

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2018.02.004



# 差异含水率条件下飞灰及其螯合物的应力-应变及环境特性

唐强<sup>1,2</sup>, 陈辉<sup>1</sup>, 高玉峰<sup>2</sup>, 陈甦<sup>1</sup>, 尹立新<sup>2,3</sup>, 司维琦<sup>1</sup>

(1. 苏州大学轨道交通学院, 江苏 苏州 215137; 2. 河海大学 a. 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室; b. 江苏省岩土工程技术工程研究中心, 南京 210098; 3. 常熟理工学院 经济与管理学院, 江苏 常熟 215500)

**摘要:**垃圾焚烧飞灰因极高的重金属含量而被认为是一种危险废弃物,但与火山灰成分的相似使该材料有着资源化利用的潜在价值。以飞灰及其螯合物为研究对象,探讨了含水率、养护条件等因素对材料应力-应变及环境特性的影响。研究表明:飞灰螯合物重金属浸出浓度较低,并有着较强的吸水特性;飞灰及其螯合物强度早期随着养护时间的增长呈上升趋势,破坏应变随之减小,脆性不断增大;材料强度在中后期出现明显分化,飞灰(90%湿度养护)强度约为螯合飞灰的23.11倍。飞灰强度随含水率的增大而减小,可归结于孔隙水对压实能量的吸收和结构的影响;螯合飞灰强度均随养护时间和含水率增加而显著增大。

**关键词:**飞灰;含水率;养护条件;应力-应变;重金属浸出

**中图分类号:**X705 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2018)02-0019-07

## Stress-strain and leaching behaviors of fly ash and chelated fly ash under various moisture content

Tang Qiang<sup>1,2</sup>, Chen Hui<sup>1</sup>, Gao Yufeng<sup>2</sup>, Chen Su<sup>1</sup>, Yin Lixin<sup>2,3</sup>, Si Weiqi<sup>1</sup>

(1. School of Rail Transportation, Soochow University, Suzhou 215137, Jiangsu, P. R. China;

2a. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering;

2b. Jiangsu Research Center for Geotechnical Engineering Technology, Hohai University, Nanjing 210098, P. R. China;

3. College of Economics and Management, Changshu Institute Technology, Changshu 215500, Jiangsu, P. R. China)

**Abstract:** Fly ash, as a kind of solid waste, attracts increasing attention in the recent years. In this paper, the stress-strain and leaching behavior of fly ash and chelating fly ash under various moisture contents were studied. According to the test results, moisture content, curing conditions have significant effects on the

**收稿日期:**2017-04-24

**基金项目:**国家自然科学基金(51708377);江苏省自然科学基金(BK20170339);江苏省高等学校自然科学研究项目(17KJB560008);江苏省建设系统科技项目(2016ZD18,2017ZD002)

**作者简介:**唐强(1985-),男,副教授,博士,主要从事岩土及环境岩土工程研究,E-mail:tangqiang@suda.edu.cn。

陈甦(通信作者),男,教授,博士,E-mail:xiaowozi@hotmail.com。

**Received:**2017-04-24

**Foundation item:** National Natural Science Foundation of China (No. 51708377); Natural Science Foundation of Jiangsu Province (No. BK20170339); Natural Science Found for Colleges and Universities in Jiangsu Province (No. 17KJB560008); Project from Jiangsu Provincial Department of Housing and Urban-Rural Development (No. 2016ZD18,2017ZD002)

**Author brief:** Tang Qiang (1985-), associate professor, PhD, main research interests: geotechnical engineering and geo-environmental engineering, E-mail: tangqiang@suda.edu.cn;

Chen Su (corresponding author), professor, PhD, E-mail: xiaowozi@hotmail.com.

compressive strength, failure strain. The heavy metals leaching from fly ash can almost meet the requirement of environment. The strength of fly ash and chelating fly ash rise with the increase of curing time, while the failure strain decreases at earlier period. In the later period of curing time, the compressive strength exhibits different trend, by which the strength of fly ash in curing boxes is about 23.11 times of the chelating fly ash. Among them, the strength of fly ash increases with the decrease of water content under different curing conditions, due to the influence of pore water on the absorption and structure of compaction energy; in addition, the strength of chelating fly ash in curing boxes increases with the increase of the curing time and water content.

