

# 粉煤灰加固土研究现状综述

齐杰\*, 倪鹏飞, 侯锡康

西京学院土木工程学院, 陕西 西安

收稿日期: 2023年7月25日; 录用日期: 2023年8月15日; 发布日期: 2023年8月25日

## 摘要

粉煤灰作为一种目前较为常见的土木工程筑路材料, 而被广泛的应用于公路工程建设中。为探讨粉煤灰对土的加固机理及研究应用前景, 本文介绍了粉煤灰加固土的固化机理及其力学性能研究现状, 将近十几年来国内外学者对粉煤灰加固土的一些静动力学性能研究应用做了简要的综述与分析, 在此基础上对于冻融循环条件下道路路基土特性研究进行总结与展望。

## 关键词

粉煤灰加固土, 固化机理, 力学性能, 冻融循环

# Review of Current Research Status of Fly Ash Reinforced Soil

Jie Qi\*, Pengfei Ni, Xikang Hou

School of Civil Engineering, Xijing University, Xi'an Shaanxi

Received: Jul. 25<sup>th</sup>, 2023; accepted: Aug. 15<sup>th</sup>, 2023; published: Aug. 25<sup>th</sup>, 2023

## Abstract

As a common civil engineering road construction material, fly ash has been widely used in highway engineering construction. In order to discuss the strengthening mechanism and research application prospect of fly ash to soil, this paper introduces the curing mechanism and mechanical property research status of fly ash reinforced soil. In the recent ten years, scholars at home and abroad have made a brief review and analysis of some static and dynamic properties of fly ash reinforced soil. On this basis, the research on the characteristics of roadbed soil under the freeze-thaw cycle is summarized and prospected.

\*通讯作者。

## Keywords

Fly Ash Reinforced Soil, Curing Mechanism, Mechanical Properties, Freeze-Thaw Cycle

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

粉煤灰是指燃煤电厂中磨细煤粉在锅炉中高温悬浮燃烧后,从烟道排除、被收尘器收集的一种工业废弃物[1]。我国火电厂粉煤灰的主要氧化物组成为:  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{FeO}$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{CaO}$ 、 $\text{TiO}_2$  等。粉煤灰是我国当前排量较大的工业废渣之一,随着电力工业的发展,燃煤电厂的粉煤灰排放量逐年增加。由于我们国家当前社会发展水平与资源发现程度,煤依旧在我国能源中占很大比例,这就导致在以后的生产生活中我国还要继续大量的使用煤作为能源。放眼全球,我国煤消耗大约占总量的一半。根据前几年的记录,我国近年来的粉煤灰年排放量持续增加,且幅度较大,燃煤电厂不断发展,粉煤灰产生量还将继续增加。对于工业废弃物,不应只采取销毁或者扔掉的做法,可以对其加以利用,就有可能变成一些有利的资源,粉煤灰也不例外。

粉煤灰本身不具有胶凝和水硬的特性,但是,当所处的环境为水环境,且其状态为粉末状,在常温状态条件下,粉煤灰会与氢氧化钙等一些金属类的氢氧化合物,产生一系列的化学反应,生成一定的化合物,而这种化合物会具有胶凝和水硬的性能。因此,在土体中添加一定量的粉煤灰,会提高土体的强度性能[2]。用粉煤灰作为主、辅材料形成的产品,具有强度高、板体性好、水稳性和冻稳性优良等特点,粉煤灰通常是一种匀质级配材料,其粒径处于粉质砂土和粉质粘土范围内,粒径介于 0.005 mm~0.10 mm 之间。粉煤灰的粒度成分与它的路用性能应用协调一致。粉煤灰用作路基填筑材料时,影响其压实性能的主要方面是粉煤灰的粒径组成,粗颗粒含量较多的粉煤灰,内摩擦角会增大[3]。由于存在着诸多优点,粉煤灰加固土技术在道路工程中得到了广泛的应用,带来了良好的社会效益和经济效益。

