干密度对生物质垃圾炉渣力学特性的影响

张攀，徐永福

(上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院，上海200240)

摘要：生物质垃圾炉渣是一种典型的颗粒状材料，可以代替骨料作为路基垫层材料。为了研究干密度对炉渣力学特性的影响规律，对干密度为0.9，1.0，1.1g／cm^3
。的炉渣试样进行三轴固结排水剪切试验。试验结果表明：炉渣力学特性与应力状态和干密度密切相关；松散炉渣的应力.应变曲线呈现硬化特性，紧密炉渣的应力-
应变曲线软化特征明显；炉渣的初始弹性模量、黏聚力、内摩擦角均随着干密度的提高而增大。

随着经济的发展，城市垃圾日益增多。其主要处理方式为填埋、焚烧、堆肥等。由于成本、技术等原因，中国仍然主要采用焚烧方式。该方法需重点考虑对环境的影响，尽量实现废物再利用。固体垃圾焚烧的主要产物为粉煤灰和炉渣。粉煤灰已被广泛应用于混凝土和煤矿充填，炉渣可作为工业陶瓷中的催化烧结剂，在土木工程中可替代骨料作为路基填筑材料。

国内外对于炉渣的研究取得了较多的成果。XIE等[1]分析了炉渣的物理化学特性，评估了其作为路基材料的可行性。LE等[2]通过三轴固结排水试验测定了炉渣的黏聚力、内摩擦角、变形模量等基本力学参数。冯兴波等[3]对城市垃圾炉渣进行了无侧限抗压强度试验，分析了不同干密度试样在不同龄期下的强度特性。徐永福[4]通过三轴试验研究了生活垃圾炉渣在饱和状态下的强度特性，并提出可以通过大、小主应力之间的关系确定炉渣的抗剪强度参数。宋丹青等[5]研究了含水率对生活垃圾炉渣强度的影响，发现炉渣在最优含水率附近具有最大抗剪强度。张远博等[6]采用离散元软件PFC3D对垃圾炉渣的力学性质进行了模拟，分析了其应力一应变关系，探讨了边界刚度对剪切强度参数和压缩模量的影响，为炉渣的研究提供了一种新思路。

目前针对炉渣力学性能方面的研究多侧重于原材料、颗粒级配、应力状态等因素对其强度与变形特性的影响。而实际上粗粒料的力学响应不仅取决于应力状态，还与密实程度有关，因此本文主要分析干密度对炉渣强度及变形特性的影响。

1试验方案

1.1试验材料

试验用炉渣取自江苏省南通市垃圾焚烧厂，原状炉渣呈灰色颗粒状，形状各异，通过筛分试验，得到如图1所示的颗粒级配曲线。粒径大于1mm的粗粒约占60%，不均匀系数为21，级配良好。炉渣矿物成分主要为石英、石膏、方解石、微斜长石以及磁铁矿，其中石英
含量46%。炉渣中主要氧化物为CaO，SiO_2，Fe_2O_3，SO_3，含量高达70%，见表1。

