] 宗立新. 硫化染料的环保卷染工艺 [J]. 染整技术, 2021, 43(10): 29-32.
- [22] Dong F C, Wang J H, Huang G, et al. Short-Flow and High-Efficiency Dyeing Process of Sulfur Black on Cotton Fabrics [J]. Advanced Materials Research, 2012, 441: 150-154.
- [23] 许世业, 徐海升, 李谦定, 等. 有机硫化剂研究进展 [J]. 工业催化, 2014, 22(06): 416-421.
- [24] 王灿, 阮少阳, 尹超. 我国含硫硅烷偶联剂的生产与应用 [J]. 橡胶科技市场, 2011, 9(10): 8-12.
- [25] 李定龙, 姜晟. 重金属废水处理的方案比较研究 [J]. 工业安全与环保, 2005, (12): 18-19.
- [26] 杨冀, 陈进一, 王鑫, 等. 硫化钠-重金属捕集剂组合处理酸性含镍废水 [J]. 电镀与环保, 2012, 32(05): 35-38.
- [27] 杨彤, 曹文海, 许耀生. 化学法处理重金属离子废水的改进 [J]. 电镀与精饰, 1999, (05): 38-40.
- [28] 郑亮. 火电厂湿法烟气脱硫废水处理施工技术分析 [J]. 山西化工, 2023, 43(12): 210-212.
- [29] 韩卫博, 卞双, 汪涛, 等. 燃煤电厂脱硫废水及污泥中重金属污染物控制研究进展 [J]. 发电技术, 2020, 41(05): 497-509.
- [30] ZHAO W, ZHANG Z, XIN Y, et al. Na₂S-modified biochar for Hg(II) removal from wastewater: A techno-economic assessment [J]. Fuel, 2024, 356: 129641.
- [31] 谢敏雄, 王晓东. 湿法炼金废水处理工艺的试验研究与流程选择 [J]. 黄金科学技术, 2011, 19(04): 62-64.
- [32] 童仕唐, 沈士德, DONDALW KIRK. 工业烟气脱硫同时制取硫化氢的初步研究 [J]. 武汉冶金科技大学学报, 1997, (02): 33-36.
- [33] 张辛铖. 含硫废气的创新型回收净化工艺 %J 化工管理 [J]. 2018, (22): 202-203.
- [34] WANG Y-X, YANG J, CHOU S-L, et al. Uniform yolk-shell iron sulfide-carbon nanospheres for superior sodium-iron sulfide batteries [J]. Nature Communications, 2015, 6.
- [35] BLOI L M, PAMPEL J, DÖRFLER S, et al. Sodium sulfide cathodes superseding hard carbon pre-sodiation for the production and operation of sodium-sulfur batteries at room temperature [J]. 2020, 10(7): 1903245.
- [36] WEI P, YANG Y, LIU C-J, et al. Single-Monolayer Na₂S Film on Metal Surfaces [J]. Advanced Functional Materials, 2024.
- [37] XIONG Z, NIE X, ZHANG B, et al. Na₂S Cathodes enabling safety Room Temperature Sodium Sulfur Batteries [J]. 2024, 7(1): e202300503.
- [38] HU M, JU Z, BAI Z, et al. Revealing the Critical Factor in Metal Sulfide Anode Performance in Sodium-Ion Batteries: An Investigation of Polysulfide Shuttling Issues [J]. Small Methods, 2020, 4(1): e1900673.
- [39] LIU X, TAN Y, WANG W, et al. Ultrafine Sodium Sulfide Clusters Confined in Carbon Nano-polyhedrons as High-Efficiency Presodiation Reagents for Sodium-Ion Batteries [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2021, 13.
- [40] ZHANG P Y, WU J B, JIANG X L, et al. First-Principles Investigation on Multi-Sodium Sulfide and Sodium Sulfide Clusters in Sodium-Sulfide Batteries [J]. Journal of the Electrochemical Society, 2023, 170(6): 060547.

- [41] WANG C, WANG H, HU X, et al. Frogspawn-coral-like hollow sodium sulfide nanostructured cathode for high-rate performance sodium-sulfur batteries [J]. 2019, 9(5): 1803251.
