

江油电厂粉煤灰的物理力学性质试验研究

王 伟, 田北平, 魏水平

(四川理工学院建筑工程学院, 四川 自贡 643000)

摘 要: 文章讨论了某电厂粉煤灰的基本物理、力学性质, 测定了粉煤灰沉积分布规律、比重、液塑限、击实特性、压缩特性和渗透特性。结果表明: 粉煤灰具有质轻、压缩性低、强度高、渗透性好和粉煤灰的压实干密度对含水量不是很敏感等特点。

关键词: 粉煤灰; 物理特性; 干密度

中图分类号: TU 528

文献标识码: A

粉煤灰是火力发电厂排放的固体废弃物, 也是一定细度的煤粉在锅炉中燃烧后由除尘器收集到的粉状物质。它是一种散粒状物质, 有其特殊的物理和化学性质^[1]。目前, 我国粉煤灰累计堆存量达 8 亿吨, 年排放量约有 1.6 亿吨, 是世界最大的排灰国^[2]。我国一直非常重视粉煤灰的开发利用。自 20 世纪 50 年代三门峡大坝工程开始使用粉煤灰以来, 国家投入了大量的人力、物力, 对粉煤灰的性能及其利用进行科学实验与技术开发, 将粉煤灰的应用范围扩展到工业、农业和建筑业等多个领域, 取得了巨大的社会效益和经济效益^[3]。

在工程中使用粉煤灰作为建筑材料时, 必须了解其物理力学特性。本文结合江油电厂贮灰场利用粉煤灰建造子坝工程需要, 对粉煤灰的基本物理力学特性进行了试验, 得出粉煤灰的基本物理力学参数指标, 为粉煤灰的工程应用提供了有益的参考^[4]。

1 粉煤灰的物理特性

1.1 粉煤灰的化学成分

粉煤灰中的主要化学成分为硅、铝和铁的氧化物, 其次为钙、镁、硫以及未燃烧的碳。钾、钠的含量都较低。在这些成分中钙常与硅、铝相结合而发生凝聚作用, 提高粉煤灰的强度和压缩性。未燃烧的碳会提高粉煤灰的最优含水量和降低最大干容重, 并减弱凝硬作用。各电厂主要化学成分见表 1。

表 1 粉煤灰的化学成分和物理性质

电厂名称	灰样类别	SO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	F ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	颗粒比重
北京	水灰	41.5	32.1	12.4	7.1	2.40
高井	干灰	48.7	36.5	7.0	3.2	2.11
河北	水灰	55.2	20.4	10.9	6.0	2.32
下花园						
天生港	—	50.1	29.2	6.3	3.7	2.11
四川江油	—	61.94	22.6	4.06	3.87	2.05
美国内凡乔	—	48.7	29.3	3.6	7.8	—

江油发电厂粉煤灰中 SO₂ 含量较其它电厂的含量偏高, 由于 SO₂、Al₂O₃ 通常以偏高岭土和高岭土矿物形式存在, 细颗粒本身为蜂窝结构, 从而使粉煤灰具有较高的持水性。另外灰渣的主要化学成分与膨胀土的主要化学成分相似, 使粉煤灰具有较大的膨胀性, 当土样饱和后, 要发生体积膨胀。

1.2 沉积规律

湿法贮灰的灰场沉积滩面上灰的颗粒分布规律一般与灰浆冲填流量、浓度、比重和颗粒组成等因素有关, 并且在很大程度上与冲填筑坝工艺有关。粉煤灰的沉积分布规律为: 离排灰口愈近, 沉积的颗粒愈粗; 离排灰口愈远, 灰渣愈细, 颗粒愈均匀。在滩面上还有明显的沉积层理。

1.3 颗粒级配

对江油电厂 4 组灰样分别采用比重计法和筛分法联合测定, 进行颗粒分析。综合成果级配曲线如图 1 所示, 4 组库灰样颗粒大小组成级配曲线的综合成果见表 2。

4组库灰样的颗粒大小综合成果表明,砂粒(2 mm - 0.075 mm)占 62.1%,粉粒(0.075 mm - 0.005 mm)占 33.3%,粘粒(≤ 0.005 mm)占 1.8%,土的不均匀系数 C_u 为 9.2 曲率系数 C_c 为 1.22。按《99规程》^[5] 定名为粉土质砂(SM)。

