

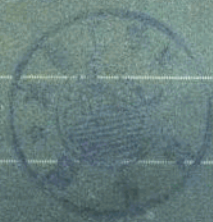
365230

成都工學院圖書館

基本館藏

渗流电拟试验指南

水利水电科学研究所
南京水利科学研究所 編



目 录

第一章 电拟試驗原理	1
第1节 概述	1
第2节 电流現象和渗流現象基本方程的相似性	1
第3节 模拟的相似条件	4
第二章 电拟模型材料	8
第1节 制造模型槽和模型边界輪廓的材料	8
第2节 模型的导电材料	10
第3节 防止模型中有害的电化学現象的措施	15
第三章 电拟試驗仪器及设备	16
第1节 电測装置原理	16
第2节 电学仪表	17
第3节 其他主要设备	31
第四章 二向电拟試驗	36
第1节 概述	36
第2节 二向平面稳定渗流的模型試驗	37
第3节 二向平面不稳定渗流的模型試驗	57
第4节 二向水平面渗流的模型試驗	60
第5节 导电紙电拟模型試驗	67
第五章 三向电拟試驗	70
第1节 概述	70
第2节 模型的設計和制造	70
第3节 試驗步骤	81
第4节 試驗成果整理	82
第5节 某些特殊三向渗流的模型装置和試驗方法	85
第六章 电阻网模拟試驗	88
第1节 概述	88
第2节 电阻网模拟的基本原理	89
第3节 电阻网上的模型边界布置	92

N

第4节	不同土层的电阻网模型布置	96
第5节	网眼大小变化的过渡布置	98
第6节	长方形网眼布置	100
第7节	各向异性土的电阻网模型布置	102
第8节	三向电阻网模型布置	103
第9节	电阻网模型边界条件的树立与测验方法	105
参考文献		108

第一章 电拟試驗原理

第1节 概 述

目前,在試驗室条件下,研究水工建筑物渗流問題的主要方法之一是用电流比拟渗流的模型試驗法或简称电拟試驗法。

用电拟試驗来研究渗流問題的原理是,在多孔介质中服从于达西(Darcy)定律的重力不可压缩流体的稳定流动和导体中电流流动之間是相似的,这种相似表现在这两种物理現象之間的数学相似,即可以用同一形式的拉普拉斯方程表示:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = 0, \quad (1-1)$$

式中 φ ——相当于渗流場中的水头或电流場中的电位①。

这种相似系H.E.儒可夫斯基教授于1889年发现的。H.H.巴甫洛夫斯基于1918年首先根据这种相似,利用水流比拟电流的方法来解决渗流問題。

第2节 电流現象和渗流現象基本方程的相似性

設在电流流动的平面場(图1-1)中和渗流流动的平面場(图1-2)中分別划出微小的流管,并在流管上截取微小段 dl ,則按照欧姆定律可得

$$i = -c \frac{dU}{dl}, \quad (1-2)$$

式中 i ——电流密度;

c ——导电系数;

U ——电位。

● 水流及电流在介质中发生物理現象的空間称渗流場及电流場。

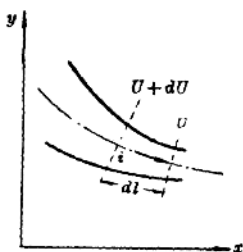


图 1-1

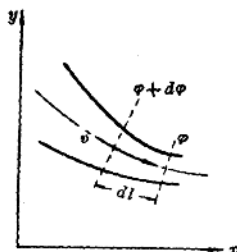


图 1-2

同理按照达西定律，則得，

$$v = \frac{d\varphi}{dl} = -k \frac{dh}{dl}, \quad (1-3)$$

式中 v —— 渗透流速，

φ —— 流速势，

k —— 渗透系数，

h —— 测压水头（或简称水头）。

电流密度向量 i 在空間坐标軸上的三个投影为：

$$i_x = -c \frac{\partial U}{\partial x}, \quad i_y = -c \frac{\partial U}{\partial y},$$

$$i_z = -c \frac{\partial U}{\partial z}. \quad (1-4)$$

按照克希荷夫第一定律，电流的連續方程为：

$$\frac{\partial i_x}{\partial x} + \frac{\partial i_y}{\partial y} + \frac{\partial i_z}{\partial z} = 0, \quad (1-5)$$

