

水泥混凝土的结构与性能

[苏] A·E·谢依金, IO·B·契霍夫斯基,

M·И·勃鲁谢尔 著

胡春芝 袁孝敏 高学善 译

陈振基 何尔章 校

中国建筑工程出版社

本书是集体编写的。第一章、第三章第四节、第七章和第八章第一节的执笔人为A·E·谢依金与M·И·勃鲁谢尔；第二章第一节为Ю·B·契霍夫斯基和M·И·勃鲁谢尔；第二章第二节和第九章为Ю·B·契霍夫斯基；第三章第一、二、三、五节和第六章为A·E·谢依金；第四章为A·E·谢依金和A·A·谢依金；第五章为A·A·谢依金；第八章第二节为A·M·波德瓦尔内。

本书介绍水泥混凝土的主要物理力学性能，强度、变形性和抗冻性等。叙述水泥成分、硬化条件、水灰比与其它工艺因素，对水泥石和混凝土结构及性能影响的基本规律。混凝土是以水泥石为胶凝基材的多组分材料，水泥石作为毛细孔-多孔体其性能由它的结构特性决定。提出了在荷载作用下或经受多次冻融循环时，有关混凝土破坏机理的新假说，以及有关徐变的物理本质等。

本书供科研人员与工程技术工作者参考。

本书有表91张，插图166幅，参考文献262篇。

**СТРУКТУРА И СВОЙСТВА
ЦЕМЕНТНЫХ БЕТОНОВ**

А.Е.ШЕЙКИН

Ю.В.ЧЕХОВСКИЙ

М.И.БРУССЕР

МОСКВА СТРОЙИЗДАТ 1979

* * *

水泥混凝土的结构与性能

胡春芝 袁孝敏 高学善 译

陈振基 何尔章 校

*

中国建筑工业出版社出版(北京西郊百万庄)

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

铜川市印刷厂印刷

*

开本：850×1168毫米 1/32 印张：11¹/₂；字数：299千字

1984年5月第一版 1984年5月第一次印刷

印数：1—13,200册 定价：1.75元

统一书号：15040·4582

前 言

提高基本建设的投资效率，保证基本建设速度进一步增长，并高质量完成投资总额，有赖于提高施工质量，特别是提高钢筋混凝土这种主要建筑材料的耐久性。根据1976~1980年间苏联国民经济发展的主要方针，基本建设投资总额约为六千三百亿卢布，比上一个五年计划增长24~26%。

提高钢筋混凝土结构的耐久性，应该在设计和制造阶段予以保证，方法是正确选用所有的原材料，选择配合比要考察到建筑物和结构物的使用条件。这个任务的解决现在已有可能，因为混凝土这种毛细孔-多孔结构材料的科研成就，揭示了混凝土的结构与其强度、变形性及在各种介质作用下的稳定性之间的规律性联系。

决定其耐久性的混凝土结构，首先由混凝土配合比、原材料（水泥、掺合料和骨料）性能，制作混凝土拌合物的工艺手段及硬化条件决定。

在献给读者的这本专著中，作者试图建立混凝土主要性能与其结构之间的关系，论证它们的密切联系，和以影响混凝土结构的途径来调节其性能的可能性。

书中一至三章，叙述混凝土为毛细孔-多孔结构材料的近代概念，叙述测量与评定混凝土孔结构的方法以及决定孔结构的因素。四、五章从统一的物理概念出发，试图说明水泥混凝土强度与变形性的物理理论基础。六至九章论述混凝土结构与混凝土其它建筑技术性能的关系。