## 2. 粉煤灰加固土力学性能研究现状

近年来,粉煤灰作为一种优质的路基填料受到了国内外学者的广泛重视,日本、欧美等发达国家早在 20 世纪初就对粉煤灰加固土进行了有关方面的研究与应用。相比之下,我国起步较晚,80 年代初才开始有关方面的研究。表 1 列举了国内目前已经开展的几个比较典型的粉煤灰加固土的研究实验。

Table 1. Summary of research tests on typical fly ash reinforced soil

表 1. 典型粉煤灰加固土研究试验汇总

粉煤灰掺量	土类型	试验结论	文献来源
0%、10%、20%、30%	膨润土	随着粉煤灰掺量的增加,其黏聚力增大,内摩擦角降低。	[4]
0%、10%、20%、30%	黄土	随着养护天数的增加,无侧限抗压强度最高时的粉煤灰掺量先增加后减小。	[5]
5%、10%、15%、20%、25%	黄土	粉煤灰改性黄土的最佳粉煤灰含量在 15%~20% 之间。	[6]

Continued

0%、10%、20%	盐渍土	推荐在路基土中依据质量比掺加 15%粉煤灰, 并将经历 7 次冻融循环后压实盐渍土的力学指标作为工程设计参考值。	[7]
0%、8%、16%、24%、32%	黄土状硫酸盐渍土	粉煤灰掺量为 24%时无侧限抗压强度最高。	[8]

## 2.1. 粉煤灰加固土静力学性能研究现状

国内外学者对粉煤灰加固土静力学性能展开了大量的试验研究, 我国学者张笑峰和国外学者 J. Prabakar 等[9] [10]用粉煤灰来改良软土的工程性质, 通过对粉煤灰加固土进行大量的土工试验发现, 粉煤灰掺量对改良土的黏聚力与内摩擦角都有显著影响。其中国外学者 J. Prabakar 等还发现当粉煤灰含量增加到 46%时, 粉煤灰加固土的抗剪强度随粉煤灰含量的增加呈非线性增长。我国学者孙超[11]选取膨胀土, 而赵百超等[4]选取膨润土, 他们通过直剪试验来探究粉煤灰对土的抗剪强度影响, 都发现随着粉煤灰掺量的逐步增加, 煤灰加固土黏聚力逐渐增大, 而内摩擦角逐渐降低。这是由于粉煤灰加固土的成分发生化学反应, 增加了颗粒间胶结作用, 对土样黏聚力提升明显, 但对内摩擦角影响不大。

除了黏聚力和内摩擦角的静力学参数研究, 有国外学者 Andavan S、Mahipal Singh Chauhan 和 Rizki S A 等[12] [13]采用粉煤灰加固黏土, 通过无侧限抗压强度试验, 发现粉煤灰的掺加可以提高土体稳定性。Mahipal Singh Chauhan 等[14]研究了利用粉煤灰和椰子纤维改良粉砂类路基土, 试验发现, 当粉煤灰含量占质量分数 30%, 粉砂土占 70%时, 是最佳配比, 试样的无侧限抗压强度最大。我国学者刘雄美、夏琼和岳建平等[15] [16] [17]通过无侧限抗压强度试验, 研究了粉煤灰的掺量对稳定黄土无侧限抗压强度的影响, 结果表明: 石灰与粉煤灰加固黄土效果十分明显, 其抗压强度随粉煤灰掺量的增加而增大; 随含水率的增大, 石灰与粉煤灰加固黄土抗压强度有一定程度的降低。除此之外, 我国学者陈康亮等[18]通过对生石灰和粉煤灰加固硫酸盐渍土进行无侧限抗压强度试验, 试验结果表明: 初始含盐量、生石灰和粉煤灰掺量是影响固化盐渍土无侧限抗压强度的主要因素。国外学者 Nath D. B.等[19]指出, 粉煤灰显著降低了有机土的塑性指数, 提高了其液塑性极限。粉煤灰的加入使粉煤灰-土混合料的干密度显著增加, 需水量降低。干密度的增加影响了无侧限抗压强度的提高, 无侧限抗压强度随粉煤灰掺量的增加而增加。而国内学者贾苍琴等[20]采用水泥、粉煤灰对闽江口地区的软黏土进行改良加固试验。研究结果表明, 当水泥掺入质量比为 16%, 粉煤灰掺入量为水泥质量的 40%时, 加固土的强度最大, 并且强度随着软黏土含水量的增加而降低, 随着水泥掺入比、养护龄期的增长, 水泥土及水泥-粉煤灰加固土的抗压强度也随之增加。张桂荣等[21]为获取不同掺入量的粉煤灰对细砂土的强度的影响, 进行了无侧限抗压试验和直剪试验, 试验表明, 在水泥掺量一定的情况下, 提高粉煤灰的掺量可以大幅度的提高无侧限抗压强度。