**Keywords:** fly ash; moisture content; curing condition; stress-strain; leaching of heavy metals

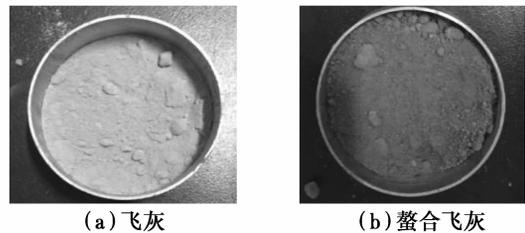
随着经济发展及城市化进程的推进,市政及生活垃圾产量随之与日俱增<sup>[1-3]</sup>。在传统市政固体废物(MSW)处理方法中,因焚烧能有效破坏有机毒性物质、减容减重、回收能源等优势,逐渐成为MSW资源化、无害化处理的重要发展方向<sup>[4-5]</sup>。以中国为例,MSW焚烧处理率已从2004年的2.9%增长到2014年的32.5%<sup>[1]</sup>;2009年,德国、法国焚烧处理率分别达到32.2%和34.0%;而早在2000年之前,日本和瑞士焚烧处理率就已高达近80%<sup>[4]</sup>。

虽然焚烧有诸多优势,但在此过程中,MSW中污染物富集,导致产出飞灰中含有极高成分的重金属,飞灰也因此被列为危险废弃物<sup>[5-6]</sup>。尽管如此,飞灰中大量的Ca、Si成分使其组成与火山灰较为相似<sup>[4,7]</sup>,吸引了诸多学者对飞灰资源化利用进行了研究:王威等<sup>[8]</sup>研究表明,飞灰可替代部分砂或水泥作为道路填充层或支撑层,但作为填充层可能产生二次污染;Colangelo等<sup>[9]</sup>提出,经水洗预处理的飞灰可回收作为道路基层材料,其对环境的影响符合相关环境标准要求;飞灰具有凝硬化特性,可代替部分石灰和水泥用于构筑堤坝,且飞灰的密度小于其它填充物质,使堤坝减小负荷,减轻地基沉降<sup>[10-12]</sup>。值得一提的是,将飞灰及其相关材料在土木工程或是地下工程领域中进行资源化利用则必须考虑材料所处的外界环境,以其中含水率为例,从地上、地表到地下,依次呈现出气态水、自然持水、含水率不断增大至最终饱和这一复杂趋势。基于以上考量及前期研究结论,笔者以飞灰及其螯合物为研究对象,测试其在不同含水率条件下的应力应变及重金属浸出特性,揭示影响材料工程及环境的关键性影响因素,进而探讨强度形成及重金属释放的内在机理。

## 1 材料和实验方法

### 1.1 材料

飞灰取自江苏省苏州常熟垃圾焚烧发电厂,该电厂位于常熟市辛庄镇南湖荡南岸,垃圾焚烧能力可达900 t/d,飞灰产量达25 t/d,采用干法半干法脱硫除酸,反向活性炭除重金属,布袋除尘的烟道气净化工艺。从控制重金属的浸出考量,将部分飞灰与重金属螯合剂拌合制成螯合飞灰。飞灰及其螯合物所取样品如图1所示。



(a) 飞灰

(b) 螯合飞灰

图1 飞灰及其螯合物

Fig. 1 Fly ash and chelated fly ash

表1列出了飞灰及其螯合物的部分理化特性,根据JGS A 0162及JIS A 1224标准,测得飞灰最大干密度(非压实)和最小干密度(非压实)分别为0.78、0.51 g/cm<sup>3</sup>,螯合飞灰的最大干密度(非压实)和最小干密度(非压实)分别为1.00、0.74 g/cm<sup>3</sup>;根据GB/T 50123—1999标准,测得飞灰的塑限、液限分别为54.42%、85.36%,螯合飞灰塑限、液限分别为38.57%、56.09%;根据沉降分析法,测得飞灰的主要成分为砂粒,不均匀系数、曲率系数分别为4.99、0.73,螯合飞灰的主要成分也为砂粒,不均匀系数、曲率系数分别为4.26、1.21;根据JGS 0212标准,测得飞灰和螯合飞灰的电导率(EC)分别为78.3、65.31 mS/cm,与螯合相比,飞灰含有更多的可溶性盐<sup>[13]</sup>;根据JGS 0211标准,测得飞灰的pH值为12.9,螯合飞灰的pH值为13.08,呈碱性<sup>[13]</sup>。

