

石油天然气总公司

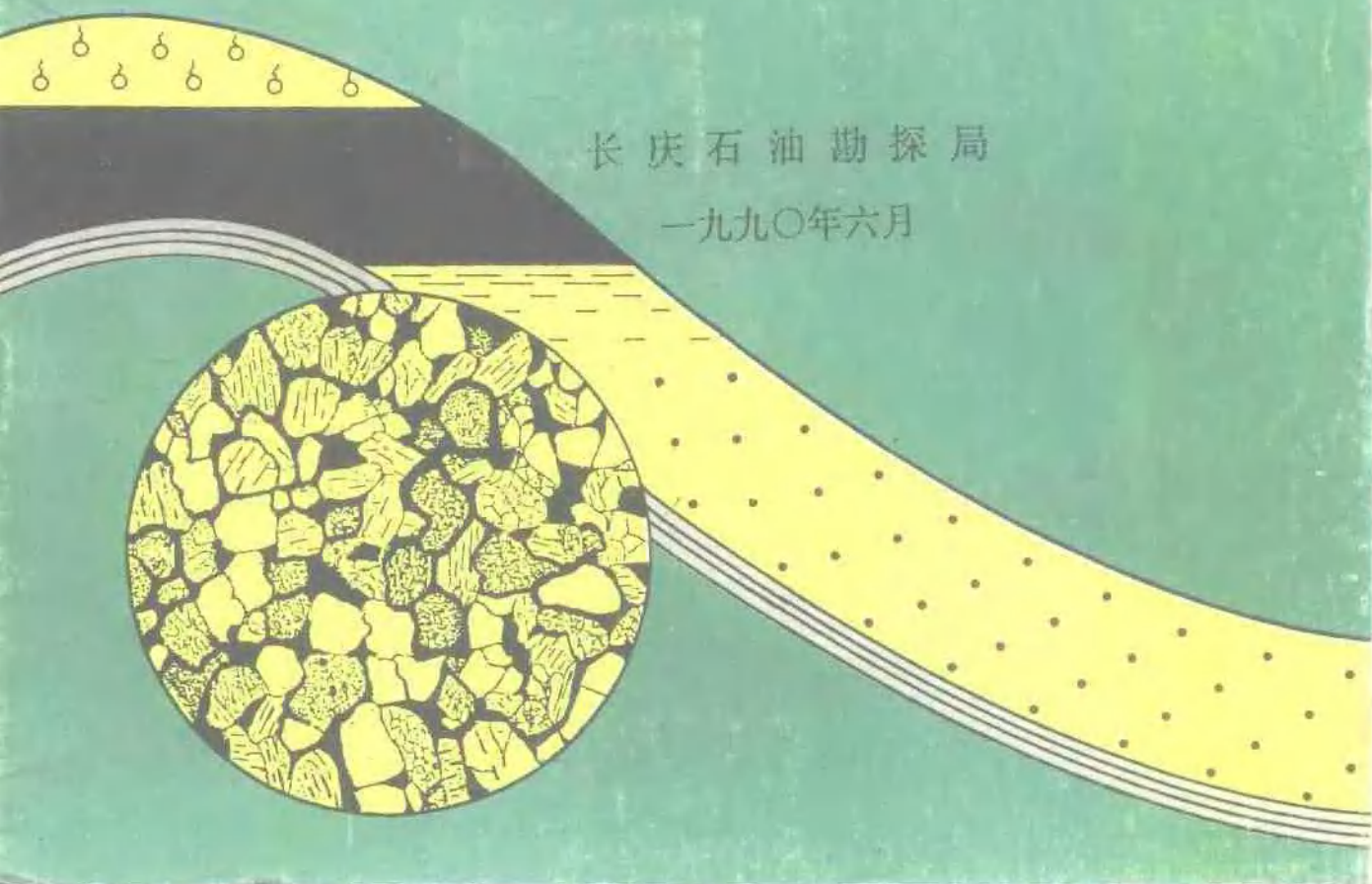
课题编号

“七·五”期间重点攻关项目

油气储集砂岩孔隙测量方法

长庆石油勘探局

一九九〇年六月

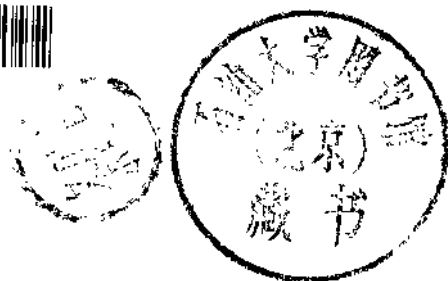


登录号	085727
分类号	TE15
种次号	041

油气储集砂岩孔隙测量方法



200431782



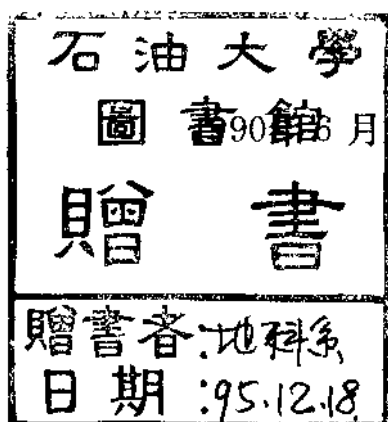
项目承担单位：长庆石油勘探局

编写人：郑瑞林

5975/01



00776905



目 录

前 言

- 一、油气储集砂岩孔隙成因类型的测量
- 二、储集砂岩原始孔隙度的恢复
- 三、储集砂岩成岩作用及孔隙演化数据的统计
- 四、储集砂岩压实后粒间余孔的恢复
- 五、评价储集砂岩孔隙参数的测量

前 言

八十年代以来石油工业在持续稳定增长的同时, 油气碎屑岩储层的研究亦取得了卓有成效的进展, 特别是成岩作用与其相关的孔隙演化史的研究以及储层评价的研究, 都不断引向深入。成岩作用及孔隙演化史的研究已成为储层概念模型研究的内容之一, 而储层评价的研究又是油藏地质模型的基础, 这些研究都已由传统的概念描述向着科学性定量化发展, 因此孔隙的定量是研究储层不可缺少的重要手段。

