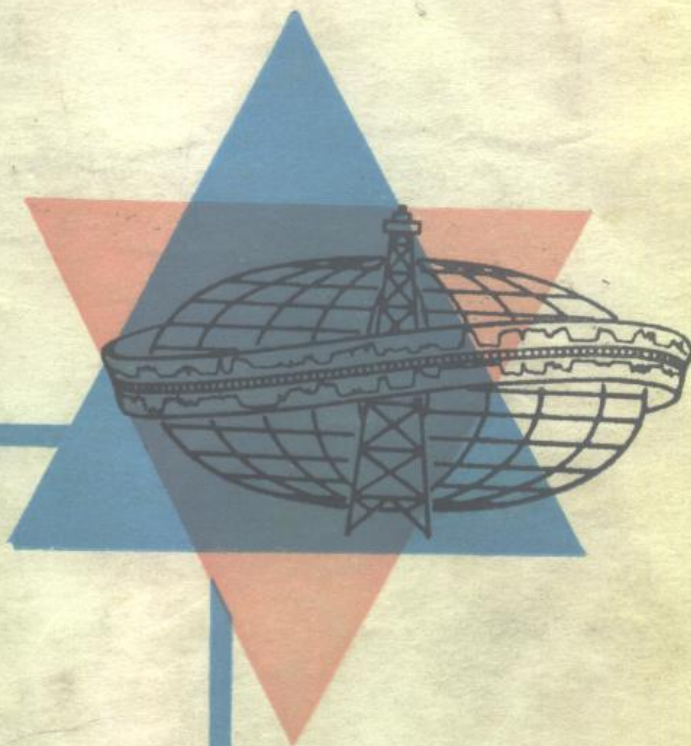


测井分析家协会专题选辑

2453



# 声波测井

石油工业出版社

## 内 容 提 要

测井分析家协会组成专门的委员会选编了这本“声波测井”。主编 A.蒂穆尔，编委 R.P.阿尔杰、J.J.科沃尔斯基、J.泽马力克。内容包括声波测井的理论、实验室的实验、测井仪器、裸眼井和套管井的声波测井解释以及声波测井的特殊应用。所选文章都是声波测井各个方面的代表著作，因此这是一本非常有价值的书。

本书可供从事声波测井工作和研究人员、使用声波测井资料的测井、物探、地质、钻井和开发人员以及有关院校师生参考。

本书的前言、理论、套管井声波测井解释及特殊应用部分由章兆淇翻译；实验室的实验和测井仪器部分由冯启宁翻译；裸眼井声波测井解释部分由尚作源翻译。

## SPWLA REPRINT VOLUME ACOUSTIC LOGGING

Editorial Committee Chairman

A. Timur Members R.P. Alger J.J. Kowalski J. Zemanek

March, 1978

Society of Professional Well Log Analysts, Inc.

Houston, Texas

\*

测井分析家协会专题选辑

声 波 测 井

A.蒂穆尔 等主编

章兆淇 尚作源 冯启宁译

\*

石油工业出版社出版

(北京安定门外外馆东后街甲36号)

妙峰山印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所发行

\*

787×1092毫米 16开本 23<sup>8</sup>/<sub>4</sub>印张 569千字 印1—1,860

1985年12月北京第1版 1985年12月北京第1次印刷

书号：15037·2529 定价：4.40元

## 前 言

这本书提供了迄今为止所收集到的声波测井在应用方面的参考资料。在准备阶段,我们的第一个任务就是对1975年以前的《测井分析家协会文集》、《测井分析家》、《美国矿业工程师协会文集》、《石油工艺杂志》、《石油工程师协会杂志》、《地球物理》、《地球物理勘探杂志》、《美国声学学会杂志》以及英国和其他外国出版物进行全面的文献检索,然后将所选的文章汇编成书后的文献目录,以便广泛了解声波测井及其有关的领域。

从我们列出的94篇文章中选择26篇,汇集成这本书。使本书成为声波测井工作者第一部最适合的参考书,这是我们选择的标准。所选文章分成六个部分:

第一部分是“理论”,提供弹性波在岩石中传播的基础知识。接着是“实验室的实验”部分,介绍孔隙度、岩性、饱和度和压力对这种传播的影响,这是对第一部分的补充。下面的三个部分分别叙述测井仪器以及裸眼井和套管井的声波测井解释。最后部分是“特殊应用”,介绍声波测井的其他应用。

虽然文献目录中包含了五十年代初的文章,但是选择时并没有把历史的观点作为一个因素。事实上第一次试验性的井下声波速度测量是在1927年进行的。在三十和四十年代,早期的测量主要是为了得到时间-深度曲线,以便用于地震解释。

在这期间,已经建议应用井下声波发射器和接收器进行速度测量,然而直到1954年证明了压缩波速度与孔隙有关系,速度测井才在工业中应用。1954年第一次使用双接收器,以后在1965年使用井眼补偿的井下仪器,这就提高了测量的精度。

普通的声波测井只记录压缩波的速度。在六十年代,出现了新的记录方法和解释方法,开始从信号中提取其他的信息。

最近几年,声波测井进入一个新的阶段。现代化的记录技术有可能用数字的方式记录声波的全波列,每半英寸井段得到500位以上的信息。对这些大量的新信息进行处理,将大大扩大声波测井的应用范围。

A. 穆希尔

1978年

# 目 录

## 第一部分 理论

- A. 非均匀介质和孔隙介质的弹性波速度…………… ( 1 )
- B. 声速测井解释: 岩石体积压缩系数的影响…………… ( 23 )
- C. 与速度有关的一些现象…………… ( 43 )

## 第二部分 实验室的实验

- D. 孔隙介质中的声速…………… ( 56 )
- E. 岩石波速随上覆层压力和孔隙饱和流体的变化而变化…………… ( 69 )
- √ F. 现场技术和实验室技术测量动态弹性模量的对比…………… ( 91 )

## 第三部分 测井仪器

- G. 声波测井和其它声学测量的一种新方法…………… ( 109 )
- H. 井下声波电视测井——寻找裂缝和其它井下检查的一种新的测井概念…………… ( 117 )
- I. 井壁声波中子测井…………… ( 132 )

## 第四部分 裸眼井声波测井解释

- J. 应用声速测井确定储集岩石中的流体饱和度…………… ( 144 )
- K. 声波测井…………… ( 156 )
- L. 声波测井的几何因素…………… ( 173 )
- M. 影响声速测井估价孔隙度的地质因素…………… ( 183 )
- N. 关于孔洞性碳酸盐岩石的声速研究…………… ( 197 )
- O. 砂岩中弹性波的速度与衰减…………… ( 203 )

## 第五部分 套管井声波测井解释

- P. 水泥胶结测井——研究套管和水泥的一些变量…………… ( 217 )
- Q. 套管井声波信号的全波显示…………… ( 233 )
- R. 套管井声波波列显示和解释的新发展…………… ( 249 )
- S. 对水泥胶结测井的考察…………… ( 264 )

## 第六部分 特殊应用

- T. 根据测井得到的泥岩参数确定地层压力…………… ( 278 )
- U. 孔隙介质在永冻温度的压缩波速度…………… ( 288 )
- V. 估计疏松砂岩在无防砂条件下可能的最大产量…………… ( 301 )
- W. 测井方法确定破裂压力梯度…………… ( 307 )
- √ X. 根据力学参数测井估计地层强度…………… ( 323 )
- Y. 根据横波和压缩波传播时间的关系确定岩性和孔隙度…………… ( 340 )
- Z. 测井方法求地层强度参数…………… ( 351 )

- 文献目录…………… ( 370 )