作者希望书中叙述的内容会对从事建筑业工作的广大工程技术人员有所帮助，以便进一步提高混凝土和钢筋混凝土的质量与耐久性。

目 录

前言

第一章 混凝土作为多组分的毛细孔-多孔材料的

一般概念	1
------------	---

第二章 测量水泥石和混凝土孔结构的方法10

第一节 测量水泥石和混凝土孔隙率的方法	10
---------------------------	----

第二节 测量水泥石比表面积、水结合形式与 孔外形的方法	40
--------------------------------------	----

第三章 水泥石的结构与性能54

第一节 水泥硬化过程的近代概念	54
-----------------------	----

第二节 水泥石的结构	67
------------------	----

第三节 水泥石的孔结构	73
-------------------	----

第四节 各种工艺因素对水泥石和水泥 砂浆孔结构的影响	77
-------------------------------------	----

第五节 水泥石强度及其决定因素	89
-----------------------	----

第四章 混凝土的强度及其决定因素122

第一节 混凝土的强度理论	122
--------------------	-----

第二节 混凝土在短时间加荷下的破坏机理	128
---------------------------	-----

第三节 水泥石和混凝土在缓慢加荷条件下 轴心受压的破坏机理	158
--	-----

第四节 混凝土在轴心受压时的原生变形	165
--------------------------	-----

第五节 决定混凝土单轴抗压强度的各种因素	177
----------------------------	-----

第六节 水灰比定律 $R_{c(n)} = f\left(\frac{B}{U}\right)$ 的物理含义和 它的适用范围	182
---	-----

第五章 混凝土的徐变186

第一节 混凝土徐变的物理本质假说简述	186
--------------------------	-----

第二节 混凝土徐变的物理本质(研究工作中的假说)	198
--------------------------------	-----

第三节 各种因素对混凝土极限徐变度 C_{∞} 和函数式	
-------------------------------------	--

$C_{r,6t}=f(t)$ 的影响	204
第六章 混凝土的收缩变形	234
第一节 准静态干燥条件下水泥石的失水动力学	234
第二节 水泥石的典型收缩曲线	236
第三节 干燥过程中水泥石体积缩小的原因	240
第四节 决定水泥石收缩变形值的因素	241
第五节 准静态干燥条件下水泥石显现的和不 显现的自由收缩变形	243
第六节 混凝土显现的和不显现的自由收缩变形	216
第七章 混凝土的容重和孔隙率	254
第一节 混凝土的容重	254
第二节 混凝土的孔隙率	257
第八章 混凝土的抗冻性	261
第一节 水泥石结构与混凝土抗冻性的关系	261
第二节 混凝土受冻破坏的现象学观点	271
第九章 混凝土的渗透性	292
第一节 混凝土渗透性的基本概念	292
第二节 测量混凝土渗透性的方法	309
第三节 混凝土渗透性与各种因素的关系	320
参考文献	340

第一章 混凝土作为多组分的毛细孔-多孔材料的一般概念

混凝土结构的含义，一般是广泛的综合概念，其中包括从组成混凝土组分的原子-分子结构到混凝土宏观结构在内概念很不相同的材料结构。混凝土多组分材料由水泥砂浆和粗骨料组成。显然，几乎所有构造材料对混凝土的材料性能都有一定影响。但是为了实际应用，对于结构对材料性能形成的作用，不仅应对这种影响作出定性的评价，而且要有定量的评价，然而评价又总是与能否测定这些结构的相应特征参数的现实可能性有关。

不同作者^[11、50、51、152]提出的大量混凝土结构分类中，最普遍的是把结构分为三种基本类型^[38、209]：微观结构即水泥石结构；亚微观结构，即混凝土中的水泥砂浆结构；宏观结构，即两组分体系（砂浆和粗骨料）。

上述每一种结构都有各自与形成条件有关的特性。例如，水泥石微观结构可能近似地具有下列结构组成：晶体骨架、托勃莫来石凝胶^①、未水化完的水泥颗粒和孔隙。影响水泥石微观结构形成的最重要的工艺因素是水泥的化学-矿物成分、粉磨细度、水灰比和硬化条件。由这些因素的相互关系决定，生成具有完全确定的物理力学性能和物理化学特性的水泥石微观结构。

对于水泥砂浆亚微观结构，除上述决定水泥石微观结构的因素外，砂浆配合比、砂的颗粒级配与矿物组成、砂粒形状、颗粒表面特性及砂中的杂质含量是最重要的控制因素。水泥砂浆的性

① 现称CSH凝胶。详见泰勒教授于1980年来华所作的《水泥化学讲座》。

——校者注

能由水泥和砂的性能决定。在大多数情况下，构成砂浆组分的单一材料性能的作用不能迭加，即砂浆各组分某些性能的变化不会引起作为整体材料的砂浆相应性能成比例变化。例如，增加水泥石与砂的粘结强度，虽然在一定条件下能提高砂浆强度，但增长率不成比例。与此不同的是，增加水泥石的內聚强度，对砂浆强度的影响可以迭加。水泥砂浆亚微观结构也可以看作是堆聚结构，水泥石是其中的基材。很明显，对于类似的两组分体系，这种模型是最通用的，但这种结构的理论研究还不够，至今实际上还不能用以获得预期性能的材料。