本文是我们“六五”、“七五”期间研究储集砂岩成岩作用与孔隙演化史以及储层评价时对孔隙定量化方面做了一些探索, 并应用于生产实践, 效果较为明显, 由此逐步形成了一套方法, 但由于水平所限, 不妥之处敬请指正。

孔隙定量研究, 是利用岩石铸体薄片在显微镜下测量各种成因类型的孔隙, 定量地追索储集砂岩孔隙演化史以及定量地描述孔隙成因类型、孔径大小、面孔率高低、孔隙分选性等二维空间的分布特征及其变化, 从而对储层预测及评价提供直观的定量数据。

测量孔隙使用的仪器设备有偏光显微镜、机械台、计数器、数字图相分析仪铸体薄片要求垂直层面, 面积 $>15\text{mm} \times 15\text{mm}$, 厚度 $0.03-0.04\text{mm}$

一、油气储集砂岩孔隙类型的测量

在孔隙测量之前, 首先应识别孔隙类型, 从成岩作用及孔隙演化的观点出发将储集砂岩的孔隙采用成因分类, 可分为原生孔隙、次生孔隙、混合成因孔隙(原生与次生叠加成因)以及微孔隙等。

(一) 原生孔隙

指砂岩中碎屑颗粒之间的孔隙, 依据其成因及成岩作用差异, 可分为正常粒间孔、残余粒间孔。

1. 正常粒间孔: 指砂岩埋藏后, 经机械压实作用, 碎屑颗粒之间未被杂基充填的孔隙空间。其成因受碎屑物质成分、粒度、分选、园球度、颗粒排列方位和杂基的填集等因素控制, 一般具较规则的几何形态, 多分布于成岩早期的砂岩中, 东濮凹陷东营组及沙河街组, 鄂尔多斯盆地白垩系砂岩中有这种未被胶结的原生粒间孔。