众多学者对于粉煤灰加固土的黏聚力、内摩擦角和无侧限抗压强度等静力学参数进行了多方面的研究, 但由于所研究土的类型和所掺加的其他材料的不同, 粉煤灰的最优掺量也随之改变, 不过可以明确的是粉煤灰由于其固化机理, 可以明显提高土体的黏聚力和无侧限抗压强度, 所以使用粉煤灰加固土体是个十分有效的方法。

## 2.2. 粉煤灰加固土动力学性能研究现状

在国内外学者对粉煤灰加固土动力学性能展开的研究中, 国内学者李长雨等[22]通过对路基填料粉质中粉煤灰加固土的动力循环荷载试验, 分析了粉煤灰加固土的动力特性, 得出了动剪切强度与循环荷载次数间的变化规律, 动模量与动应变的关系表达式。而姜明阳等[23]则针对传统的粉煤灰加固土动力特性

研究中只考虑单向荷载作用的局限性,将交通荷载简化为双向振动的正弦波形循环荷载,进行双向交通荷载作用下粉煤灰加固土的动三轴试验,分析了径向动应力对粉煤灰加固土轴向累积塑性变形、动强度和动弹性模量的影响,建立了轴向累积塑性变形与振动次数关系的分段函数数学模型。兰常玉和孟靖等[24][25]以粉煤灰加固的膨胀土为研究对象,进行动三轴试验,其中兰常玉等考察了粉煤灰掺入量确定的条件下,循环次数、动荷大小、围压等对土体动强度的影响。其试验结果表明:粉煤灰改良膨胀土的动强度随振次的增加而缓慢减小。随着围压的增大,土体的动强度增大。而孟靖等研究改良膨胀土动弹性模量与阻尼比的变化规律。其试验结果表明:掺入粉煤灰可以显著提高膨胀土的动弹性模量,但掺灰率对阻尼比无明显影响。陈能远和王峻等[6][26]通过动三轴试验,开展了粉煤灰加固黄土的动力特性研究。其中陈能远等根据试验结果对粉煤灰加固黄土的动强度进行了分析。试验结果表明:随着粉煤灰掺量的增加,粉煤灰加固黄土的动强度值有所增加;粉煤灰加固黄土的动强度指标中粘聚力随粉煤灰掺量的增加而提高,而内摩擦角随粉煤灰掺量的减小呈略微减小的趋势。而王峻等研究结果表明,动弹性模量随着粉煤灰掺入量的增加而增加,而阻尼比减小。随后王峻等[27]通过动三轴震陷试验,提出残余应变随着粉煤灰掺量的增大而减小,最佳粉煤灰掺量为20%。另外崔高航等[28]选用5种不同配合比的粉煤灰改良饱和粉砂土,对其进行直剪试验和动三轴试验,试验结果表明:在一定限度内,增加粉煤灰的掺入量可以有效提高土体抗剪强度、初始弹性模量,降低阻尼比的增长速度。

国内外学者对于粉煤灰加固土的动强度、动弹性模量和阻尼比度等动力学参数进行了多方面的研究,通过对他们的研究成果总结,随着粉煤灰掺量的增加,土体的动强度和动弹性模量明显提高,但对阻尼比无明显影响。