表1 飞灰及其螯合物理化指标

Table 1 Some selected physical and chemical characteristics of fly ash and chelated fly ash

物理指标	标准	单位	飞灰	螯合飞灰
最小干密度(非压实)	JIS A 1224	g/cm <sup>3</sup>	0.51	0.74
最大干密度(非压实)	JGS A 0162	g/cm <sup>3</sup>	0.78	1.00
塑限	GB/T50123—1999	%	54.42	38.57
液限	GB/T50123—1999	%	85.36	56.09
塑限指数	GB/T50123—1999		30.94	17.52
天然含水率	JIS A 1203	%	2.5	31.31
渗透系数	JIS A 1218	m/s	$8.92 \times 10^{-7}$	$1.29 \times 10^{-6}$
pH	JGS 0211		12.9	13.08
EC	JGS 0212	mS/cm	78.3	65.31
持水性	JGS 0151	%	128.7	100.2
级配	GB/T50123—1999			
黏粒( $\leq 0.005$ mm)		%	12.59	0.80
粉粒(0.075~0.005 mm)		%	9.01	13.70
砂粒(2~0.075 mm)		%	78.40	85.50
不均匀系数			4.99	4.26
曲率系数			0.73	1.21

## 1.2 实验方法

首先,实验针对飞灰及其螯合物的吸水性进行研究。将飞灰和螯合飞灰置于 105 ℃ 条件下(101-A, Leao, China)烘干 24 h,之后转入干燥器中冷却至室温待用。然后,将飞灰和螯合飞灰分别与水按质量比均匀混合,设计含水率为 10%、20%、30%、40%、50%、60%、70%、80%、90% 和 100%。将制备的样品使用聚乙烯薄膜覆盖并在温度 20 ℃ ± 2 ℃ 条件下静置 6 h。作为对比,将平行样品直接置于空气中,在湿度为 40%,温度为 20 ℃ ± 2 ℃ 条件下,静置 6 h。静置后,测定飞灰及其螯合物的实际含水率。根据 TCLP-1311-SW-84 方法,检测静置 6 h 后,覆盖聚乙烯薄膜的飞灰及其螯合物重金属(Cu、Cr、Cd、Zn、Ni、Pb)浸出浓度(TAS-990, Persee General, China)。

早期强度实验:分别制备含水率为 40%、60%、80% 的飞灰和含水率为 40%、60% 的螯合飞灰,并于内径为 50 mm、高为 100 mm 的套筒中分层压实;脱膜后将样品置于恒温恒湿标准养护箱(HBY-15B, Donghua, China)中,在湿度为 90%、温度为 20 ± 2 ℃ 条件下,分别养护至 20 min、40 min、1 h、3 h、5 h,取样测试其无侧限抗压强度并记录破坏应变。

中晚期强度实验:设计飞灰含水率为 20%、

40%、60%、80%,螯合飞灰含水率为 20%、40%、60%。通过分层压实法制备直径为 50 mm,高为 100 mm 的圆柱体试样,并置于湿度为 90%、温度为 20 ± 2 ℃ 养护箱中养护;同时,将同条件制备所得样品覆盖聚乙烯薄膜在温度 20 ℃ ± 2 ℃ 下养护,至不同养护时间 7、14、28 d,分别取样测试其无侧限抗压强度、破坏应变和样品实际含水率。

使用微机控制电子试验机对不同工况下飞灰及其螯合物无侧限抗压强度( $q_u$ )、破坏应变( $\epsilon_f$ )进行测试,并计算飞灰及其螯合物的变形模量。变形模量是指无侧限条件下应压力与相应压缩应变的比值,反映材料抵抗弹塑性变形的能力。常用变形系数  $E_{50}$  作为表征材料变形特性的参数,计算式如式(1)所示。

$$E_{50} = \frac{\sigma_{1/2}}{2\epsilon_f} \quad (1)$$

式中: $\sigma_{1/2}$  是压缩应变为破坏应变一半时的压缩应力, $E_{50}$  可视为此时的割线模量<sup>[14]</sup>。为确保实验的准确性和数据的可信度,每组不同工况下(含水率、养护环境和养护时间)的样品均设置 3 个平行样品。

