

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2020.165



开放科学(资源服务)标识码(OSID):



矿渣基改性材料干化城市污泥的效果及微观分析

张发文¹,何禹龙¹,董明坤¹,赵长民²,张雪娇¹

(1. 河南农业大学 林学院, 郑州 450002; 2. 河南省郑州生态环境监测中心, 郑州 450007)

摘要:通过不同掺入量和养护龄期下矿渣基改性剂对城市污泥含水率的影响,采用X射线衍射、扫描电镜和热重分析方法表征矿渣基改性材料和干化污泥的水化产物和微观结构,探讨矿渣基改性材料对污泥干化的效果及机理。结果表明:随着矿渣基改性剂掺量的增加和养护龄期的延长,污泥含水率大幅减少;在相同条件下,矿渣基改性剂对污泥的干化效果明显好于生石灰。微观试验表明:改性剂遇水后,矿渣基改性材料中的 SiO_2 和 Al_2O_3 会在碱性条件下与污泥中的水发生水化反应,生成水化硅酸钙凝胶和钙矾石晶体,将大量自由水转化为结晶水,降低污泥中的含水率,同时也会填补污泥内部的孔隙,改变原污泥松散团聚的结构体系,使污泥牢固地联结成一个整体,有助于污泥的进一步资源化利用。

关键词:矿渣;城市污泥;干化;微观试验;改性材料

中图分类号:X705 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2022)03-0177-09

Effect and microscopic analysis on drying municipal sludge with slag-based modified material

ZHANG Fawen¹, HE Yulong¹, DONG Mingkun¹, ZHAO Changmin², ZHANG Xuejiao¹

(1. College of Forestry, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, P. R. China; 2. Zhengzhou Ecological Environment Monitoring Center of Henan Province, Zhengzhou 450007, P. R. China)

Abstract: The effect and mechanism of municipal sludge drying with slag-based modified material were revealed by the study of moisture content at different contents of modified material and curing times. The hydration products and microstructure of slag-based modified material and the dried sludge were characterized by using X-ray diffraction analysis, scanning electron microscopy and thermogravimetric analysis. The results showed that the moisture content of dried sludge reduced gradually with the contents of modified material and curing age. The drying effect of slag-based modified material on sludge was better than that of quick lime at the same conditions. Microscopic experimental results indicated that insoluble calcium silicate hydrate gels and ettringite crystal were formed during the hydration process of slag-based

收稿日期:2020-07-24

基金项目:国家自然科学基金(51008118);河南省高等学校重点科研项目(18B610001);河南农业大学科技创新基金(KJ CX2017A06)

作者简介:张发文(1981-),男,博士,副教授,主要从事固体废物处理与资源化,E-mail:zhangfawen@henau.edu.cn.

Received:2020-07-24

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (No. 51008118); The Key Scientific Research Project of Henan Higher Education Institutions (No. 18B610001); Innovation Technology Foundation of Henan Agricultural University (No. KJ CX2017A06)

Author brief: ZHANG Fawen (1981-), PhD, associate professor, main research interests: treatment and resource utilization of solid waste, E-mail: zhangfawen@henau.edu.cn.

modified materials at alkaline conation, transforming a lot of free water into crystalline water in order to reduce moisture content of sludge. Meanwhile, these hydration products filled the pores of sludge, inducing to a thorough from loose agglomerate structure system of original sludge to a firmly bonded structure with different phases. It is helpful to the further resource utilization of sludge.

Keywords: slag; municipal sludge; drying; microscopic experiment; modified material

随着经济水平的提高和城镇化的不断发展,城市污水排放量持续上升,污水处理的副产物——污泥也随之增加。城市污水处理厂经过浓缩、机械脱水处理排出的污泥不仅含有重金属、病原体、农药、持久性有机污染物等多种污染物,而且其含水率高达 80% 左右,根本无法处理或利用,如此大量的污泥如果得不到合理的处置,将给土壤、水体、大气带来严重的二次污染^[1-3]。只有当污泥含水率降至 40%~50% 时才能够进行处置利用,所以,城市污泥的有效干化是其处置和资源化的关键。

目前,污泥干化方法主要有自然干化、热干化、生物干化及无机材料干化 4 种^[4-7],其中,无机材料干化常采用石灰、水泥等胶凝材料,学者们已经取得了大量的研究成果。栗志翔^[8]利用氧化钙作为热干化材料,碱渣和矿渣为固化材料,对污泥进行固化处理,开展了碱渣-矿渣固化污泥的工程性质试验研究。汪墨等^[9]研究发现,在 CaO/湿污泥为 0~20 g/kg 时,增加 CaO 能有效提高污泥干化速率,而 CaO 的消解离解作用以及对污泥内部孔隙结构的改变是影响污泥干化效果的主要因素。Lim 等^[10]采用石灰、黄土、粉煤灰对市政污泥进行了固化处理,发现添加生石灰对污泥中微生物起到杀菌作用,污泥在固化后强度满足建筑材料标准。张芊等^[11]通过水泥、煤矸石等材料对污泥进行了改性,发现改性后的污泥固化土含水率为 22.08%~150.48%,污泥经过改性后作为填埋场衬垫防渗材料具有可行性。Singh 等^[12]利用水泥、粉煤灰、氢氧化钙等聚合物固化含砷污泥,研究发现,粉煤灰的添加有助于水化反应进行,从而改善固化效果。但在将常规胶凝材料用于污泥干化时,存在资源消耗大、回收利用率低、

