

重金属复合污染土壤电动联合修复技术研究进展

郭倩¹ 李福龙² 夏青青³

海南职业技术学院 海南 海口 570216

摘要: 金属是一类广泛存在于自然界中的金属元素。随着我国经济建设和社会进步,环境污染日益加重,土壤污染已经严重威胁着人类健康及生态环境安全。重金属污染土壤电动联合修复过程涉及多种学科领域,具有复杂的物理化学反应过程。该研究将电化学与物理方法相结合,可以高效地去除各种环境污染物并实现原位治理,已成为近年来国内外研究热点。本文对重金属复合污染土壤电动联合修复技术研究进展进行综述。

关键词: 重金属;复合污染;土壤电动联合修复技术

前言: 开采和利用矿产资源不仅为国民经济的发展提供了重要的支撑,同时也带来了严峻的生态挑战。我国蕴藏着丰富的金属矿产资源,其价值不可估量。我国的重金属土壤污染问题,源于对矿区及周边地区矿产资源的过度开采和利用,这也是其主要的来源之一。开采和开采矿山所产生的岩石、尾矿和废渣等,在经过风化和淋滤的过程中,会发生有害元素向土壤中迁移的现象,这不仅会导致土壤质量恶化,还会对农作物和地下水等环境造成污染,同时,这些有害元素还会通过食物链进入人体,对人类健康构成潜在威胁。周边生态环境和当地居民的健康生活正受到严重威胁,因为尾矿库附近的土壤和植物已经受到了重金属污染。因此,对于金属矿区及其周边土壤中存在的重金属污染问题,越来越多的学者开始加强研究和修复工作。

1 土壤修复技术

通过运用特定的技术手段,对受污染的土壤进行修复,以使其恢复到正常的状态。目前,针对污染土壤的修复技术已经涵盖了物理、化学、生物、农业生态等多个领域,并与其他修复技术相互融合,形成了一套完整的土壤修复技术系统。物理回收技术涵盖了对土壤表面的覆盖、对土壤进行深耕、进行热处理以及采用电回收技术等多种手段。表土覆盖技术是一种利用沥青对受污染土壤表面进行覆盖的方法,以避免核素迁移所带来的渗透影响。深耕技术是通过挖掘土壤中的污染物,将其转化为高污染土壤,并将其运往固体废物填埋场进行稳定的填埋处理。利用热蒸汽或微波辐射、红外线辐射等加热方式,将土壤中受到污染的重金属转化为气态。由于高温环境下,土壤表面所吸附的某些放射性重金属会被转移至土壤间隙,从而导致其生物有效性和环境风险的降低。化学修复技术涵盖了固定化、稳定化、化学还原和化学浸出等多种方法,以实现修复过程的稳定化、

还原和浸出。通过向土壤中添加特定的化学药剂,固定化稳定修复技术能够促使土壤中的重金属与化学药剂发生吸附沉淀、共沉淀或离子交换等反应,从而转化为更加稳定的物质状态,有效降低重金属在土壤中的浓度、流动性和溶解度,最终达到减少重金属浸出毒性和生物有效性、降低土壤中重金属对环境造成的潜在风险的目的。针对重金属污染的土壤,采用化学还原修复技术,使用具有强大还原能力的化学药剂,将土壤中高毒性、高流动性的重金属还原为低价态,从而有效降低其流动性和毒性。采用化学浸出修复技术,通过向土壤中注入酸碱剂或人工螯合剂,实现对土壤中污染物的有效浸出,并将含有污染物的洗脱液以一定的方式与土壤颗粒进行分离。在这一过程中,土壤中的污染物被转移至淋洗液中,从而实现了土壤污染物的修复。生物修复技术涵盖了动物、植物和微生物三个方面的修复技术,这些技术能够有效地恢复生物体的功能和特性。为了减少环境中的重金属污染,动物修复技术应该利用那些具有较低重金属吸收和转化能力的动物,以达到环境保护的目的。植物修复技术是利用特定植物在一种或多种核素的过度积累中所表现出的生物学特性,以提取土壤中的污染物为目的的一种修复技术。植物提取技术是目前广泛应用于回收的三种主要方法,分别是植物提取法、植物挥发法以及植物固定法。

2 电动修复机理

在19世纪,Reuss通过施加直流电场于泥水混合物之间,首次探测到了电动现象的存在,这一发现被Acar and Alshwabkeh(1993)所证实。电动修复是多种机制相互作用的结果,其中包括水平对流,扩散以及离子迁移等。在土壤溶液中,带电离子会向带相反电荷的电极移动,这种现象被称为电迁移;而在土壤微孔中,由于带电离子的作用,液体在电场作用下相对于带电土壤表面