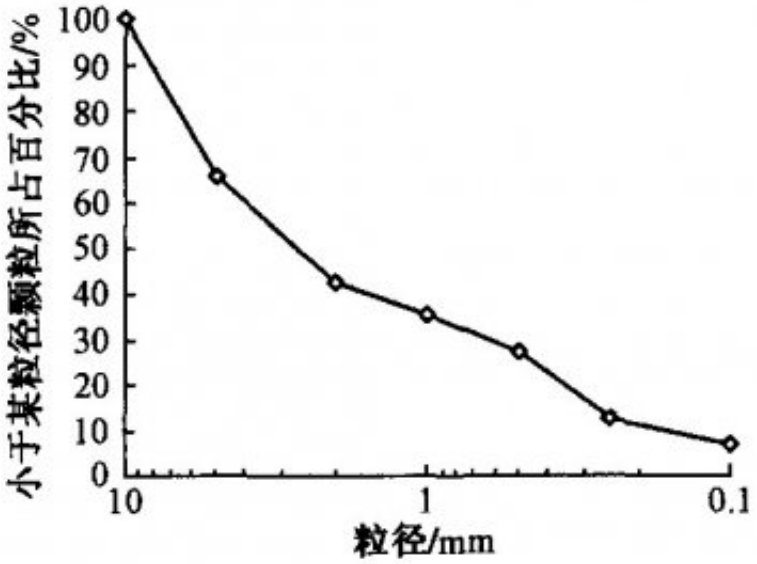

图 1　炉渣颗粒级配曲线

表 1　炉渣中氧化物

CaO	SiO_2	Fe_2O_3	SO_3	Al_2O_3	K_2O	MgO	TiO_2	LOI
27.32	25.50	9.79	6.22	4.90	4.24	1.71	1.23	13.04

1.2试验方法

将粒径小于2mm的炉渣加水拌合至含水率为22%，塑料袋密封12h。根据不同干密度称取相应质量的炉渣，在试样模中分5层击实，试样高度80mm，直径39.2mm。文献[2]提出炉渣三轴试验剪切速率最好控制在0.009～0.144mm／min，本试验剪切速率控制在0.055mm／min。本文在3种干密度(0.9，1.0，1.1g／cm^3)下开展三轴固结排水试验，每一种干密度下进行3组试验，围压分别为50，100，200kPa。

2试验结果与分析

2.1应力-应变关系

参考临界状态土力学，三轴试验中当应变超过20%时，试样的应力分布已经不均匀，应力一应变曲线关系出现失真，因此本文取炉渣应变20%段进行分析。炉渣的应力一应变曲线见图2。图中纵坐标为大、小主应力差σ1-σ3，横坐标为竖向应变εa。在低围压(50，100kPa)下炉渣应力一应变曲线大多呈应变软化型，有明显的峰值强度，而在高围压下(200kPa)应力.应变曲线呈硬化型。松散炉渣应力.应变曲线呈现硬化特性，紧密炉渣应力-应变曲线软化特征明显。炉渣应力一应变曲线特性由围压和干密度共同决定，紧密炉渣在高围压下也可能出现应变硬化。