混凝土宏观结构与亚微观结构有许多共同点，因为这时可以把水泥砂浆看作基材，粗骨料分布在砂浆中。对于亚微观和宏观堆聚结构，除基材和骨料（细的与粗的）的本身性能外，骨料的分布也有很大意义。

亚微观结构和宏观结构可按骨料（分别为细、粗骨料）含量分作三类：第一类结构中骨料相互不接触，好象“漂浮”在基材中，即砂浆含量超过骨料间的空间体积。这种情况的特点是骨料性能对混凝土性能影响不大，混凝土性能主要由砂浆性能决定。随着骨料用量的增加，水泥砂浆层厚度变薄，但骨料颗粒尚未相互接触，形成相当紧密的骨架（第二类结构），这种紧密骨架对混凝土性能影响很大，首先影响混凝土强度。

第三类结构中，骨料间的孔隙未被砂浆或水泥石完全填满，形成大孔结构。

除骨料用量外，骨料级配、骨料和基材的强度与变形性之间的关系等，对混凝土类堆聚材料的性能也有影响，后面将详细论述。

混凝土的孔结构参数是混凝土结构最重要的特性之一。这是因为，水泥石、砂浆和混凝土按其本质都属于毛细孔-多孔材料。

众所周知，即使材料的孔体积不大，也会使材料性能急剧变化。例如，蒸养水泥石中的孔体积，平均波动范围为15~50%

(与水灰比、龄期及其它因素有关)。砂浆与混凝土中,颗粒间的全部孔隙被水泥石充填,孔体积当然较小(与这些材料中的水泥石体积大致成比例),但仍然相当大。因此很明显,所有实践中有重要意义的混凝土性能,在一定程度上都与混凝土的孔体积、孔结构特征有关。

文献中对“孔结构”本身的概念,或对孔结构的各项参数,都有不一致的定义,因此必须在此说明我们对这些概念的理解。

材料中所有未被原材料与生成物固相所占据的非密实部分,都称为材料的孔隙。

从这个定义出发,对于一种具体的材料来说,测量时间与采用的外部条件一定时,孔结构参数是个不变值,与测量方法无关,这点很重要。

有些情况下,水泥石的孔结构往往是混凝土孔结构的研究对象。现在已经积累了水泥石孔结构的大量试验资料。但实际应用时常常发生方法上的困难,因为随测量孔结构参数的方法不同,只能测量到材料中孔与毛细孔体积的一部分。

目前,水泥石和混凝土的孔结构参数,没有一个通用的分类法,因此下面采用最常用的分类法。

首先按孔的来源分类。

混凝土中主要孔体积的形成,与残留水量有关,这部分水是为了得到必要的流动性而掺入混凝土拌合物中的。残留水的体积与水灰比、水和水泥的用量、水化程度及其它因素有关。当用水量为 $160\sim 240$ 升/米³,水泥用量 $300\sim 600$ 公斤/米³时,硬化混凝土中的游离水体积平均为混凝土体积的 $5\sim 20\%$ 。水泥石或混凝土中,这些孔形成连通的毛细孔体系,因此通常称它为毛细孔。毛细孔的尺寸为 $0.1\sim 1$ 微米到 $20\sim 50$ 微米,或者更大一些。与水泥凝胶孔不同(详见第二章),凝胶孔具有连续的特征,而毛细孔可以是断续的结构,故毛细孔对降低混凝土渗透性,提高耐久性有良好的影响。

随混凝土硬化条件不同，凝胶孔、收缩^①孔和毛细孔，可以被水或空气充填。

混凝土中气孔的形成（除上述几类孔的脱水作用外），可以由几种原因引起。混凝土拌合物中总是含一定量的空气，这些空气最初吸附在水泥与骨料表面上，搅拌时由于颗粒表面没有完全湿润，空气未被完全排除或者由于掺入了专用的外加剂（引气剂）。这里气孔一般为球状，孔的平均尺寸为25~500微米或稍大一些。气孔体积很少超过混凝土体积的5%。此外，在捣实混凝土拌合物（特别是干硬性的）时，可能另外夹带空气，不均匀地分布于混凝土中，因此这些孔隙可降低材料的均匀性，使材料性能变坏。

