



超细地聚合物对河湖疏浚淤泥固化和重金属固结效果的影响

梁远博

(中交上海三航科学研究院有限公司, 上海 200032)

摘要: 我国每年河湖疏浚产生大量废弃淤泥, 这些淤泥固结周期长、固化强度低且含有大量重金属, 难以进行资源化利用。采用超细偏高岭土地聚合物, 研究其对淤泥固化强度、水稳系数和重金属固结效果的影响。结果表明: 随着超细地聚合物掺量增加, 淤泥固化土的强度逐渐增大, 7 d 无侧限抗压强度可达 1.68 MPa, 具有优异的淤泥固化效果; 水稳系数先增大后减小, 掺入超细偏高岭土的淤泥固化土水稳系数均达到了 90% 以上, 是纯淤泥土的两倍以上。超细地聚合物对镉、铅等 6 种重金属离子均具有良好的固结效果, 尤其是对镉和汞的固结作用最为显著, 且各组淤泥固化土中 6 种重金属元素浸出量均未超过相关标准的要求。超细地聚合物对淤泥具有良好的固化和重金属固结效果, 与普通硅酸盐水泥固化材料有较大区别。

关键词: 超细地聚合物; 淤泥固化; 水稳系数; 重金属固结

中图分类号: U616

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)03-000015-05

Effect of ultrafine geopolymers on solidification and heavy metal consolidation of dredged silt in rivers and lakes

LIANG Yuanbo

(CCCC Shanghai Third Harbor Engineering Science and Technology Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200032, China)

Abstract: The dredging of rivers and lakes in China produces a large amount of waste silt every year, which has long consolidation period, low curing strength and heavy metals, and is difficult to be used as resources. In this paper, ultrafine metakaolin geopolymer is used to study its influence on the solidification strength, water stability coefficient and heavy metal consolidation effect of the silt. The results show that with the increase of ultrafine geopolymer content, the strength of silt solidified soil gradually increases, and the 7 d unconfined compressive strength can reach 1.68 MPa, which has excellent silt solidifying effect. The water stability coefficient increases first and then decreases, and the water stability coefficient of the silt solidified soil mixed with ultrafine metakaolin is more than 90%, which is more than twice that of the pure silt soil. The ultrafine geopolymer has good consolidation effect on 6 kinds of heavy metal ions such as cadmium and lead, especially on cadmium and mercury, and the leaching amount of 6 heavy metal elements in each group of silt solidified soil does not exceed the requirements of relevant standards. The solidification and heavy metal consolidation effect of the ultrafine geopolymer on the silt is good, which is quite different from the ordinary Portland cement solidifying material.

Keywords: ultrafine geopolymer; silt solidification; water stability coefficient; heavy metal consolidation

我国是内陆河湖资源非常丰富的国家, 每年河湖疏浚会产生大量的淤泥, 这些淤泥大多直接

抛至深槽水域或干化处理后填埋, 不但造成泥土资源浪费, 而且其中的重金属污染物可能渗透进

收稿日期: 2023-07-17

作者简介: 梁远博 (1990—), 硕士, 高级工程师, 从事高性能先进工程材料开发及应用研究。

入地下水或地表径流产生二次污染^[1-2]。因此，国内外对疏浚淤泥的固化和资源化利用技术的研究越来越多，一些学者提出使用生石灰、水泥和石膏可以显著提高淤泥固化土的物理参数，可以使其达到堤岸码头填筑材料的技术要求，实现淤泥在工程上的资源化利用^[3-5]。同时，也有部分学者提出采用矿渣、粉煤灰、高岭土和钢渣等材料代替一部分水泥来固化淤泥，希望在不降低固化强度的情况下减少水泥用量，降低固化成本^[6-9]。陈海斌等^[10]则提出采用水泥、生石灰和粉煤灰对疏浚淤泥进行固化，并分析固化效果、生产成本和工期等因素，建立数学模型，得出掺加4%水泥和9%粉煤灰的最佳固化方案。目前，国内外研究成果多集中于淤泥固化强度、固化材料成本等方面，缺少对淤泥固化和重金属固结效果两方面的综合研究，而工程界对淤泥中重金属浸出毒性的担忧，是阻碍河湖疏浚淤泥应用于工程的重要原因。

