

土力学试验指导书

张吾渝 主 编

马艳霞 蒋宁山 常立君 李积珍 副主编



中国建材工业出版社

土力学试验指导书

张吾渝 主编

马艳霞 蒋宁山 常立君 李积珍 副主编

中国建材工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

土力学试验指导书/张吾渝主编. —北京: 中国
建材工业出版社, 2016. 9

ISBN 978-7-5160-1335-9

I. ①土… II. ①张… III. ①土工试验 IV.
①TU41

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 319068 号

土力学试验指导书

张吾渝 主编

马艳霞 蒋宁山 常立君 李积珍 副主编

出版发行: **中国建材工业出版社**

地 址: 北京市海淀区三里河路 1 号

邮 编: 100044

经 销: 全国各地新华书店

印 刷: 北京鑫正大印刷有限公司

开 本: 787mm×1092mm 1/16

印 张: 6.25

字 数: 142 千字

版 次: 2016 年 9 月第 1 版

印 次: 2016 年 9 月第 1 次

定 价: 25.00 元

本社网址: www.jccbs.com 微信公众号: zgjcgycbs

本书如出现印装质量问题, 由我社市场营销部负责调换。联系电话: (010) 88386906

前 言

本书依据中华人民共和国住房和城乡建设部颁布的《土工试验方法标准》(GB/T 50123)、《建筑地基基础设计规范》(GB50007)、《湿陷性黄土地区建筑规范》(GB50025)等编写而成。

本书分为三部分,第1部分为基本试验,内容包括颗粒大小分析试验(筛析法、密度计法)、相对密度试验(比重瓶法)、含水率试验(酒精燃烧法、烘干法)、密度试验(环刀法)、界限含水率试验(液、塑限联合测定法、锥式液限仪法及滚搓法)、击实试验(轻型击实试验)、渗透试验(常水头渗透试验、变水头渗透试验)、压缩试验及直接剪切试验(快剪试验),共9个试验;第2部分为综合性试验,内容包括三轴剪切试验、固结试验及黄土湿陷试验(黄土室内浸水试验);第3部分为设计性试验,本部分试验为研究生选做试验,试验内容包括固结试验、应力路径试验、非饱和土强度特性试验及动荷载作用下黄土的动强度参数测定等,研究生可结合自己参与的课题选做其中的部分试验。试验所用试验仪器主要为英国GDS标准应力路径试验系统、TFB-1非饱和土应力应变控制式三轴仪、SLB-1型应力应变控制式三轴剪切渗透仪及动三轴试验系统(DYNTTS),本部分主要介绍了仪器的基本操作方法。

本书由张吾渝主编,马艳霞、蒋宁山、常立君、李积珍副主编,李辉参与编写了部分内容,硕士研究生罗传庆、武文举、冯永珍进行校对和插图工作,特在此表示感谢!

书中不妥之处在所难免,恳请广大读者批评、指正。

编者

二〇一六年八月

目 录

第 1 部分	基本试验	1
第 1 章	颗粒大小分析试验	3
1-1	概述	3
1-2	筛析法	3
1-3	密度计法	6
第 2 章	相对密度试验	12
2-1	概述	12
2-2	比重瓶法	12
第 3 章	含水率试验	15
3-1	概述	15
3-2	酒精燃烧法	15
3-3	烘干法	16
第 4 章	密度试验	18
4-1	概述	18
4-2	环刀法	18
第 5 章	界限含水率试验	21
5-1	概述	21
5-2	液、塑限联合测定法	21
5-3	锥式液限仪法及滚搓法	26
第 6 章	击实试验	29
6-1	概述	29
6-2	轻型击实试验	29
第 7 章	渗透试验	33
7-1	概述	33
7-2	常水头渗透试验	33
7-3	变水头渗透试验	37
第 8 章	压缩试验	41
8-1	概述	41
8-2	单向压缩试验	42

第 9 章	直接剪切试验	47
9-1	概述	47
9-2	快剪试验	47
第 2 部分	综合性试验	51
第 1 章	三轴剪切试验	53
1-1	概述	53
1-2	固结不排水三轴剪切试验	53
第 2 章	固结试验	64
2-1	概述	64
2-2	标准固结试验	64
第 3 章	黄土湿陷试验	69
3-1	概述	69
3-2	黄土室内浸水试验	69
第 3 部分	设计性试验	77
附录 1	TFB-1 非饱和土应力应变控制式三轴仪操作指南	81
附录 2	SLB-1 型应力应变控制式三轴剪切渗透仪操作指南	88
	土力学试验安全须知	94