成本高等缺点,而且有研究表明,污泥中的重金属和高有机物含量对常规胶凝材料的水化反应有不良影响,严重影响了其干化及稳定化效果^[13-15]。因此,干化材料的优化选择十分重要,亟需针对污泥的特点研制干化效果好、处理成本低的环保干化材料。

污泥经过干化后能够进一步资源化利用才是解决污泥问题的根本途径。矿渣是一种具有很高潜在活性的玻璃体结构材料,但其活性需要在适当的条件下才能激发出来。如果能够利用矿渣等工业废渣改性城市污泥,既能降低污泥含水率,又能改变污泥絮体结构,同时为后续利用提供钙、铝、硅等元素,使得干化后污泥的物化性质与黏土相近,则可取代部分黏土和水泥等作为建筑材料的基材,广泛应用于水泥烧制辅料^[16-19]、制砖材料^[20]、陶粒骨料^[21-22]、墙体材料^[23-24]、道路基层材料^[25]等方面。

为了实现城市污泥与工业废弃物的双重资源化利用,实现“以废治废”的目标,采用矿渣为主要原料制备新型干化材料,对城市污泥进行干化,开展污泥干化效果研究,并采用 X 射线、扫描电镜、TG-DTG 等测试手段对污泥、改性剂及干化污泥进行测试分析,为矿渣基改性剂在城市污泥干化方面的应用提供依据。

1 试验

1.1 试验材料

试验中的污泥为取自郑州市某污水处理厂机械脱水后的城市生活污水污泥,样品呈灰黑色,有异味并略显弹性。污泥的 pH 值为 7.15 ± 0.45 ,含水率为 79.64%,有机质含量为 45.65%,其化学成分分析见表 1。

表 1 污泥和改性剂原料的化学成分

Table 1 Chemical compositions of sludge and raw materials

原料	化学成份/%						
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	K ₂ O	Na ₂ O
污泥	49.14	7.70	5.49	10.31	5.78	2.45	0.75
矿渣	41.23	13.54	1.89	6.85	29.14	1.09	0.81
熟料	21.48	4.72	1.12	3.70	56.62	0.54	1.00
粉煤灰	47.55	31.97	10.80	0.83	4.06	0.64	0.64

改性剂原料组成主要为矿渣,并掺入熟料、粉煤灰及活性激发剂,按照质量比为 58:27:12:3 进行配料,将原料拌和后,粉磨大约 20 min,制得矿渣改性剂。其中,矿渣为河南某钢铁厂高炉矿渣,熟料取自河南某水泥厂,粉煤灰取自河南某发电厂,其原料化学成分见表 1。为了考察该改性剂对污泥的干化效果,选用生石灰进行对比试验,所用生石灰购于郑州市某建材市场,有效 CaO 含量为 80.21%,比表面积为 286.8 cm²/g。

1.2 试验方法

污泥干化试验:在室温 20 °C 条件下,称取一定量的原始污泥,分别将质量比为 0、5%、10%、15%、20%、30%、40%、50% 的改性剂加入搅拌机,搅拌 5 min 后取出干化污泥,将其置于密闭容器中,在温度(20±1) °C、湿度≥95% 条件下养护,分别在 1、3、7、14 d 取样测定污泥含水率。每个掺量均做 3 次平行样,试验结果取其平均值。

干化污泥的含水率计算:污泥在掺入改性剂后,其含水率降低主要有两个方面的原因,一是改性剂的物理化学效应;二是改性剂自身的添加增加了总物质中的固含量。试验仅讨论改性剂的物理化学效应对含水率降低的影响。假设湿污泥初始质量为 m ,60 °C 烘干恒重后污泥样品质量为 m_0 ,改性剂质量为 m_1 ,养护至某龄期时改性剂-干化污泥总质量为 m_2 ,则经过改性剂干化后的污泥含水率 w 由式(1)计算得到。

$$w = \frac{m_2 - m_0 - m_1}{m} \times 100\% \quad (1)$$

需要指出的是,按照式(1)计算时, $m_2 - m_0 - m_1$ 为污泥中水分经过改性剂物理化学反应消耗后剩余在污泥中的水量, m 为污泥干化前的重量。因此,可根据该计算结果,探讨改性剂仅通过自身发生物理化学作用对污泥干化效果的影响。