将式 (1-4) 代入 (1-5) 則得

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = 0. \quad (1-6)$$

同样渗透流速向量 v 在空間坐标軸上的三个投影为：

$$v_x = \frac{\partial \varphi}{\partial x} = -k \frac{\partial h}{\partial x}, \quad v_y = \frac{\partial \varphi}{\partial y} = -k \frac{\partial h}{\partial y},$$

$$v_z = \frac{\partial \varphi}{\partial z} = -k \frac{\partial h}{\partial z}. \quad (1-7)$$

按照流体运动的連續方程

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0, \quad (1-8)$$

将式(1-7)代入(1-8)則得

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = 0, \quad (1-9)$$

或

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0. \quad (1-10)$$

由式(1-6), (1-9)和(1-10)可以看出电位 U 、流速势 φ 或水头 h 都滿足拉普拉斯方程式, 即都是坐标的調和函数。

因而对于成几何相似的电流場和渗流場, 在保持相似的边界条件下, 当导体的导电性及土的渗透性不变时, 上面所提供的区域坐标(x, y, z)和相应的物理量(U, φ 或 h)之間的关系式的积分将仅相差一个任意常数。

拉普拉斯方程的理論解的結果, 可以用之于任何一种可由該方程表达的物理現象, 不論这个現象是電場中电位的分布(式1-6), 还是渗流場中水头的分布(式1-10), 或者是流速势的分布(式1-9)。求得該方程的解可以用理論的方法也可用試驗的方法。然而仅对很简单的流动情况, 可以用理論方法求得它的理論解, 而对比較复杂的情况, 要求得拉普拉斯方程的积分, 在数学上却有很大的困难, 并且会导致复杂的函数。对于大多数实际的渗流問題, 由于渗流区域形状的复杂性, 求得理論解答是不可能的。在这种情况下如借助于試驗的方法則可求得滿意的解答。

电拟模型的制造是很容易實現的。現有的电学测量仪器使人們可以很精确地确定所测量的电学量, 因此, 通过电拟試驗测量相应的電場, 可以成功地代替稳定渗流的研究。亦即用电拟試驗方法借助于方程(1-6)的解找出方程(1-9)或(1-10)的解。

第3节 模拟的相似条件

上面已经讲过拉普拉斯位势方程，当边界条件已知时，电位 U 、流速势 φ 和水头 h 都与流场中坐标的位置有关，并为坐标的函数。设函数 $\varphi(x, y, z)$ 已求得，则渗流的图形即可确定。在电拟模型中进行电学测量，可得到一系列电位值相等的点子。通过等电位点作面，即得等位面

$$U(x, y, z) = \text{常数}. \quad (1-11)$$

等位面与电流线正交。这个面相似于渗流场中的等势面

$$\varphi(x, y, z) = \text{常数}, \quad (1-12)$$

或等水头面

$$h(x, y, z) = \text{常数}; \quad (1-13)$$

而电流线则相似于渗流场中的流线。

在平面问题中则由面变成线即：

$$U(x, y) = \text{常数};$$

$$\varphi(x, y) = \text{常数};$$

$$h(x, y) = \text{常数}.$$

等电位线群与电流线束正交所构成的网相似于由等水头线群与渗流线束正交所构成的渗流网，通常简称为流网。

上面曾经指出，方程(1-6)，(1-9)和(1-10)的解，只有当场成几何相似以及边界条件相似时才是相似的。因此，电拟模型和渗流区域的边界条件必须相似。

当具有下述相似条件时，可以在由导电材料制成的电拟模型上研究稳定渗流。

一、电拟模型的外部边界应当与所研究的渗流区域的外部边界几何相似。

二、在所研究的渗流区域及其模型的边界上，对于水头 h 和电位 U 的边界条件必须对应地相似。例如进出渗流的上下游河床面各为等势面或等水头面，即 $\varphi = \text{常数}$ 或 $h = \text{常数}$ 的条件，符合于电流场的相应边界上的电位 $U = \text{常数}$ 。又如渗流区的不透土层

