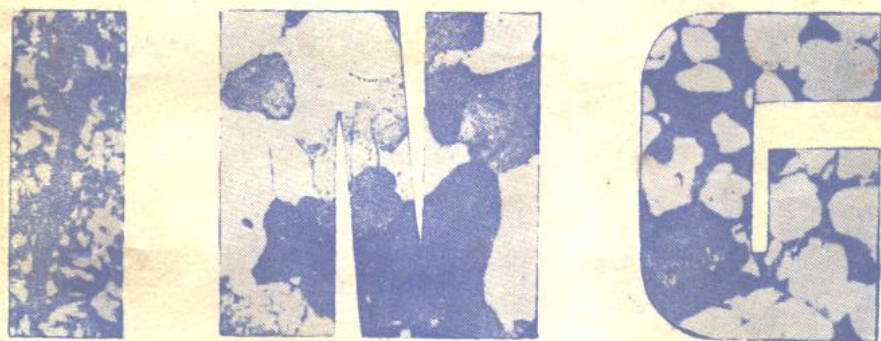


取 芯 和岩芯分析手册

〔美〕G. 安德森 著



and Core Analysis
Handbook

石 油 工 业 出 版 社

取芯和岩芯分析手册

〔美〕G.安德森著

杨礼显 石宝珩 译 李汉瑜 校

石油工业出版社

内 容 提 要

本书提供了评价潜在油气藏所需的全部资料。包括：储集岩的特性；典型的储集岩；气、油、水的力学；取芯工具、岩芯分析设备；岩芯的钻取、收集及保存；饱和度、渗透率及孔隙度的各种测量方法及计算；以及测井、试井和储量估算等。其中对钻井取芯技术及岩芯分析技术的论述尤为详尽。书后附有完整的参考书目和参考文献。

读者对象：地质、钻井、测试和开发等专业技术人员及有关院校师生；从事现场钻井取芯及实验室岩芯分析工作的有关人员。

本书第一、二章由石宝珩译，其它各章及附录由杨礼显译。全书由成都地质学院李汉瑜副教授校订。第一、二两章由中国科学院地质研究所陈海泓复校。

石油工业出版社出版
(北京安定门内外馆东后街甲36号)
通县印刷厂排版印刷
新华书店北京发行所发行

850×1168毫米 32开本 $6\frac{1}{4}$ 印张 160千字 印1—2,200

1986年9月北京第1版 1986年9月北京第1次印刷

书号：15037·2621 定价：1.30元

前 言

第一套取芯工具于1908年出现于荷兰，是一个钻井技术人员设计的一种钢管。它被装在钻头中央的上部，以防岩芯受循环钻井液的影响。

直到1921年，才发明了第一套有效的取芯工具，它是由美国的J. E. 埃利奥特将带齿的钻头和内岩芯筒结合起来制成的。1925年，取芯工具又有了更多的改进。这些改进包括一个可更换的取芯钻头、一个岩芯爪和一个固定的内岩芯筒；此后对内岩芯筒的改进只使它更为精致。

本书的目的，是使井场地质工作者熟悉岩芯分析的手续，并给他们提供使用标准分析仪器所必须有的知识。对那些认为有必要更新有关沉积物、原油特性、取芯等方面的知识的人员来说，本书也不失为一本良好的参考书。

全直径岩芯和全岩芯分析的复杂程序在此不予讨论，因为这些分析所需用的设备太大，对于井场工作来说，它们既笨重，又不方便。关于毛细管压力的量测，在书中有所论述，但限于时间和篇幅，未能作更详细、更深入的讨论。

井场岩芯分析之所以重要，是因为它是在岩芯具有各种流体、仍是“活”的时候量测出岩石特性的。通过封堵的岩芯样品的分析，可收集到可靠的资料，这些资料即可反映岩芯在原地的地层条件。