2. 残余粒间孔: 自生矿物从孔隙溶液中析出, 并沉淀于原生粒间孔的孔壁

上而残留的原生孔隙，一般孔隙几何形态也较规则，多呈三角形、多边形，大小较均匀，常见的有两种类型，一是石英、长石自生加大后保存下来的残余粒间孔隙壁平直，多分布于富石英、长石砂岩中；二是成岩早期的自生粘土矿物（绿泥石、伊蒙混层矿物、伊利石）环边式胶结，保留的残余粒间孔，这些粘土矿物构成孔隙衬里，孔壁沿颗粒呈圆缓弧形，多分布于富长石、岩屑砂岩中。

（二）次生孔隙

识别孔隙成因是识别次生孔隙的关键，有时在无裂隙贯通的情况下，次生孔隙与原生孔隙常常不易区分，其形态和分布比原生孔隙更无规律，因此次生孔隙识别要籍助于多方面的证据，Schmidt和Mcoonad（1979）提出识别次生孔隙的岩石学标准有：①部分溶解②铸模③不均一填集④超粒孔⑤伸长状孔隙⑥溶蚀的颗粒⑦组份内孔隙⑧破碎的颗粒；Shanmugam（1984）又提出了20个次生孔隙识别标准见图1，这些标准可综合判明，如颗粒骨架微弱溶蚀→溶蚀颗粒—残余颗粒→残余粒土边缘→超粒孔等，总的依据其溶蚀组分及溶蚀程度的差异可归纳以下几种类溶蚀型次生孔隙。

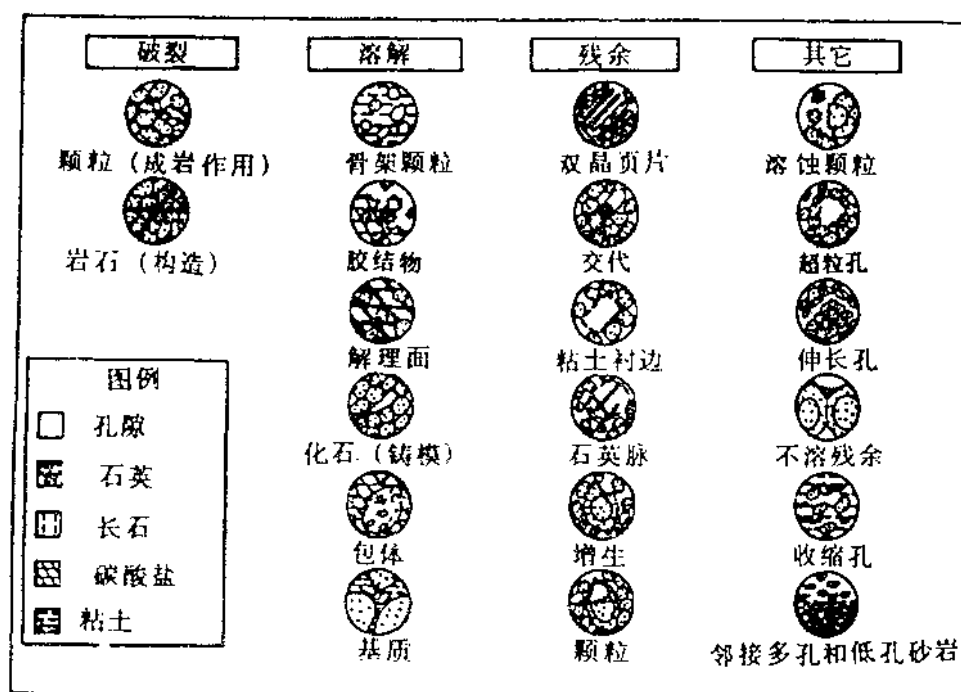


图1 砂岩中次生孔隙的识别标准

1. 粒间溶蚀孔

是骨架颗粒间胶结物或杂基经溶解，仅残留少量粘土痕迹或全部消失，使粒间孔重新开启，而形成的次生粒间孔隙，由于成岩阶段的溶解、胶结、交代反复进行，若未保留少量溶蚀残余，这类孔隙与残余粒间孔常常不易区分。