# 第一部分 理 论

## A. 非均匀介质和孔隙介质的弹性波速度

M.R.J.威里 A.R.格雷戈里 L.W.加德纳

### 摘 要

在室内温度和压力下，测量了许多人造和天然的孔隙介质的纵波速度。本文简要介绍了测量装置的基本特点。不同直径的均匀球集合体在干燥以及饱和水、盐水、有机液和塑料时的弹性波速度都已求得。在孔隙度19%~70%的范围内，测定了饱和塑料的玻璃球集合体的孔隙度对其声波速度的影响。用实验方法测量了不同量的盐水-油和盐水-气所饱和的天然沉积岩岩样，测量饱和度的变化对声波速度的影响。重新测定了氯化钠盐水的含盐量和温度对它的纵波速度的影响。

这些结果用图形表示，以便显示沉积岩的声波速度、孔隙度、孔隙所含物质和岩石骨架特性之间的经验关系。根据实验结果和理论研究，从这些因素之间的一般关系中引出某些结论。利用这些关系，可以对井中连续声速测井进行解释，提供一种测量地层孔隙度的方法。对一些连续声速测井和岩心分析所得到的孔隙度结果进行了比较。

### 引 言

海湾研究实验室设计并制造了一种超声波速度仪，可以很快测量高频脉冲通过试样的传播速度。已经用这种仪器取得不同条件下各种物质的声波速度实验数据，重点是孔隙性的粒状介质。

在仪器中测量速度的脉冲技术是休斯及其合作者首创的（1948年，休斯、庞德罗姆和明斯；1950年，休斯和琼斯；1951年休斯和罗斯）。这些工作者还相当深入地研究了诸如压力、温度、孔隙度和饱和度这类因素对许多不同类型岩样的影响。我们对岩石和人造孔隙性介质进行了一些测量。

本文所介绍的大量数据是对人造的和天然的孔隙介质，在未受到很大的围压或压实压力的情况下测量的。这样的测量通常不会遇到困难。空气本身的速度很容易测得，这一事实显示了该测量仪器的性能。

对连续速度测井在孔隙度方面的解释也给予相当大的注意。



## 仪 器

图 1 是地球物理发展部设计和制造的速度仪的照片。J.L.芒戴是设计和制造该仪器的主要负责人。被测试样放在两个探头之间的试样夹持器中。每一探头有一压电晶体（钛

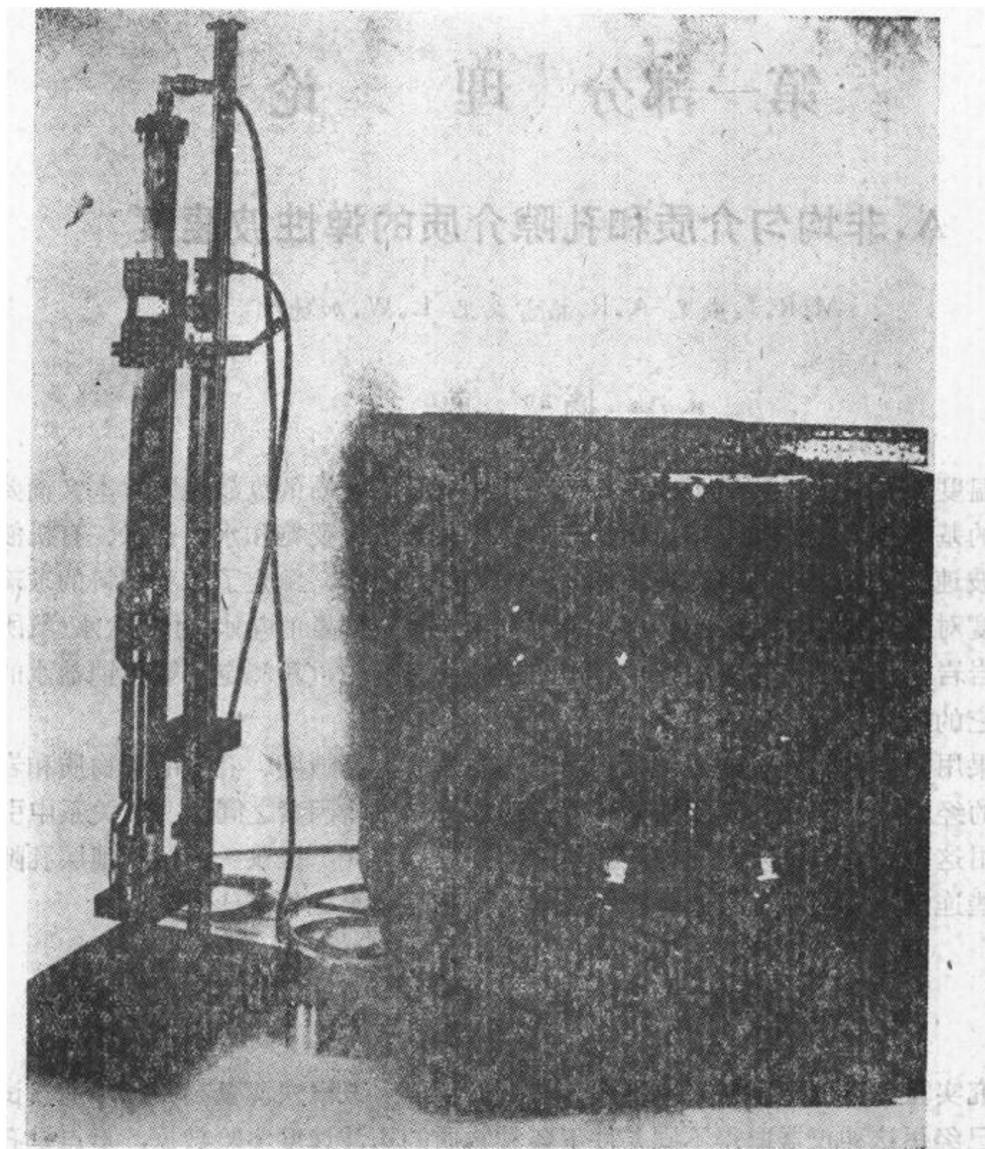


图 1 超声波速度仪和试样夹持器

酸钡)，其中一个作为重复式脉冲声波源，另一个作为接收器，接收通过试样传播之后的脉冲。两个代表性的信号显示在示波器上(图 2)，其中一个对应输出脉冲，另一个是输入脉冲产生的参考脉冲或测量时间的脉冲，但是电子线路将该脉冲延迟一段时间间隔，这段时间间隔可以用仪器箱前面的刻度盘进行调节和测量。为了测量任何给定的试样，通常调节刻度盘，直到输入和输出的两个代表性脉冲重叠时为止。然而示波器上的水平位移也可以测量两个信号之间的时间变化和输出信号存在的频率。仪器上的其他控制装置可以调节输出信号的增益、变换示波器水平方向的时间比例尺和重复出现的输入脉冲之间的不同时间间隔。

测量的特点如下：测量的速度就是通过试样的第一个能量相当大的声波的速度，因此得到的是纵波速度。

在本实验中，观测的脉冲其主要频率成分在200和1000千周之间，总之大约是休斯所用频率数值的十分之一。发射信号相应的波长在0.1和1英寸之间，小于岩样的直径，不过有时接近于岩样直径。通常，波长大于颗粒或孔隙的尺寸。改变晶体，发射信号的频率成分相应改变，但观测的速度没有变化，在所做的测量中，没有一次测量表明与频率有任何明显的依赖关系。

许多测量都进行重复，有些还重复多次。经常测量特制的黄铜圆柱体，实际上将它作为标准件，以便证明仪器的读数始终是正确的。对于所有的速度测量，传播时间可以随意重复测定，在总的传播时间为6微秒（最小）至270微秒（最大）的范围内，

重复测量的精度约在0.1微秒之内。因为利用试样夹持器上的刻度尺可以精确地测量声波在两个探头之间的传播距离，因此通常测量的速度其可靠程度约在 $\pm 1\%$ 的范围之内。