获得正确数据的一个最重要的关键就是地质工作者本身。他对沉积物，沉积物内油、气特性的了解，以及他作出一致的量测的能力，这对于整个岩芯分析过程的成败都是至关重要的。

在过去，岩芯分析不受重视，所得资料常被认为是“知道了更好”的资料。但现在，如果人们想从油藏中采出最大量的油、

气，这些“知道了更好”的资料对他来说已成为“必须知道”的资料了。随着原油消费量的增加，加以消费的速度又超过了新油田的发现速度，岩芯分析也就日益增加了它的重要性。

一开始，岩芯分析对于未入门者似乎是一项神秘、乏味和浪费时间的工作。但在有了经验以后，他就可以设计一个系统，来量测岩样的各种特性，并获得预期的、合理的量测和对计算结果的一种“辨别力”。这种辨别力不是经常用来修改数字的，而是用以保证这些数字的正确性，避免出错。例如，人们可以看出孔隙度和渗透率的数据彼此间是成比例的。

“流体求和法”由于在用于碳酸盐沉积物时不准确而未予考虑。碳酸盐岩具有有用的和无用的孔隙空间，用流体求和法处理时，这些孔隙空间类型间的比率是变化的。这一比率在碎屑岩中也有不同程度的变化。

希望本书所提供的一些准则将会阐明该项工作的某些更细微的方面，并把一些“书生”从繁忙的日常生活中解脱出来。这些准则则是获得准确、一致的结果所必须通晓的。我也希望这本书的材料和展示的内容能引起读者对岩芯分析工作的真正兴趣。

附录B的岩芯分析工作表，迫使人们在开始下一步工作之前要完成前一步的工作。实质上，这就使人们不可能忘记某一特定步骤和漏掉某一项极重要的量测。

可以给一个岩芯分析工作者的最重要的忠告就是：井井有条地工作！

G. 安德森

伦敦，1974

目 录

第一章 储集岩的重要特性	(1)
1.1 孔隙度.....	(1)
1.2 颗粒排列方位.....	(8)
1.3 渗透率.....	(13)
1.4 饱和度.....	(18)
1.5 相对渗透率.....	(20)
第二章 典型的储集岩	(25)
2.1 碳酸盐岩.....	(25)
2.2 碳酸盐岩的能量指数分类.....	(31)
2.3 砂岩.....	(32)
第三章 气、油、水的力学	(51)
3.1 物相关系.....	(51)
3.2 毛细管作用.....	(52)
3.3 润湿性.....	(55)
3.4 油-水过渡带.....	(56)
3.5 浮力.....	(57)
3.6 油田水的分类.....	(57)
3.7 石油的生成、特性和分类.....	(62)
第四章 取芯工具、分析设备及设备清单	(69)
4.1 取芯工具.....	(69)
4.2 分析设备.....	(70)
4.3 设备清单.....	(82)
第五章 岩芯的钻取、收集、取样及保存	(84)
5.1 取芯.....	(84)
5.2 样品收取.....	(90)

5.3	取样准则.....	(91)
5.4	岩芯的保存.....	(95)
第六章	测定和计算.....	(97)
6.1	用干馏法测饱和度的操作步骤.....	(97)
6.2	用空气测定渗透率的操作步骤.....	(100)
6.3	压汞法测孔隙度的步骤.....	(102)
6.4	空气注入法测孔隙度步骤.....	(107)
第七章	测井、试井和储量估算.....	(112)
7.1	孔隙度, 渗透率, 饱和度.....	(112)
7.2	自然电位(SP)测井	(118)
7.3	放射性测井和声波测井.....	(119)
7.4	中途测试.....	(128)
7.5	储量估算.....	(143)
附 录		(152)
附录 A		(152)
附录 B		(156)
附录 C		(167)
附录 D		(173)
附录 E		(183)
参考书目		(186)
参考文献		(188)

第一章 储集岩的重要特性

对最佳的采油速度、井距和产量分配的估计，已经越来越多地依赖于岩芯分析资料。这种发展趋势导致了多种精密仪器和更精确的分析方法的发展。

进行产量估算所需要的基础资料为：

1. 地层的有效厚度；
2. 产油层的厚度；
3. 储集层储存流体的能力；
4. 岩石内的孔隙空间；
5. 油气占据孔隙空间的程度；
6. 储集岩的渗透率；
7. 气、油与水接触面的位置。