2. 粒内溶蚀孔：是最常见的一种次生孔隙类型。一种是不稳定长石沿解理缝、双晶缝进行溶解，并逐渐扩大而成，呈栅状、蜂窝状、拉长的各种不规则状另一种是硅质岩、火山岩、变质岩、粉砂岩等岩屑以及鲕粒、生物骨屑等颗粒内的不稳定组分选择性溶解而成，形状不规则，大小不一。

3. 铸模孔：粒内孔进一步发展，使其溶解消失均可形成铸模孔，一些长石火山岩屑或某种重矿物全部溶解，仅留下包覆这些颗粒的粘土套模所显示出的颗粒形貌。有些胶结物、交代矿物也可形成铸模孔。

4. 自生胶结物内溶孔：常见的自生胶结物有浊沸石、方解石、白云石、硬石膏、石盐以及粘土矿物等的溶蚀孔，在溶蚀作用早期沿胶结物与颗粒接触缝形成弯曲窄条状贴边孔隙，进一步发展沿胶结物解理缝溶蚀，形成筛网状、蜂窝状孔隙。

除此还有一些非溶蚀次生孔隙

5. 粘土矿物收缩孔：伊蒙混层粘土矿物或伊利石经压实失水形成的收缩缝有时经溶蚀扩大，又称收缩溶蚀孔，形状多呈不规则长条形。

6. 自生矿物晶间孔：一些自生矿物如高岭石、石英、沸石、白云石、石盐等的晶体间或集合体间所形成的晶间小孔。在煤系地层砂岩中，高岭石晶间孔分布很广泛，是由书页状蠕虫状高岭石集合体间的细小孔隙构成，当晶间孔发育时在100倍镜下观察，集合体间的小孔相互连通，构成微细的弯弯曲曲的细小孔喉，孔径由5—10 μm ，最大可达20 μm ，高岭石晶间孔可构成天然气的储集空间

7. 微裂缝：可分成岩裂缝及构造裂缝，脆性或解理发育的颗粒如长石、云母等经压实沿解理或双晶破碎产生的粒内微裂隙；砂岩埋藏成岩后又经受构造应力作用而产生切穿岩石的裂隙，常常沿颗粒与填隙物接触而新开，形成围绕颗粒分布的微裂隙。

（三）混合成因粒间孔（复合型粒间孔或溶蚀扩大粒间孔）

是在原生粒间孔基础上进一步溶蚀扩大，构成原生与次生共同组合的孔隙，孔壁多具港湾状溶蚀标记，有时形成超粒孔，或几个扩大粒间孔连通形成不规则混合型带状大孔隙。

(四) 微孔隙

是指孔径 $<1\mu\text{m}$ 的微孔，广泛分布于各种成因的粘土基质中，只能借助扫描电镜下观察和测定，铸体薄片在偏光镜下观察，微孔隙也具溶蚀现象，成为可见微孔。粘土矿物绝对含量较高的砂岩，由于微孔隙的影响，虽有较高的孔隙度，但砂岩的渗透率却很低，微孔隙可成为天然气的储集空间。

在准确鉴别各种成因类型孔隙后，即可用表1的各项内容进行分类测量，由机械台控制铸体薄片，从薄片下部逐渐向上部一行行等间距推进，每行由左向右以点计法统计，统计点数视孔径大小及分布均匀程度而定，一般300—500个点。