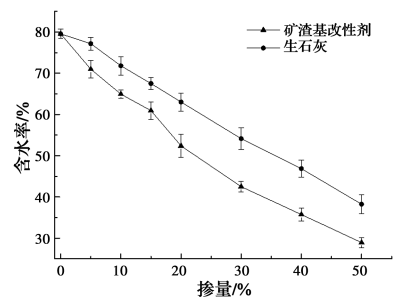
微观分析:将养护到规定龄期的样品破碎取芯,并用无水乙醇中止水化,在无水乙醇中浸泡时间至少为 10 d,且每 3 d 更换无水乙醇,最后将样品滤出并在 45 °C 温度下烘干至恒重,做 XRD、SEM 和 TG-DTG 分析。X 射线衍射仪选用德国 BRUKER AXS 公司生产的 D8 ADVANCE 型号 X 射线衍射仪,扫描电镜为德国 ZEISS MERLIN Compact 超高分辨率场发射扫描电镜,同步热分析采用德国耐驰公司生产的 STA 449 F3 Jupiter 型热分析仪。

2 结果与讨论

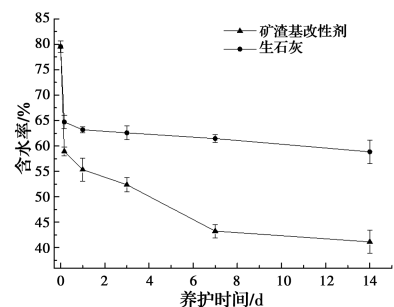
2.1 改性剂对污泥含水率的影响

污泥在分别掺入矿渣改性剂和生石灰后,养护时间为 3 d 时,干化污泥的含水率随干化剂掺入量的变化情况见图 1(a)。污泥含水率随着两种材料掺入量的增加而降低,而且矿渣改性剂的干化效果明显优于生石灰。这与污泥的干化机理有关,根据魏娜等^[26]的研究,生石灰主要是通过 CaO 水化生成 Ca(OH)₂,将部分自由水转化为化学结合水,同时,反应产生的大量水化热会起到蒸发作用;矿渣改性剂主要通过其中胶凝组分的水化反应将大部分自由水和间隙水转变为矿物结晶水,随着掺量的增加,污泥中参与水化反应的自由水转化量增加,从而导致含水率下降。

当干化剂掺量为 20% 时,干化污泥的含水率随养护时间的变化见图 1(b)。随着养护时间的增加,污泥含水率不断下降,14 d 后,经过生石灰和矿渣改性剂干化后的污泥含水率分别降至 62.50% 和 42.36%。当养护时间在 4 h 时,改性剂和生石灰对污泥的干化速率基本相似,说明在干化初期,不论是矿渣改性剂还是生石灰,都与污泥中水分直接发生反应,从而使一部分水分消耗掉,还有一部分水分可能是因为释放热量导致温度升高而引起蒸发作用,



(a) 不同干化剂掺入量(养护时间为3 d)



(b) 不同养护时间(掺入量为20%)

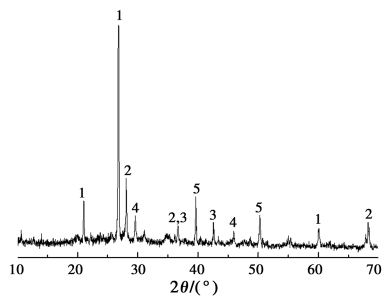
图 1 改性剂对干化污泥含水率的影响

Fig. 1 Effect of modified material on water content of dried sludge

从而被去除。当养护时间超过 4 h 时,矿渣基改性剂的干化速率明显优于生石灰,生石灰对污泥的干化速率从养护时间为 1 d 时开始趋于平缓,说明生石灰水化反应迅速,在 1 d 内其干化过程已基本结束,随着养护时间延长,主要是自由水自然蒸发导致含水率的缓慢下降。而随着养护时间的增加,矿渣基改性剂还能进一步与污泥发生水化反应,从而导致污泥含水率的下降。当养护龄期超过 7 d 时,随着自由水的不断消耗,水化反应基本完成,其含水率的下降也趋于平缓。

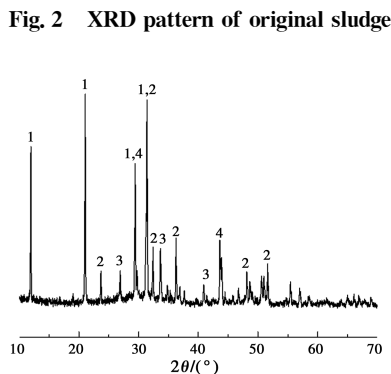
2.2 X 射线衍射分析

图 2~图 4 分别是污泥、矿渣改性剂及干化污泥不同龄期的 X 射线衍射谱。图 2 为污泥的 X 射线衍射谱,从图中一系列特征峰所得晶面距来看:原状污泥中主要矿物成分是石英,除此之外,还检测到少量由 Na 元素和 Al 元素组成的钠长石,以及高岭石、方解石和石膏等矿物。