各种结构变形过程，可能使混凝土结构松散，生成更多的孔隙，这些孔一般被空气充填（如果不直接与水接触）。

混凝土内部或外表泌水形成的沉降孔，也属于混凝土结构缺陷。

外表泌水时，围绕粗骨料流动的部分拌合水升到上部，形成定向的互相连通的毛细孔体系。其余水积聚在粗骨料下面，使接触区充满水（内部泌水）。

沉降孔的尺寸为50~100微米。已经确定，粗骨料周围的砂浆层越薄，混凝土外表泌水越少，内部泌水越多。根据许多研究人员^[155, 156]的意见，沉降孔是混凝土渗水的主要通道，因为沉降孔与毛细孔不同，沉降孔孔径大于50微米，处于游离状态的水，在重力或微不足计的静水压作用下就可以迁移。因此，沉降孔在混凝土渗透过程中往往起决定性作用，对混凝土及其建筑物的耐久性有很大影响。

① 原文Контракционная Усадка是指与水泥-水系统进行物理化学作用有关的一种收缩(拉力)现象，这种收缩不引起整个体积的明显收缩。根据系统中形成的真空度大小可大致判断收缩过程的发展。· 详见 О.А. Гершберґ著《Технология бетонных и железобетонных изделий》。——校者注

除上述因素外，混凝土在使用期间可能出现其它缺陷。收缩裂缝、温差裂缝及其它裂缝，浸蚀孔及由于介质腐蚀作用出现的缺陷等，都属于这类缺陷。

简要叙述按孔来源分类后，根据我们的看法，必须指出两个重要情况。第一，必须考虑到，水泥石和混凝土的孔结构参数，随龄期不断地变化。举例说，随着水化作用的进行，毛细孔逐渐被新生成物取代，减少毛细孔体积，使凝胶孔体积增加。孔隙的总体积与平均孔径同时都减小。水泥石中也同时进行相反的过程——“老化”过程^[201]，可以使水泥石的大毛细孔相对数量增加；第二，必须考虑混凝土的孔结构虽然在很大程度上由水泥石的孔结构决定，但是有它自己的特点，这对混凝土性能有很大影响。因此很明显，在一切可能的情况下，评定混凝土孔结构必须全面地考虑到大多数情况下不可避免的缺陷，而不要把水泥石和砂浆孔结构的研究结果硬搬到混凝土中来，大多数从事这个问题的研究工作正是这样做的。

按照孔的形状及分布情况，可将水泥石和混凝土中的孔隙和毛细孔分为以下几类^[22, 161]：

1. 按照横截面形状分为：直管形、瓶形、楔形、开缝形和几种形状的组合形；
2. 按照长度扩展性分为：直线形、弯曲形、环形；
3. 按照连续性分为：开口形（形成通道）、封闭型（只一端开放）、假定封闭型（用已知测量孔结构参数的方法测不出来的毛细孔）。

水泥石和混凝土中的孔，按照有效孔半径分类是最重要的分类方法之一。虽然至今还没有按孔径大小划分毛细孔-多孔体孔的通用方法，但还是应该指出，从现代科学水平来看，A·B·雷科夫和M·M·杜宾宁学派^[62, 106]对这个问题的研究是最完善的。根据他们的意见，把微孔势能明显大于重力场势能的孔称为毛细孔。毛细孔中的液面形状由表面张力决定，并由于重力作用而略呈弯曲。毛细孔可分为微毛细孔与大毛细孔。孔与毛细孔凝结现

象^①的关系，是这种划分的主要标准。由于从空气中吸附水蒸汽，毛细孔孔壁覆盖着一层厚度约为0.1微米的水。若毛细孔半径小于该厚度，则因为吸附液态蒸汽，这类毛细孔可能完全被液体充填，与毛细孔是否有底或穿通无关。半径大于0.1微米时，凹液面不闭合，毛细孔凝结现象只能在不穿通的毛细孔中发生。

由此可见，半径小于0.1微米的微毛细孔可以由于吸附周围介质的蒸汽而被充填，壁上生成液膜。而半径大于0.1微米的大毛细孔，只有直接与液体接触时才能被液体填满。此外，大毛细孔的特征是，不仅不吸收湿空气中的水分，其中原有的水反而会进入空气中。因此，混凝土的吸水性及其平衡湿度，首先由混凝土中微毛细孔与大毛细孔的比例决定。毛细孔凝结现象的重要规律性在于，这种现象本质上与毛细孔孔壁的浸润性无关，即憎水性微毛细孔可以吸收空气中的水分，而亲水性大毛细孔会让水进入被水蒸汽饱和的大气中。