### 2.3. 冻融循环作用下粉煤灰加固土静动力学性能研究现状

在国内外学者关于冻融循环作用下粉煤灰加固土静力学性能研究中,国内学者王丽霞等[29]对粉煤灰/石灰加固粉砂土进行了三轴剪切试验,结果表明:与素土相比,粉煤灰/石灰改良粉砂土的粘聚力、内摩擦角和抗剪强度均有一定程度的改善,且当粉煤灰/石灰加固粉砂土中的粉煤灰与石灰的掺量比为4:1时其改善最明显。程卓等[7][30]先对盐渍土开展无侧限抗压试验和三轴剪切试验,发现多次冻融循环后,盐渍土无侧限抗压强度、黏聚力和内摩擦角均有下降,经历1~7次冻融循环时,土体各力学参数下降速率较快;随着粉煤灰掺量的增加,盐渍土的内摩擦角、黏聚力、无侧限抗压强度和抗剪强度呈现出先升高后下降的变化趋势。并推荐在路基土中依据质量比掺加15%粉煤灰,经历7次冻融循环后压实盐渍土的力学指标作为工程设计参考值。随后又对盐-冻胀影响因素以及水盐迁移的相关研究进行总结,发现在道路施工中粉煤灰的掺加,可以通过改变盐渍土的微观结构,提升土骨架的强度,提升其强度和抗冻融的能力,提高盐渍土的路用性能。另外国内学者王东星等[31]通过对大掺量粉煤灰淤泥固化土进行无侧限抗压强度试验和抗拉强度试验。发现淤泥固化后弹性模量、无侧限抗压强度和抗拉强度均增加,水泥掺量越大,养护时间越长,强度和弹性模量越大;浸水软化和冻融循环导致固化土抗压强度显著劣化,冻胀融缩导致设计混合料的无侧限抗压强度减小约22%。张淑玲等[32]对水泥土及粉煤灰加固土进行了冻融循环作用后的单轴抗压试验研究,结果表明:冻融循环对粉煤灰土抗压强度的影响仅在冻融循环初期较显著。粉煤灰加固土的抗冻性能随着养护龄期的增长有不同程度的提高。干冻、湿冻对改良土抗压强度影响明显,相同冻融次数下干冻改良土的抗压强度高于湿冻条件下的抗压强度。

而在关于冻融循环作用下粉煤灰加固土动力学性能研究中,国外学者Han-Bing L等[33]对冻融循环后的粉煤灰加固粉质黏土进行三轴试验,研究粉煤灰加固土在路基充填中的动力特性。研究结果表明,粉煤灰土经过1次冻融循环后,其动力性质优于粉质黏土,其动力强度和动模量达到稳定。Chen Shufeng等[34]对不同掺合比和冻融循环次数的粉煤灰和聚丙烯纤维改良黄土进行了动三轴试验。结果表明:冻融



循环后动剪切模量和阻尼比分别显著减小和增大；动剪切模量随粉煤灰掺量和围压的增大而显著增大，随含水量的增加而减小。同时，阻尼比随纤维含量和含水量的增加而增大，随粉煤灰含量和围压的增加而减小。魏海斌、刘寒冰和贾明琨等[35] [36] [37]通过大量动三轴试验，建立了动力参数的衰减模型，发现粉煤灰加固粉质粘土的冻融损伤程度远远小于粉质粘土，抗冻耐久性较好。其中魏海斌和刘寒冰等还发现随着冻融循环次数的增加，粉煤灰加固土的动强度逐渐衰减，经历 45 次冻融循环的粉煤灰加固土的动剪强度趋于稳定。在相同围压下，聚丙烯纤维与粉煤灰加固土的动强度大于粉煤灰加固土的动强度，且两者的动强度都随着荷载循环次数的增加而下降，随着围压的增加而变大。

通过对国内外学者所研究的冻融循环作用下粉煤灰加固土静动力学性能，发现冻融循环对土体力学性能的影响十分显著，而粉煤灰的掺入可以明显提高土体的强度，因此粉煤灰加固土有着抗冻性好的优点，同时总结学者的研究可以看出，冻融循环后粉煤灰加固土的内摩擦角、黏聚力、无侧限抗压强度和抗剪强度逐渐降低，而其动剪切模量和阻尼比显著减小和增大，随着粉煤灰掺量的增加，土体的内摩擦角、黏聚力、无侧限抗压强度和抗剪强度呈现出先升高后下降的变化趋势。动剪切模量随粉煤灰掺量的增大而显著增大，阻尼比随粉煤灰含量的增加而减小。