注:1.石英 2.钠长石 3.高岭石 4.方解石 5.石膏

图 2 污泥原样的 X 射线衍射图

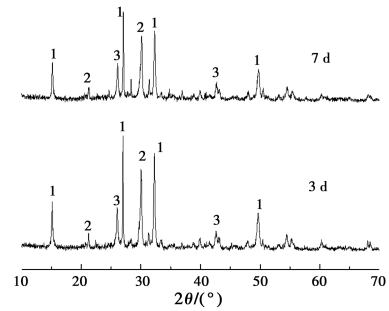


注:1.钙矾石 2.水化硅酸钙 3.氢氧化钙 4.硫酸钙

图 3 矿渣基改性剂水化产物的 X 射线衍射图

Fig. 3 XRD pattern of hydrated slag-based modified material

图 3 为矿渣基改性剂在养护龄期为 3 d 时水化产物的 X 射线衍射图谱。图 3 显示,改性剂水化产物中钙矾石和水化硅酸钙的特征峰较强,还存在一部分氢氧化钙和硫酸钙的特征峰。由于改性材料中含有氢氧化钙和硫酸钙成分,而且在碱性激发剂和硫酸盐激发剂的作用下,矿渣改性剂中的 SiO_2 和



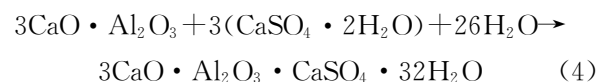
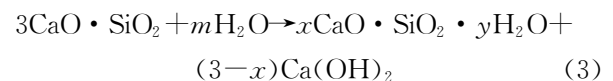
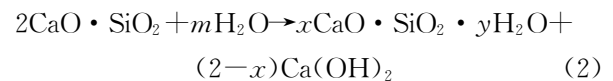
注:1.石英 2.钙铝黄长石 3.氢氧化钙

图 4 干化污泥的 X 射线衍射图

Fig. 4 XRD pattern of dried sludge

Al_2O_3 会与 OH^- 和 SO_4^{2-} 发生水化反应,主要反应产物为钙矾石和水化硅酸钙^[27],同时,通过水化反应可以将自由水分转化为水化产物中的化学结合水,达到改善原污泥干化效果的目的。改性剂通过水化产物的相互交织连生形成结晶结构网络,浆体逐渐硬化并形成一定的强度,将更有利于污泥的干化^[28]。

图 4 为不同龄期干化污泥的 X 射线衍射图谱。从图中可以看出,随着养护时间的延长,干化污泥中矿物成分钙铝黄长石和镁硅钙石含量均有所下降。钙铝黄长石和镁硅钙石主要为矿渣的组成部分,钙铝黄长石含量的下降说明,在激发剂的作用下,当接触污泥中的水分时,矿渣与污泥中的自由水发生水化反应,会部分溶解和水化,从而降低原污泥中的含水率,生成的水化产物里有钙离子和硅酸根离子。从该 XRD 图谱中可看出,改性剂与污泥中的水分会发生水化反应,从而降低污泥中的含水率,达到干化污泥的效果。掺入改性剂干化污泥时,可能发生式(2)~式(4)的水化反应。



2.3 扫描电镜观察

图 5~图 7 分别是污泥原样、改性剂净浆和干化污泥的扫描电镜照片。由图 5 可知,通过 SEM 对污泥原样表面形态分析发现,污泥中颗粒普遍较细,但其黏结力较强,大多聚集在一起。污泥表面凹凸不平,且有少量晶体生长的枝杈结构和纤维存在,呈多孔絮状结构,所以含水能力较强。

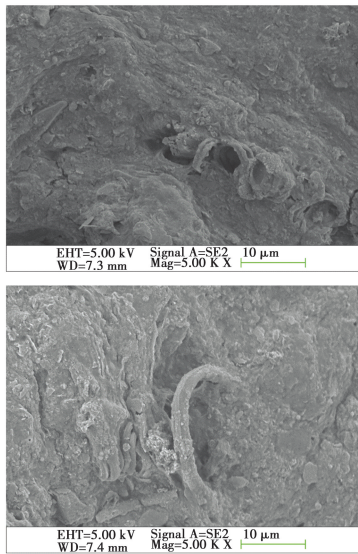


图 5 污泥原样的扫描电镜照片

Fig. 5 SEM images of original sludge

从图 6 可以看出,矿渣基改性剂经过 3 d 养护后,样品中的大部分矿渣表面被侵蚀并被无定形的凝胶体覆盖,呈棉絮状、网格状彼此相连形成一定的初始网络骨架,但仍存在一定量的空隙。同时,在表面出现大量的针状晶体穿插并填充在网状水化硅酸钙凝胶中,呈簇状出现,生长长度在 $1\ \mu\text{m}$ 左右。根据朱熙等^[29]的研究结果可知,此形状晶体为钙矾石,是由改性剂与水分发生水化反应生成的。随着龄期的延长,当养护 7 d 时,不断生成的水化产物胶结在一起,形成较为密实的结构体,空隙不断减小,水化产物和未反应的物质已经基本融为一体。