有研究指出地聚合物材料的水化产物硅铝酸盐可以结合几乎所有的有毒离子，而且地聚合物具有良好的耐酸碱侵蚀和耐候性，固结的有毒离子不会对环境造成新的污染^[11]。其中偏高岭土地聚合物具有片状结构，硅铝化合物再聚反应时可以更有效地将重金属离子固结在地聚合物基质的骨架中。同时，相对于粒径10~1 000 μm的细粉，偏高岭土超细粉(粒径0.1~10 μm)具有比表面积大、表面活性高等优点。因此，本文将超细地聚合物作为固化材料，研究其对淤泥固化强度、水稳系数和重金属固结效果的影响规律，以期为淤泥在工程中资源化利用提供借鉴。

3) 碱激发剂：硅酸钠固体，由山东天祥化工有限公司生产，模数1.5。

1.2 试验方法

淤泥固化的无侧限抗压强度按 JTG E51—2009

1 试验与方法

1.1 原材料

1) 淤泥：取自无锡太湖疏浚淤泥，初始含水率50%~65%，相对密度2.43，塑性指数18。淤泥中重金属元素含量见表1，粒径分布如图1所示。淤泥的X射线衍射图谱如图2所示，其主要组成矿物有石英、钠长石和蒙脱石。

表1 淤泥中重金属含量 mg/kg

砷	镉	铬	铜	铅	汞	镍
12.28	3.98	98	52	122	0.126	94

注：砷为非金属，但在环境污染方面一般将其按重金属归类。

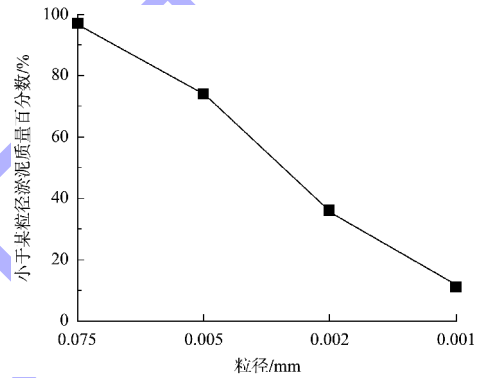


图1 淤泥粒径分布

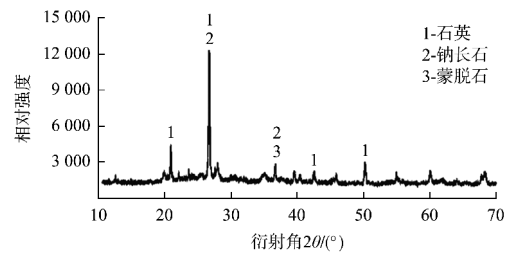


图2 淤泥X射线衍射图谱

2) 超细地聚合物：偏高岭土(MK)超细粉，由河北科旭建材有限公司生产，细度为3 000目，其与淤泥的化学组成见表2。

表2 淤泥和超细偏高岭土的各化学成分的质量比

原材料	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	K ₂ O	Na ₂ O	烧失量
淤泥	62.91	21.72	3.83	1.65	1.56	1.52	1.36	5.40
偏高岭土	54.38	42.82	0.66	0.45	0.47	0.29	0.25	0.65

《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》^[12]进行试验。水稳系数试验按 CJ/T 486—2015《土壤固化外加剂》^[13]进行。重金属浸出毒性检测按照 HJ/T 300—2007《固体废物 浸出毒性浸出方法 醋

酸缓冲溶液法》^[14]制备浸提剂, 固液比为 1 kg : 10 L, 采用电感耦合等离子发射光谱仪 (ICP-AES) 检测溶液试样中镉 (Cd)、铅 (Pb)、铬 (Cr)、汞 (Hg)、镍 (Ni) 和砷 (As) 等 6 种重金属元素的含量。为排除淤泥含水量不同对试验结果的影响, 固化土试件成型含水率均为 20%, 成型静压力为 2 MPa。将太湖淤泥晾晒、烘干后, 采用粉碎机进行破碎后过 0.6 mm 孔径筛, 制成淤泥干粉。外掺淤泥干粉质量 0%、5%、10%、15%、20% 的超细偏高岭土, 碱激发剂 (硅酸钠) 掺量固定为偏高岭土质量的 20%, 加水搅拌 2 min 以上, 成型直径 50 mm、高 50 mm 的圆柱体试件, 标准养护至试验龄期 7、14、28、56、90 d 进行测试。