地质学家用岩芯作详细的岩性鉴定并确定岩石的年龄，但是不能仅仅用岩芯分析资料来“编录一口井的剖面”。然而，岩芯分析数据可作为校正电缆测井曲线的基础，同时亦尽可能地提供最好的孔隙度和渗透率数据。

岩芯分析数据的价值

因为地质学家已经看到了潜在的产油岩石，所以便可信赖电缆测井和中途测试(DST)的结果。

电缆测井和中途测试结果必须与岩芯分析结果相对照。

测井地质家应该熟悉其它评价工作方法，这样他才能够对比和消化所获得的全部资料。

1.1 孔隙度

孔隙度是对岩石中未被固体结构或骨架所占据的空间的一种度量。孔隙度的定义为未被固体物质占据的空间所占岩石总体积的百分率。

总孔隙度包括岩石中所有的孔隙空间，而**有效孔隙度**仅包括

相互连通、并能有效地充满或排出流体的孔隙空间。

要强调孔隙度的潜在意义，因为百分之一的孔隙度便相当于每英亩·英尺含77.58桶的油(约 8.63×10^{-2} 升/立方米)的空间。

具工业意义的含油砂岩可以有各种各样的孔隙度，这取决于可望生产的油(气)量，以及潜在的产油层与消费者的情况。通常认为，至少有8~10%孔隙度的储集层，才有工业价值。

在碳酸盐岩储集层中，这种一般规律却被打破了。因为极其有效的孔隙度-渗透率-裂隙(剪切褶皱作用)关系，使得仅4~6%这样小的孔隙度也能维持工业性生产。

孔隙度在很大程度上取决于颗粒表面结构、圆度以及粒度的均一性。颗粒球度越差，孔隙度越高。因此不能指望球状颗粒会有最大的孔隙度。

沉积以后，岩石颗粒之间的胶结作用和压实作用也是很重要的。当粘土微粒、粉砂质胶结物和泥质作为储集岩沉积组成的一部分时，则有效孔隙度变差。粘土在正常潮湿状态下比在干燥状态下的体积要大许多倍。在这种膨胀条件下，粘土与粉砂一起充填了孔隙，从而降低了潜在储集岩的有效孔隙度。

由于孔隙度的现场测量是用干燥的样品进行的，故孔隙度要比实际的大一些。因为原先膨胀的粘土业已收缩。只能用再造的方法来测量，因粘土物质膨胀而造成的孔隙度的降低。这种方法是将岩石样品放置在可进行特殊测量的自然环境条件中。?

单个孔隙可以象一个毛细管；或者是晶簇充填的晶洞；或者呈不规则的、向不渗透胶结物尖灭的羽状撒开空隙。还可能是薄的晶间透镜状裂隙，其宽度比厚度要大50至100倍或更多。孔隙的壁可以由洁净的石英、燧石、方解石或白云石组成，或者是被粘土矿物颗粒及板状副矿物或围岩碎块所包裹而成的壳。〔2〕

环绕每个孔隙空间的颗粒表面积主要与颗粒的变大或变小成反比变化，可以变得较大或较小。据估计，在砂岩中，或者是在直径为0.23毫米的中到细砂呈菱面体状堆集的情况下，每英亩·英尺体积砂粒的表面积大约有5000英亩(约16404.2平方米/立方

米)。这对研究和认识诸如润湿性、吸附作用、毛细管作用、可溶性及自由表面能等储集层现象是重要的。〔3〕

孔隙格局的弯曲程度称为“弯曲度”，它是通过连接两个孔隙的距离和两个孔隙之间直线距离的比值确定的。〔4〕

应用下列数学公式可表达上述关系：

孔隙体积 = 总体积 - 颗粒体积

$$\text{总孔隙度的百分率} = 100 \times \frac{\text{总体积} - \text{颗粒体积}}{\text{总体积}} \quad (1)$$