## 2 结果与讨论

### 2.1 含水率及重金属浸出特性

图 2 列出了静置 6 h 后,覆膜与暴露空气中(湿

度 40%) 的飞灰及其螯合物的实际含水率。不难看出,与初始含水率相比,静置后,覆膜飞灰的含水率平均减少 5.95%,暴露空气中的飞灰含水率平均减少 3.14%。含水率减小的差异主要归因于飞灰的吸水性,暴露空气中的飞灰可从空气中汲取水分,而覆膜的飞灰只能消耗自身的水分<sup>[15]</sup>。与飞灰相比,静置后,覆膜和暴露于空气中的螯合飞灰含水率减少量均较大,高达 15.70% 和 14.22%。不同环境下,螯合飞灰含水率减小量的不同,可能也归因于螯合飞灰的吸水性。

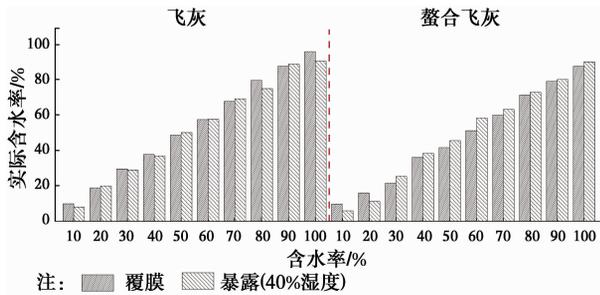


图 2 静置 6 h 后覆膜与暴露空气(湿度 40%) 飞灰及其螯合物实际含水率

Fig. 2 Actual moisture content of fly ash and chelated fly ash with different conditions after standing 6 hours

图 3 列出了静置 6 h 后,覆膜飞灰及其螯合物的重金属浸出浓度。不难看出,螯合飞灰重金属浸出浓度远低于飞灰,螯合飞灰重金属浸出浓度均低于 USEPA 浸出标准<sup>[4]</sup>。含水率对飞灰及其螯合物的重金属浸出浓度影响较小,可归结于飞灰及其螯合物呈碱性,碱性环境对重金属浸出有明显的抑制作用,而含水率的增减,未改变碱性环境<sup>[7,16]</sup>。

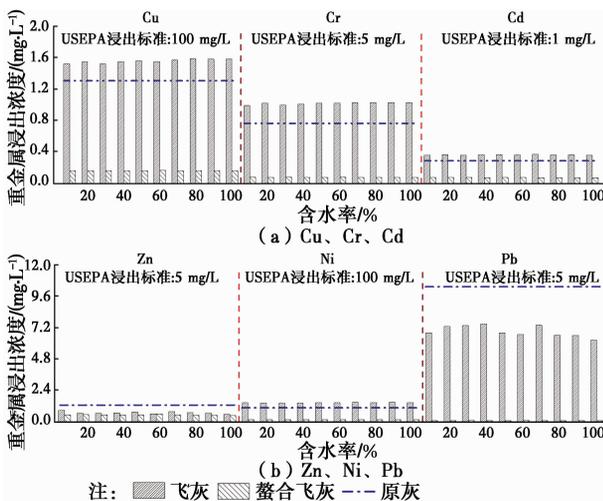


图 3 静置 6 h 后覆膜飞灰及其螯合物重金属浸出浓度

Fig. 3 The leaching of heavy metals of fly ash and chelated fly ash covering polyethylene film after standing 6 hours

图 4 列出了经不同时间养护后,覆盖聚乙烯薄膜的飞灰及其螯合物的实际含水率。飞灰及其螯合物的含水率在养护 7、14、28 d 后均有不同程度的降低:就螯合飞灰而言,养护后样品的实际含水率比初始含水率(20%、40%、60%)分别减少 9.6%、11.1% 和 7.0%;就飞灰而言,养护后样品的实际含水率比初始含水率分别减少 3.7%、4.3%、5.2% 和 8.7%,可以看出,随着初始含水率的增加,养护前后飞灰含水率减少量也随之增大,这主要归结于飞灰中含有一定量的生石灰,与外加的自由水发生反应,同时反应放出的热促使水分蒸发,进一步减小了飞灰的实际含水率<sup>[15]</sup>。