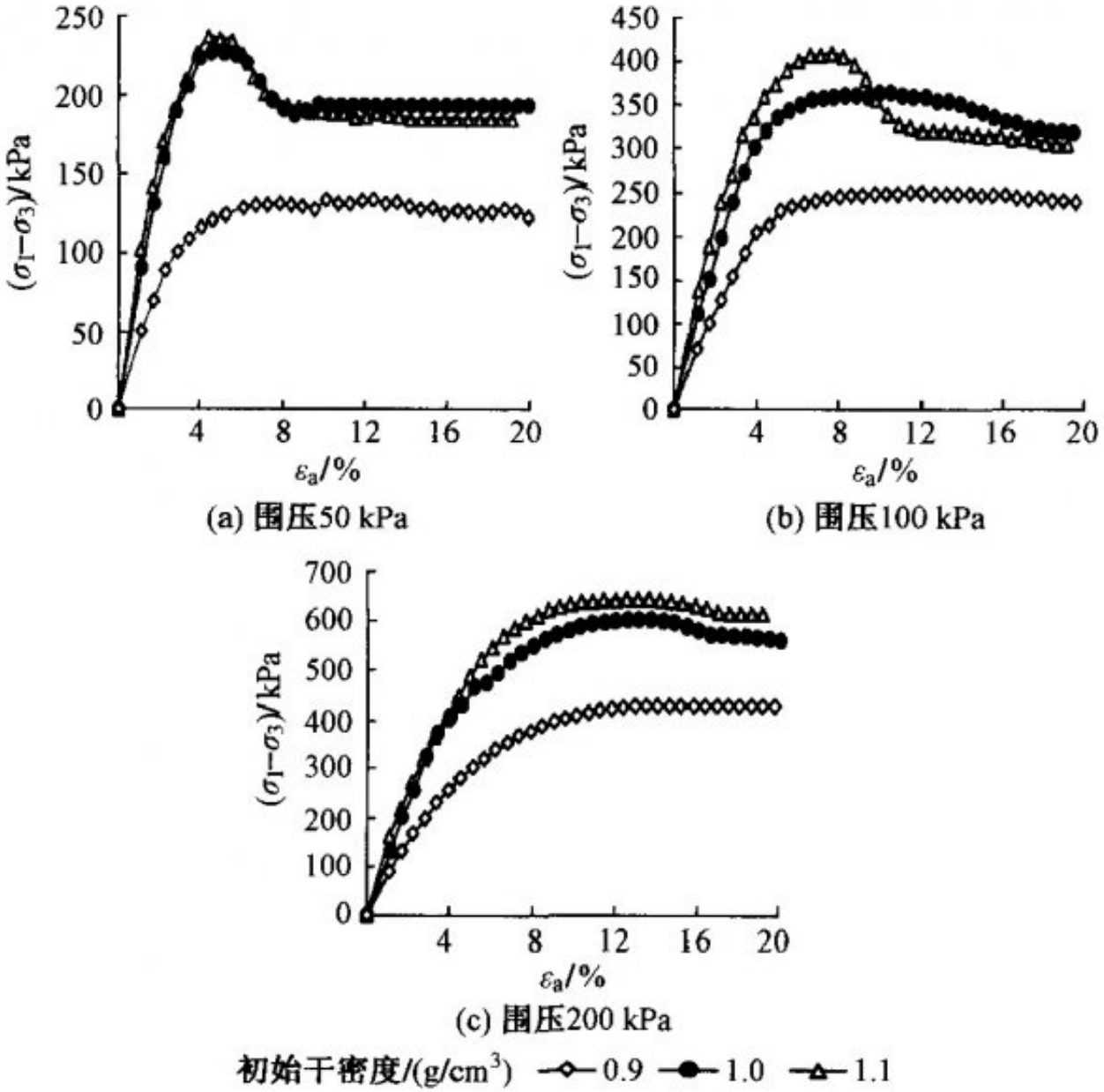

图 2　炉渣的应力-应变曲线

2.2峰值强度

不同围岩下炉渣的峰值强度(σ1-σ3)max随干密度ρd变化曲线见图3。可见：随着干密度的增加，峰值强度也随之增大，但其增长幅度明显减小。在低围压下峰值强度相对较小，且其增长幅度明显比高围压时低。如围压200kPa时干密度由0.9g／cm^{3}增加到1.0g／cm^3，峰值强度增加了176kPa，而围压50kPa时仅增加了76kPa。这主要是因为相同围压下干密度越大颗粒之间孔隙越小，排列越紧密，嵌入咬合作用越明显，在剪切变形过程中能承受较大的应力，峰值强度高；初始干密度一定时，围压越大试样压缩变形越大，相对密实度提高导致强度明显增大。因此，炉渣的峰值强度不仅与围压有关，还与干密度紧密相关。