运动,这种运动被称为电渗流。电泳技术中的双电层和电场作用,是指带电粒子在相对于稳定液体的运动过程中所产生的物理现象。在电动修复过程中,由于带电土壤颗粒的流动性较低,因此通常可以被视为可以忽略不计。当施加直流电到被污染土壤的两端时,带电离子会发生迁移,正电离子将从阳极迁移至阴极,而负电离子则会从阴极迁移至阳极;不带电的物质会发生电渗流迁移,而带电离子则通过电渗流迁移,污染物的迁移方向和速率会受到多种因素的影响,尤其是污染物的浓度、土壤的结构和类型、污染物离子浓度迁移率以及电导率孔隙率等。

3 电动修复影响因素

电动修复的效率和成本受到多种因素的影响,包括但不限于土壤性质、电极材料和电极设置、辅助试剂以及供电方式等。

3.1 土壤性质

在实验室和现场电动修复研究中,多种不同类型的土壤已被应用,包括但不限于沙子、淤泥、高岭土、伊利石、蒙脱石、膨润土、自然土壤、海洋沉积物以及人工混合不同的土壤。大量的研究表明,不同的土壤类型并不会对电动回收技术的使用造成限制,反而会对电动回收的效率和能量消耗产生影响。高岭土呈现出均质性,其阳离子交换容量较低,颗粒分布更加细小,渗透性也较低。电动修复技术在处理导水率低、比表面积较大的污染土壤方面表现出较好的效果^[1]。由于其具有较低的缓冲能力,高岭土可作为一种可重现的粘土介质,因此在电动恢复研究中被广泛应用。大量的研究表明,土壤中的污染物浓度并不会对电动修复技术的应用产生显著的影响,相反,随着污染物浓度的增加,电动修复技术的应用将会更加有利。电动修复在重金属浓度达到5,000mg/kg时,其去除效率不会受到影响。

3.2 电极材料

目前所采用的电极材料包括石墨电极、钛合金电极等,然而,大多数学者的研究重点在于电极的电导率和稳定性方面。目前的研究主要聚焦于电极材料的筛选:材料的导电性优异,获取容易,加工和安装容易,安装方便,成本低廉。然而,鲜有研究探究不同电极材料对电动修复效率的影响,这一领域的研究仍有待深入挖掘。采用电化学手段对四种电极材料进行性能评估,最终筛选出最佳的负极材料为Ti|IrO₂-Ta₂O₅,以达到最佳效果。Pt/Ti、IrO₂/Ti和石墨的去除效率存在差异,然而该研究仅探讨了电极材料对处理过程中去除效率和电流变化的影响,而未深入探讨其机制。在电动修复的过

程中,电极的应对电动修复的效率具有至关重要的影响,而电极材料的电导率和比表面积则是影响电极反应的两个关键因素。因此,深入研究各种电极材料对电动修复效率的影响,对于提升电动修复效率具有至关重要的意义。

4 电动联合修复技术

结合多种土壤修复技术,不仅能够最大程度地发挥修复效果,同时也能够弥补单项技术的局限性,从而达到更加全面、高效的修复效果。将电动修复技术与其他修复技术相互融合,可实现治疗效果的成本效益超越单一修复技术^[2]。

4.1 采用电动和淋洗相结合的修复技术,以达到更好的修复效果

电动-淋洗联合修复技术是一种利用浸出技术对土壤中的污染物进行预处理,然后通过电动方式进行处理,以实现污染土壤的修复。这种联合修复技术能够在短时间内消除土壤中的重金属污染物,而且不会受到土壤渗透性的限制所影响。针对受到重金属污染的土壤,采用pH优化淋洗后再进行电动回收,以确保回收效果不受土壤pH值变化的影响,该方法可广泛应用于大面积土壤修复。通过调节设备温度、破坏土壤结构、提高土壤通透性、促进重金属元素解吸等措施,在回收过程中实现了更为优异的效果。经过预先清洗和随后的电动分离,部分铀已被从土壤中清除。由于电解时电流过大导致阴极上有大量金属氧化物形成,因此需要对其施加适当的电压,才能达到良好的处理效果。为了减少阴极大量金属氧化物的生成,我们使用pH控制器来调节电解液的pH值,使其保持在0.5至1.0之间,从而产生UO₂²⁺,以提高精馏效果。

4.2 EK-PRB联合修复技术,为电动-渗透反应墙提供一种高效的修复方案

电动渗透反应壁(EK-PRB)联合修复技术指的是在电场的作用下,高毒性金属离子向其两端迁移,以达到修复的目的。这种新方法将电渗析原理应用于传统的化学沉积修复技术,利用电解过程中产生的阴极还原电势作为驱动力来去除污染物质^[3]。通过与可渗透反应壁中的填充物发生物理和化学反应,重金属污染物得以转化为稳定的低毒状态,从而实现了对重金属离子的高效富集。该修复方案融合了两种先进技术,可实现更为卓越的修复效果,同时更加环保,对环境因素的影响微乎其微,修复效果更加全面。针对重金属污染问题,该修复方案在铜、铅、铬、镉、砷等重金属污染的治理方面表现出卓越的效果。