第 1 部分

基 本 试 验

第 1 章 颗粒大小分析试验

1-1 概 述

【试验目的】

本试验的目的是测定土中各粒组的相对含量及组成情况，绘制颗粒级配曲线，以明确颗粒大小分布情况，供判别土的种类、工程性质的优劣及选料之用。

颗粒级配曲线是以粒径的对数为横坐标，以小于某粒径的土重占总土重的百分数为纵坐标的关系曲线。由于土粒粒径相差常在百倍、千倍以上，且细小颗粒对土的工程性质影响较大，所以宜采用对数坐标表示。

【试验方法】

颗粒分析测试方法主要采用以下两种，筛析法与沉降分析法。筛析法：适用于粒径大于 0.075mm 的粗粒土；沉降分析法适用于粒径小于 0.075mm 的细粒土，包括密度计法和移管法等。

如果拟分析的土中粗、细颗粒兼有，且含量都超过 10%，则需要联合使用这两种方法。

1-2 筛 析 法

【试验原理】

筛析法是将粒径 $0.075\text{mm} < d \leq 60\text{mm}$ ，风干、分散的代表性土样通过一套孔径不同的标准筛（例如 20mm、2mm、0.5mm、0.25mm、0.1mm、0.075mm），称出留在各个筛子上的土重，即可求得各个粒组的相对含量，绘制颗粒级配曲线。

【仪器设备】

1. 粗筛：圆孔，孔径为 60mm、40mm、20mm、10mm、5mm、2mm。
2. 细筛：孔径为 2.0mm、1.0mm、0.5mm、0.25mm、0.1mm、0.075mm。
3. 天平：称量 1000g，感量 0.1g；称量 200g，感量 0.01g。
4. 台秤：称量 5000g，感量 1g。
5. 振筛机：筛析过程中应能上下震动。

6. 其它：烘箱、量筒、研钵（附带橡皮头研杆）、搅棒、瓷盒等。

【取样标准】

土样为风干松散土，筛析法取样质量应符合表 1-1-1 的规定。

表 1-1-1 取样质量

粒径尺寸 (mm)	取样数量 (g)
<2	100~300
<10	300~900
<20	900~2000
<40	2000~4000
≥40	4000 以上

【无黏性土的操作步骤】

1. 按表 1-1-1 规定称取试样质量，精确至 0.1g，当试样质量多于 500g 时应精确至 1g。
2. 将试样过 2mm 筛，分别称出筛上和筛下的土样质量。
3. 取 2mm 筛上试样倒入依次叠好的粗筛，2mm 筛下试样倒入依次叠好的细筛中筛析（可在振筛机上振摇 10~15min）。2mm 筛上土或筛下土占总土质量不足 10% 者，可以省略粗筛或细筛筛析。
4. 按由上而下的顺序将各筛取下，称各级筛上及底盘内试样的质量，精确至 0.1g。各筛中试样质量的总和与试样总质量的差值，不得大于试样总质量的 1%。

【含黏土颗粒砂性土的操作步骤】

1. 按表 1-1-1 规定称取试样质量，置于盛有清水的瓷盒中充分搅拌，使试样的粗细颗粒分离。
2. 将试样悬液过 2mm 的筛，取筛上试样烘干称重，精确至 0.1g，并按无黏土的操作方法进行粗筛分析。
3. 用带橡皮头的研杆研磨 2mm 筛下的悬液，过 0.075mm 的筛，并将筛上试样烘干称重，精确至 0.1g，并按无黏性土的操作方法进行细筛分析。
4. 当粒径小于 0.075mm 的试样质量大于试样总质量的 10% 时，应按沉降分析法测定小于 0.075mm 的颗粒组成。

【试验结果整理及分析】

1. 按试验表格（表 1-1-2）的要求记录有关数据。
2. 按下式计算筛析法小于某粒径的试样质量占试样总质量的百分比 X ：

$$X = \frac{m_A}{m} \times 100\% \tag{1-1-1}$$

式中 m_A ——小于某粒径的试样质量 (g)；

m ——筛析时的试样总质量 (g)。

3. 以粒径的对数为横坐标，以小于某粒径的土质量占总土质量的百分数为纵坐标，绘制颗粒级配曲线于图 1-1-1 中，并按式 (1-1-2)、式 (1-1-3) 计算不均匀系数 C_u 和曲率系数 C_c 。