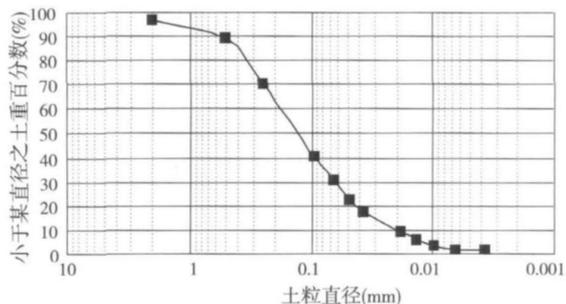


图 1 粉煤灰级配曲线

表 2 江油电厂粉煤灰土粒大小组成综合成果

土样	砂粒 (%)	粉粒 (%)	粘粒 (%)	C_u	C_c	分类定名
1号	64.8	31.0	2.0	8.6	1.11	SM
2号	63.3	31.9	1.6	10.0	1.43	SM
3号	57.6	37.9	2.1	8.4	1.03	SM
4号	62.5	32.4	1.6	9.9	1.30	SM
平均	62.1	33.3	1.8	9.2	1.22	SM

江油发电厂库灰样的颗粒大小组成与其它发电厂粉煤灰相比较见表 3。

表 3 各电厂粉煤灰颗粒大小组成比较

电厂	砂粒 (%)	粉粒 (%)	粘粒 (%)	分类定名
昆明电厂	66.0	30.0	3.5	粉土质砂(SM)
重庆电厂	51.5	44.7	3.8	含砂的高液限粉土(MH _s)
白马电厂	96.0	3.2	0.8	粉土质砂(SM)
豆坝电厂	75.0	24.0	1.0	含砂的中液限粉土(MI _s)
清镇电厂	42.8	54.1	3.1	含砂的高液限粉土(MH _s)
攀钢电厂	45.7	51.3	3.0	含砂的高液限粉土(MH _s)
江油电厂	72.9	22.9	2.0	粉土质砂(SM)

从表 3 可以看出,江油发电厂粉煤灰属偏粗类,比省内外其它发电厂(除白马电厂和豆坝电厂)粉煤灰的砂粒含量高,与豆坝电厂粉煤灰的颗粒大小组成接近。

1.4 比重、相对密度及液、塑限

1.4.1 比重

土粒的比重是土粒在温度 100℃ - 105℃下,烘至恒温时的质量与同体积 4℃时纯水质量的比值。根据土工试验规程,土的比重测试方法有比重瓶法、浮称法和虹吸法。本文采用比重瓶法,将土样在砂浴上煮沸一段时间,平行四组(每组 5 个样)测定后取其平均值。4 组粉煤灰土粒比重 G 分别为 2.051、2.044、2.050 和 2.045,取其平均值,得粉煤灰比重为 2.05。根据常规,砂土平均比重为 2.65 轻亚粘土 2.70 亚粘土 2.71,粘

土 2.74。可以看出,粉煤灰比重较小,说明粉煤灰质轻。这是由于粉煤灰颗粒内呈蜂窝结构。同时,粉煤灰中含有残煤(比重 1.3)也是粉煤灰比重较小的一个因素。残煤的含量越少,粉煤灰比重越大。

灰粒比重一般介于 2.1 - 2.5 之间,随着 F_eO_3 含量的增加而增加。江油发电厂粉煤灰的土粒比重为 2.05,较其它发电厂粉煤灰的土粒比重值偏低较多。其它发电厂粉煤灰的土粒比重值为,昆明电厂 2.34 重庆电厂 2.47,白马电厂 2.33 豆坝电厂 2.74 清镇电厂 2.35。