在一些金属圆柱体所测出的速度是：铝——21550英尺/秒，黄铜——14150英尺/秒，铅——7300英尺/秒和钢——17600英尺/秒。测量了在各种条件下的盐水的声波速度，下面给出测量结果。

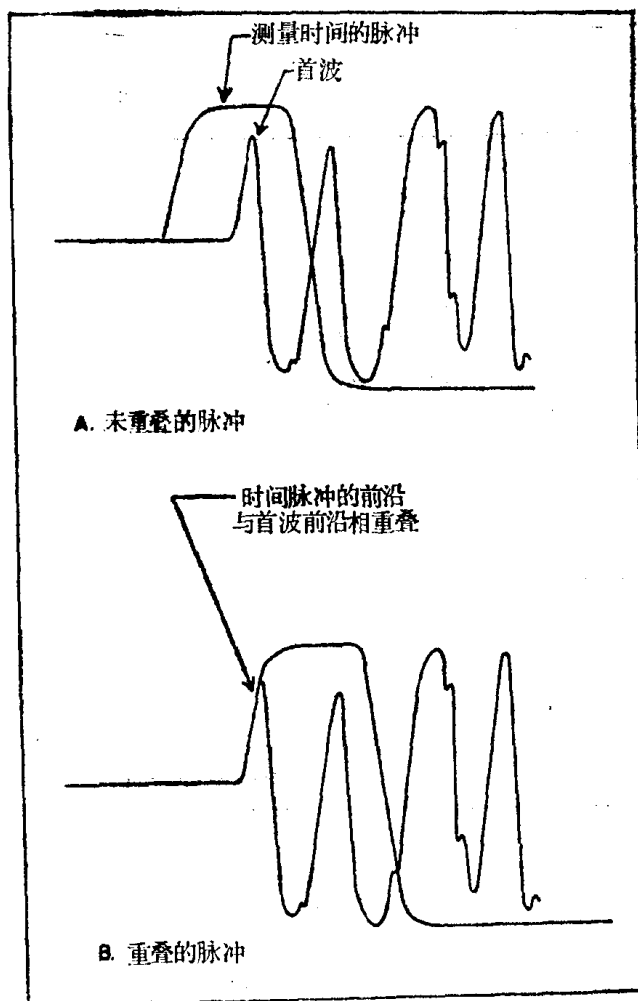


图 2 在示波仪上显示的通过黄铜的波

## 结 果

### 各种固体和液体的速度

一些典型岩石的测量结果示于表 I。这些岩石中很多是天然的结晶体，有很强的各向异性。记录的两种速度是沿着岩样两个不同轴向测量的速度（除方解石和石英之外，不需要沿晶轴测量）。这些测量是在大气压力和 $25^{\circ}\text{C}$ 的条件下进行的。显然，这些速度只是所列举的典型的岩石速度，具体的数值不仅与岩石的实际成分有关，而且与压力、温度、孔隙度、胶结、和饱和的流体有关，在各向异性的情况下还与方向有关。我们正在对这些影响因素作更多的了解。

表 I 在室内温度和大气压力下测量的矿物的速度

|   | 在测量方向的速度 (英尺/秒) |       |       |
|---|-----------------|-------|-------|
|   | X               | Y     | Z     |
| 硬石膏 (CaSO <sub>4</sub> )  | 20340           | 20790 | 20360 |
| 酞酸钡   | 15700           | —     | —     |
| 方解石 (CaCO <sub>3</sub> )  | 23060           | 21570 | 15740 |
| 白云石 (CaCO <sub>3</sub> ·MgCO <sub>3</sub> )                               | 14960           | —     | —     |
| 长石 (K <sub>2</sub> O·Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·6SiO <sub>2</sub> )  | 12150           | 18760 | 12460 |
| 长石 (Na <sub>2</sub> O·Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·6SiO <sub>2</sub> ) | 14370           | 21920 | —     |
| 石膏 (CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O)                                 | 18970           | 17460 | 21300 |
| 石盐  | 15350           | —     | —     |
| 云母  | 5000            | 16650 | 12860 |
| 蛋白石 (SiO <sub>2</sub> ·H <sub>2</sub> O)                                  | 17250           | —     | —     |
| 石英  | 17650           | 17750 | 21400 |
| 板石  | 16230           | 20600 | —     |

石英和方解石沿晶轴测量

一些特别感兴趣的物质其测量速度示于表 II，因为在实验研究中还要用到它们。一些液体的速度示于表 III。

表 II 具有各种特点的固体的速度 (英尺/秒)

|               |       |
|---------------|-------|
| 人造刚玉岩芯        | 20600 |
| 软木杆           | 2650  |
| 软木薄板 (厚5/16") | 1850  |
| 玻璃杆           | 17850 |
| 有机玻璃          | 8700  |
| 尼龙            | 8650  |
| 油石            | 16750 |
| 石蜡            | 6900  |
| 合成物           | 9750  |
| 聚脂树脂          | 8000  |
| 聚四氟乙烯         | 4400  |

### NaCl盐水的速度与浓度和温度的关系

图 3 总结了所得到的数据，这些数据大大扩展了以前报导的测量结果。对于所有的测量，试样夹持器上的两个晶体探头都是浸没在被测的盐水中，测量路径的长度为 6 到 8 英寸，所用的氯化钠为分析级，水经过蒸馏，容器是长方形的铜盒  $4\frac{1}{2}$  英寸 × 7 英寸 × 12 英寸。

我们的结果与史密斯和劳森(1954)以及巴塞尔(1954)的结果非常一致，他们分别采用 12 和 15 兆周/秒的波进行测量。而且还与戴克和斯怀森(1953)的结果一致，相差约在 1% 的范围之内。戴克和斯怀森使用海水，采用的频率为前者所用频率的千分之一。因此在一个很宽的频率范围，海水的频散现象显然是可以忽略的。

### 通过有机玻璃-铝柱体的速度

直径  $1\frac{7}{8}$  英寸、厚度在  $\frac{1}{8}$  和  $10\frac{1}{2}$  英寸之间的铝圆板，平行地装到另一块有机玻璃圆板



表 III 液体的速度(英尺/秒)

|                               |             |
|-------------------------------|-------------|
| 氯仿 (26.2°C)                   | 3200        |
| 四氯化碳 (26.6°C)                 | 3000        |
| 钻井泥浆 (26°C)                   | <u>4870</u> |
| 泥饼                            | <u>4980</u> |
| 蒸馏水 (25°C)                    | <u>4912</u> |
| 甘油 100% (25°C)                | 6380        |
| 正己烷 (26.2°C)                  | 3511        |
| 正戊烷 (26.2°C)                  | 3303        |
| 硅酮 DC 200, 粘度1厘沓29.2°C)       | 2960        |
| 硅酮 DC 200, 粘度0.65厘沓(沓(28.6°C) | 2875        |
| 乙醇 95% (26°C)                 | 4006        |
| 无水乙醇 (26°C)                   | 3815        |
| 异丙醇 (26°C)                    | 3744        |
| 异辛烷 (26°C)                    | 3622        |