2 试验结果

2.1 无侧限抗压强度

不同超细偏高岭土掺量对淤泥固化土无侧限抗压强度的影响见图 3。可以看出, 不掺加偏高岭土的淤泥试件的 7 d 无侧限抗压强度仅有 0.06 MPa, 随着龄期增长, 强度略有增加, 90 d 龄期时强度仅为 0.22 MPa, 难以直接用作工程填筑材料。随着超细偏高岭土掺量增加, 淤泥固化土的无侧限抗压强度均逐渐增大, 且随着龄期增加, 无侧限抗压强度均稳定增大, 无倒缩现象。当掺入 5%、10% 的超细偏高岭土后, 固化土试件无侧限抗压强度增加幅度较大, 7 d 龄期时分别达到 0.96、1.39 MPa, 为纯淤泥试件强度的 16、23 倍; 当偏高岭土掺量继续增加至 15%、20% 时, 固化土试件强度增加幅度相对变小, 7 d 无侧限抗压强度分别为 1.52、1.68 MPa。

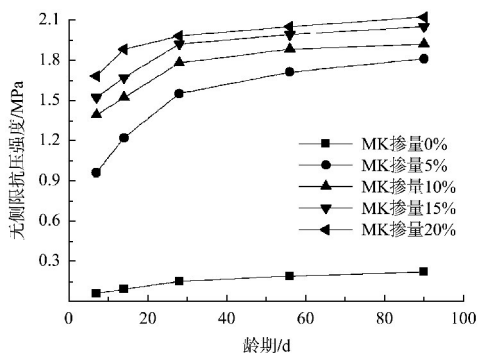


图3 超细偏高岭土掺量对淤泥固化土无侧限抗压强度的影响

2.2 水稳系数

水稳系数是评价淤泥固化土抵抗水侵蚀的关键指标之一, 直接影响到固化土能否用于工程填筑。不同超细偏高岭土掺量对淤泥固化土水稳系数的影响见图 4。可以看出, 不掺加偏高岭土的淤泥试件 7 d 龄期时的水稳系数仅有约 35%, 随着龄期增长, 淤泥颗粒间的黏聚力增强, 水稳系数略有增加, 90 d 龄期时约 45%, 纯淤泥颗粒之间的相互作用力较小, 难以有效抵抗水的侵蚀; 随着超细偏高岭土掺量增加, 淤泥固化土的水稳系数先增大后减小, 均达到了 90% 以上, 是同龄期纯淤泥试件水稳系数的 2 倍以上, 大幅提高了固化土的抗水侵蚀性能。当超细偏高岭土掺量为 5%、10%、15% 时, 淤泥固化土的水稳系数随超细偏高岭土掺量增加而增大; 当超细偏高岭土掺量达 20% 时, 试件的水稳系数有所降低。随着龄期的增加, 淤泥固化土试件的水稳系数呈现基本一致的变化规律。当龄期在 28 d 以内时, 水稳系数随着龄期增加相对较快增长; 当龄期在 28 d 以上时, 水稳系数随着龄期增加而增大且幅度趋于平稳。可见, 淤泥固化土实际工程应用时, 可适当增加养护时间, 以获得更高的抗水侵蚀能力。

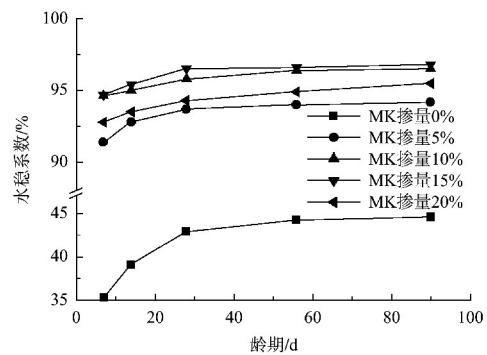
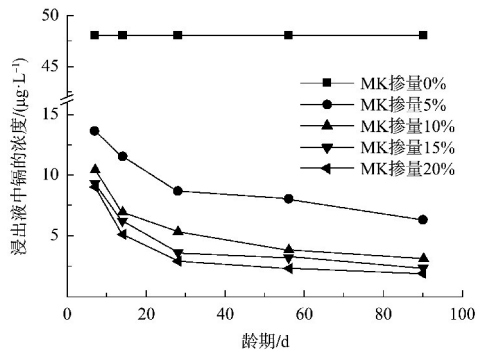