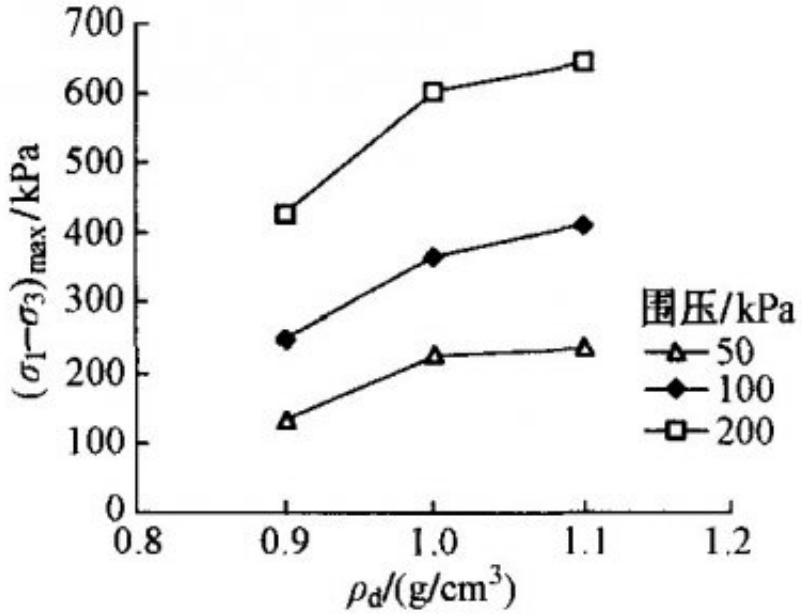

图 3　不同围岩下炉渣的峰值强度随干密度变化曲线

2.3初始弹性模量

不同围压下炉渣的初始弹性模量E1随干密度ρd变化曲线见图4。可见：初始弹性模量随着干密度的增大而增大，如围压50kPa、干密度由0.9g／cm^{3}增至1.0g／cm^3
时，初始弹性模量从62kPa增至114kPa，增幅84%。同时，围压越大初始弹性模量亦越大，但其影响远小于干密度，如干密度为0.9g／cm^3
，围压从50kPa提高到100kPa时，初始弹性模量从62kPa提高到74kPa，增幅仅19%。这主要是因为干密度越大颗粒排列越紧密，剪切过程中竖向能承受较大荷载，而围压对于初始弹性模量的作用未充分发挥出来，干密度起主要作用。在相同荷载作用下初始弹性模量越大变形越小，因此采用炉渣填筑路基时可以提高干密度，增大初始弹性模量，从而减小路基变形。

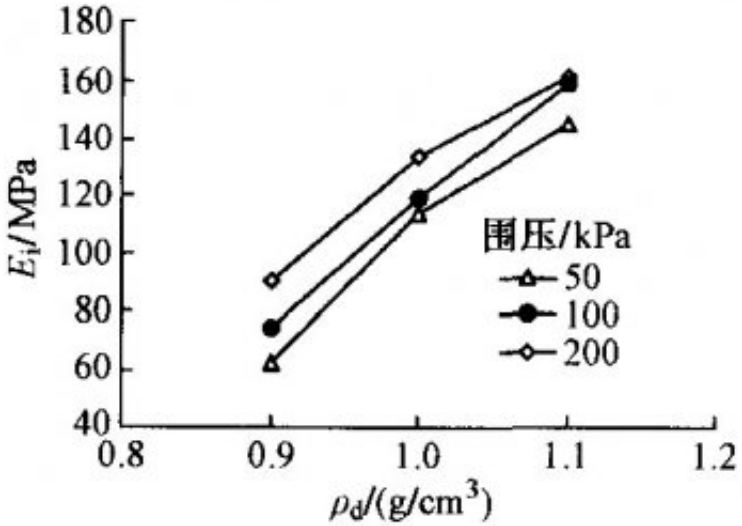

图 4　不同围压下炉渣的初始弹性模量随干密度变化曲线

2.4抗剪强度

根据摩尔-库仑定律可以得到抗剪强度表达式。

根据摩尔-库仑定律可以得到抗剪强度表达式。

$$\frac{\sigma_1-\sigma_3}{2}=\frac{\sigma_1+\sigma_3}{2}\sin\phi+c\cdot\cos\phi$$

式中：c 为黏聚力；ϕ 为内摩擦角。

若纵坐标 $t=(\sigma_1-\sigma_3)/2$，横坐标 $s=(\sigma_1+\sigma_3)/2$，对不同围压下求得的 σ_1，σ_3 进行拟合，则拟合直线的斜率为 $\sin\phi$，与纵坐标的截距为 $c\cdot\cos\phi$。