毛细孔凹液面上的饱和蒸汽压，低于平液面上的饱和蒸汽压。半径小于0.1微米的微毛细孔中，压力下降很显著，而大毛细孔的压力下降则可以忽略不计。

M·M·杜宾宁在研究吸附剂中的孔时^[63]，查明了孔径为15~20Å的孔类型。这类孔在水泥石中也发现了。吸附势能增加是这些孔的空间被充填的原因。

文献中遇到的各种不同分类名称的孔，列于表1-1中。

对于水泥石与混凝土来说，最好将孔分作三类：微细孔($r < 0.1$ 微米)，大毛细孔 $[(1 \sim 10) > r > 0.1$ 微米]与非毛细孔。有时可进一步将微孔再区分为超微孔($r \leq 50 \text{Å}$)和过渡微孔($50 \text{Å} < r < 0.1$ 微米)。

水泥类材料的孔结构一般有下列主要特征参数：孔体积、孔径大小和比表面积。

① 毛细孔凝结现象系指对平液面不饱和的蒸汽在毛细孔中液化的现象。详见中国建筑工业出版社编《建筑材料辞典》(1981年7月第一版)第594页。——校者注

孔 的 分 类

表 1-1

孔尺寸 (Å)	孔 类 型	分类的作者	孔径测定方法
小于 6	超 微 孔 小 内 孔 晶 间 孔 层 间 孔	布鲁纳尔 ^[221] 米哈依尔 ^[250] 近 藤 ^[261] 弗尔德曼 ^[231]	饱 水 法 饱 水 法 水吸附法 水吸附与氮气吸入法
6~15	微 孔 凝 胶 孔 吸 附 孔 大 内 孔 晶 内 孔	布鲁纳尔 鲍维尔斯 ^[123] 弗尔德曼 米哈依尔 近 藤	电子显微镜 电子显微镜 甲醇吸附法 氮和甲醇吸附法 氮和甲醇吸附法
15~1000	亚 微 孔 凝胶粒间孔	布鲁纳尔 鲍维尔斯 米哈依尔 近 藤	水银压入法
大于1000	大 孔	布鲁纳尔 鲍维尔斯 米哈依尔 弗尔德曼 近 藤	水银压入法

孔体积特征可用积分参数表示：真孔隙率（或总孔隙率）、开口型孔隙率（或显孔隙率）和假定封闭孔隙率。

所谓真孔隙率（总孔隙率），是指温度25°C、剩余压力66.6帕（0.5毫米汞柱）的真空中，干燥材料的孔隙总体积。测量真孔隙率的最简单方法，是理·查德理的计算-试验法，原理是测量干燥材料的容重与比重。计算公式如下：

$$\pi_u = \left(1 - \frac{\rho_0}{\rho}\right) 100\%$$

式中 π_u ——真孔隙率（占试件体积的百分比%）；

ρ_0 ——试件的容重（公斤/米³）；

ρ ——材料的比重（公斤/米³）。

所谓开口型孔隙率（或显孔隙率），是指材料中相互连通并与材料外表面都相连、用已知试验方法能测出来的孔的总体积。这一特征参数与所用测量孔体积的方法及相应制备试件的条件有关，使得用不同方法测出的材料孔结构的研究结果缺乏可比性，这是很大的缺点。因此，提到孔结构的试验数据时，总是必须说明试验所用的测量方法。另一方面，下面介绍的大多数广泛采用的方法，虽然只能得到水泥石和混凝土孔结构的相对值，但所提供的数据是足够的。

所谓假定封闭孔隙率，是真孔隙率与显孔隙率之差，即用已知测量方法测不出来的孔体积。至于孔结构的微分参数，乃是孔径大小和孔按孔径大小分布的特征参数，必须指出，这些参数是相对假定的。这种假定性是因为在测量按孔径大小分布的孔体积的所有方法中，使用的都是简化孔结构模型。圆筒形毛细孔，是水泥石和混凝土最常用的孔模型。因为实际的孔任何时候也不是这种形状，所以按这种模型算得的孔隙率参数，当然只是假定的。

微分参数中，经常采用按孔径大小的孔体积分布函数 $\left[f(r) = \frac{dv}{dr} \right]$ 和不同的假定孔径，如孔的平均半径、有效半径、水力半径、最大半径等等。此外，属于孔的微分参数的还有孔的几何特征，如形状、孔及毛细孔的相互位置、孔的直线性、封闭性、弯曲性、透光性、方向性等。