上的 $\frac{\partial \varphi}{\partial n} = 0$, 符合于电场内的相应绝缘面上 $\frac{\partial U}{\partial n} = 0$, 其中 n 分别是不透水面或绝缘面的法线。

三、渗流区域为均质土时, 电拟模型也是均质的。可用具有任意电阻率 ρ 或导电系数 $c = 1/\rho$ 的导电材料做成。

四、当渗流区域由不同渗透系数的土层组成时, 电拟模型将是非均质的。这时模型内部区分不同导电系数材料的内部边界应与渗流区域内部区分不同渗透系数土层的内部边界成几何相似。模型中代表各不同土层所用的导电材料的导电系数与相应土层的渗透系数的比值应当是常数, 亦即应遵守下列等式:

$$\frac{1}{\rho_1 k_1} = \frac{1}{\rho_2 k_2} \cdots \cdots = \frac{1}{\rho_n k_n}, \quad (1-14)$$

式中 $1/\rho_1, 1/\rho_2, \cdots, 1/\rho_n$ ——分别为模型中第 1, 2, $\cdots, n$ 层导电材料的导电系数;

$k_1, k_2, \cdots, k_n$ ——分别为所模拟的渗流区域中相应各土层的渗透系数。

当保持等式 (1-14) 的条件时, 电流密度向量 $\vec{i}_1, \vec{i}_2$ 在区分两不同导电系数层界面上的屈折 (图 1-3) 将与渗透流速向量 $\vec{v}_1, \vec{v}_2$ 在相应的两土层界面上的相应点的屈折相似 (图 1-4)。

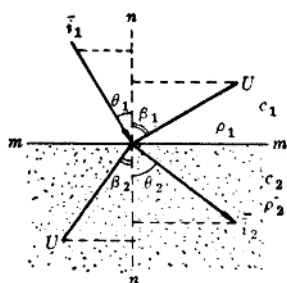


图 1-3

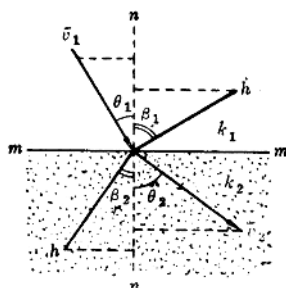


图 1-4

因而，模型中的电流綫和与其相应的渗流区域中的渗流綫所受的屈折一致。如果用 θ_1 和 θ_2 表示向量 $\vec{i}$ 与不同导电系数层次界面上与法綫所成的夹角，則

$$\frac{\operatorname{tg} \theta_1}{\operatorname{tg} \theta_2} = \frac{c_1}{c_2} = \frac{\rho_2}{\rho_1} \quad (1-15 a)$$

在渗流区域内渗透流速向量 $\vec{v}$ 与不同渗透系数土层界面上的法綫所成的夹角 θ_1 、 θ_2 与 k_1 、 k_2 有如下的关系：

$$\frac{\operatorname{tg} \theta_1}{\operatorname{tg} \theta_2} = \frac{k_1}{k_2} \quad (1-15 b)$$

考虑到模型中的等电位綫正交于电流綫，而渗流区域中的等水头綫正交于渗流綫，因此，当流动由一层通过到另一层时，得到模型中的等位綫和渗流区域中的等水头綫的屈折相同。可以分别用下式表示：

$$\frac{\operatorname{tg} \beta_1}{\operatorname{tg} \beta_2} = \frac{c_2}{c_1} = \frac{\rho_1}{\rho_2},$$

及

$$\frac{\operatorname{tg} \beta_1}{\operatorname{tg} \beta_2} = \frac{k_2}{k_1}, \quad (1-15 c)$$

式中 β_1 和 β_2 为在等位綫或等水头綫上所引的切綫和不同层次界面上法綫所成的夹角。

另一方面，由简单的物理学推論可知，在分界面上的电位 U 或水头 h 是連續变化的，但渗透流速势将有驟变，其变化值为 $\frac{\varphi_1}{\varphi_2} = \frac{k_1}{k_2}$ ，故对于不均质情况來說，电流場中的等位綫仅相当于渗流場的等水头綫。