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} \times 100\% \tag{1-1-2}$$

$$C_c = \frac{(d_{30})^2}{d_{60} \cdot d_{10}} \times 100\% \tag{1-1-3}$$

式中 d_{60} 、 d_{10} 、 d_{30} ——分别为颗粒级配曲线上纵坐标为 60%、10%、30% 所对应的粒径。

表 1-1-2 颗粒分析试验表 (筛析法)

试验小组：_____

试验人员：_____

试验日期：_____

成 绩：_____

筛号		风干试样总质量 (g)	
2mm 筛上土质量 (g)		2mm 筛下土质量 (g)	
筛孔孔径 (mm)	累积留筛土质量 (g)	小于该孔径土质量 (g)	小于该孔径的土 重百分数 (%)

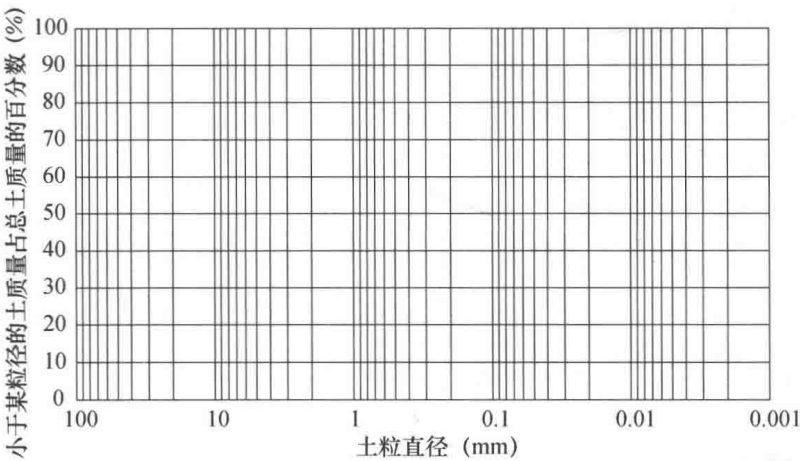


图 1-1-1 颗粒级配曲线

1-3 密度计法

【试验原理】

密度计法是将粒径 $d < 0.075\text{mm}$ 的土加水搅拌，煮沸冷却后加分散剂搅拌均匀，搅拌停止后土粒开始下沉，此时悬液中不同大小的土粒下沉速度快慢不一，悬液浓度也开始变化，一方面可根据 Stokes 定律计算悬液中不同大小土粒的直径，再利用特制的密度计，测得不同时刻悬液浓度的变化，换算成小于某一粒径的土占总土质量的百分数 X ，即可绘制颗粒级配曲线。

土颗粒的粒径 d

根据 Stoke 定律，下沉力 F_s 和液体黏滞阻力 F_r 相等：

$$F_s = \frac{\pi d^3}{6} (\rho_s - \rho_w) g \quad (1-1-4)$$

$$F_r = \varphi \frac{\pi d^2}{4} v^2 \rho_w \quad (1-1-5)$$

式中 φ ——阻力系数，由试验公式 $\varphi = \frac{12}{R_e}$ 求得， $R_e = \frac{v}{\eta} d \rho_w$

$$\text{则：} \quad F_r = 3\pi d \eta v \quad (1-1-6)$$

$$\text{由于土粒等速下沉，其速度} \quad v = \frac{L}{t} \quad (1-1-7)$$

由 $F_r = F_s$ 可得：

$$v = \frac{\rho_s - \rho_w}{18\eta} d^2 \quad (1-1-8)$$

$$d = \sqrt{\frac{18\eta}{(\rho_s - \rho_w) g} \times \frac{L}{t}} \quad (1-1-9)$$