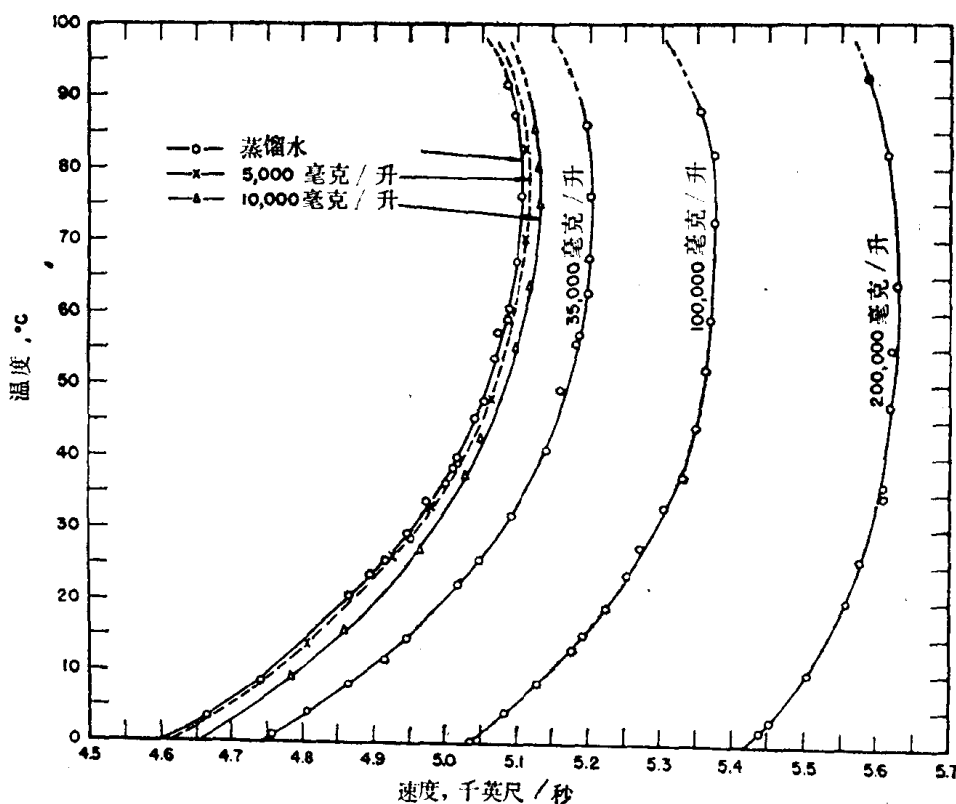


图 3 在各种NaCl浓度下速度与盐水温度的关系

上, 形成一个有机玻璃块与铝块相互交替的圆柱体。安装有机玻璃时加热和加压, 以便去掉气泡, 改善声耦合的程度。有机玻璃片的厚度在  $1\frac{1}{16}$  到  $\frac{1}{2}$  英寸之间。这样做成的每一个柱体代表一个孔隙度。这个孔隙度值就是在柱体轴向测量的总长度中有机玻璃所占的长度。对孔隙度在 1% 到 66% 范围的柱体进行速度测量, 其结果和时间平均速度曲线一起示于图 4。这条平均时间曲线是以铝(20800英尺/秒)和有机玻璃(8700英尺/秒)的传播时间的总和为基础的, 即

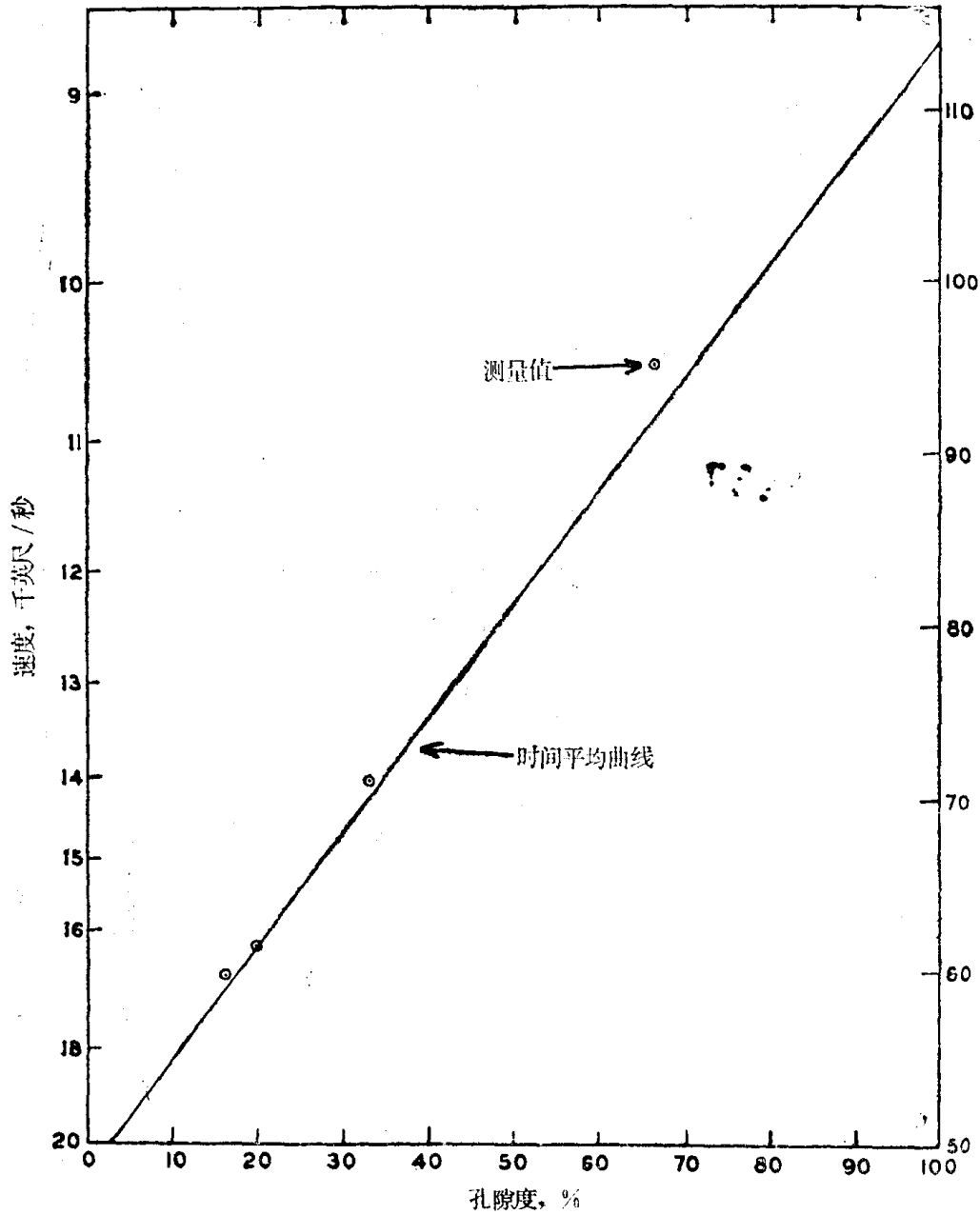


图 4 铝板在有机玻璃中的情况

$$\frac{1}{\bar{V}} = \frac{\phi}{V_{\text{流体}}} + \frac{1-\phi}{V_{\text{铝}}} \quad (1)$$

式中:  $\phi$  = 孔隙度

$\bar{V}$  = 时间平均速度

对于这样一个系统, 如果波是垂直圆板定向地通过柱体传播, 无论波长是大于还是小于各块的厚度, 理论的速度就是时间平均速度。这是从下列事实推测出来的: 一些弹性介质, 当它们的表面之间没有间隙或滑动时, 其声波速度和透射系数与频率无关。在测量的精度范围之内, 观测的速度和时间平均速度是一致的, 这就证实了上述的理论条件。

#### 通过玻璃片的速度

将显微镜承物玻璃片重叠起来, 堆积成一柱体, 沿柱体长度和宽度的方向测量的速度

与单个玻璃片用类似方法测得的结果(约为17530英尺/秒)是一致的。在50个玻璃片堆积的柱体两端。测量的速度只有1650英尺/秒。在25个玻璃片两端测量的速度没有增加很多,只有当玻璃片的数目减少到非常少时才得到较高的速度。在只有2片或3片的情况下,测量的速度约为8000英尺/秒,这是很不准确的测定。在所有这些测量中,观察到的发射频率比正常情况小许多倍。用手对试样夹持器的两个探头施加压力,所得结果没有很大变化。装配成柱体之前,使玻璃表面变湿,得到了玻璃的真正速度,观察到正常的信号频率。这个实验证实了这种猜测: 物质之间耦合很差或者有裂缝会使速度大大降低。