图4 超细偏高岭土掺量对淤泥固化土水稳系数的影响

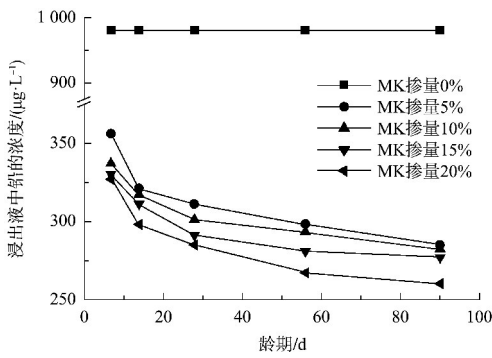
2.3 重金属浸出毒性

疏浚淤泥通常含有大量的重金属, 如果这些重金属污染物渗透进入地下水, 将会造成二次污染, 所以重金属的浸出毒性是否符合要求, 决定了淤泥能否进行资源化利用。不同超细偏高岭土掺量对 6 种重金属浸出量的影响见图 5。可以看出, 所有组别中 6 种重金属元素浸出量均未超出

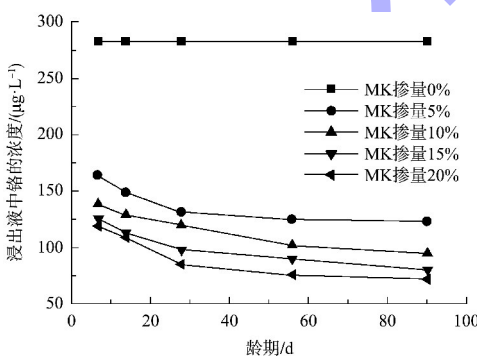
GB 5085.3—2007《危险废物鉴别标准浸出毒性鉴别》^[15]中对危险废弃物的限制要求，可以作为工程填筑材料使用。



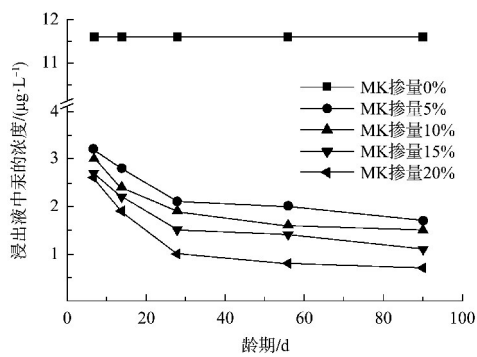
a) 镉



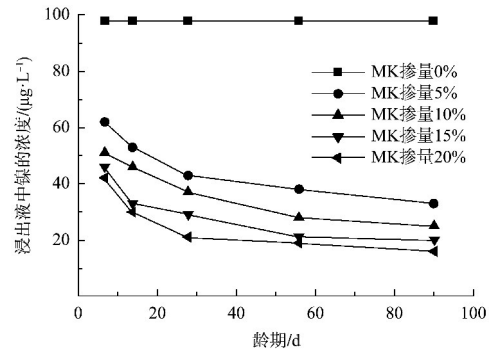
b) 铅



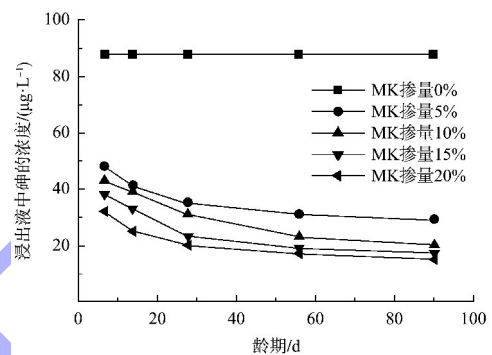
c) 铬



d) 汞



e) 镍



f) 砷

图5 超细偏高岭土掺量对淤泥固化土重金属浸出量的影响

随着超细偏高岭土掺量增加，淤泥固化土的镉、铅、铬、汞、镍、砷的浸出量整体均呈现出降低趋势。相比于纯淤泥材料，当超细偏高岭土掺量仅为5%时，7 d龄期时镉、铅、铬、汞、镍、砷的浸出量分别降低72%、43%、42%、72%、37%、45%，可见超细偏高岭土固化材料对6种重金属离子均具有良好的固结效果，尤其是对镉和汞的固结作用最为显著。随着龄期的增加，不同超细偏高岭土掺量淤泥固化土试件的重金属离子浸出量均呈下降趋势。其中，重金属镉、铬、汞、镍、砷的浸出量在28 d龄期后趋于平稳，重金属铅的浸出量则在60 d龄期以后趋于平稳。

3 影响分析

3.1 超细地聚合物对淤泥固化的影响

超细地聚合物对淤泥固化的增强效果主要是由于超细偏高岭土颗粒具有较大的比表面积，大量无定形硅铝氧化物在硅酸钠碱激发的作用下发生解聚和重聚反应，生成铝硅酸盐凝胶网络，淤