式中 d ——试样颗粒粒径 (mm)；

η ——纯水的动力黏滞系数 ($10^{-6} \text{kPa} \cdot \text{s}$)；

ρ_s ——土粒相对密度；

ρ_w ——水温为 T 时水的比重；

L ——某一时间内的土粒沉降距离 (cm)；

t ——沉降时间 (s)。

粒径含量百分比 X

小于某粒径的试样质量占试样总质量的百分比，按下列公式计算：

$$\text{甲种密度计：} \quad X = \frac{100}{m_d} C_G (R_m + T) \quad (1-1-10)$$

式中 T ——温度校正值，查表 1-1-3；

C_G ——土粒相对密度校正系数，查表 1-1-4；

R_m ——密度计读数；

m_d ——试验用干土质量 (g)。

【仪器设备】

- 1. 密度计。
- 2. 量筒：容积为 1000mL，内径为 60mm，高度为 350±10mm，刻度为 0~1000mL。
- 3. 秒表、时钟。
- 4. 天平：称量 200g，感量 0.01 g。
- 5. 搅拌器：系带有多孔圆盘的搅拌棒，圆盘轮径 50mm，孔径 3mm。
- 6. 温度计：刻度为 0~50℃，精度为 0.5℃。
- 7. 煮沸设备：电热器、三角烧瓶及回流冷凝管。
- 8. 细筛、烘箱、玻璃棒等。

【密度计的校正】

实验室采用的密度计有甲、乙两种。甲种密度计读数表示 1000mL 悬液中所含的土粒质量的克数，乙种密度计的读数表示悬液比重。两种密度计通常均是在温度为 20℃ 时刻划的，而且土粒相对密度以 2.65 为基准。在使用密度计时，由于使用条件的变化会产生系统误差，需要进行以下校正。

有效沉降距离校正

$$L=L_1+L_0-L_2 \tag{1-1-11}$$

式中 L_1 ——密度计最底刻度线至液面的距离 (cm)；
 L_0 ——密度计浮泡中心至最底刻度线的距离 (9.0cm)；
 L_2 ——密度计的浮泡浸入装有悬液的量筒时，液面的升高值，可根据密度计的浮泡体积 ($V_b = 61.5\text{cm}^2$) 和量筒标尺刻度的全高，由实验室提供的“液面升高距离计算图”查取 (cm)。

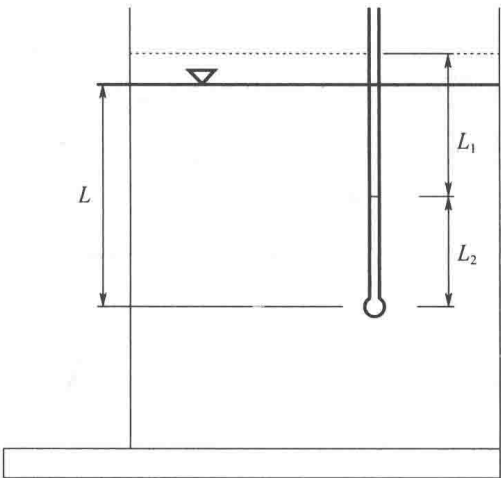


图 1-1-2 密度计法的原理

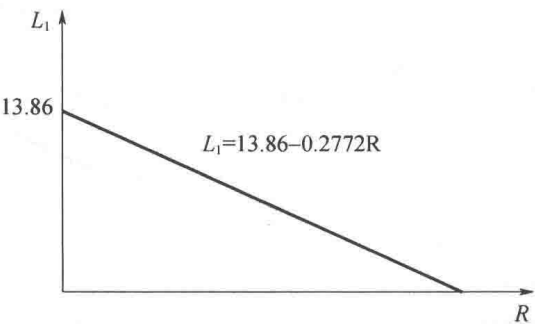


图 1-1-3 读数 R 与底刻度线距离 L_1 的对照图

温度校正

土壤密度计是 20℃时刻制的，当悬液温度不等于 20℃时，水的密度及密度计浮泡体积发生变化，应进行校正。校正值查表 1-1-3。

表 1-1-3 温度校正值 T

悬液温度 (℃)	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
校正值 T	-2.0	-1.9	-1.8	-1.6	-1.4	-1.2	-1.0	-0.8	-0.5	-0.3	0.0
悬液温度 (℃)	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	—
校正值 T	0.3	0.6	0.9	1.3	1.7	2.1	2.5	2.9	3.3	3.7	—

土粒相对密度校正

土壤密度计刻度以土粒相对密度 2.65 为准。当试样的土粒相对密度不等于 2.65 时，应进行土粒相对密度校正。校正值查表 1-1-4。

表 1-1-4 土粒相对密度校正值 C_G

土粒相对密度	2.60	2.62	2.64	2.66	2.68	2.70	2.72	2.74	2.76	2.78	2.80
校正值	1.012	1.007	1.002	0.998	0.993	0.989	0.985	0.981	0.977	0.973	0.969