电拟模型中的电流量与渗流場中的渗流量也是相似的。現在假設在某单向流动区域内发生渗流，并設渗流区域起始断面上的测压管水头为 h_1 ，而在末尾断面上的测压管水头为 h_2 。依达西定律，則：

$$Q = kJ\omega = \frac{k(h_1 - h_2)\omega}{l}, \quad (1-16)$$

式中 Q ——渗流量;
 k ——渗透系数;
 ω ——渗流横断面积;
 l ——渗径长度。

又設由导电材料所作的模型与渗流区域成几何相似, 且在模型起始断面上的电位为 U_1 , 而末尾断面上的电位为 U_2 。依照欧姆定律, 則:

$$I = \frac{(U_1 - U_2)F}{\rho L} = \frac{c(U_1 - U_2)F}{L}, \quad (1-17)$$

电流与渗流的相似性

电	流	渗	流
电位 U		测压水头 h (流速势 φ)	
导电系数 $c = 1/\rho$		渗透系数 k	
电流密度 i		渗流速度 v	
欧姆定律:		达西定律:	
$i = -c \frac{dU}{dl}$		$v = -k \frac{dh}{dl}$	
电位的拉普拉斯方程:		水头的拉普拉斯方程:	
$\nabla^2 U = 0$		$\nabla^2 h = 0$	
边界条件		边界条件	
絕緣面		不透水面	
$\frac{\partial U}{\partial n} = 0$		$\frac{\partial h}{\partial n} = 0$	
n ——垂直于面的法綫		n ——垂直于面的法綫	
拉普拉斯方程的积分(电位函数):		拉普拉斯方程的积分(水头函数):	
$U = f(x, y, z)$		$h = f(x, y, z)$	
等电位面		等水头面(等势面)	
$U = \text{常数}$		$h = \text{常数} (\varphi = \text{常数})$	
电流量 I		渗流量 Q	
电流通过的横断面面积 F		渗流通过的横断面面积 ω	
电流綫长度 L		渗径长度 l	
电场强度:		渗透水力坡降:	
$E = \frac{U_1 - U_2}{L}$		$J = \frac{h_1 - h_2}{l}$	

式中 I ——导体中的电流量；

$c = \frac{1}{\rho}$ ——导电系数；

ρ ——电阻率；

F ——导体的横断面积；

L ——导体长度。

根据以上的讨论兹将多孔介质中地下水的稳定流与电拟模型中电流之间的数学与物理相似列成以上的对照表。

第二章 电拟模型材料

第1节 制造模型槽和模型边界轮廓的材料

模型试验槽系用绝缘材料，如胶木板、木材、玻璃等制造。木材外面须加油漆，以防水分浸入发生变形和导电现象。二向模型试验槽底面的玻璃须选用较平整的，以免导电材料有厚薄不均的现象影响试验精度。

模型中相应于渗流区域的不透水边界，须用绝缘材料制造，如胶木板、胶木条、油漆过的木板或木条、玻璃板、玻璃条、石蜡、油灰等，视模型为二向或三向及其大小而选用。

为了防止石蜡冷凝时因收缩而发生裂缝，以致有漏水现象，故须在石蜡中掺入蜂蜡和松香，以减小其收缩性。重量配合比为 2:1:0.1。

油灰系用墙粉和凡士林加热调和而成的可塑体，或用橡皮泥，因其永不硬化，故用后可以回收再用。

对于非均质的模型，为了将不同导电性的导电液隔开，而又不能使电流一并被隔断，则须采用导电隔板，其构造有下列几种形式。

一、点导式隔板 对于二向模型而言，用厚约 3 或 4 毫米、

寬約2.5厘米的塑料板或胶木板钻成許多小孔(孔径約2~3毫米), 然后鑲入小銅釘, 銅釘須較孔径略大, 以便鑲入后能够挤紧而不漏水。銅釘端面須与条面齐平, 如图2-1a所示。