$$\text{有效孔隙度的百分率} = 100 \times \frac{\text{连通孔隙体积}}{\text{总体积}} \quad (2)$$

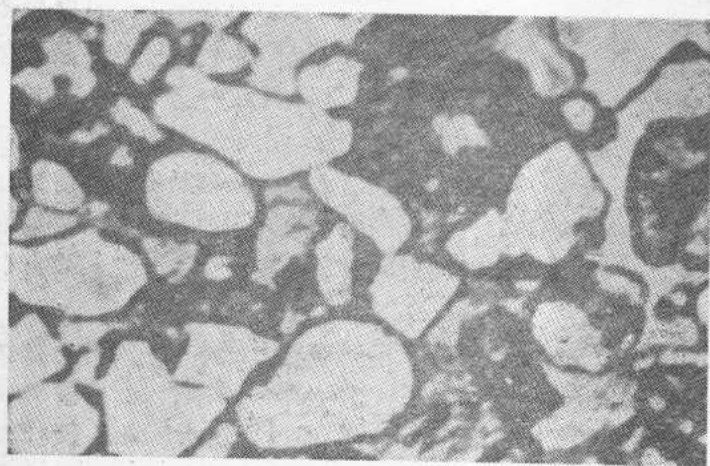
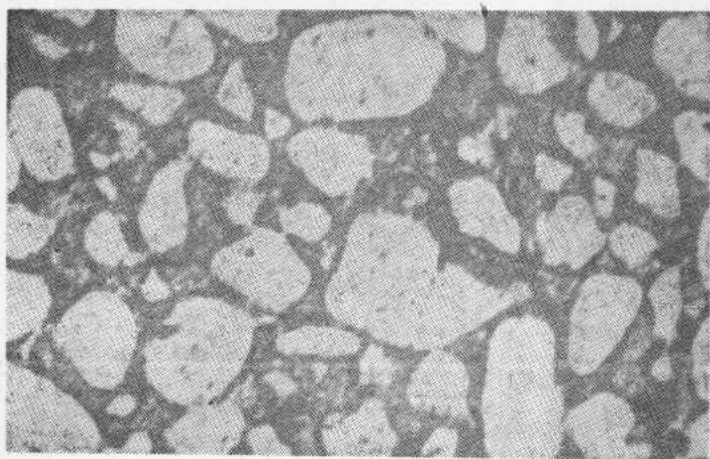
在(1)式中，颗粒体积是决定的因素；而在(2)式中，孔隙体积是决定因素。总孔隙度不是生产潜力的标志，因为一些孔隙空间可能被隔离而不与其它空隙相连通。在岩芯分析中，对岩屑或整个岩芯所测得的孔隙空间，即连通的孔隙体积，便是样品的有效孔隙，因而也最有意义。

“针尖状孔隙”是一种描述性术语，用于具有只能用显微镜才能辨认的细小孤立孔隙的岩石。白垩和某些白云岩典型地具有这种特征，并呈现很均匀、很规则排列的沉积结构。当这些孔隙中有石油充填时，在紫外线辐射下很容易观察到孔隙空间的大小和均一性。

图版 1-1 到 1-4 展示了不同地层的薄片放大照片。将奥陶系的 St. Peter 砂岩同宾夕法尼亚系的 Morrow 砂岩相比较，如图版 1-1 所示。令人惊讶的是：两组地层岩石的粒级相似，但孔隙度却不相似。胶结物在孔隙空间和渗透性(裂缝除外)的分布上都起着重要的作用。