干密度为0.9g／cm ^{3}
时炉渣的抗剪强度可由图5确定。同样方法可求得其他2种干密度下炉渣的抗剪强度，结果见表2。可见：随着干密度的增加，黏聚力和内摩擦角均增大。这是因为炉渣干密度越大孔隙比越小，固体颗粒之间的胶结咬合作用越强，致使黏聚力和内摩擦角提高。

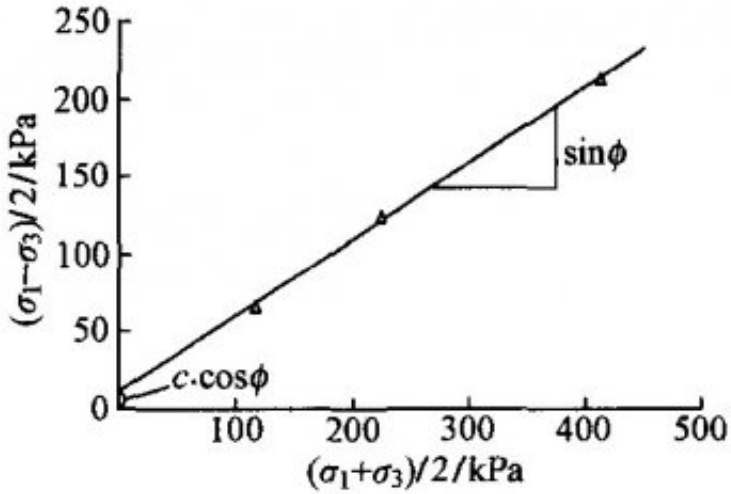

图 5　干密度 0.9 g/cm^3 时炉渣的抗剪强度确定

表 2　不同干密度下炉渣的抗剪强度

干密度/(g/cm^3)	抗剪强度表达式	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
0.9	$t=0.4913s+11.299$	12.97	29.43
1.0	$t=0.5543s+24.147$	29.01	33.66
1.1	$t=0.5728s+25.089$	30.61	34.95

3结论

本文对不同干密度的炉渣进行了三轴固结排水试验，得到如下结论：

1)生活垃圾炉渣的力学特性不仅与其应力状态有关，还与干密度密切相关。

2)松散炉渣应力-应变曲线呈现硬化特性，紧密炉渣应力-应变曲线软化特征明显。

3)初始弹性模量随着干密度的提高而增大，用炉渣路基填筑时可以适当提高干密度以减小变形。

4)随着干密度的增大，炉渣的黏聚力和内摩擦角也有所提高，但变化幅度较小。

参 考 文 献

[1]XIE R F,XU Y F,HUANG M,et al.Assessment of Municipal Solid Waste Incineration Bottom Ash as a Potential Road Material[J].Road Materials and Pavement Design,2017,18(4):992-998.

[2]LE N H,ABRIAK N E,BINETRUY C,et al.Mechanical Behavior of Municipal Solid Waste Incinerator Bottom Ash:Results from Triaxial Tests[J].Waste Management,2017,65:37-46.

[3]冯兴波,徐永福.城市垃圾炉渣试样的无侧限抗压强度试验研究[J].中外公路,2017,37(3):192-195.

[4]徐永福.生活垃圾焚烧炉渣在饱和状态下的强度特性[J].工程地质学报,2017,25(2):277-283.

[5]宋丹青,宋宏全,项国圣,等.含水率对生活垃圾炉渣强度特性的影响[J].湖南大学学报(自然科学版),2017,44(1):150-156.

[6]张远博,冯兴波,徐永福.垃圾炉渣力学性质的颗粒流模拟[J].科学技术与工程,2017,17(19):72-77.

[7]姜景山,程展林,左永振,等.干密度对粗料力学特性的影响[J].岩土力学,2018,39(2):1-9.

原文地址：http://www.china-nengyuan.com/tech/177208.html