### 饱和流体的球形颗粒集合体的速度

把大小均匀的球形颗粒按照随意方式填塞成的集合体(孔隙度38%),用各种液体饱和并测其速度。对于干燥(即用空气饱和)的集合体也进行类似的测量。

测量是在软木作壁的矩形盒(3英寸×3英寸)中进行的。盒底是有机玻璃,测量盒底的传播时间,并从实验结果中扣除这一数值。在所有实验中,上部晶体探头这样支撑,使得它对研究的集合体所施加的挤压力可以忽略不计。对通过软木的盒壁所传的能量(可作为参考能量)没有造成困难。

所用的玻璃球就是威里和格雷戈里在以前(1955)的文章中详细描述过的那些玻璃球。铅球由国家铅公司提供,用筛选方法确定它的大小。聚苯乙烯球经宾夕法尼亚州梅隆学院的氰胺联谊会许可进行制造,也用筛选和淘选方法确定大小。使用的全部有机液体都是试剂级的。用来饱和集合体的这些液体、蒸馏水和盐水,使用前都进行过排气。

试样在干燥的情况下,测量的声波通常是很弱的,输出的是频率非常低的信号,所得结果的有效程度难以确定。在图5,测量干燥玻璃球所得的点子显然是分散的。

对于饱和液体的球集合体,接收到的声波信号的质量在好与极好之间,取决于所用的液体。然而试样的长度是一个控制因素,极限长度约为10英寸,大于这个长度就能可靠地测定声波信号。

图5是对实验点子所作的图。试样长度与球的直径之比值为纵座标,速度为横座标。这种作图方法使最初得到的看来不一致和混乱的结果合理化。我们以前使用均匀球的实验表明,在离表面的一段距离(等于球的直径的许多倍)之内,扁平的表面常常影响球的随意排列。尽管如此,我们很难确定均匀球集合体的两个扁平表面对其弹性波速度的数值所产生的影响。如图5所示,要使末端的影响可以忽略不计,长度/直径的比值至少要为100,最好是1000。图5所示的结果,实际上是容器的平底和上部晶体支架的扁平探头所引起的一种填塞形式(各向异性)的必然结果。当长度/直径比值为1(即测量单个球体的速度)时,测量的速度可以推知球体物质的速度,从这一事实可看出图5的结果是非常好的。

均匀球的所有数据都落在一条共同的曲线上,不论球的大小如何。从这个事实得出一个有益的结论: 随意排列的均匀球集合体,其填塞类型及孔隙度总是相同的,而且与球的尺寸无关。然而这种集合体的渗透率与它的表面积的平方成反比,因此与组成集合体的球的直径的平方成反比。在所用的玻璃球的直径范围(6.00毫米至0.028毫米),渗透率变化 $4.6 \times 10^4$ 倍,但是速度不受影响。

直径0.028毫米球用水和四氯化碳饱和时的数据表明,如果试样的长度/球的直径之比值超过100左右(因此消除了末端影响),通过饱和的集合体的速度基本上是恒定的。若有变化,也只是速度随试样长度的增加而稍有减少,没有出现相反的迹象。

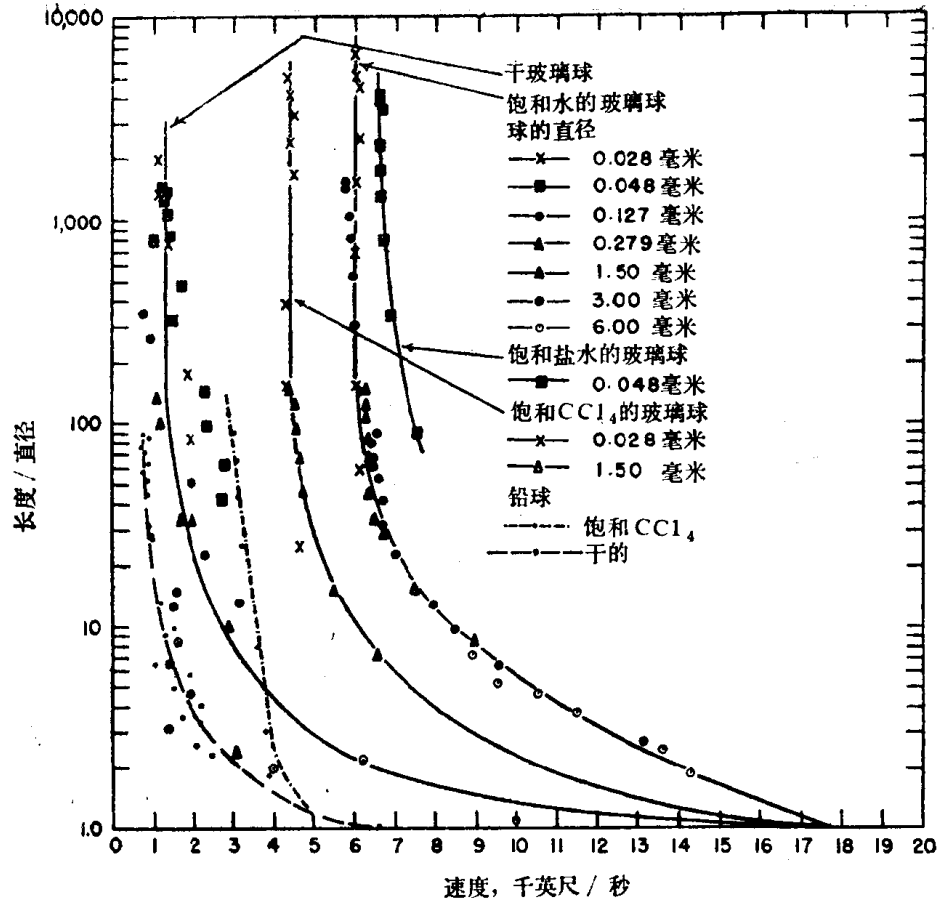


图 5 未固结的球集合体，其速度与集合体长度/颗粒直径的关系

表IV总结了图5所示的结果。在表IV中列出不存在末端作用的条件下测量的各种饱和集合体的速度。第5栏表示实验得到的数值。第6栏表示按照公式(1)计算的时间平均速度的相应值。第7栏表示根据下式计算的相应速度值：

表 IV 在室内的温度和压力下饱和的集合体的速度(孔隙度: 40%)

| 固 体   |                                  | 流 体                    |                       | 集合体速度(英尺/秒) |        |      |  |
|-------|----------------------------------|------------------------|-----------------------|-------------|--------|------|--|
| 球     | 种 类                              | 密度(克/厘米 <sup>3</sup> ) | 速度(英尺/秒)              | 观测的         | 时间平均公式 | 伍德公式 |  |
| 玻 璃   | 盐 水                              | 1.14                   | 5600                  | 6600        | 9550   | 6630 |  |
| 玻 璃   | 水                                | 1.00                   | 4820                  | 6080        | 8600   | 5600 |  |
| 玻 璃   | C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> OH | 0.79                   | 3800                  | 4550        | 7210   | 3980 |  |
| 玻 璃   | CCl <sub>4</sub>                 | 1.50                   | 3000                  | 4300        | 6000   | 4010 |  |
| 玻 璃   | 油                                | 0.75                   | 3990                  | 4010        | 7480   | 4000 |  |
| 玻 璃   | 硅 酮                              | 0.76                   | 2870                  | 3620        | 5800   | 2980 |  |
| 玻 璃   | 空 气                              | 0.0013                 | 1130                  | 1300        | —      | —    |  |
| 塑 料   | 水                                | 1.00                   | 4820                  | 5500        | 6550   | 6130 |  |
| 固 体   |                                  |                        |                       |             |        |      |  |
| 玻 璃   | 甲基丙烯酸甲酯                          | 1.17                   | 8600                  | 12600       | 12520  | 9840 |  |
| 玻 璃速度 | 18000英尺/秒,                       | 密度                     | 2.4克/厘米 <sup>3</sup>  |             |        |      |  |
| 塑料速度  | 8700英尺/秒,                        | 密度                     | 1.17克/厘米 <sup>3</sup> |             |        |      |  |

$$\frac{1+q^*}{(V^*)^2} = \left[ \frac{\phi}{V_I^2 \rho_I} + \frac{(1+q_s)(1-\phi)}{V_s^2 \rho_s} \right] [\phi \rho_I + (1-\phi) \rho_s] \quad (2)$$