孔隙成因类型统计表

表1

孔 隙 类 型 %												面 孔 率 %	微 孔 隙 %	主要 孔隙 类型	物 性	
原生孔隙			次 生 孔 隙												孔 隙 度 %	渗 透 率
正常粒间孔	残余粒间孔	合 计	粒间溶蚀孔	粒内溶蚀孔	铸 模 孔	方解石溶孔	浊沸石溶孔	收 缩 孔	晶 间 孔	微 裂 隙	合 计					

由计数器直接计算出各种成因类型孔隙的百分含量。实践证明，由于微孔隙的存在，实测面孔率总是低于物性孔隙度，基质粘土含量越高，实测面孔率与物性孔隙度差距越大。

表1中 面孔率=各种成因类型孔隙总和

微孔隙=物性孔隙度—面孔率

若晶间孔很细小，如粘土矿物高岭石晶间孔，不能用点计法统计时，可在常规镜下估计（大致度量）晶间孔占高岭石面积的百分含量，也可在扫描电镜下量出晶间孔占高岭石面积的百分数，以高岭石含量乘以此孔隙面积百分数即可求得晶间孔的百分含量。

二、储集砂岩原始孔隙度的恢复

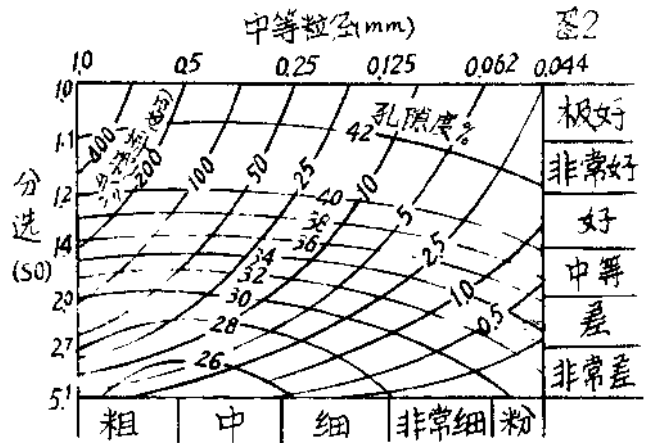
众所周知碎屑岩的原始孔隙度，是由碎屑物质沉积后，未经压实作用而保存于碎屑质点间的孔隙，实际上它形成于沉积期。Graton和Fraser（1935）指出，等大球体最紧密的堆积方式是菱面体，孔隙度为25%；最疏松的堆积方式是立方体，孔隙度为47.6%，但自然界的沉积物不会具备这样理想的条件，因为碎屑颗粒不可能是等大的，也不可能均为球体而是大小不一的复杂多样形体，因此砂岩

的原始孔隙度自然也不尽完全相同。

为了研究压实作用导致的原始孔隙度的降低及其各种成岩作用对孔隙演化的影响，首先应恢复砂岩的原始孔隙度。我们的实践证明，目前最接近实际和最实用的方法是Berad和Weyl（1973）研究的得克萨斯Brazos河的天然砂的孔隙度和渗透率，研究结果指出砂岩的原始孔隙度几乎完全依赖于分选（Trask分选系数），而与粒度无多大关系，而原始渗透率既是粒度又是分选的函数，当Trask分选系数为1.1时，沉积砂原始孔隙度为42%，当Trask分选系数为4.2时，沉积砂原始孔隙度仅28%，并用他们的测量值制作出相应图版（见图2）。由此可见，只要求出每一砂岩的Trask分选系数，即可由此图版查出相应的原始孔隙度值。采用这一方法，所求鄂尔多斯盆地石炭系太原组—二叠系山西组、石盒子组天然气储集砂岩的原始孔隙度为35.2—40.1%；三叠系延长统低渗透储集砂岩原始孔隙度由34—36%。