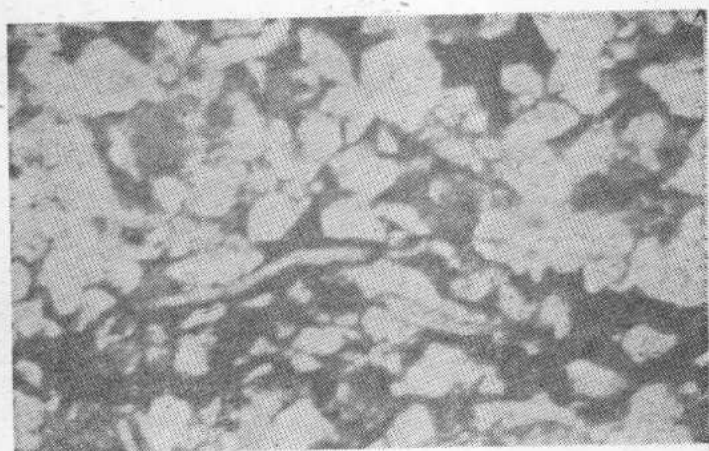
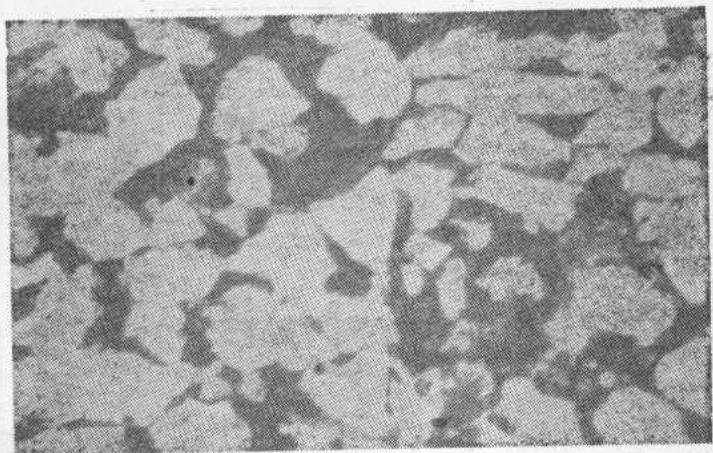
两个渐新世的 Frio 砂岩(图版 1-2)具有极相似的孔隙度，但渗透率却截然不同。这是由于分选作用和基质含量不同所致。

图版 1-3 比较了孔隙度和渗透率均有很大差别的两种砂岩。图版 1-4 显示碳酸盐岩中渗透率的较大变化。



图版 1-1 颗粒大小相似而孔隙度不同的砂岩

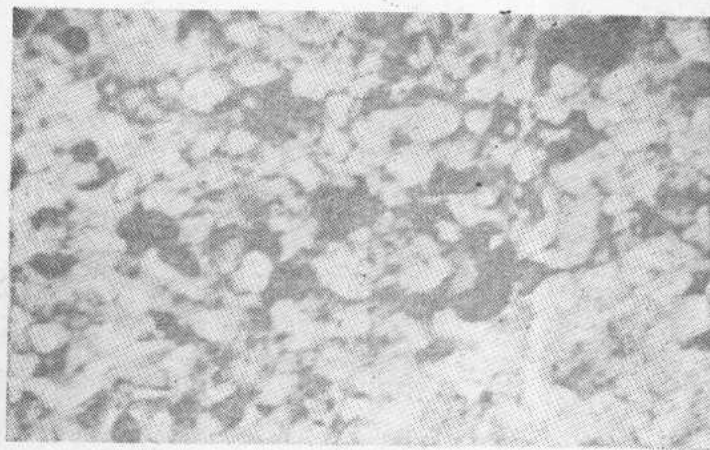
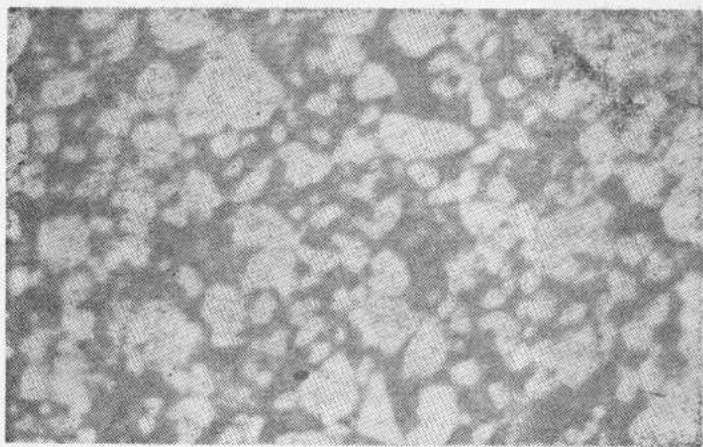
上图：衣阿华州Webster县奥陶系St. Peter砂岩。深度1200英尺(366米)，渗透率2110毫达西，孔隙度28.4%，磨圆很好的颗粒具极少胶结物。放大50倍
 下图：俄克拉何马州Beaver县宾夕法尼亚系Morrow砂岩。深度7400英尺(2256米)，孔隙度5.0%。碳酸盐胶结物几乎填满了粒间孔隙空间。围绕石英颗粒的暗色轮廓表示石英为碳酸盐所置换。放大50倍