二、綫导式隔板 其制法系于上述塑料板或胶木板上用28号或30号的漆包銅綫繞成綫圈, 然后涂清硝酸纖維漆一层, 使綫圈彼此胶合并胶結于板面上, 然后将兩側面的漆包綫表面上的包漆用砂布擦去, 使銅綫外部裸露, 最后将板底的綫用凿子凿断, 如图2-1b所示。

三、挂鈎式隔板 用上述塑料板或胶木板制好模型內部边界后, 于板上挂許多倒“U”形的銅鈎, 鈎的长度須足以深入隔板兩側的导电材料中, 以連通电路, 如图2-1c所示。

上述三种隔板, 以綫导式最好。因其整个板面基本上都可通电, 电流分布較為均匀, 电位損失較小。

非均质三向模型有时也須采用导电隔板。因三向模型中隔板表面上各点的电位分布不同, 因此, 只能采用点导式隔板, 其构造也与上述二向模型用的点导式隔板相同, 不过尺寸較大。

模型中用以控制已知电位的汇流板, 例如代表上下游河床等水头面的等电位面, 通常采用0.2~1.0毫米厚的紫銅板或黃銅板制造。

在二向模型中, 控制渗流出逸段上的已知电位, 最好采用电阻絲板, 其构造系用28号或30号左右的漆包电阻絲(即冷阻絲)繞于厚約4毫米, 寬約2.5厘米的胶木板或塑料板上, 然后涂清硝酸纖維漆一层, 使漆包电阻絲胶結于板面上, 最后将板的一側

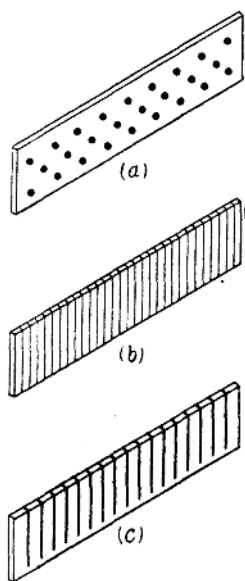


图 2-1

(或兩側)電阻絲表面上的包漆用砂布擦去,使電阻絲的外部表面裸露。其外形與圖2-1b相似,所不同的是其底部的電阻絲不要切斷。應該特別指出,這種電阻絲板的板子尺寸必須嚴格一致,並且要繞得特別均勻,這樣才能保證電流通過時電位沿着板子成直線變化。

製造模型時,為了膠結模型各部件之間以及各部件與模型槽之間的接觸縫,以防漏水,通常採用前面所述的蜡和油灰。但是這種材料常易失效,致使試驗返工,影響進度。為了解決這一問題,曾找到一種膠結性能較好的膠,其組成如下:

原料名稱	配合比 (以重量%計)	用途
環氧樹脂	51.70	膠合劑
二次乙基三胺	4.14	固結劑
苯二甲酸二丁酯	5.17	增塑劑
400號水泥(越細越好)	38.99	填料

這種膠塗抹膠合後,放置10小時左右即可凝固,模型即可使用。拆卸模型時,用烙鐵熨膠合處,使膠合物熔化。粘在玻璃和銅片上的膠合物,先用小刀鏟下,再用乙醇擦洗。

這種膠合物的優點為使用方便,易于掌握,其不透水性、不導電性、對酸鹼溶液的抗蝕性及強度等都合乎要求。其缺點為除了水泥外,其他材料較貴,而且它不易保存,故只能於使用時臨時配制,並且用後不能回收再用。

第2節 模型的導電材料

導電材料應當滿足下列條件:

一、允許在足夠大的範圍內用人工方法改變材料的導電系數 c ,在一般情況下,導電系數 c 應當可以在 $1 \sim 10^{-6}$ 歐姆 $^{-1}$ 厘米 $^{-1}$ 範圍內人工地變化。