1.4.2 相对密度

用漏斗法和振打法分别求取灰样的最小和最大干容重。取代表性烘干灰样约 1.5 kg 碾散并拌和均匀,然后称取 700 g 缓慢均匀分布地落入量筒中,用砂面拂平器拂平后读数计算最大孔隙比。再取代表性土样 4 kg 碾散并拌和均匀,分层倒入容器,用振动叉敲打容器两侧,同时用击锤锤击砂层,直至砂样体积不变。然后称重,计算最小孔隙比。结果见表 4。

表 4 密度试验成果表

比重 G	最大干容重 KN/m^3	最小干容重 KN/m^3	最大孔隙比 e_{max}	最小孔隙比 e_{min}	相对密度 %
2.05	10.3	7.1	1.231	0.652	39.1

相对密度 D_r 计算公式为: $D_r = (e_{max} - e_0) / (e_{max} - e_{min})$, 其中, e_0 为天然孔隙比或填土的相应孔隙比, e_{min} 为最小孔隙比; e_{max} 为最大孔隙比。

1.4.3 液、塑限

粉煤灰基本属于无粘性土,其液、塑限不易正确测定,更不能由此来粗估它的力学性质。因此一般较少进行这种试验。不过从液、塑限都比较大,而塑性指数却很小的特点来看可以间接说明灰粒本身孔隙中储存着不起增塑作用的水分。从另一个方面证实了电子显微镜所显示的灰粒多孔特性。

2 粉煤灰的力学性质

2.1 击实特性

击实试验是测定土的干密度和含水量的关系,从而确定最大干密度和相应的最优含水量。结合现场的碾压功能,室内采用重型标准击实,确定压实状态下粉煤灰的相应最大干密度及最优含水率。击实仪筒径 150 mm,高 120 mm,落锤重 4.5 kg 落距 45 cm,土样分三层击实,每层 43 击,单位体积击实功 2 740 kJ/m³。