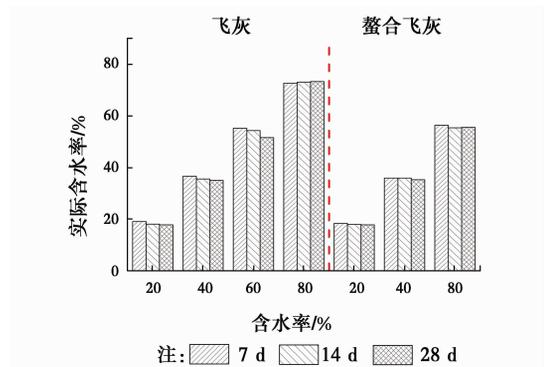


图 4 不同工况下(含水率、中晚期养护时间) 覆膜飞灰及其螯合物实际含水率

Fig. 4 Actual moisture content of fly ash and chelated fly ash with different conditions

### 2.2 飞灰及其螯合物早期应力应变特性

图 5 列出了 90% 湿度条件下,不同含水率的飞灰及其螯合物早期无侧限抗压强度、破坏应变和割线模量的均值。从图 5 可以看出,随着养护时间的增加,飞灰强度和割线模量呈上升趋势,而破坏应变随之减小。与养护 20 min 的飞灰样品相比,养护时间为 40 min、1 h、3 h、5 h 的飞灰强度增长均值约为 115%,破坏应变减小的均值约为 19%。螯合飞灰的强度和破坏应变随养护时间变化趋势与飞灰相同,较养护 40 min 样品,养护 1、3、5 h 的螯合飞灰强度增长均值约为 267%,破坏应变减小的均值约为 17%。在相同含水率和养护时间条件下,飞灰强度为螯合飞灰的 3.59 倍。对于含水率为 60% 的螯合飞灰,养护 20 min 后不存在无侧限抗压强度、破坏应变,主要是螯合飞灰的液限为 58.09%,养护 20 min 后,60% 含水率的螯合飞灰尚未初凝,无法成型。养护 40 min 以上则可成型且有强度。

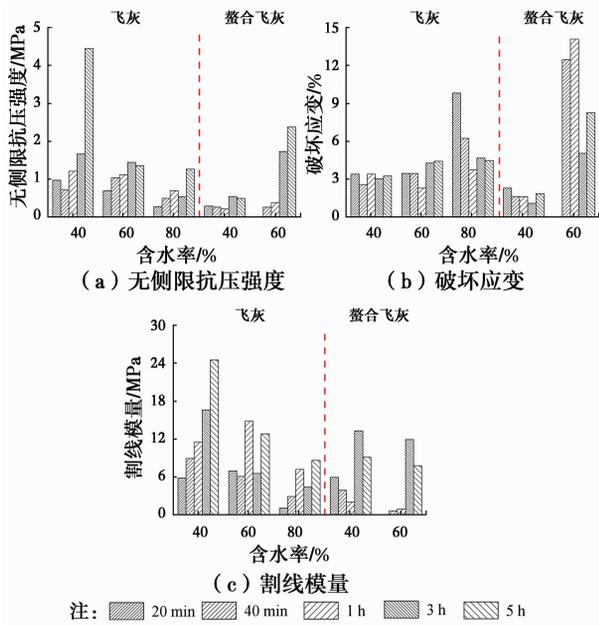


图 5 不同工况下(含水率、早期养护时间、90%湿度)飞灰及其整合物抗压强度、破坏应变、割线模量

Fig. 5 The unconfined compressive strength, strain at failure, and secant modulus of fly ash and chelated fly ash with different moisture content under different conditions

与整合飞灰相比,不同含水率的飞灰早期无侧限抗压强度较大,如图 5(a)所示。这主要是由于飞灰及其整合物的颗粒粒径分布不同,飞灰中含有较多的黏粒( $\leq 0.005$  mm),其含量是整合飞灰的 15.74 倍。Mitchell 等<sup>[17]</sup>发现:固相中黏粒越多,其可塑性和粘聚性越高,强度越大,这也揭示了飞灰比整合飞灰强度较大的原因。