式中， $\phi$ 是用小数表示的孔隙度； $V$ 和 $\rho$ 分别表示固体（下标S）和液体（下标I）成分的速度和密度；星号“\*”表示将该系统作为一个整体； $q$ 是与刚性模量有关的量。下面给出(2)式的推导以及 $q$ 的更详细的意义。表IV第七栏的数据是取 $q_s$ 为0.6，对饱和液体的系统 $q^*$ 取作零，饱和固体（甲基丙烯酸甲酯）的系统取作0.6。图5所示的测量速度与计算的速度相一致。

### 饱和甲基丙烯酸甲酯的玻璃球速度

玻璃球集合体用甲基丙烯酸甲酯单晶饱和，然后用布赫莱水压机在热和压力下使单晶聚合。发展这种技术是为了避免热形成的塑料所造成的缺点。用纯单晶进行的单独实验表

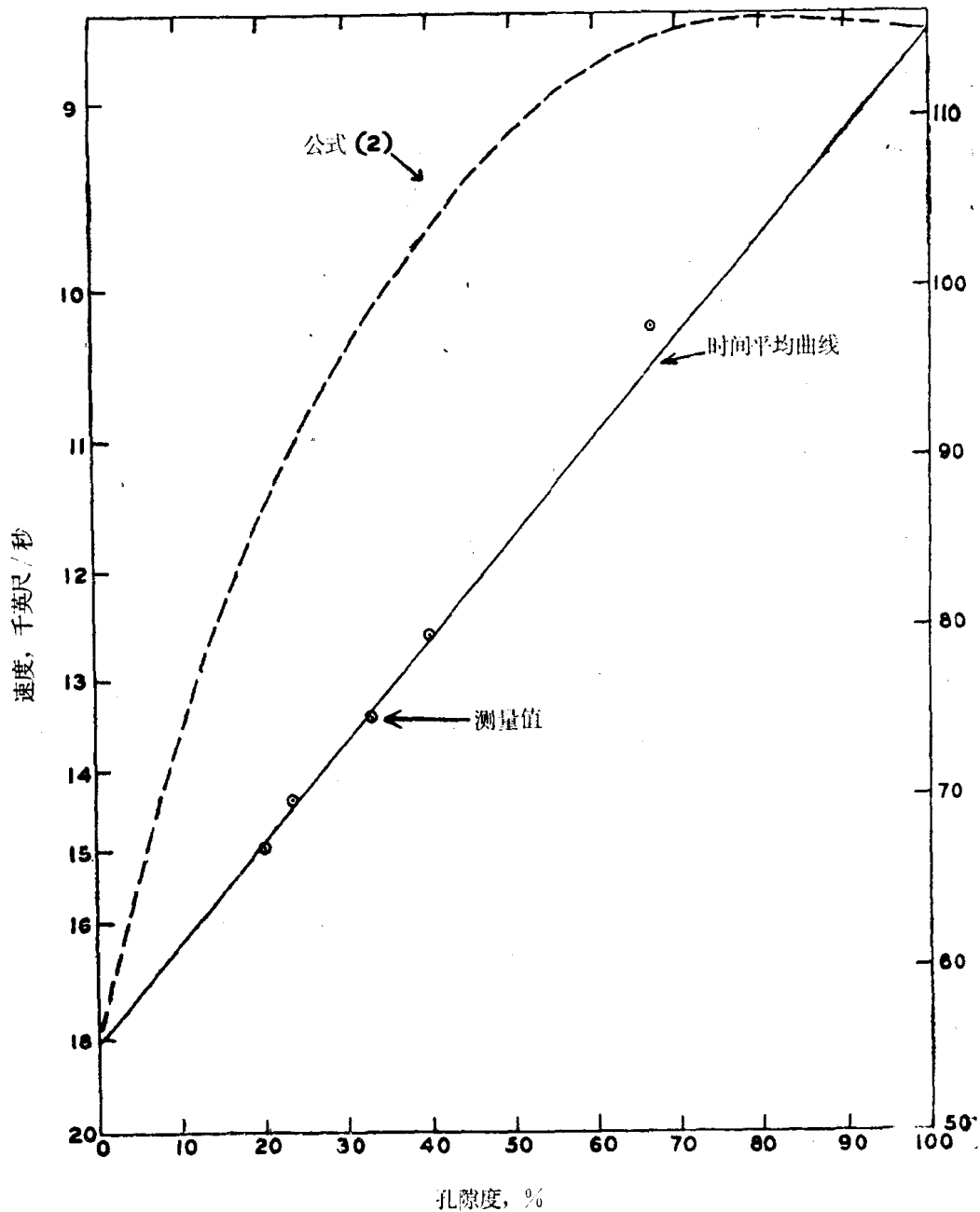


图 6 玻璃球在甲基丙烯酸甲酯中，其孔隙度与速度的关系



明，聚合物的速度对聚合单晶所用的方法不敏感。还发现聚合过的单晶的速度与用粉末模制的有机玻璃的速度相同。这个结果是可以预料到的，因为在工厂中单晶的聚合作用使用了片状和粉末状的有机玻璃产品。

制成的试样其孔隙度（即塑料体积/总体积）随着不同尺寸玻璃球所占比例的变化而改变。为了得到大于40%的孔隙度，细小的球分散在粘性的单晶中，在凝固之前完成聚合作用。

图6所示的时间平均曲线是根据(1)式计算的，第二条曲线是用(2)式计算的。所用的甲基丙烯酸甲酯其速度为8600英尺/秒，玻璃球的速度为18000英尺/秒。很明显，实验数据与时间平均曲线拟合很好，与(2)式计算的曲线有较大的不同，这是属于两个固体的情况，可以预计固-液系统的理论不能适用。

### 天然砂岩岩样的速度

在围压可忽略的条件下，也就是只受到上部晶体架重量所产生的非常小的垂直压力条件下，测量了大量天然砂岩岩芯的速度。

使用的岩样不是专门挑选的，是从常规取芯作业所得的  $4\frac{1}{2}$  英寸直径岩芯中切割出来的。这些岩芯取自海湾公司在巴巴多斯和俄克拉荷马的一些井。还研究了俄亥俄的某些贝雷砂岩。所有岩样都与地质上描述的“砂岩”相吻合，但是使颗粒胶结的物质自然会有变化，在一些岩样中胶结物是方解石，在另一些岩样中胶结物是硅石或粘土。所有的岩样，用烘箱干燥和冷却之后，首先测量它的速度，然后饱和蒸馏水，再进行测量。岩样在干燥及饱和的情况下称重，用重量分析的方法求得孔隙度。