4.3 电动-植物联合修复技术

植物联合修复技术是通过施加低强度电场于植物生长周围的污染土壤，从而刺激植物对重金属的吸收和积累，以达到修复土壤的目的。通过电动处理，向日葵和印度芥菜的铀吸收能力得到了显著提升。在施加直流电场的作用下，U和Cd的富集系数分别提高了90.84%和93.33%，同时电场的刺激促进了微生物的酶活性，从而增强了U和Cd的耐受性和富集能力。

4.4 采用电动-微生物联合修复技术，实现高效的修复过程

电动微生物修复技术借助电场的催化作用，提升微生物的活性水平，加速污染物的去除和生物物质的转移过程，从而有效提升污染物的去除效率^[4]。研究表明，在土壤修复领域，电动-微生物联合淋洗技术、电动注射降解菌或营养基质以及电动刺激降解菌代谢技术等多种技术手段均可应用。目前，电动-微生物联合修复技术已广泛应用于去除有机污染物、油污以及Zn、Pb、As、Cu、Cd、Cr等重金属离子，成为业内的首选。将微生物修复技术与电动修复技术相融合，可实现比单一修复技术更为经济高效的处理效果。当以淀粉溶液为电解质时电压梯度在0.5V/cm左右。初步实验研究表明，土壤污染受到细菌介导过程的影响，而经过处理的土壤中磷含量的增加则进一步证实了电场对微生物生长的刺激作用。利用石墨烯氧化石对多孔土壤进行改性，可促进电化学过程的扩展，从而为微生物细胞在偏远地区的生长提供了便利。在经过16天的电动修复后，土壤中铜的去除率高达86%，这一成果令人瞩目。采用硫氧化细菌预酸化可以降低66%的电力消耗，使得电动处理更具有成本效益。然而，这种联合修复过程尚需深入探究微生物的适应性、实际应用的可操作性等多个问题，以寻求更为高效的解决方案。实验结果表明，硫氧化菌的生物浸出过程在尾矿土壤重金属富集的预处理中具有显著的应用潜力^[5]。此外，采用电动-微生物修复技术可有效修复尾矿。电动-微生物修复效果的影响因素涵盖电场强度、污染物的生物利用度、污染物的结构和性质、微生物的种群数量，以及土

壤pH值、土壤类型、养分和水分含量等多种环境因素。实验结果表明，经过30天的修复，石油烃的降解率已经达到了惊人的77.4%，同时Ni的去除率也高达58.5%。在微生物电动修复实验中，使用阴阳离子交换膜可刺激微生物的繁殖和生物降解，而原生菌则能有效地减少金属毒性的影响。从遭受镉污染的土壤中分离出具有耐镉特性的蜡样芽孢杆菌，并将其分别移植到含有镉的土壤。以1 V/cm的电压梯度、10 d的通电时间，进行了Cd污染土壤联合修复的电动-耐镉细菌实验。采用电动耐镉细菌联合修复技术相较于传统电动回收，能够显著提升整体Cd去除率，同时有效降低修复过程中的能耗。在经过8天的修复后，添加了还原菌微细菌sp.Y2，Cr(VI)的处理效率得到了显著提升，达到了90.67%。

5 结论

总之，土壤修复的需求超出了单一修复方案的能力范围，需要采用多元化的修复方案。因此，在选择修复方案时，技术人员应综合运用多种方法和技术，根据自身需求和土壤情况进行个性化调整，以取长补短，从而达到更优秀的修复效果。加强智能决策系统的建设，以适应不同类型、程度、环境条件和回收情况的重金属污染情况。部门和企业需加强协作，确保该技术在土壤修复中得到充分应用，从而在生态环境修复中实现经济效益，避免重金属渗透到人体内部。

参考文献

- [1]董雪.电动联合修复技术在重金属污染土壤中的研究进展[J].新疆地质,2023,41(01):98-102.
- [2]王禹宸.海藻酸钠强化电动技术修复铜锌污染土壤效能及机制[D].黑龙江:哈尔滨工业大学,2022.
- [3]马强,卫泽斌,吴启堂.化学淋洗联合电动技术修复重金属污染土壤的效果及其机制[J].环境科学,2023,44(03):1668-1677.
- [4]颜加情,周书葵,段毅,等.电动-淋洗联合修复重金属污染土壤研究进展[J].应用化工,2022,51(12):3634-3640.
- [5]刘伟,程岩,李昊.有机物-重金属复合污染土壤的治理[J].绿色科技,2021,23(16):26-29.