二、在實用上,導電材料的導電系數,在進行試驗所必需的時間內,不允許發生變化。

三、导电材料与供给模型电流的汇流板之间以及在非均质模型中各个区域之间的界面上须有良好的接触。

四、导电材料应当容许在模型的各个边界段上，按直线或者是按在真实情况下有效地以某种规律造成电位分布。

五、所采用的导电材料最好是不仅可以用来简便地制造平面的（二向的）模型，而且也可以用来简便地制造空间的（三向的）模型。

常用的导电材料有导电液、润湿的粉状混合物（分散体）、胶状体和凝胶、胶质石墨、导电纸等等。可是这些材料并不能满足上述全部条件，并且各有其优缺点。

1. 导电液 由于导电液价格便宜制备简单，用改变浓度的方法可以使其导电系数在很大的范围内变化（ $c = 0.1 \sim 10^{-5}$ 欧姆 $^{-1}$ 厘米 $^{-1}$ ），在制造模型和测量等位线方面都很方便，对于二向模型和三向模型均适用，并能保证各渗流区质地均匀，因而被广泛

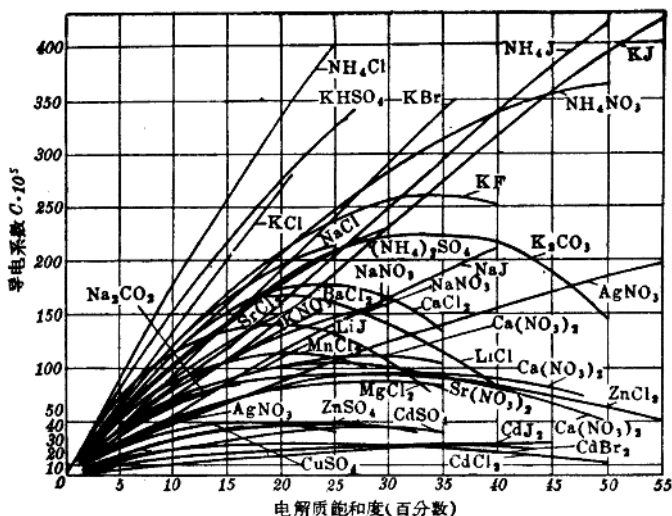


图 2-2

地应用。

可用以进行电拟試驗的导电液很多，应用最广的为硫酸銅溶液和氯化鈉溶液。图 2-2 为各种导电液的饱和度与导电系数的关系曲綫。图 2-3 为硫酸銅溶液的浓度与导电系数的关系曲綫。

普通的飲水亦可用作模型的导电液。对于均质的三向模型，因其容积一般都相当大，采用飲水既方便又經濟。但須指出，飲水由于水源不同，其中所含电解质的质与量亦不同。为了減輕电化現象，应选用导电系数較小的水。为此，在使用之前最好将水中所溶的电解质分析清楚，以便必要时加以处理（例如軟化），使合乎試驗要求。

此外，甘油亦可用作导电液，于甘油中加电解质，如食盐等，可以改变其导电性。将甘油与其他导电液配合使用，可以大大提高模型的导电系数比，它比单纯用水溶液制造大倍数比值模型較为稳定。但是，在試驗过程中甘油有吸收水蒸汽的缺点，故試驗应迅速进行，尽量爭取在短時間內結束測量工作。

电流通过导电液时总是会引起溶液发生电化学变化的。当导电液发生分解反应时，汇流板的金属被溶解或被氧化。所有这些有害的效应，将使导电液的导电性不断改变，电阻重新分配，因而也引起电路中各个段落上的电压重新分配。这样就使电場情况破坏，使未知值的測量工作变得困难，并在研究中带来了誤差。試驗操作中最常遇到的異常現象如汇流板上的电位发生变化，等位綫发生不合理的分布等，都是这些有害的电化学現象的反映。

电化学現象的有害程度决定于导电液的純度和化学成分、汇流板的材料、模型輪廓的形状和质量、安装和进行試驗的条件、电流的种类、任务的特性和仪器的綫路等。至于防止有害电化現象的措施，将于本章第 3 节中叙述。

2. 胶态导电材料 最普遍用以制造电拟模型的胶体有动物胶和由海草中所得的胶。由海草石花菜中提炼而得的洋菜，即为后者之一。动物胶制备的方法，系将胶融于热水中，成均一体后倒入模型中冷凝而成。胶与水的重量比为 $1:3 \sim 1:4$ 。洋菜胶的制备