4 组试样含水率约从 15% - 40% 逐级增大,平行进行 8 个试样不同含水率的击实,以研究确定相同击实功能下,粉煤灰的击实干密度与含水率的关系。重型击实

试验结果即 $\rho_d \sim w$ 关系曲线如图 2- 图 5 所示。

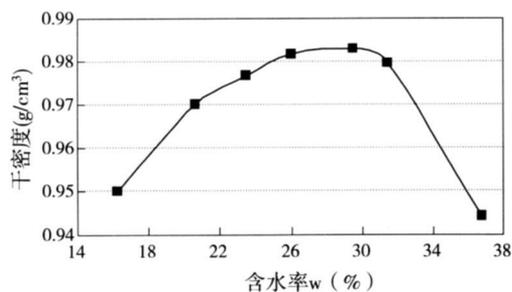


图 2 探坑 1 号粉煤灰 $\rho_d \sim w$ 关系曲线

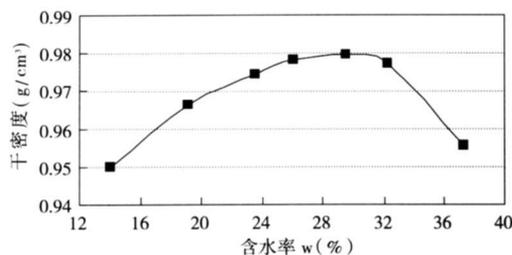


图 3 探坑 2 号粉煤灰 $\rho_d \sim w$ 关系曲线

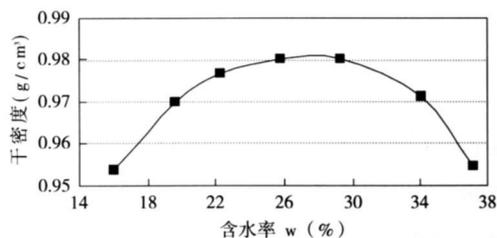


图 4 探坑 3 号粉煤灰 $\rho_d \sim w$ 关系曲线

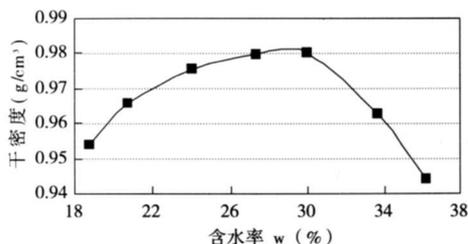


图 5 探坑 4 号粉煤灰 $\rho_d \sim w$ 关系曲线

重型击实结果表明, 4 组粉煤灰的最大干密度 ρ_{dmax} 分别为 0.983、0.979、0.981 和 0.981, 最优含水率 w_p 分别为 29.5%、31.0%、28.0% 和 29.4%。平均最大干密度 $\rho_{dmax} = 0.98 \text{ g/cm}^3$, 最优含水率 $w_p = 30.0\%$ 。

考虑到现场施工碾压与室内击实条件的差异, 压实系数取为 0.97, 同时为便于比较, 另定压实系数分别为 0.95、0.92, 即筑坝灰的试样控制条件如下:

筑坝灰一: 干密度 $\rho_d = 0.95 \text{ g/cm}^3$, 含水率 $w = 30.0\%$ 。

筑坝灰二: 干密度 $\rho_d = 0.93 \text{ g/cm}^3$, 含水率 $w = 30.0\%$ 。

筑坝灰三: 干密度 $\rho_d = 0.90 \text{ g/cm}^3$, 含水率 $w = 30.0\%$ 。

粉煤灰的击实特性与粘性土不同, 具有典型的非粘性土特性在含水量 27% - 32% 范围内可获得理想的压实密度, 表明粉煤灰击实密度对含水量不是很敏感。确定最优含水量为 $w_p = 30.0\%$, 最大干密度为 $\rho_{dmax} = 0.98 \text{ g/cm}^3$ 。考虑现场机械与室内击实条件的差异, 压实系数取为 0.97。

2.2 压缩特性

土的压缩变形与其他材料如钢铁、混凝土和砖石等相比, 要复杂得多^[6]。采用单向固结仪进行非饱和及饱和状态下库灰的压缩试验, 最大压力加至 400 kPa 加压荷载为 50 kPa、100 kPa、200 kPa、300 kPa 和 400 kPa 每级荷载施加 12 小时后加下一级荷载。

筑坝灰在非饱和及饱和状态下的压缩试验结果详见表 5。压缩结果表明: 筑坝灰一非饱和状态下压缩系数 $a_{1-2} = 0.11 \text{ MPa}^{-1}$ 、压缩模量 $E_{s1-2} = 19.62 \text{ MPa}$ 饱和状态下 $a_{1-2} = 0.14 \text{ MPa}^{-1}$ 、 $E_{s1-2} = 15.41 \text{ MPa}$ 属中等压缩性土; 筑坝灰二非饱和状态下 $a_{1-2} = 0.13 \text{ MPa}^{-1}$ 、 $E_{s1-2} = 16.89 \text{ MPa}$ 饱和状态下 $a_{1-2} = 0.16 \text{ MPa}^{-1}$ 、 $E_{s1-2} = 14.05 \text{ MPa}$ 属中等压缩性土; 筑坝灰三非饱和状态下 $a_{1-2} = 0.15 \text{ MPa}^{-1}$ 、 $E_{s1-2} = 15.33 \text{ MPa}$ 饱和状态下 $a_{1-2} = 0.17 \text{ MPa}^{-1}$ 、 $E_{s1-2} = 13.40 \text{ MPa}$ 属中等压缩性土。以上判别以压缩系数 a_{1-2} 为依据。

2.3 渗透特性

粉煤灰的干密度不同, 渗透系数有细微变化。做了 3 种不同干密度的渗透试验, 分别为 $\rho_d = 0.95 \text{ g/cm}^3$ 、 $\rho_d = 0.93 \text{ g/cm}^3$ 、 $\rho_d = 0.90 \text{ g/cm}^3$, 结果见表 6。从试验结果可以看出: 粉煤灰的干密度越小, 渗透系数越大, 临界坡降越小。