比表面积的特征取决于所用的测量方法，并没有一个固定的名称，因为即使采用同一种方法（如B.E.T法），也会因吸附质不同而得到完全不同的结果。

上面列举的水泥石和混凝土孔结构参数中，最重要而又最有参考价值的，是真孔隙率、显积分孔隙率和微分孔隙率，因为正是这些参数，不仅对混凝土最重要的物理力学性能影响很大，而且对工艺因素的变化最敏感。有意识地改变这些参数，就能得到

预期性能的材料。

由上面的叙述可以认定，混凝土就其结构而言，是一种复杂成分的毛细孔-多孔材料。混凝土结构对它的全部性能有积极的影响，因此混凝土所有工艺问题的研究，都必须考虑到材料的结构。

第二章 测量水泥石和混凝土 孔结构的方法

第一节 测量水泥石和混凝土孔隙率的方法

这类方法品种繁多，并已广泛用于科学研究和生产实践中。它们基本上是物理和物理化学的分析方法。这些方法可以分作两类：一类方法是根据孔所占有的体积划分孔径大小，另一类方法可以测出总孔隙率值。许多测量总孔隙率的方法，既可用于研究水泥石，也可用于混凝土。但大多数研究微分孔隙率的方法只能适用于水泥石。

一、水银压入法

近二十年来，水银压入法广泛用于研究水泥石和混凝土中砂浆的微分孔隙率。

此法的原理是：水银不会浸润被它压入的大多数材料（浸润边角^① $\geq 90^\circ$ ），因此只有在外压作用下水银才能挤入物体的毛细孔中。

根据坎托尔（Кантор）导出的公式^[217]，外压 p 与毛细孔半径 r 有关：

$$r = \frac{2\sigma \cos\theta}{p} \quad (2-1)$$

式中 σ ——水银的表面张力；

θ ——水银的浸润边角。

实际上纯水银的 σ 值为 $0.41 \sim 0.515$ 牛顿/米。

① 浸润边角是指在材料、水和空气的接触处，沿水滴表面的切线与水与固体接触面所成的夹角——润湿角。——校者注

·由于毛细孔表面有吸附层,浸润边角也可能变化。对于硅酸盐材料来说, θ 值的推荐范围为 $112^{\circ}\sim 150^{\circ}$,一次测量误差可能是 $10^{\circ}\sim 15^{\circ}$ 。按照А·И·沙拉霍夫的意见^[145],由于 σ 和 θ 值变化,总的理论误差可达 $30\sim 40\%$ 。

水泥石的研究证明,在试验过程中表面张力不会因水银中混入杂质或浸润边角发生明显差异而变化。通常测量结果的误差平均为 5% 。电阻测孔仪,误差不超过 10% ,接触针测孔仪误差为 $3\sim 15\%$ 。

对于大多数硅酸盐材料, σ 和 θ 值可分别采用 0.48 牛顿/米和 140° 。

测量毛细孔的测孔仪有低压(0.5 帕 ~ 0.1 兆帕)和高压($0.1\sim 0.12$ 兆帕到 $200\sim 400$ 兆帕)两种,测量范围分别为 $(5\sim 300)\times 10^{-4}$ 厘米与 $(0.003\sim 5)\times 10^{-4}$ 厘米。

根据在升压过程中测得的电路电阻值,即可算出试件的孔体积。

一定压力下水银的体积 V 按下式计算:

$$V = \frac{K(R_p - R_0) - \Delta V}{m} \quad (2-2)$$

式中 K ——膨胀计常数;

R_p ——一定压力下电路的电阻值;

R_0 ——初始压力下电路的电阻值;

m ——准确称出的试件重量;

ΔV ——一定压力下,水银受压的体积修正值。

罗依基(Ломъзъ)的著作中首次提到过高压测孔仪,里特(H·L·Ritter)和德列克(L·C·Drake)也作过描述。后来出现了工作压力为 $200\sim 400$ 兆帕的不同结构的测孔仪^[125~127]。低压测孔仪出现较晚。

艾德尔曼(Л·И·Эдельман)所研制的仪器,可以说是第一批低压测孔仪之一。

许多著作^[223, 225, 237]都注意到,在高压研究过程中,必须对