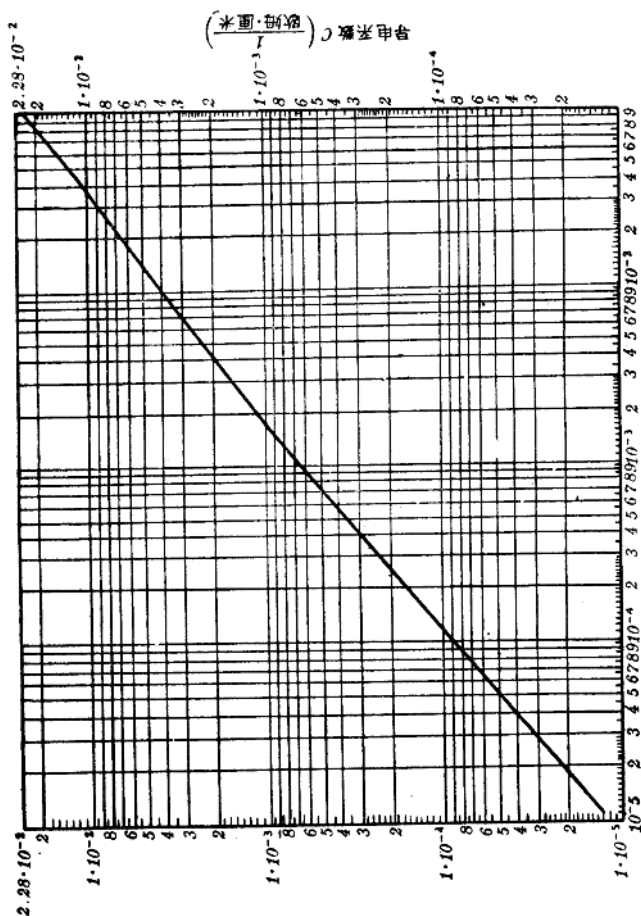


图 2-3

方法，系将洋菜放入水中，加热煮沸融化成均一体后倒入模型中冷凝而成。洋菜与水的重量比为 $1:50 \sim 1:100$ 。改变胶体导电系数的方法，是在融化的胶水中加入硫酸铜、食盐、纯碱或其他电解质，也可加入各种附加剂，如烟灰、石墨粉等。胶体导电性的变化范围可达2000倍。

胶体模型中各种不同导电性的胶体之间有良好的电气接触（因为不象导电液模型中在不同导电液之间有导电隔板），对于二向模型和三向模型均可适用。但胶体导电材料有下列几种缺点，因此尚未能广泛地被采用。

（1）当凝胶收缩时和形成收缩缝时，模型导电性将发生变化。在汇流板与胶体的接触面发生裂缝时，其影响表现得最明显。

（2）由于不同导电性的胶体系直接相接触，因而在靠近接触面的部分可溶性物质将发生扩散现象，使研究成果的精度降低。当模型中有薄胶层或狭窄胶层时所受影响将更为显著。

（3）不论动物胶或洋菜胶皆比导电液的价格贵很多，用以制造三向模型时，尤其感到很经济。

在导电液模型中所发生的有害作用和现象也大多存在于胶体模型中。因此，也应采取相同的防止措施。

3. 可塑的分散体导电材料 用以制造电拟模型的较普遍的可塑导电材料，系于石墨粉中加入滑石粉或其他附加剂，如大理石粗粒粉和石英砂粗粒粉，然后再加水拌匀成为可塑的分散混合体。改变导电系数的方法，系采取混合体的不同混合比。拌合分散体导电材料所需的水量与其组成及孔隙率有关。为了消除试验过程中模型各个区域内水分发生变化的可能性，所加的水量必须使分散体导电材料具有必要的可塑性，同时其湿度又相当稳定。

这种导电材料的优点是，不同导电性区域之间系直接接触，不须用导电隔板。其缺点是，制造模型复杂，导电系数随压实程度、含水量和时间而变化，影响试验精度，因而阻碍了此种材料的广泛应用。