三、成岩作用及孔隙演化数据的统计

在研究成岩作用所导致的孔隙演化以及储集空间类型的过程中，通过我们实践，建立了如表2各项统计内容，其中着重说明的是，需区分陆源杂基、自生胶结物与交代矿物，由于沉积期水动力条件影响，陆源杂基多呈不均一填集产状，即较细粒处杂基填集多，较粗粒处杂基分布少；自生胶结物由于沉淀于成岩作用的物理化学环境，所以它往往是一些单矿物，并且很洁净如自生石英、长石以及绿泥石、伊蒙混层、伊利石等粘土矿物构成的环边式胶结；交代矿物多具交代残余及假像，如表2分别所示。表2各项内容整体上共同用点计法统计，依据研究内容的具体需要，直接用计数器任意分组统计百分率：①陆源碎屑及填隙物为一百分率；②孔隙类型统计一百分率；③杂基为一百分率；④胶结物及交代矿物为一百分率；⑤陆源碎屑、填隙物以及孔隙类型作为同一整体统计百分率等等。



成岩作用及孔隙演化数据统计表

表 2

编 号 深 度 (m)	陆 源 碎 屑 %																						
	石英类			长石类			岩浆岩			变 质 岩				沉积岩			其 它			合			
	石 英	燧 石	石 英 岩	正 长 石	微 斜 长 石	斜 长 石	花 岗 岩	喷 发 岩	隐 晶 岩	高 变 岩	片 岩	千 枚 岩	变 质 砂 岩	板 岩	粉 砂 岩	泥 岩	白 云 岩	黑 云 母	白 云 母	绿 泥 石	其 它	计	
填 隙 物 %																							
陆源杂基			自 生 胶 结 物										交 代 矿 物										合
凝 灰 质	蒙 皂 石		混 层 粘 土	水 云 母	绿 泥 石	高 岭 石	方 解 石	白 云 石	浊 沸 石	硬 石 膏		合 计	浊 沸 石	硬 石 膏	黄 铁 矿	铁 方 解 石	铁 白 云 石	菱 铁 矿	钛 矿			合 计	
孔 隙 类 型 %													面 孔 率 %	微 孔 隙 %	主 要 孔 隙 类 型	物 性							
原生孔隙			次 生 孔 隙													孔	渗						
正 常 粒 间 孔	残 余 粒 间 孔	合 计	粒 间 溶 蚀 孔	粒 内 溶 蚀 孔	铸 模 孔	方 解 石 溶 孔	浊 沸 石 溶 孔	收 缩 孔	晶 间 孔	微 裂 隙		合 计				隙 度 %	透 率 %						
粒 度 'mm'				分 选		圆 度		胶 结 类 型					定 名										
描 述																							

注：(1) 石英岩物理化学性质与石英相近，由成岩观点出发，故放入石英栏内；

(2) 表内各项内容，根据研究地区具体情况进行调整增减；(3) 自生胶结物和交代矿物可放入一栏统计。

四、储集砂岩压实后粒间余孔的恢复

为定量地研究成岩过程中原生粒间孔的降低与保存，我们用追索的方法，建立一个孔隙演化过程中过渡性参数，即压实后（胶结前）粒间余孔（见图 2）

压实后粒间余孔 $A = \text{砂岩残余粒间孔 } M + \text{自生胶结物总量 } \sum ci$ （不包括次生孔隙

内胶结物及交代矿物)：压实作用损失的孔隙=原始孔隙度-压实后粒间余孔。以这一方法所恢复的压实后粒间余孔，鄂尔多斯盆地石炭系太原组—二叠系山西组、石盒子组为2—17.1%，三叠系延长组为9.9—17.1；压实后损失的粒间孔，太原组—石盒子组为13—33.2%，延长组为18.9—25%。