图7是大量测量所得的结果，用速度的倒数对孔隙度的关系来表示。图上给出了二条曲线，其一标明时间平均曲线，它是用(1)式计算的，水的速度采用4800英尺/秒，硅石

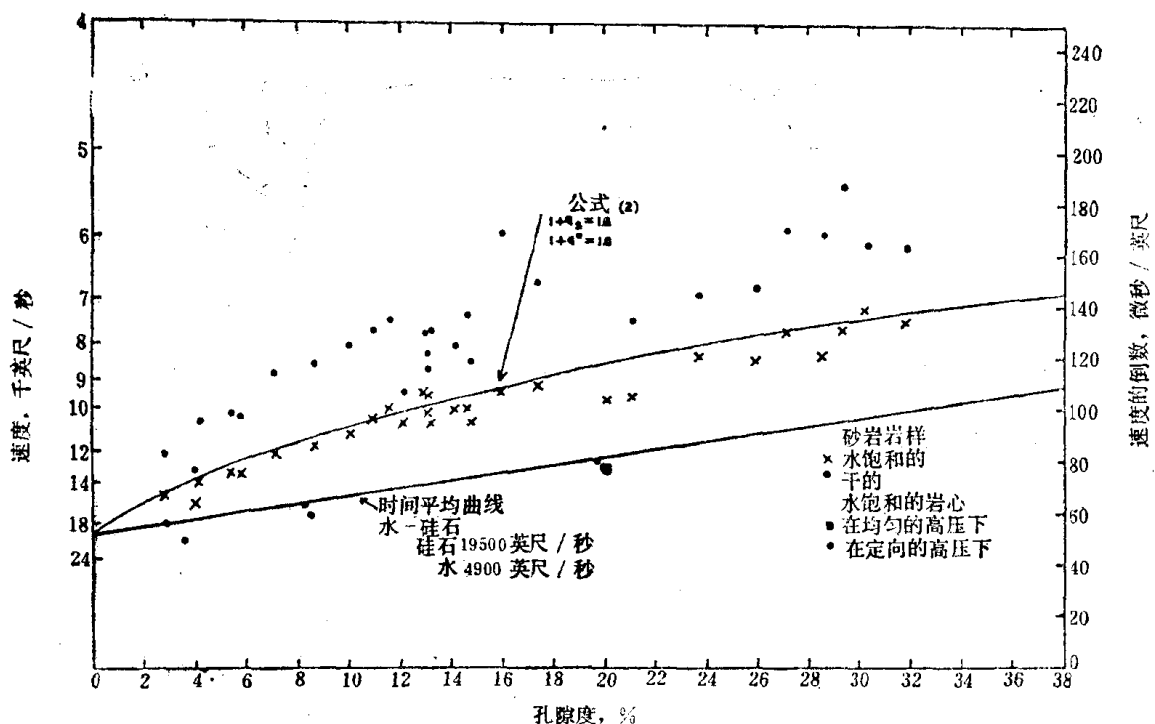


图 7 砂岩岩芯的速度与孔隙度的关系

速度为19500英尺/秒。另一曲线是根据公式(2)计算的，硅石速度用19500英尺/秒， $q_1 = 0.6$ ， $q^*$ 在0.6~0.05之间（孔隙度较大时采用较小的数值）。

至今测试过的所有天然岩样，水饱和后的速度都大于干燥时的速度。测量德克萨斯西部的一些石灰岩岩样的速度也出现这种特点，测量结果示于图8。在计算时间平均速度以及根据公式(2)计算曲线时，方解石的速度采用23000英尺/秒。公式(2)中的 $q^*$ 和 $q_1$ 值都规定为0.6。

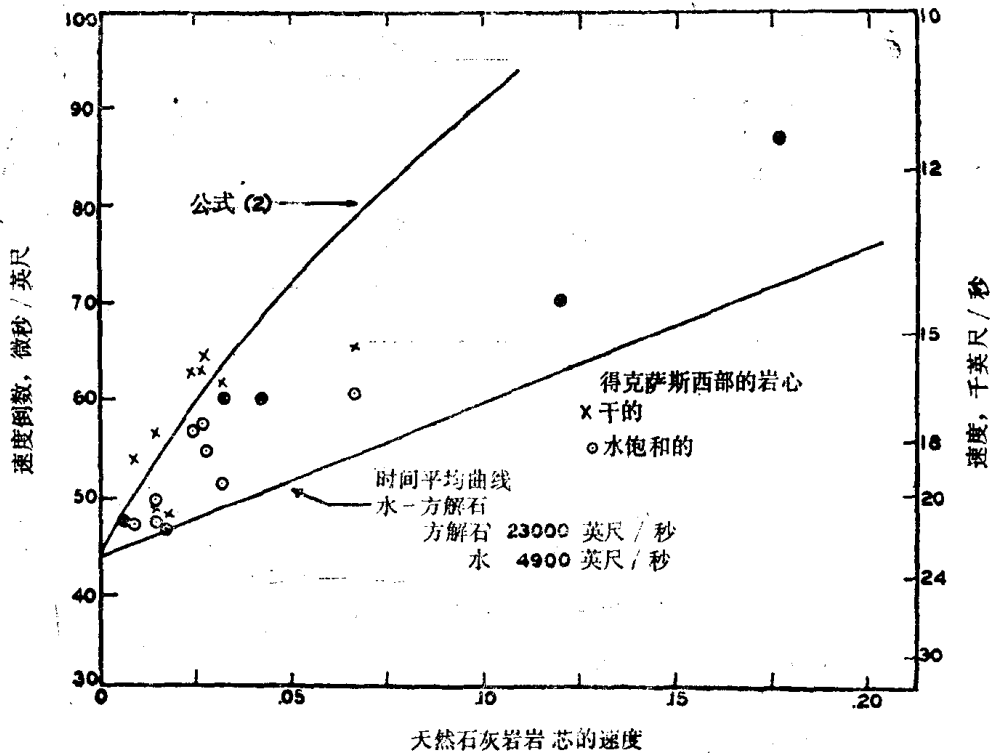


图 8 天然石灰岩岩芯的速度

显然，对于图7所示的砂岩和图8所示的石灰岩，时间平均公式计算的速度偏高。根据公式(2)计算的速度与饱和岩样在室内温度和压力下的测量结果比较一致。

#### 砂岩岩样的速度与含水饱和度的关系

对部分饱和的岩样即包含水和空气的岩样进行实验时，采用在控制条件下蒸发的方法得到所要求的饱和度。已经发现，有可能对每一个研究的岩样独立进行一些测定，以便绘出一条可重复的饱和度-时间曲线。得到刻度曲线的条件与岩样放置在图1的晶体探头之间所具有的条件相同。因此当测量速度与饱和度的关系时，在测量期间不需要从仪器上拿下岩样，而是将速度作为时间的函数来测量，每一时刻的相应饱和度值则由刻度曲线谈得。

还在围压限定到等于上部晶体探头的重压的情况下测量这些速度。三个砂岩岩样和二个人造刚玉岩芯的典型测量数据示于图9。每个试样的测量可以重复，而且出现下列类似之处：

对于砂岩岩样，饱和度从100%降到70%左右时速度显著降低；在70%和10%之间速度明显稳定；低于10%，速度不稳定。对于人造刚玉试样，当饱和度从100%到60%时，速度明显变化而且无规律；饱和度低于60%时，速度相当稳定。按百分数的算法，人造刚玉

的速度变化大于饱和度的变化。由于这些结果是在大气压下得到的，当用于加压的系统时，它们的有效程度不能断定。对于后面这个问题，现在的结果与休斯和凯利(1952,图8)报导的部分饱和的岩样在加压条件下的实验结果有明显不同。