图版 1-2 同时代的孔隙度相近而渗透率不同的两种砂岩

上图：路易斯安那州南部渐新统 Frio 砂岩。深度 11500 英尺 (3505 米)，渗透率 2100 毫达西，孔隙度 28.5%，分选好的次棱角状颗粒，洁净的孔隙中只有极少的胶结物。放大 50 倍

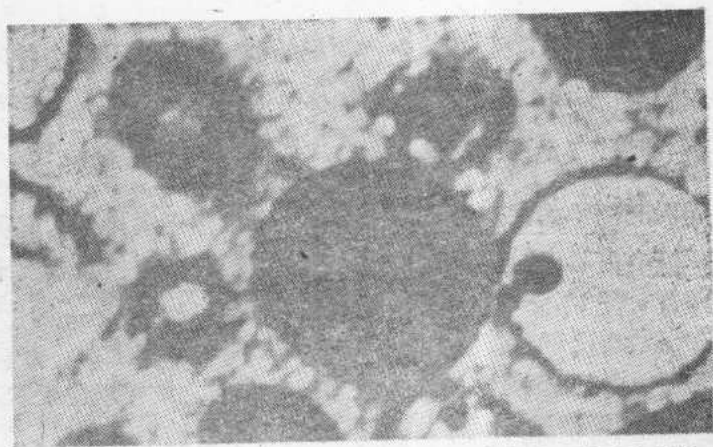
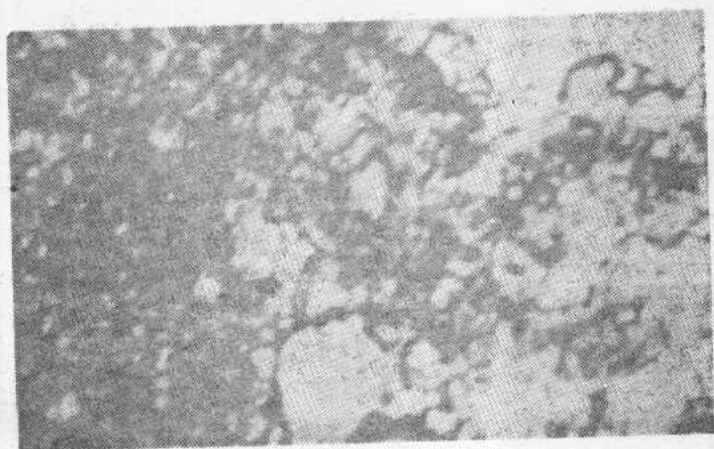
下图：路易斯安那州南部渐新统 Frio 砂岩。深度 11480 英尺 (3499 米)，渗透率 160 毫达西，孔隙度 25.8%。分选中等，具一薄的泥质条带，其中有线状排列的云母片。粒间存在着一些棕色粉砂和粘土级矿物。放大 50 倍



图版 1-3 孔隙度和渗透率都有很大差别的两种砂岩

上图：南路易斯安那州渐新统Frio砂岩。深度11450英尺(3490米)，渗透率0.3毫达西，孔隙度13.9%，棱角状颗粒、分选差的砂岩，粒间有许多棕色的粉砂和粘土级矿物。放大50倍

下图：得克萨斯州 Frio 县，上白垩统Navarro砂岩，深度3100英尺(945米)，渗透率11毫达西，孔隙度30.4%，有大量的棕色粉砂和粘土级矿物，许多粘土呈膨胀型，孔隙很小。放大50倍