### 2.3 飞灰及其整合物中晚期应力应变特性

图 6 列出了不同养护环境和养护时间条件下,不同含水率的飞灰及其整合物无侧限抗压强度、破坏应变和割线模量的均值。从图 6 不难看出,就飞灰而言,在养护箱中(湿度 90%)飞灰的强度随含水率的减小而增大,破坏应变呈下降趋势。与含水率 80% 的样品相比,含水率 60% 的飞灰样品强度增长了 129%,含水率 20% 的样品强度进一步增长了 71%;较 80% 含水率的飞灰,含水率 20%、40%、60% 的样品破坏应变减小的均值约为 35%。覆膜飞灰的强度随着含水率的增加而减小,破坏应变逐渐增大;当养护时间逐渐增加,其强度呈上升趋势。较 20% 含水率的飞灰,含水率 40%、60%、80% 的样品强度减小的均值约为 39%,破坏应变增加的均值约为 31%。较养护 7 d 的样品,养护 14、28 d 的飞灰强度分别增长了 102%、167%。就整合飞灰而

言,在养护箱中养护 7、14、28 d 后,整合飞灰强度随含水率的增加呈上升趋势,较含水率为 20% 的样品,40%、60% 含水率的样品强度增长的均值分别为 303%、838%;随着养护时间的增加,整合飞灰强度和割线模量也随之增大,较养护 7 d 的样品,其余养护时间的样品强度增长的均值约为 281%、455%。覆膜的整合飞灰强度和破坏应变随含水率增加而增大。较 20% 含水率的样品,其余含水率整合飞灰的强度、破坏应变增长的均值分别约为 211%、509%。对比可得,经养护箱养护后,飞灰的强度约为整合飞灰强度的 23.11 倍。较覆膜条件下飞灰,90% 湿度环境下的飞灰强度为其 3.29 倍。

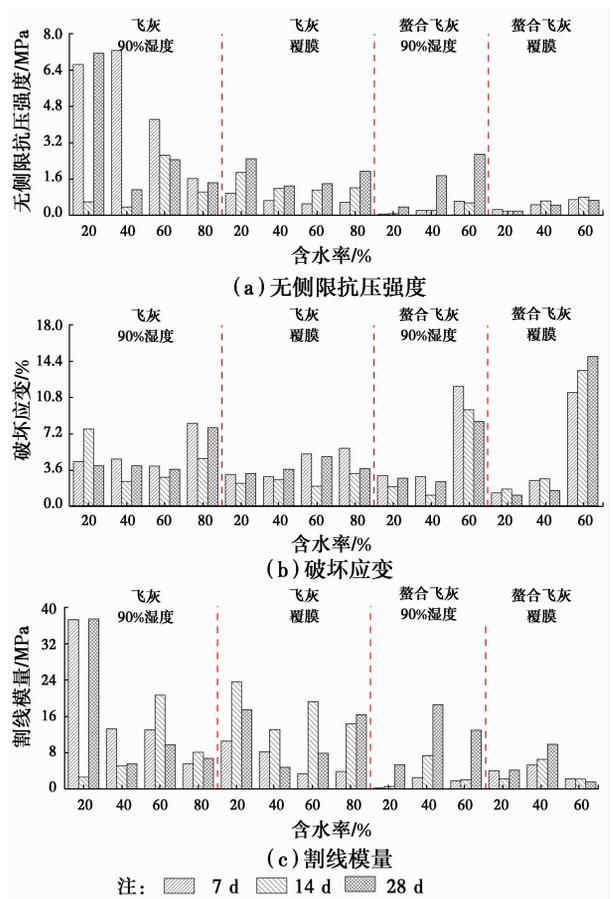


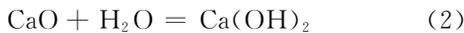
图 6 不同工况下(含水率、中晚期养护时间、条件)飞灰及其整合物无侧限抗压强度、破坏应变、割线模量

Fig. 6 The unconfined compressive strength, strain at failure, and secant modulus of fly ash and chelated fly ash with different moisture content under different conditions

在不同的养护环境下,飞灰的强度都随含水率减小而增大。主要归结以下几点:高含水率的飞灰含有多余的水分,在压实时很难快速排出而在孔隙中形成水团,削弱了颗粒间的联结,使灰粒润滑而变得易于移动,压实性变差<sup>[15]</sup>;从能量转化的角度来