粉煤灰为细粒土, 故其渗透破坏形式主要为流土, 故临界坡降 i_{cr} , 即

$$i_{cr} = \frac{G_s - 1}{1 + e} = \frac{\gamma'}{\gamma_w}$$

式中: G_s 为土粒比重, γ' 为土体有效重 $\times 10^{-4}$ 度, e 为土的孔隙比, γ_w 为水的重度。

3 结束语

电厂粉煤灰属粉土质砂, 多孔, 质轻, SO_2 、 Al_2O_3 的含量较高, 具有较高的持水性。粉煤灰比重小, 自然沉积的干容重低。

粉煤灰具有典型的非粘性土的击实特性, 对含水率不敏感, 在含水率 27% - 30% 的范围内可获得理想的干

表 5 库灰压缩试验结果

灰样	压力	压缩模量 E_{s1-2} (MPa)		压缩系数 a (MPa ⁻¹)		备注
		非饱和	饱和	非饱和	饱和	
筑坝灰一	0-50	5.14	4.69	0.42	0.46	$\rho_d = 0.95g/cm^3$ $w = 30\%$ $e_0 = 1.158$
	50-100	15.41	8.99	0.14	0.24	
	100-200	19.62	15.41	0.11	0.14	
	200-300	23.98	20.62	0.09	0.10	
	300-400	31.98	28.98	0.07	0.07	
筑坝灰二	0-50	4.3	4.25	0.51	0.52	$\rho_d = 0.93g/cm^3$ $w = 30\%$ $e_0 = 1.204$
	50-100	12.8	10.19	0.17	0.22	
	100-200	16.89	14.05	0.13	0.16	
	200-300	21.15	18.55	0.10	0.12	
	300-400	28.75	23.75	0.08	0.09	
筑坝灰三	0-50	4.07	3.80	0.56	0.60	$\rho_d = 0.90g/cm^3$ $w = 30\%$ $e_0 = 1.278$
	50-100	11.39	11.99	0.20	0.19	
	100-200	15.33	13.40	0.15	0.17	
	200-300	18.98	17.52	0.12	0.13	
	300-400	25.48	22.78	0.09	0.10	

表 6 粉煤灰渗透试验结果

干密度 (g/cm^3)	渗透系数 k (cm/s)	临界坡降 i_{cr}
0.95	2.00×10^{-4}	0.49
0.93	2.51×10^{-4}	0.48
0.90	3.25×10^{-4}	0.46

密度,自然沉积的粉煤灰属中压缩性土。随干密度的变化压缩参数有一定的改变。

粉煤灰的渗透系数较大,不低于 10^{-4} cm/s 渗透系数于干容重近似成反线性关系,渗透破坏形式属流土破坏。

参考文献:

[1] 刘兴德,牛福生,倪文.粉煤灰的资源化利用现状与研究进展[J].建材技术与应用,2005,26(1):

12-14.

[2] 郭陶明.粉煤灰在建筑材料领用的应用分析[J].中国建材科技,2007,16(5):14-17.
 [3] 马悦红.粉煤灰特性及综合利用[J].西北电力技术,2004,32(3):45-48
 [4] 李自立,宋日英.粉煤灰物理力学特性试验研究[J].山西建筑,2010,36(20):45-48
 [5] GB/T50123-1999,土工试验规程[S].
 [6] Gilbert B Myrvoid W. Maximizing spanning stresses in almost complete graphs[J]. Networks 1997, 30: 23-30
 [7] 王钟琦.岩土工程测试技术[M].北京:中国建筑工业出版社,1986

Research of Basic Physical and Mechanics Properties of Fly-ash

WANG Wei TIAN Beiping WEI Shuiping

(School of Architecture Engineering Sichuan University of Science & Engineering Zigong 643000, China)

Abstract The basic physical and mechanics properties of fly-ash, such as liquid-plastics limits, compaction, compressibility, permeability properties, lateral pressure coefficient at rest were discussed. The results show that fly-ash is of low specific gravity, low compressibility, high strength and high permeability etc. Its compacted dry density is non-sensitive to moisture content.

Key words fly-ash; mechanics properties; dry density