### 3. 总结

在查阅近几年国内外学者对粉煤灰加固土的相关研究中，发现粉煤灰加固土可以有效的提高土体的强度，所以粉煤灰加固土的研究是非常有必要的。但在查阅过程中我还发现，虽然粉煤灰加固土能改善路基土体的工程性能，但与掺入了纤维的粉煤灰加固土相比，其抗剪强度、无侧限抗压强度、抗拉强度等都有着明显的差距，因此粉煤灰加固土还可以掺加一些可以弥补其不足之处的材料，这样可以更好的改善土体的工程性能。

### 参考文献

- [1] 许力, 孔亚宁, 谢国帅, 等. 我国粉煤灰综合利用现状综述[J]. 福建建材, 2012(3): 16-18.
- [2] 王冬容. 粉煤灰气泡混合轻质土静动力特性试验研究[D]: [硕士学位论文]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2018.
- [3] 张舒畅. 粉煤灰路用性能综述[J]. 山西建筑, 2005, 31(3): 99-100.
- [4] 赵百超, 陈四利, 董凯赫. 基于膨润土、粉煤灰的水泥复合土抗剪强度研究[J]. 硅酸盐通报, 2019, 38(9): 2882-2889.
- [5] 桑南. 粉煤灰掺量对陕西黄土稳定性的影响研究[D]: [硕士学位论文]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2019.
- [6] 王峻, 王谦, 王平, 等. 粉煤灰掺入量对改性黄土动本构关系的影响[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(S1): 156-160.
- [7] 程卓, 崔高航, 高原昊, 等. 季冻区粉煤灰加固路基土力学性能试验研究[J]. 硅酸盐通报, 2021, 40(11): 3854-3864+3875.
- [8] 任振东. 石灰-粉煤灰固化黄土状硫酸盐渍土的力学及电化学特性的试验研究[D]: [硕士学位论文]. 太原: 太原理工大学, 2020.
- [9] 张笑峰, 张艳美, 刘锦程, 等. 纤维与粉煤灰改良粉土的正交试验分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2019, 17(1): 36-40.
- [10] Prabakar, J., Dendorkar, N. and Morchhale, R.K. (2003) Influence of Fly Ash on Strength Behavior of Typical Soils. *Construction and Building Materials*, **18**, 263-267. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2003.11.003>
- [11] 孙超. 粉煤灰掺量对膨胀土抗剪强度的改性影响[J]. 水利建设与管理, 2023, 43(5): 25-30.
- [12] Andavan, S. and Pagadala, K.V. (2020) A Study on Soil Stabilization by Addition of Fly Ash and Lime. *Materials Today: Proceedings*, **22**, 1144-1148. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.11.323>
- [13] Rizki, S.A., Bakri, A.M.M.A., Romisuhani, A., et al. (2021) Evaluation on the Mechanical Properties of Ground Granulated Blast Slag (GGBS) and Fly Ash Stabilized Soil via Geopolymer Process. *Materials (Basel, Switzerland)*, **14**, Article No. 2833. <https://doi.org/10.3390/ma14112833>
- [14] Chauhan, M.S., Mittal, S. and Mohanty, B. (2008) Performance Evaluation of Silty Sand Subgrade Reinforced with Fly