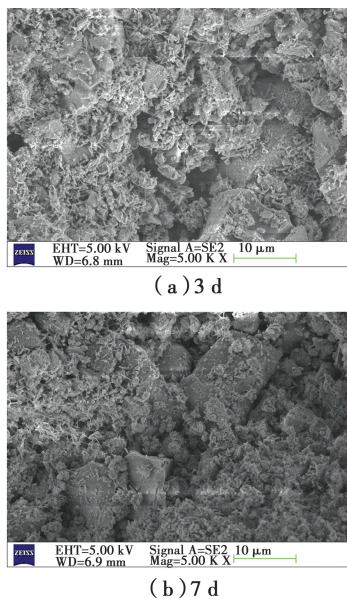


图 6 矿渣基改性剂净浆的扫描电镜照片

Fig. 6 SEM images of hydrated slag-based modified materials

由图 7 可见,污泥干化过程中能看到在微观结构体内呈发散状分布的不规则絮状水化产物,根据形貌判断,水化产物除了有网状结构的硅酸钙凝胶和被包裹住的污泥颗粒之外,结合 XRD 的测试结果可以发现还有铝酸钙水化产物的生成,如针状或者柱片状的钙矾石晶体附着在凝胶之中。水化初期,细颗粒较多且空隙较大,结构体不够紧密,随着水化反应的进行,干化污泥养护 7 d 后,其形貌较 3 d 时更为密实,空隙逐渐细化变小,原有的污泥絮状结构也有所改变,污泥中成片生长的不规则多面体水化产物明显增多,且相互交织纠缠在一起,使污泥和未反应的物质包裹在一起充填在空隙中,使结构更加整体化,进一步增加了微观结构体的密实度,降低了污泥体中的水分含量。试验结果表明,养护龄期越长,水化反应更加充分,由于水化产物强烈的吸附、黏附作用使得污泥-集料界面黏结牢固。

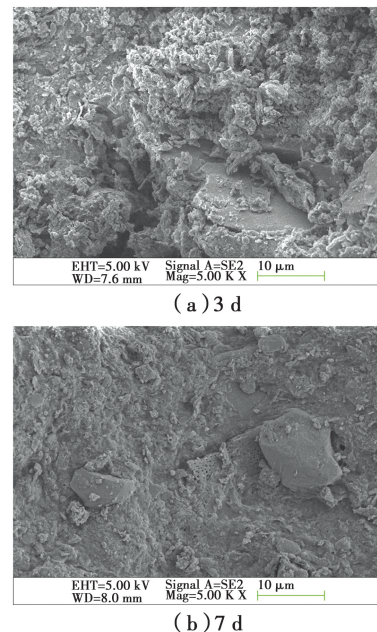


图 7 干化污泥的扫描电镜照片

Fig. 7 SEM images of dried sludge

2.4 热重分析

图 8 和图 9 分别是原样污泥和干化污泥的热重分析曲线。从污泥的热重分析曲线(图 8)可以看出,污泥的重量随着温度的升高逐渐减少,其失重曲线可分为 3 个阶段^[30-31]:第 1 阶段为污泥的干燥阶段,温度范围为室温至 $180\ ^\circ\text{C}$ 之间,在 TG 曲线上表现出一定量的失重,该范围内重量减少 3.13%,减少的物质主要为污泥间水分挥发;第 2 阶段为有机质裂解和挥发分析出阶段,温度范围为 $180\sim$

575 °C。随着温度的升高,失重迅速增加,反应速率加快,在温度为 289.4 °C 时出现最大反应速率峰,最大反应速率为 $-3.21\%/min$,说明在此温度下有机质裂解成小分子气体和挥发分的挥发速率最大,而后反应速率逐渐减小,整个过程失重为 28.27%;第 3 阶段为焦炭燃尽阶段,温度范围为 575~1 000 °C,当温度达到 673.2 °C 时出现峰值,最大反应速率为 $-0.62\%/min$,根据文献[32],该失重峰应为污泥中固定碳的燃烧,也有人认为是灰渣中某种矿物质在高温区间的分解,该阶段失重约 5.88%。