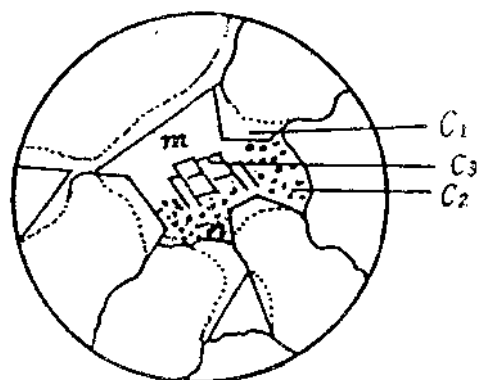


图3 $A = m + \sum c_i$

压实后粒间余孔的意义

1. 压实后粒间余孔的大小，反应压实程度强弱，压实后粒间余孔大，反应压实程度弱，压实后粒间余孔小，反应压实程度强。

2. 压实后粒间余孔的大小，基本可以控制着储集砂岩孔隙演化格局，决定砂岩储集性能的优劣，一般情况下，如果压实后粒间余孔很大，再经胶结、胶代以及溶蚀等一系列成岩改造，仍可保留原生粒间孔，并可形成残余粒间孔高渗透储集砂岩或溶蚀孔隙高渗透储集砂岩；如果压实后粒间余孔很小或者消失，无论经过怎样的成岩改造（无可溶性组份及渗流通道），只能形成低渗透、特低渗透储集砂岩。

五、评价储集砂岩孔隙参数的测量

自然界油气储集砂岩孔隙大小不一，形状各异，分布不均匀，连透性也有很大变化，具有很强的微观非均质特征。除选用孔隙度、渗透率、毛管压力曲线等项目内容对储层进行评价外，其孔隙大小、分布均匀程度、连通情况等也是储层地质模型不可缺少的重要参数。

评价储集砂岩孔隙参数的测量，不采用成因分类，而以薄片粒度为借鉴，将砂岩孔隙大小依次分成若干间距，以使更确切表明砂岩的储集性能及微观非均质程度。利用铸体薄片测量这些大小不一的孔隙，可直观地解释，孔隙大小、分选程度、连通情况与孔隙度、渗透率、毛管压力曲线之间的内在联系，以便更有效地对储层进行评价，更好地描述储层地质模型。

在不具有数字图像分析仪的条件下，通过我们实践，简易适用的方法是线测法，线测法也是等间距平移测线，截取测线所透过的孔径截距，一块铸体薄片可

测两组相互垂直的测线 截距间格长度及计算孔隙参数的公式见表 3，将计算各项参数的公式编好程序，输入微机储存，随时都可使用

表 4 为铸体薄片线测法孔隙统计原始记录

表 5 为铸体薄片线测法孔隙统计报表

表 6、表 7 分别为网络法孔隙统计原始记录及报表。

人工法使用显微镜测量孔隙速度慢，精度低，工作人员操作眼睛易疲倦 现在很多油田备有数字图像分析仪，它具有很强的分辨能力和高速度的计算能力，因此在有条件的情况下，尽可能使用数字图像分析仪。

参考文献

1. 郑瑞林 煤系中石英砂岩成岩作用及孔隙演化
石油勘探与开发 1989,第4期
2. 罗平译 胡瑞忠校 石英次生加大导致砂岩孔隙度减少
四川石油普查 1983年第3期
3. 西北大学地质系编译 碎屑岩的成岩作用
西北大学出版社
4. 袁政文译 姜在兴校 次生孔隙在砂岩成份鉴定中的意义。
国外油气勘探与开发 1987年第1期

表 3

铸体薄片线测法孔隙截距间隔及参数计算公式

截距格	10	10-9	9-8	8-7	7-6	6-5	5-4	4-3	3-2	2-1	、1	累积 总频数 N	最大 截距格数 Lmax	每小 格长度 S (μ)	测线 总长 L (mm)
频数	n ₁	n ₂	n ₃	n ₄	n ₅	n ₆	n ₇	n ₈	n ₉	n ₁₀	n ₁₁				
累积频数	n ₁	n ₁ + n ₂	n ₁ + n ₂ + n ₃								Σ ni				
截距间隔 中值	L ₁	L ₂ 9.5	L ₃ 8.5	L ₄ 7.5	L ₅ 6.5	L ₆ 5.5	L ₇ 4.5	L ₈ 3.5	L ₉ 2.5	L ₁₀ 1.5	L ₁₁ 0.5				
频率Ui (%)	n ₁ /N	n ₂ /N	n ₃ /N	n ₄ /N							n ₁₁ /N				
频率累集Qi (%)	n ₁ /N	n ₁ + n ₂ /N	n ₁ + n ₂ + n ₃ /N								Σ ni/N				