或根据下式计算 C_G

$$C_G = \frac{\rho_s}{\rho_s - \rho_{w20}} \times \frac{2.65 - \rho_{w20}}{2.65}$$

(1-1-12)

式中 $\rho_s=2.72\text{g/cm}^3$;
 ρ_{w20} ——水温为 20℃时纯水的密度。

【试验步骤】

1. 称取粒径 $d<0.075\text{mm}$ 的风干试样 30g 倒入锥形瓶，注入纯水 200mL，浸泡过夜。
2. 过夜后的悬液在煮沸设备上煮沸，时间为 40min。
3. 悬液冷却后倒入量筒，加入 4% 浓度的分散剂六偏磷酸钠 10mL，再注入纯水至 1000mL。
4. 将搅拌器插入量筒上下搅拌 1min。取出搅拌器立即开动秒表，将密度计放入悬液中，测记 $t=1、3、5、15、30、60\text{min}$ 的读数 R_t 。密度计读数均以弯液面上缘为准，甲种密度计精确至 0.5 度。
5. 每次读数后，应取出密度计放入盛有纯水的量筒中，并应测定相应的悬液温度，精确至 0.5℃。每次读数均应提前 15s 将密度计小心放入悬液中的适当深度。

【试验结果整理及分析】

- 1. 按试验表格（表 1-1-5）要求记录数据，填写有关内容。
- 2. 用公式（1-1-9）式计算粒径 d （mm）。

其中定义 $K=\sqrt{\frac{1800\eta}{(d_s-d_{wT})\rho_w g}}$ 为粒径计算系数，可根据悬液温度和土粒相对密度 d_s ，由表（1-1-5）查取 $L-t$ 时间内，土粒的有效沉降距离，由式（1-1-11）计算。

- 3. 按公式（1-1-10）计算小于某粒径 d 的土粒百分含量 X 。
- 4. 绘制颗粒级配曲线于图（1-1-4）中，并计算土的不均匀系数 C_u 和曲率系数 C_c 。

表 1-1-5 粒径计算系数 $K=\sqrt{\frac{1800\eta}{(d_s-d_{wT})\rho_w g}}$ 值表

温度 (℃)	土粒相密度								
	2.45	2.50	2.55	2.60	2.65	2.70	2.75	2.80	2.85
5	0.1385	0.1360	0.1339	0.1318	0.1298	0.1279	0.1261	0.1243	0.1226
6	0.1365	0.1342	0.1320	0.1299	0.1280	0.1261	0.1243	0.1225	0.1208
7	0.1344	0.1321	0.1300	0.1280	0.1260	0.1241	0.1224	0.1206	0.1189
8	0.1324	0.1302	0.1281	0.1260	0.1241	0.1223	0.1205	0.1188	0.1182
9	0.1305	0.1283	0.1262	0.1242	0.1224	0.1205	0.1187	0.1171	0.1164
10	0.1288	0.1267	0.1247	0.1227	0.1208	0.1189	0.1173	0.1156	0.1141
11	0.1270	0.1249	0.1229	0.1209	0.1190	0.1173	0.1156	0.1140	0.1124
12	0.1253	0.1232	0.1212	0.1193	0.1175	0.1157	0.1140	0.1124	0.1109
13	0.1253	0.1214	0.1195	0.1175	0.1158	0.1141	0.1124	0.1109	0.1094
14	0.1221	0.1200	0.1180	0.1162	0.1149	0.1127	0.1111	0.1095	0.1080
15	0.1205	0.1184	0.1165	0.1148	0.1130	0.1113	0.1096	0.1081	0.1067
16	0.1189	0.1169	0.1150	0.1132	0.1115	0.1098	0.1083	0.1067	0.1053
17	0.1173	0.1154	0.1135	0.1118	0.1100	0.1085	0.1069	0.1047	0.1039
18	0.1159	0.1140	0.1121	0.1103	0.1086	0.1071	0.1055	0.1040	0.1026
19	0.1145	0.1125	0.1108	0.1090	0.1073	0.1058	0.1031	0.1028	0.1014
20	0.1130	0.1111	0.1093	0.1075	0.1059	0.1043	0.1029	0.1014	0.1000
21	0.1118	0.1099	0.1081	0.1064	0.1043	0.1033	0.1018	0.1003	0.0990
22	0.1103	0.1085	0.1067	0.1050	0.1035	0.1019	0.1004	0.0990	0.09767
23	0.1091	0.1072	0.1055	0.1038	0.1023	0.1007	0.09930	0.09793	0.09659
24	0.1078	0.1061	0.1044	0.1028	0.1012	0.09970	0.09823	0.09600	0.09555
25	0.1065	0.1047	0.1031	0.1014	0.09990	0.09838	0.09701	0.09566	0.09434
26	0.1054	0.1035	0.1019	0.1003	0.09879	0.09731	0.09592	0.09455	0.09327
27	0.1041	0.1024	0.1007	0.09915	0.09767	0.09623	0.09482	0.09349	0.09225
28	0.1032	0.1014	0.09975	0.09818	0.09670	0.09529	0.09391	0.09257	0.09132
29	0.1019	0.1002	0.09859	0.09706	0.09555	0.09413	0.09279	0.09144	0.09028
30	0.1008	0.09910	0.09752	0.09597	0.09450	0.09311	0.09050	0.09050	0.08927