- Ash and Fibre. *Geotextiles and Geomembranes*, **26**, 429-435. <https://doi.org/10.1016/j.geotextmem.2008.02.001>
- [15] 刘雄美. 石灰粉煤灰水泥稳定黄土的力学性能研究[J]. 铁道建筑技术, 2021(9): 4-8.
- [16] 夏琼, 杨有海, 耿焯. 粉煤灰与石灰、水泥改良黄土填料的试验研究[J]. 兰州交通大学学报, 2008(3): 40-43+47.
- [17] 岳建平, 杨有海. 石灰及其与粉煤灰混合改良黄土强度特性试验研究[J]. 兰州工业学院学报, 2013, 20(5): 41-45.
- [18] 陈康亮, 刘长武, 杨伟峰, 等. 基于生石灰和粉煤灰改良硫酸盐渍土的强度特性[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(26): 10888-10893.
- [19] Nath, D.B., Molla, A.K.M. and Sarkar, G. (2017) Study on Strength Behavior of Organic Soil Stabilized with Fly Ash. *International Scholarly Research Notices*, **2017**, Article ID: 5786541. <https://doi.org/10.1155/2017/5786541>
- [20] 贾苍琴, 黄茂松, 姚环. 水泥-粉煤灰加固闽江口地区软粘土试验研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2004(7): 884-888.
- [21] 张桂荣, 罗紫婧, 邵勇, 等. 水泥、粉煤灰改良细砂土的工程特性与改良机理[J]. 水利与建筑工程学报, 2019, 17(5): 128-132.
- [22] 李长雨, 张志强, 刘炜. 粉煤灰土的动剪强度试验研究[J]. 长春工程学院学报(自然科学版), 2006(1): 5-8.
- [23] 姜明阳, 张彬. 双向交通荷载作用下粉煤灰土动力特性研究[J]. 非金属矿, 2016, 39(3): 57-59+66.
- [24] 兰常玉, 薛鹏, 周俊英. 粉煤灰改良膨胀土的动强度试验研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2010, 30(S1): 79-81.
- [25] 孟靖, 庄心善, 周睦凯, 等. 粉煤灰改良膨胀土动弹性模量与阻尼比试验研究[J]. 湖北工业大学学报, 2022, 37(2): 70-74.
- [26] 陈能远, 骆亚生, 董雷. 掺土粉煤灰的动强度及孔压发展规律[J]. 水文地质工程地质, 2011, 38(1): 76-80.
- [27] 王峻, 王谦, 钟秀梅, 等. 粉煤灰与动载耦合作用下黄土震陷试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2014, 41(6): 70-75.
- [28] 崔高航, 席晨, 程卓, 等. 粉煤灰掺量对含黏粒粉砂土力学性能影响[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(34): 14688-14695.
- [29] 王丽霞, 韩兵, 张云龙, 等. 冻融作用下粉煤灰/石灰改良粉砂土静力特性研究[J]. 吉林建筑大学学报, 2020, 37(1): 31-37.
- [30] 程卓, 杨政, 李雨桐. 冻融条件下应用粉煤灰改良盐渍土性能研究综述[J]. 山西建筑, 2020, 46(20): 107-111.
- [31] 王东星, 徐卫亚. 大掺量粉煤灰淤泥固化土的强度与耐久性研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(12): 3659-3664.
- [32] 张淑玲, 倪静, 马蕾, 等. 冻融循环作用后水泥土及粉煤灰土的力学性能试验研究[J]. 水资源与水工程学报, 2018, 29(4): 196-201.
- [33] Liu, H.B., Wei, H.B., Gao, Y.P., et al. (2007) Experimental Research on Dynamic Properties of Fly Ash Soil and Silty Clay after Freeze-Thaw Cycling. *Proceedings of the First International Conference on Transportation Engineering*, Vol. 1, 7. [https://doi.org/10.1061/40932\(246\)672](https://doi.org/10.1061/40932(246)672)
- [34] Chen, S.F., Luo, T., Li, G., et al. (2022) Effects of Cyclic Freezing-Thawing on Dynamic Properties of Loess Reinforced with Polypropylene Fiber and Fly Ash. *Water*, **14**, Article No. 317. <https://doi.org/10.3390/w14030317>
- [35] 魏海斌, 刘寒冰, 高一平, 等. 冻融循环对粉煤灰土动强度的影响[J]. 吉林大学学报(工学版), 2007, 130(2): 329-333.
- [36] 刘寒冰, 何岩, 魏海斌, 等. 聚丙烯纤维改良粉煤灰土的动力特性[J]. 吉林大学学报(工学版), 2010, 40(3): 672-675.
- [37] 贾明琨. 聚丙烯纤维改良粉煤灰路基土的抗冻融试验研究[D]: [硕士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2009.