图版 1-4 孔隙度相似而渗透率有很大变化的两种碳酸盐岩

上图：俄亥俄州Morrow县寒武系 Trempealeau 组，渗透率840 毫达西，孔隙度11.8%，深度3000英尺(915米)，白云岩具溶蚀空洞，并存在不明显的晶间孔隙，致使岩层的孔隙大小和几何形态都有很大变化。放大50倍

下图：堪萨斯州Barton县宾夕法尼亚系的Lansing-Kansas City 组，深度3350英尺(1021米)，渗透率0.05毫达西，孔隙度10.1%，具有较好孔隙度的鲕粒状和负鲕粒石灰岩，其渗透率很低。放大50倍

在实验室确定颗粒体积，常用的另一公式为：

$$\text{颗粒体积} = \frac{\text{干岩样的重量} - \text{浸入液体中的岩样重量}}{\text{饱和剂密度}} \quad ?$$

这个公式在现场难以应用。误差是由于孔隙空间捕获了一定量的空气所造成的。捕获空气的量取决于颗粒的方位和粒度。

用溶剂清洗样品前后，应对岩芯进行显微镜分析。有时，在清洗过程中，由于破坏了岩石的自然表面而增加了孔隙空间，例如某些白云岩针孔状孔隙空间被石盐所充填。在样品上加水会极大地改变样品的孔隙度。

1.2 颗粒排列方位

当遇到交错层理和递变层理时，岩芯分析就会出现一些问题。应该调整采样密度，以适应这种沉积变化及其差异。岩石基质中颗粒排列的方位有助于确定碎屑沉积物中孔隙空间的大小和方位。

确定碳酸盐沉积物孔隙空间格局的规模和成因是一个特殊的问题，因为化学溶解作用和断裂作用(图1-1)对碳酸盐岩的物质组成、岩石内普通的重结晶和交代作用都起着非常重要的作用。图1-2表示了石灰岩的各种孔隙类型。

碎屑沉积物是以颗粒在最稳定的方向上作定向排列而沉积的这就是说，页岩中的片状颗粒将平行于层理面，而棱角状或半圆状颗粒将平行于沉积物沉积时的水流方向。

在正常情况下，颗粒较大、较重的一端将指向上游，并且楔入其它颗粒之间。颗粒在重力方向和运动方向之间寻求稳定状态，结果，对层理面来讲，水平方向渗透率比垂向渗透率既大又均匀。

更难了解的是由于褶皱、断裂和塑性形变所引起的岩石孔隙度和渗透率的变化。剪切和挠曲褶皱这两种基本构造类型，影响岩石对流体的吸收性和传导性。

剪切作用在碳酸盐岩地层中很普遍，并由压缩、拉伸和扭动作用而形成垂直裂隙。碳酸盐岩极少有能使岩层弯曲的软弱层面。挠曲褶皱，或普通褶皱，通常出现在碎屑岩中。碎屑岩的层理面