泥颗粒则被包裹在凝胶骨架中,使淤泥固化土具有较高的强度,远高于普通水泥固化淤泥土的强度(约0.5 MPa)。随着反应时间延长,超细偏高岭土颗粒表层反应剥离,内部硅铝氧化物继续与硅酸离子反应,所以后期固化土强度呈现稳定增长。

超细偏高岭土碱激发反应产生的三维凝胶网络,能很好地包裹住淤泥颗粒,进而减少水侵蚀的影响,大幅提高了淤泥固化土的水稳系数,均达到了90%以上。随着超细偏高岭土掺量增加,淤泥固化土的水稳系数先增大后减小,这是由于超细偏高岭土比表面积较大、需水量大,当其掺加超过一定量时,在相同用水量情况下,固化土中自由水减少,颗粒间摩擦力增大,相同成型压力下固化土的密实度降低、孔隙率增大,进而对水侵蚀的抵抗能力变弱,水稳系数降低。可见,当超细偏高岭土掺量较大(15%以上)时,可适当提高固化土的含水率,从而降低固化土的孔隙率、增大水稳系数。

3.2 超细地聚合物对重金属固结的影响

超细地聚合物对重金属具有良好的固结效果,主要来源于偏高岭土重聚反应生成的三维硅铝酸盐网络结构,其对重金属离子具有包裹和离子交换吸附作用^[16],可以将重金属固结于材料内部;另一方面,相较于常见的硅酸盐水泥类固化材料,地聚合物的反应产物与其不同,不存在类似 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 粗大晶体富集的薄弱界面过渡区,从而减少了溶液侵蚀形成的通道,进一步减少重金属离子的浸出量^[17]。

4 结论

1) 随着超细偏高岭土掺量的增加,淤泥固化土的无侧限抗压强度逐渐增大,且随龄期增加而逐渐增大。超细偏高岭土颗粒比表面积较大,大量无定形硅铝氧化物在硅酸钠激发的作用下生成铝硅酸盐凝胶网络,可以大幅提高淤泥固化土的强度,7 d 无侧限抗压强度可达1.68 MPa,具有优异的淤泥固化效果。

2) 掺入超细偏高岭土的淤泥固化土水稳系数

均达到了90%以上,是纯淤泥试件水稳系数的2倍以上。随着超细偏高岭土掺量增加,淤泥固化土的水稳系数先增大后减小。当超细偏高岭土掺量15%以上时,可适当提高固化土的含水率,提高固化土密实度,从而增大水稳系数。

3) 不同超细偏高岭土掺量的淤泥固化土中6种重金属元素浸出量均未超过相关规范的要求,可以作为工程填筑材料使用。随着超细偏高岭土掺量增加,重金属浸出量均呈现出降低趋势。超细偏高岭土固化材料对6种重金属离子均具有良好的固结效果,尤其是对镉和汞的固结作用最为显著,其浸出量较纯淤泥降低达70%以上。随着龄期的增加,不同超细偏高岭土掺量淤泥固化土试件的重金属离子浸出量均呈下降趋势。

参考文献:

- [1] 王铎鑫,江朝华,孙逸琳,等.低质地聚合物固化处理疏浚淤泥力学性能试验研究[J].水运工程,2022(8):40-44,57.
- [2] 陈萌,杨国录,徐峰,等.淤泥固化处理研究进展[J].南水北调与水利科技,2018,16(5):128-138.
- [3] 邬德宇,曲贝贝,李金峰,等.内河疏浚土抗剪强度随含水率变化规律的试验研究[J].水运工程,2022(S2):22-28.
- [4] 范昭平,朱伟,张春雷.有机质含量对淤泥固化效果影响的试验研究[J].岩土力学,2005,26(8):1327-1330,1334.
- [5] 李志威,朱书景.改性淤泥做码头填筑材料试验研究[J].水运工程,2006(6):85-88.
- [6] JAMSAWANG P, POORAHONG H, YOOBANPOT N, et al. Improvement of soft clay with cement and bagasse ash waste[J]. Construction and building materials, 2017, 154: 61-71.
- [7] HORPIBULSUK S, PHETCHUAY C, CHINKULKIJNIWAT A. Soil stabilization by calcium carbide residue and fly ash[J]. Journal of materials in civil engineering, 2012, 24(2): 184-193.
- [8] 沈宇,王瑞彩,陶桂兰,等.矿渣和石灰固化疏浚淤泥效果的室内对比试验[J].水运工程,2022(3):38-43.

(下转第37页)