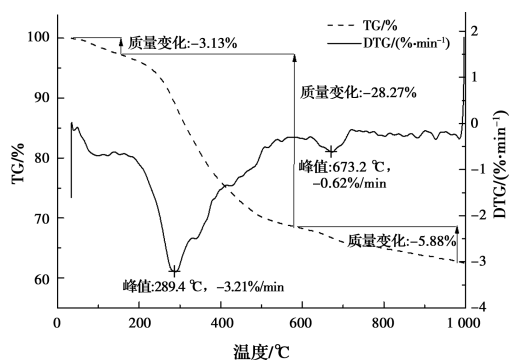


图 8 原样污泥的热重分析曲线

Fig. 8 TG-DTG curves of original sludge

图 9 是经过矿渣基改性剂干化后污泥不同龄期的热重分析曲线图。由图可以看出,干化污泥失重主要分为 4 个阶段:第 1 阶段为污泥中水分析出阶段,温度范围为室温至 180 °C,不同龄期条件下,该范围内重量分别减少 3.57% 和 3.68%,相较于原样污泥有所提高,说明在该温度范围内除了水分的挥发,同时可能存在水化硅酸钙凝胶和钙矾石等这一类水化产物的吸热分解^[27],而且龄期 7 d 比 3 d 时吸热多,失重大,说明随着龄期的延长,干化污泥中的水化产物钙矾石等晶体也在增加,这与 XRD 图谱结果一致,同时也进一步验证了污泥的干化效果;第 2 阶段为干化污泥中有机物分解阶段,温度范围为 180~525 °C,该范围内重量分别减少 9.5% 和 12.48%,主要是由于经过矿渣基改性剂干化后的污泥中有机物分解或挥发组分析出造成的,分别在 283.8、299.1 °C 时出现峰值,相较于原样污泥,出现峰值的温度基本不变,但是最大反应速率却大大下降,分别为 $-1.07\%/min$ 和 $-1.45\%/min$,说明经改性剂干化后,污泥中有机物组分或挥发组分含量有所降低;第 3 阶段为干化污泥中有机物的炭化阶段,温度范围为 525~750 °C,主要是干化污泥中部分有机物被分解为炭,该范围内重量分别减少

4.69% 和 3.94%;第 4 阶段为焦炭燃尽阶段,温度范围为 750~950 °C,主要为残留物无机组分的分解导致干化污泥重量进一步降低,分别减少 23.81% 和 18.26%,而且分别在 947.5、920.1 °C 时出现最大反应速率峰值,这在原样污泥中是没有出现的,说明该阶段干化污泥分解得到的炭在高温下与改性剂中的 Fe、Si、Al 等大量氧化物发生反应,造成干化污泥的化学组分发生变化,导致干化污泥中的主要矿物成分钙铝黄长石和镁硅钙石含量随着养护龄期的延长均有所下降,从而进一步验证了干化污泥的 XRD 分析结果。通过一系列热分析试验,结果说明,矿渣改性剂与污泥间的物质发生了一系列反应,这可能是导致改性剂对污泥有良好干化效果的原因。

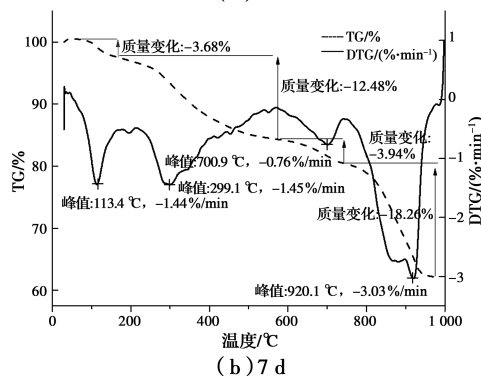
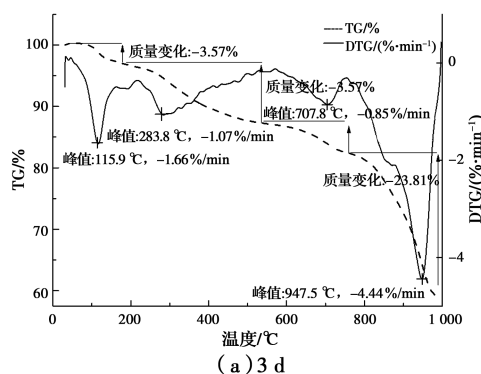


图 9 干化污泥的热重分析曲线

Fig. 9 TG-DTG curves of dried sludge

3 结论

1) 随着材料掺量的增加和养护时间的延长,污泥含水率大幅度降低。在相同条件下,经生石灰和矿渣基改性剂干化后污泥的含水率分别可降至 62.50% 和 42.36%。当材料掺量一定时,生石灰对污泥的干化效果主要集中在 1 d 内,后期干化速率与原污泥自然蒸发速率几乎相同,而矿渣基改性剂还能进一步与污泥发生水化反应,从而导致污泥含水率的下降,当养护时间为 7 d 时才开始逐渐趋于

平缓。

2)矿渣基改性剂对污泥有良好的干化效果,主要在于其能够发生水化反应。在活性激发剂的作用下,矿渣基改性材料中活性 SiO_2 和 Al_2O_3 与污泥中的水分发生反应,主要水化产物为水化硅酸钙和钙矾石晶体,这些产物的生成会填补污泥内部的孔隙,污泥会被牢固地联结成一个整体,从而降低污泥中的含水率,同时提高干化污泥的自身强度,有助于污泥的进一步资源化利用。

参考文献:

- [1] LIU X Y, LIU L J, LENG P S, et al. Feasible and effective reuse of municipal sludge for vegetation restoration: Physiochemical characteristics and microbial diversity [J]. *Scientific Reports*, 2019, 9 (1): 879-887.
- [2] 袁福林, 王惠, 伏小勇, 等. 污泥常温干化及其影响因素[J]. *环境工程*, 2019, 37(3): 7-12.
YUAN F L, WANG H, FU X Y, et al. Sludge drying at room temperature and influencing factors [J]. *Environmental Engineering*, 2019, 37(3): 7-12. (in Chinese)
- [3] 李辉, 吴晓芙, 蒋龙波, 等. 城市污泥脱水干化技术进展[J]. *环境工程*, 2014, 32(11): 102-107.
LI H, WU X F, JIANG L B, et al. Progress on the dewatering and drying technology of municipal sludge [J]. *Environmental Engineering*, 2014, 32(11): 102-107. (in Chinese)
- [4] FYTILI D, ZABANIOTOU A. Utilization of sewage sludge in EU application of old and new methods: A review [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2008, 12(1): 116-140.
- [5] 张勇. 东莞市首座城镇污泥处理处置中心工程设计[J]. *中国给水排水*, 2014, 30(16): 58-61.
ZHANG Y. Design of first municipal sludge treatment and disposal center engineering in Dongguan City [J]. *China Water & Wastewater*, 2014, 30(16): 58-61. (in Chinese)
- [6] 汪翠萍, 左东升, 杨永凯, 等. 城镇污泥加钙稳定干化/资源化利用技术中试研究[J]. *中国给水排水*, 2015, 31(7): 109-113.
WANG C P, ZUO D S, YANG Y K, et al. Pilot study on stabilization and reclamation of sewage sludge by addition of lime [J]. *China Water & Wastewater*, 2015, 31(7): 109-113. (in Chinese)
- [7] 邹淑鑫, 李欢, 李洋洋, 等. 污泥热干燥粘结的特征和影响因素[J]. *土木建筑与环境工程*, 2012, 34(Sup1): 124-126.
ZOU S X, LI H, LI Y Y, et al. Characteristics and impact factors of sludge adhesion during thermal drying [J]. *Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering*, 2012, 34(Sup1): 124-126. (in Chinese)
- [8] 栗志翔. 碱渣-矿渣固化市政污泥的工程性质试验研究[D]. 武汉: 湖北工业大学, 2020.
LI Z X. Experimental research on engineering properties of municipal sludge solidified with soda residue and ground granulated blast furnace slag [D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2020. (in Chinese)
- [9] 汪墨, 马晓茜, 彭晓为, 等. CaO改善印染污泥干化效果的微观研究[J]. *可再生能源*, 2016, 34(3): 462-468.
WANG Z, MA X Q, PENG X W, et al. Microscopic study on CaO improving dryness of dyeing sludge based on directional random walk method [J]. *Renewable Energy Resources*, 2016, 34(3): 462-468. (in Chinese)
- [10] LIM S, JEON W, LEE J, et al. Engineering properties of water/wastewater-treatment sludge modified by hydrated lime, fly ash and loess [J]. *Water Research*, 2002, 36(17): 4177-4184.
- [11] 张芊, 陆海军, 李继祥, 等. 填埋场改性污泥防渗层渗透与变形特性[J]. *科学技术与工程*, 2017, 17(8): 87-93.
ZHANG Q, LU H J, LI J X, et al. The permeability and deformation characteristics of modified sewage sludge as impervious layer in landfill [J]. *Science Technology and Engineering*, 2017, 17(8): 87-93. (in Chinese)
- [12] SINGH T S, PANT K K. Solidification/stabilization of arsenic containing solid wastes using Portland cement, fly ash and polymeric materials [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2006, 131(1/2/3): 29-36.
- [13] 李翔, 宋云, 刘永兵. 石灰干化污泥稳定后土壤中 Pb、Cd 和 Zn 浸出行为的研究[J]. *环境科学*, 2014, 35(5): 1946-1954.
LI X, SONG Y, LIU Y B. Leaching behavior of Pb, Cd and Zn from soil stabilized by lime stabilized sludge [J]. *Environmental Science*, 2014, 35(5): 1946-1954. (in Chinese)
- [14] 翁焕新, 傅凤霞, 刘瓚, 等. 污泥干化使重金属形态变向稳定的原因分析[J]. *环境科学学报*, 2010, 30(7):