看,在含水率较高时,飞灰颗粒间孔隙水较多,装样压实,部分击实能量被自由水吸收,转化为超静孔隙水压力,未能使得颗粒有效靠近、密实,致使强度减小,而在含水率较低时,孔隙水吸收的能量减少,压实的能量被飞灰吸收,促使飞灰颗粒之间靠近而密实,强度增大<sup>[18]</sup>;在养护过程中飞灰会生成碳酸盐,填充部分孔隙,但在较高的含水率下,碳酸盐化主要在液体的表面进行,生成的沉淀会阻碍碳酸盐化的继续进行,无法有效填充孔隙<sup>[15]</sup>。这也进一步解释含水率为20%的飞灰强度达到最大值。

由图6(a)可知,养护7 d后,90%湿度环境下养护的飞灰强度远大于覆膜的飞灰以及相同养护环境下的螯合飞灰。这主要归结于飞灰中含有的生石灰(CaO)与水(H<sub>2</sub>O)和二氧化碳(CO<sub>2</sub>)反应生成碳酸钙(CaCO<sub>3</sub>),反应式为



碳酸钙作为一种胶结物,分布于骨架颗粒表面以及骨架颗粒之间,在颗粒间起着连接作用,使得飞灰强度大幅度增长<sup>[19]</sup>。而在覆膜的飞灰和螯合飞灰中则不存在碳酸钙,这也揭示两者强度较小的原因。在覆膜条件下的飞灰,因其与外界隔绝,无法接触CO<sub>2</sub>,进而无法形成CaCO<sub>3</sub>胶结物,致使其强度变小。图7为不同养护环境下飞灰及其螯合物断面图。



(a) 飞灰(湿度90%) (b) 飞灰(覆膜) (c) 螯合飞灰(湿度90%)

图7 不同养护环境下飞灰及其螯合物  
(养护时间7 d,含水率40%)断面图

Fig. 7 Sectional drawing of fly ash and chelated fly ash with different condition

图8列出了90%湿度环境下,养护14、28 d后的飞灰强度均值。较养护14 d的飞灰,养护28 d后样品强度均有不同程度的恢复,且恢复量随着含水率的增加而减小。较含水率为80%的飞灰强度恢复量,含水率为40%样品的恢复量增加了82.0%,含水率为20%的样品强度恢复量进一步增长了764.7%。该变化规律与陈恒等<sup>[20]</sup>的研究结果一致。

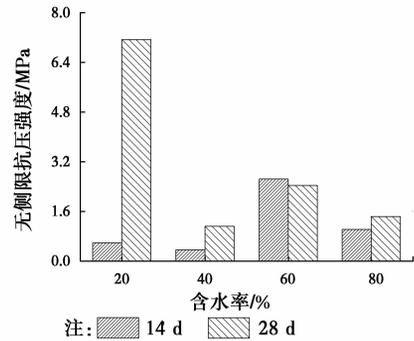


图8 不同工况下(含水率、养护时间、90%湿度)飞灰抗压强度  
Fig. 8 The strength of fly ash with different moisture content

### 3 结论

对飞灰及其螯合物应力应变及环境特性进行了研究,并探讨了含水率、养护条件等关键性影响因素。研究表明:飞灰及其螯合物都存在吸水性;飞灰螯合物的重金属浸出浓度较低,均满足 USEPA 标准;在早期养护时间内,飞灰及其螯合物的强度随着养护时间的增长而呈上升趋势,而破坏应变随之减小,脆性增大。经90%湿度养护后,中后期的螯合飞灰强度随养护时间和含水率增加而增大;在覆膜条件下,螯合飞灰的强度和破坏应变也随含水率增加而增大。在各类养护环境下,飞灰的强度都随含水率的增大而减小,主要是由于飞灰中过多的孔隙水对压实能量的吸收,导致飞灰结构松散。

### 参考文献:

- [1] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2014.  
National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. China statistical yearbook [J]. Beijing: China Statistics Press, 2014. (in Chinese)
- [2] WALSER T, LIMBACH L K, BROGIOLI R, et al. Persistence of engineered nanoparticles in a municipal solid-waste incineration plant [J]. Nature Nanotechnology, 2012, 7(8): 520-524.
- [3] TANG Q, KIM H J, ENDO K, et al. Size effect on lysimeter test evaluating the properties of construction and demolition waste leachate [J]. Soils and Foundations (JGS), 2015, 55(4), 720-736.
- [4] TANG Q, LIU Y, GU F, et al. Solidification/stabilization of fly ash from municipal solid waste incineration facility using ordinary Portland cement [J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2016 (2016): 7101243.
- [5] HU H, LUO G, LIU H, et al. Fate of chromium