表 1-1-6 颗粒分析试验表（密度计法）

试验小组： _____
试验日期： _____

试验人员： _____
成 绩： _____

下沉时间 t (min)	悬液温度 T (°C)	密度计 读数 R	温度校 正值 T	读数与底 刻度线距 离 L_1	液面升高 值 L_2	土粒落距 L (cm)	粒径计算 系数 K	粒径 d (mm)	相对密 度校正 值 C_G	小于 d 的 土质量百分 数 (%)
1										
3										
5										
15										
30										
60										

$L_0=9.0\text{cm}$

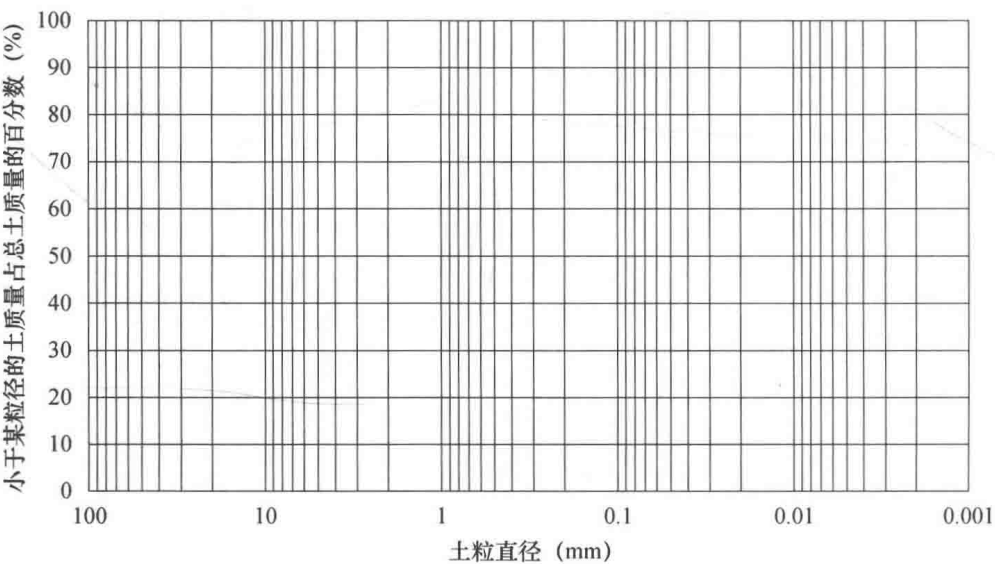


图 1-1-4 颗粒级配曲线

【试验说明】

- 1. 整个试验过程中，注意不要使土粒散失，不要使悬液溢出。
- 2. 测定悬液温度和密度计读数时，应尽量减少对悬液的扰动，密度计应保持在量筒中心位置。
- 3. 当试样中易溶盐含量大于 0.5% 时，应洗盐。

【思考题】

1. 颗粒级配曲线的纵横坐标分别表示什么？为什么采用半对数坐标的形式？
2. 在利用振筛机或手动振筛时，因操作者失误，导致土样振出，有何补救措施？
3. 颗粒级配曲线及指标的用途是什么？
4. 密度计法进行颗粒大小分析试验的适用条件是什么？