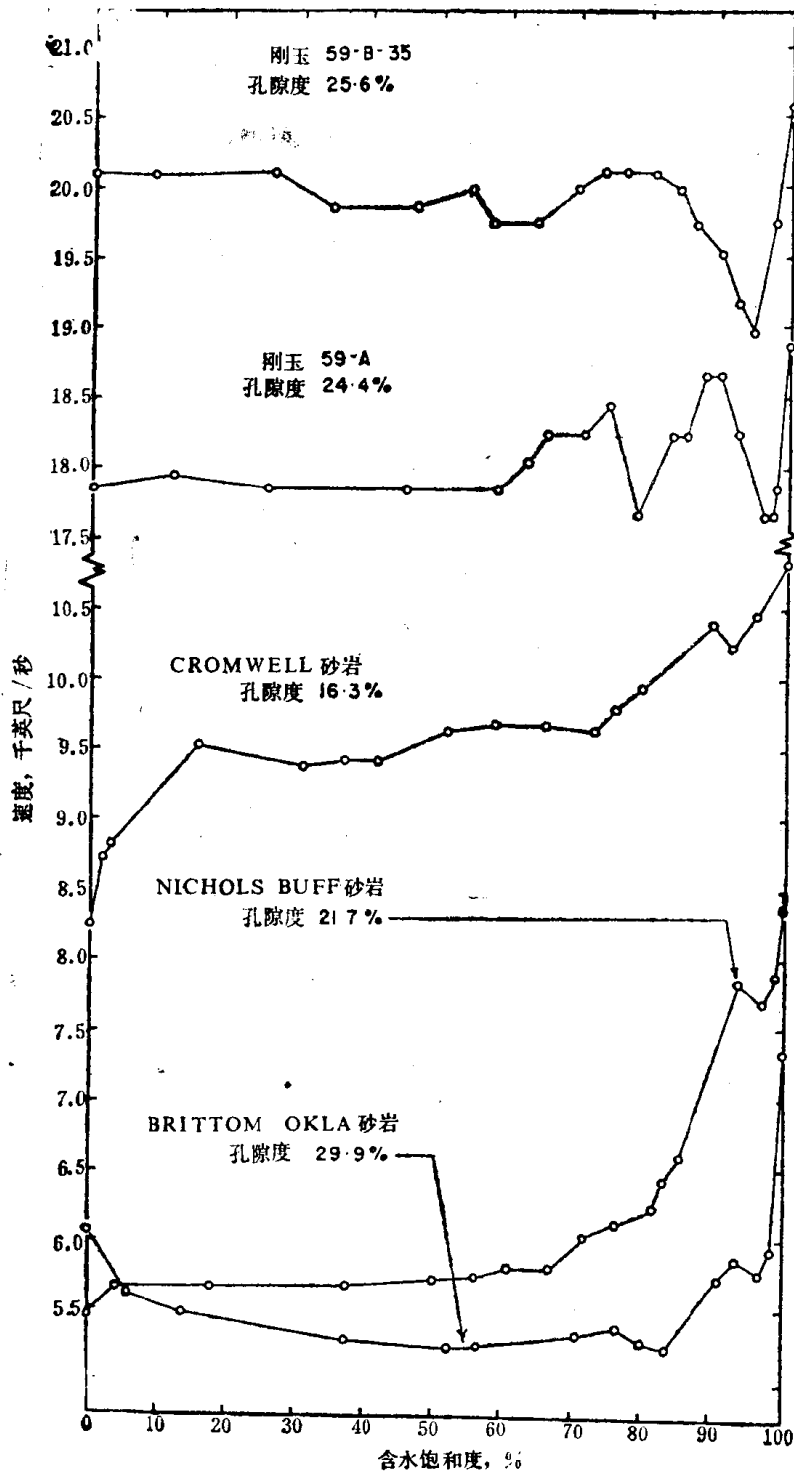


图 9 速度与水和空气的饱和度的关系

### 砂岩岩样的速度与含油和含水饱和度的关系

两个孔隙度为21.7%和21.1%的天然砂岩岩芯，最初用蒸馏水(速度为4900英尺/秒)饱和，然后用毛细压力技术逐步降低饱和度。石油(Soltrol C,速度为3990英尺/秒)是

替换的液相。在饱和度降低期间,每隔一定时间测量含有油和水的岩样的速度。如同岩样含有水和空气时那样,测量不是在挤压的条件下而是在上部晶体探头重量作用下进行的。在每次测量之间必须将试样从试样夹持器上取下进行处理,但是认为测量结果是好的,因为能够很好重复。

结果示于图10。显然在含水饱和度为100%时,两个砂岩岩芯的速度都是最大。用油替换水,其速度逐渐明显下降。含水饱和度在45%和65%之间的范围,曲线有一平直的部分。我们再次指出,这些结果不能直接用于受到压力的类似系统。

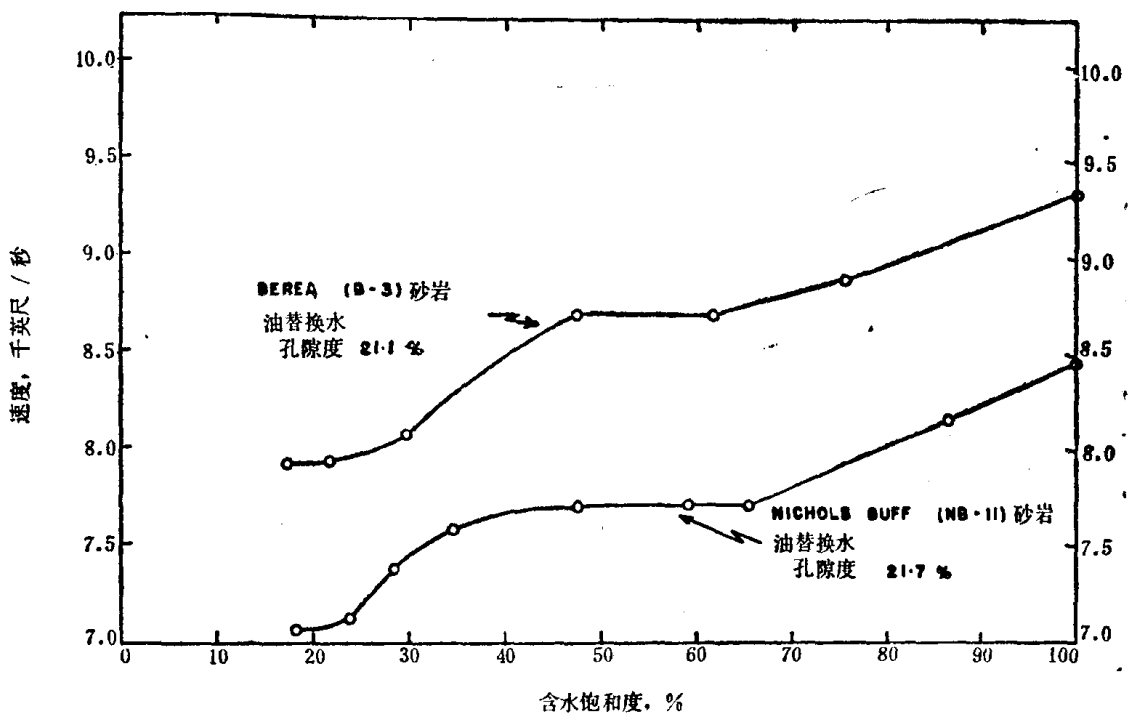


图 10 砂岩岩芯的速度与含油和含水饱和度的关系

### 单向压力对砂岩速度的影响

直径1英寸、长2英寸的正圆柱形岩样装上橡皮套,以防蒸发损失,并用卢米斯水压机(容量40000磅),在两个装有酞酸钡晶体的黄铜制的探头之间进行轴向挤压。试样夹持器虽然不同,但是除了给晶体探头加适当负载的工具之外,基本上如图1所示。

已经发现速度随所加压力的增加而增大,直到极限压力为止,如图11所示。孔隙度非常高的易碎的岩芯,在达到极限速度之前出现破裂。然而在大多数的情况下,看来是可以达到极限速度的。

### 围压对砂岩速度的影响

我们已经在水压容器中对受到围压作用的物质进行测量。设计了工作压力可达15000磅/英寸<sup>2</sup>的压力系统。这种设计属于常规类型的,主要设备包括一台手压泵,一个经过刻度的布尔登压力计和一压力容器。该容器是美国仪器公司标准的6 $\frac{7}{8}$ 英寸直径反应压力容器。用铬-钒钢制造,内径5 $\frac{1}{16}$ 英寸,内部高度为20英寸。试样夹持器安装在容器室内。通过可折开的帽进行电的和流体的连接,砂岩试样加上铜的套筒,以便测量下列各种状态的