- during thermal treatment of municipal solid waste incineration (MSWI) fly ash[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2013, 34(2): 2795-2801.
- [6] LIAO W P, YANG R, KUO W T, et al. The application of electrocoagulation for the conversion of MSWI fly ash into nonhazardous materials [J]. Journal of Environmental Management, 2014, 137: 157-162.
- [7] SOBIECKA E, OBRANIAK A, ANTIZARLADISLAO B. Influence of mixture ratio and pH to solidification/stabilization process of hospital solid waste incineration ash in Portland cement[J]. Chemosphere, 2014, 111: 18-23.
- [8] 王威, 吴宁. 城市生活垃圾焚烧飞灰资源化利用的研究状况[J]. 北方环境, 2013, 25(7): 27-28.  
WANG W, WU N. Beneficial utilization of municipal solid waste incineration fly ash [J]. Inner Mongolia Environmental Sciences, 2013, 25(7): 27-28. (in Chinese)
- [9] COLANGELO F, CIOFFI R, MONTAGNARO F, et al. Soluble salt removal from MSWI fly ash and its stabilization for safer disposal and recovery as road basement material [J]. Waste Management, 2012, 32(6): 1179-1185.
- [10] 李新明, 王士革, 乐金朝, 等. 城市垃圾焚烧飞灰资源化利用研究进展[J]. 热力发电, 2010, 39(5): 1-5.  
LI X M, WANG S G, YUE J C, et al. Advancement of study on utilizing fly ash resource from MSW incineration [J]. Thermal Power Generation, 2010, 39(5): 1-5. (in Chinese)
- [11] GU F, SAHIN H, LUO X, et al. Estimation of resilient modulus of unbound aggregates using performance-related base course properties [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2015, 27(6): 04014188.
- [12] GU F, ZHANG Y, DRODDY C, et al. Development of a new mechanistic empirical rutting model for unbound granular material [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2016, 28(8): 04016051.
- [13] TANG Q, KATSUMI T, INUI T, et al. Influence of pH on the membrane behavior of bentonite amended Fukakusa clay [J]. Separation and Purification Technology, 2015, 141: 132-142.
- [14] 汤怡新, 刘汉龙, 朱伟. 水泥固化土工程特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2002, 22(5): 549-554.
- TANG Y X., LIU H L, ZHU W. Study on engineering properties of cement-stabilized soil [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 22(5): 549-554. (in Chinese)
- [15] 何晶晶, 刘星, 冯军会, 等. 城市生活垃圾焚烧飞灰的工程性质表征[J]. 同济大学学报, 2007, 35(11): 1503-1506.  
HE P J, LIU X, FENG J H, et al. Engineering characteristics of air pollution control residues from municipal solid waste incineration plant[J]. Journal of Tongji University, 2007, 35(11): 1503-1506. (in Chinese)
- [16] TANG Q, CHU J M, WANG Y, et al. Characteristics and factors influencing Pb (II) desorption from a Chinese clay by citric acid [J]. Separation Science and Technology, 2016, 51(17): 2734-2743.
- [17] MITCHELL J K, SOGA K. Fundamentals of soil behavior [M]. John Wiley and Sons, 1993: 95.
- [18] 王清, 张奇, 马玉飞, 等. 广西红土击实特性的影响因素及机理分析[J]. 吉林大学学报, 2014, 44(6): 1960-1965.  
WANG Q, ZHANG Q, MA Y F, et al. The influence factors of compaction characteristics and mechanism analysis of laterite in Guangxi [J]. Journal of Jilin University, 2014, 44(6): 1960-1965. (in Chinese)
- [19] 王绪民, 陈善雄, 程昌炳. 酸性溶液浸泡下原状黄土物理力学特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(9): 1619-1626.  
WANG X M, CHEN S X, CHENG C B. Experimental study on physico-mechanical characteristics of undisturbed loess soaked in acid solution [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(9): 1619-1626. (in Chinese)
- [20] 陈恒, 马克生. 含水率对扰动粉土强度恢复规律影响研究[J]. 科学技术与工程, 2015, 15(23): 184-188.  
CHEN H, MA K S. Study on effect of moisture to strength recovery of disturbed silt [J]. Science Technology and Engineering, 2015, 15(23): 184-188. (in Chinese)