- [42] YE C, JIN H, SHAN J, et al. A Mo_5N_6 electrocatalyst for efficient Na_2S electrodeposition in room-temperature sodium-sulfur batteries [J]. *Nature Communications*, 2021, 12(1): 7195.
- [43] HU L, LI J, ZHANG Y, et al. Enhancing the Initial Coulombic Efficiency of Sodium-Ion Batteries via Highly Active Na_2S as Presodiation Additive [J]. *Small*, 2023, 19: e2304793.
- [44] 刘琛, 侯占峰, 耿红娟, 等. 浅议农药中间体二甲基硫醚的合成方法及工艺 [J]. *化工管理*, 2020, (18): 14-15.
- [45] JAKSE R, RABER J, RABER M. The use of sodium sulfide to separate mercury from tissues preserved in Cialit and Merthiolate solutions [J]. *Archives of oto-rhino-laryngology*, 1987, 244(5): 259-261.
- [46] 吴川, 陈虹任, 陆永平, 等. 铅冶炼场地土壤微生物群落结构与硫化菌作用 (英文) [J]. *Journal of Central South University*, 2024, 31(04): 1050-1063.
- [47] 李致同. 我国几种主要土壤中微生物硫循环代谢途径特征及硫循环功能微生物群落结构 [D]. 西南大学, 2023.
- [48] XIE W, YANG J, YAO R, et al. Impact Study of Impoundment of the Three Gorges Reservoir on Salt-Water Dynamics and Soil Salinity in the Yangtze River Estuary [J]. 2020, 36(1).
- [49] LIU W, WEI D, MI J, et al. Immobilization of Cu(II) and Zn(II) in simulated polluted soil using sulfurizing agent [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2015, 277: 312-317.
- [50] XIAO L, ZHANG T, GUO M, et al. Comprehensive Detoxification of Heavy Lead-Contaminated Soil and Soil-Washing Wastewater: Efficient and Mild [J]. *Water Air and Soil Pollution*, 2023, 234(6): 337.
- [51] 李霞, 王晨, 刘利, 等. 磺胺类药物水环境行为及水生生物毒性研究进展 [J]. *环境工程技术学报*, 2024, 14(02): 681-691.
- [52] 康舒, 周迎春, 张煜明, 等. 局部麻醉剂——对氨基苯甲酸的合成研究 [J]. *化学工程师*, 2014, 28(03): 67-69.
- [53] Misak A, Kurakova L, Goffa E, et al. Sulfide (Na_2S) and polysulfide (Na_2S_2) interacting with doxycycline produce/scavenge superoxide and hydroxyl radicals and induce/inhibit DNA cleavage [J]. *Molecules*, 2019, 24(6): 1148.
- [54] LIU L, WU B, YU P, et al. Sub-20 nm nontoxic aggregation-induced emission micellar fluorescent light-up probe for highly specific and sensitive mitochondrial imaging of hydrogen sulfide [J]. *Polymer Chemistry*, 2015, 6(29): 5185-5189.
- [55] BELTOWSKI J, WIORKOWSKI K. Role of Hydrogen Sulfide and Polysulfides in the Regulation of Lipolysis in the Adipose Tissue: Possible Implications for the Pathogenesis of Metabolic Syndrome [J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2022, 23(3): 1346.
- [56] 吴海祥, 吴维新, 岳涛, 等. 某铜冶炼渣浮选回收铜工艺试验研究 [J]. *矿冶工程*, 2024, 44(01): 57-59+67.
- [57] 刘霄, 刘定富. 铁-碳微电解/改进硫化钠沉淀法处理综合电镀废水 [J]. *环保科技*, 2021, 27(06): 15-17+32.
- [58] 徐芝芬. 制革废水多污染物生物强化协同去除机制研究 [D]. 陕西科技大学, 2023.
- [59] 李静, 陈张好, 周智明. 高效液相色谱法测定染发产品中 48 种准用染料 [J]. *分析试验室*, 2024, 43(07): 966-973.