孔隙参数计算公式:

平均孔径 $\bar{L} = \frac{\sum niLis}{N}$

面孔率 $Mt = \frac{\sum niLis}{L \cdot 10^3} \times 100\%$

线密度 $M = \frac{N}{L}$ 次/mm

分选系数 $\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{L} - Lis)^2}{N - 1}}$

最大孔径 $Lmax = L_{11} \cdot S$

铸体薄片线测法孔隙统计原始记录

表 4

井号 标本号 深度 m 放大倍数 1格= 微米 K= md =

截距频数 (格)	>10	10-9	9-8	8-7	7-6	6-5	5-4	4-3	3-2	2-1	<1	测线长 mm
截距频数中值		9.5	8.5	7.5	6.5	5.5	4.5	3.5	2.5	1.5	0.5	
频 数												
累积频数												
频率 U_i (%)												
累积频率 Q_i (%)												

$\bar{L} =$ μ $\delta =$ $M =$ 个/毫米
 $M =$ % 测线总长 L 毫米 $L_{max} =$ μ
 鉴定: 计算: 复算: 日期 年 月 日

铸体薄片线测法孔隙统计报表

表 5

井号 标本号 深度 放大倍数 1格= 微米 K md $\phi =$ %

间 隔 (格)	>10	10-9	9-8	8-7	7-6	6-5	5-4	4-3	3-2	2-1	<1	$\Sigma_i >10$	最大截 距格数
频 率													
累计频率													
频 率 (%)													
累积频率 (%)													
测线总长 $L =$ 毫米				平均孔径 $L =$ 微米				分选系数 $\delta =$					
线密度 $M =$ 个/毫米				面孔率 $M_i =$ %				$L_{max} =$ 微米					

分析者: 计算: 复核: 年 月 日

085727

铸体薄片网格法孔隙统计原始记录

表 6

井号 标本号 深度 放大倍数 1格 = μm^2 $k =$ $\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ $z =$

格 数	个数 %		格 数	个数 %		格 数	个数 %	
0.25			9.0			18.0		
0.5			9.5			18.5		
1.0			10.0			19.0		
1.5			10.5			19.5		
2.0			11.0			20.0		
2.5			11.5			22		
3.0			12.0			24		
3.5			12.5			26		
4.0			13.0			28		
4.5			13.5			30		
5.0			14.0			32		
5.5			14.5			34		
6.0			15.0			36		
6.5			15.5			38		
7.0			16.0			40		
7.5			16.5			42		
8.0			17.0			44		
8.5			17.5			46		
机械台标尺读数:								

鉴定: 计算: 复算: 日期: 年 月 日

085727

铸体薄片网格法孔隙统计报表

表 7

井号	标本号	深度			m			放大倍数			1格= μm^2			K =			$\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$			f =			%				
格	数	0.25	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.5	7	7.5	8	8.5	9	9.5	10	10.5	11	11.5	12	12.5
孔隙面积 μm^2																											
累积面积 μm^2																											
$\frac{\text{孔隙面积}}{\text{网格总面积}} \times \%$																											
累积面积																											
$\frac{\text{累积面积}}{\text{网格总面积}} \times \%$																											
格	数	13	13.5	14	14.5	15	15.5	16	16.5	17	17.5	18	18.5	19	19.5	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38	40	42
孔隙面积 μm^2																											
累积面积 μm^2																											
$\frac{\text{孔隙面积}}{\text{网格总面积}} \times \%$																											
网格总面积																											
$\frac{\text{孔隙面积}}{\text{网格总面积}} \times \%$																											
网格总面积																											
面孔率 $Z/t =$																											

分析

计算

复核

年 月 日