- 1401-1409.
WENG H X, FU F X, LIU Z, et al. Mechanisms of heavy metal stabilization during sludge drying [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2010, 30(7): 1401-1409. (in Chinese)
- [15] 应梅娟, 赵振凤, 崔希龙, 等. 脱水污泥石灰处理工艺分析[J]. *中国给水排水*, 2011, 27(18): 13-16.
YING M J, ZHAO Z F, CUI X L, et al. Process analysis for lime treatment of dewatered sludge [J]. *China Water & Wastewater*, 2011, 27(18): 13-16. (in Chinese)
- [16] 龚成晨, 徐伟, 刘伟, 等. 城市污水厂石灰干化污泥对水泥易烧性的影响[J]. *环境工程学报*, 2015, 9(8): 3997-4001.
GONG C C, XU W, LIU W, et al. Effect of lime drying municipal sludge on burnability of cement clinker [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2015, 9(8): 3997-4001. (in Chinese)
- [17] HUSILLOS-RODRÍGUEZ N, MARTÍNEZ-RAMÍREZ S, BLANCO-VARELA M T, et al. The effect of using thermally dried sewage sludge as an alternative fuel on Portland cement clinker production [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2013, 52: 94-102.
- [18] HUSILLOS-RODRÍGUEZ N, GRANADOS R J, BLANCO-VARELA M T, et al. Evaluation of a lime-mediated sewage sludge stabilisation process. Product characterisation and technological validation for its use in the cement industry [J]. *Waste Management*, 2012, 32(3): 550-560.
- [19] 郑维伟, 曹海花, 刘伟, 等. 基于水泥窑协同处理石灰干化污泥工艺研究磷、硫对碳酸钙分解的影响[J]. *环境化学*, 2018, 37(9): 2008-2015.
ZHENG W W, CAO H H, LIU W, et al. Effect of phosphorus and sulfur on calcium carbonate decomposition in Cement Kiln Co-processing lime-dried sludge [J]. *Environmental Chemistry*, 2018, 37(9): 2008-2015. (in Chinese)
- [20] 马雯, 呼世斌. 以城市污泥为掺料制备烧结砖[J]. *环境工程学报*, 2012, 6(3): 1035-1038.
MA W, HU S B. Application of municipal sewage sludge in the process of sintering brick [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2012, 6(3): 1035-1038. (in Chinese)
- [21] 王兴润, 金宜英, 聂永丰, 等. 污泥制陶粒技术可行性分析与烧结机理研究[J]. *环境科学研究*, 2008, 21(6): 80-84.
WANG X R, JIN Y Y, NIE Y F, et al. Sintering characteristics and application research of sewage sludge in producing lightweight aggregate [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2008, 21(6): 80-84. (in Chinese)
- [22] 徐振华, 刘建国, 宋敏英, 等. 污泥与底泥烧结陶粒骨料的中试研究[J]. *环境工程学报*, 2013, 7(6): 2307-2316.
XU Z H, LIU J G, SONG M Y, et al. Pilot-scale study on lightweight aggregate sintered from sewage sludge and sediment [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2013, 7(6): 2307-2316. (in Chinese)
- [23] LIEW A G, IDRIS A, SAMAD A A, et al. Reusability of sewage sludge in clay bricks [J]. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 2004, 6(1): 41-47.
- [24] 蹇守卫, 何桂海, 马保国, 等. 干化污泥制备节能烧结墙体材料[J]. *环境工程学报*, 2016, 10(7): 3793-3799.
JIAN S W, HE G H, MA B G, et al. Preparation of energy saving sintered wall materials with dried sewage sludge [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2016, 10(7): 3793-3799. (in Chinese)
- [25] 崔宁, 崔丽, 毛世春. 石灰干化污泥应用于道路基层的研究[J]. *市政技术*, 2017, 35(2): 178-180, 184.
CUI N, CUI L, MAO S C. Applied research of lime drying sludge for road base [J]. *Municipal Engineering Technology*, 2017, 35(2): 178-180, 184. (in Chinese)
- [26] 魏娜, 侯浩波, 张发文. 基于复合胶凝材料的污泥干化改性试验研究[J]. *武汉理工大学学报*, 2009, 31(10): 97-100.
WEI N, HOU H B, ZHANG F W. Investigation of sludge drying and modification treatment by an innovative composite modifier [J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2009, 31(10): 97-100. (in Chinese)
- [27] 张发文, 杨建涛, 刘文霞, 等. 矿渣胶凝材料固结尾砂的微观实验[J]. *北京科技大学学报*, 2012, 34(7): 738-743.
ZHANG F W, YANG J T, LIU W X, et al. Microscopic experiment of consolidating tailings by slag cementing materials [J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 2012, 34(7): 738-743. (in Chinese)
- [28] 胡旋, 杨全兵. 矿渣合成增强剂对水泥基材料性能的

- 影响及其作用机理[J]. 建筑材料学报, 2020, 23(6): 1265-1272, 1304.
- HU X, YANG Q B. Effects of slag synthetic strength-enhancer on properties of cement-based material and its mechanism [J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(6): 1265-1272, 1304. (in Chinese)
- [29] 朱熙, 李飞, 宋永伟. 高钙矾石改性剂对污泥孔隙结构的影响[J]. 环境工程学报, 2017, 11(7): 4331-4336.
- ZHU X, LI F, SONG Y W. Influence of pore structure change on high content of ettringite modified sludge effect [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2017, 11(7): 4331-4336. (in Chinese)
- [30] 蔡景成. 城市污泥灰分理化特性与同步热分析实验研究[D]. 辽宁 大连: 大连理工大学, 2016.
- CAI J C. Study of municipal sludge ash on physical and chemical properties and simultaneous thermal analysis [D]. Dalian, Liaoning: Dalian University of Technology, 2016. (in Chinese)
- [31] 庄明明, 王小治, 柏彦超, 等. 生石灰稳定干化对生活污泥理化性质的影响[J]. 环境工程学报, 2012, 6(9): 3270-3274.
- ZHUANG M M, WANG X Z, BAI Y C, et al. Physical and chemical properties of sewage sludge stabilized by quicklime [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2012, 6(9): 3270-3274. (in Chinese)
- [32] 孙峰. 污泥理化性质与污泥处置的环境风险[D]. 杭州: 浙江大学, 2007.
- SUN F. The physicochemical properties of sewage sludge and its environmental risks for disposal [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007. (in Chinese)

(编辑 黄廷)