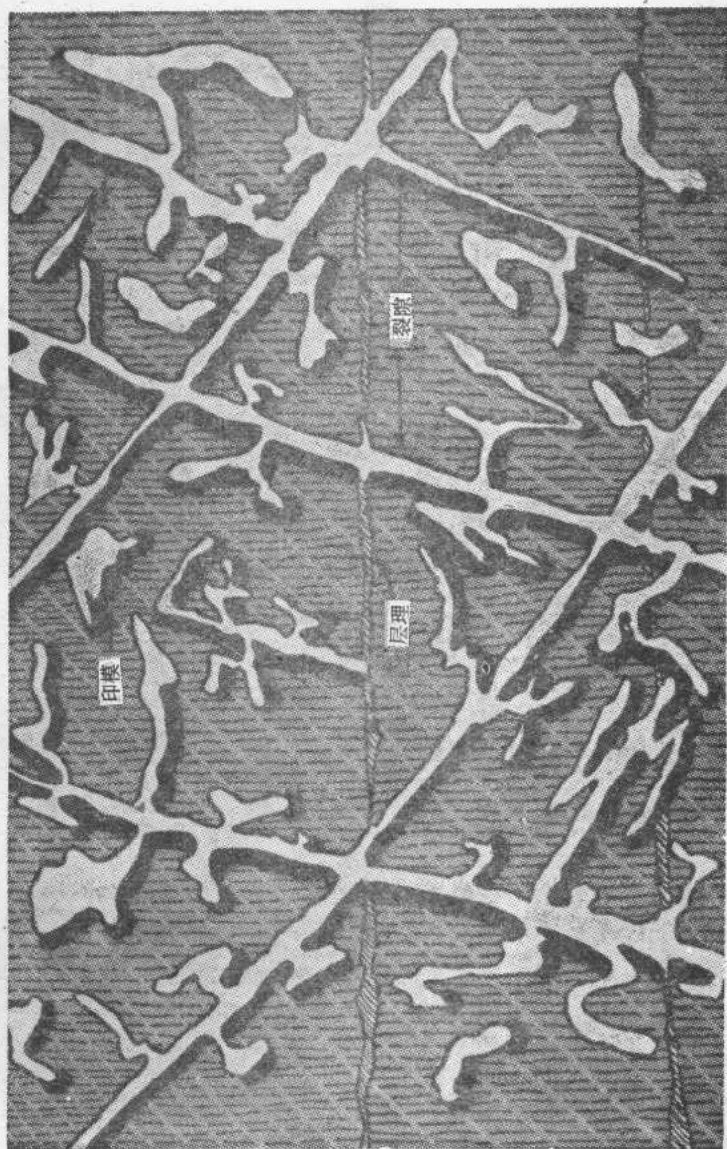


图 1-1 裂隙如何促使渗透率增加的理想化剖面
溶液通过时，溶解通道周围的岩石并促使裂隙扩大，这些裂隙连接了原来分隔的空洞和孔隙 (From
(Levorsen, A.I., "Geology of Petroleum", second edition)

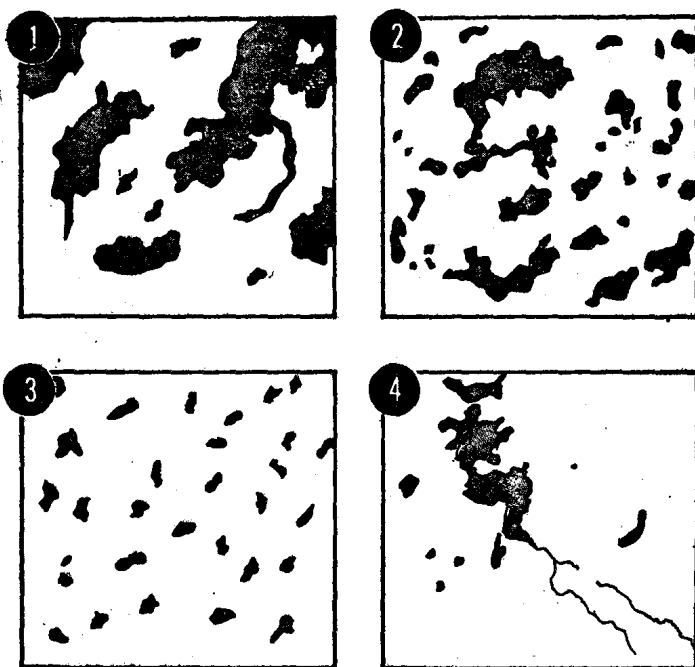


图 1-2 典型的石灰岩孔隙

1—晶洞孔隙；2—原生孔隙；3—原生针孔状孔隙；4—具裂隙的孤立原生孔隙

是地层的软弱部分，因而岩层沿着这些滑动面或滑移面发生弯曲或挠曲。

断层作用、破裂作用和褶皱作用破坏了岩石与流体在沉积期间所建立的平衡关系。它们通过岩块的运动和颗粒轴的移动，间接地引起沉积组构的变化。这有助于诱发或阻止隙间流体的运移。由施加在沉积物上的应力和应变，产生重结晶作用，有时还发生压碎作用。

孔隙空间中的溶液在很大程度上控制了沉积物内应力-应变和裂隙的关系。对石灰岩的试验表明：随着与围限颗粒压力有关的孔隙流体压力的升高，柔性岩层变得较脆。大于0.47 磅/英寸²/