

— 国外完井技术丛书 —

3

FANG
SHA

防 砂

石油工业出版社

22622

国外完井技术丛书 3

防 砂

C.J. 科伯利 等著

周惟英 等译



00280693



200395768

石油工业出版社

内 容 提 要

油井防砂在完井作业中是非常重要的,它直接关系到油井质量和油井产能。本书收集了12篇有关防砂作业方面的文章,介绍了各种防砂作业的现代应用理论、工艺方法以及现场应用结果等等,对我国油井防砂技术的发展具有指导性意义。本书可供钻井、采油现场技术人员、研究人员及有关院校师生参考。

国外完井技术丛书 3

防 砂

C.J.科伯利 等著

周惟英 等译

*

石油工业出版社出版

(北京安定门外外馆东后街甲36号)

地质印刷厂排版

北京顺义燕华营印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

*

787×1092毫米 32开本 8印张 175千字 印1—1,680

1985年8月北京第1版 1985年8月北京第1次印刷

书号: 15037·2531 定价: 1.60元

出 版 说 明

美国石油工程学会根据其历届会议所发表的论文，按照内容收集成册，出版了一套专论丛书。其中完井技术方面有三本 (SPE REPRINT SERIES WELL COMPLETION, No.5 、 5a-I 、 5a-II)。结合我国石油工业的需要，为了方便读者，我们根据这三本书的内容，分册翻译出版了这套《国外完井技术丛书》，其中包括：

1. 完井液
 2. 固井
 3. 防砂
 4. 完井酸化压裂
 5. 射孔
 6. 完井设备
 7. 完井评价
-

目 录

砾石的选择及砾石充填需要考虑的一些问题	1
成功的高产油井和水井防砂设计	28
多级注入封隔器对塑料固砂剂注入分布的控制	44
砂拱的稳定性是防砂的关键	63
砾石充填设计的依据	88
浓砾石浆充填	110
美国-墨西哥湾海岸完井使用水基粘性砾石充填系列 获得高产能	134
固结砾石填充防砂用的“含水环氧”乳胶涂覆砾石 系统的进展和应用	141
斜井砾石充填设计	163
一种新型的低粘度环氧树脂固砂工艺	183
根据力学性质测井数据估算地层强度	202
南路易斯安那地区的固砂经验	234

砾石的选择及砾石充填需要考虑的一些问题

C. J. Coberly 等著 周惟英 译

随原油产出的砂子是造成泵、油管、气锚及其他设备磨损，进而导致停产的主要原因之一。如果能从根本上阻止砂子随原油流出，则可以大大延长上述设备的寿命，从而降低生产成本。对于某些油田，只要合理选择带眼尾管上的孔眼的大小便可减少甚至避免出砂带来的麻烦。但是，在砂粒细、地层压实性差、井底压力低等条件下，仅靠控制带眼尾管上孔眼的大小是无法解决出砂问题的。在这种情况下，砾石充填似乎是个既实用而又简单的解决办法。

砾石充填，尤其是水井的砾石充填，并不是什么新技术，但砾石的选择和充填方法一直未得到足够的重视，因此，充填效果往往不佳。本文将讨论砾石的选择及其充填方法，以期说明砾石充填有其理论根据，并能成为解决长期困扰石油工业的难题的切实可行的方法。本文将从三个方面进行分析：（1）合理选择砾石粒度，以阻止砂子从地层内流出。（2）正确的砾石充填方法。（3）选择合适的带眼尾管，以挡住砾石。

尾管的选择

前面提到的第三个方面，即选择合适的带眼尾管，是最容易解决的问题。看来应该选择能挡住所有砾石的带眼尾

管，以便使砾石滤层永远保持完整无缺。这就要求带眼尾管上开的槽子的宽度等于或小于砾石滤层中最小砾石的直径。如果槽子宽度为砾石滤层内粒度正态分布率为10%的砾石粒径的两倍，尽管其阻挡砾石的能力还能符合要求，但在形成槽子桥塞的过程中流出的少量砾石却有可能足以造成砾石滤层的下沉，从而使地层内的砂子大量流出而宣告砾石充填作业失败。

砾石的选择

用钢球做的试验

为了挡住某一地层内的砂子，选择合适的砾石粒度是个需要进行较为深入研究的问题。假定在理想情况下，砾石滤层由直径相等的球粒组成，发现球粒有两种可能的排列方式：一种为六角形（见图1），另一种为四方形（见图2）。将钢球随意倒入玻璃杯内，若玻璃杯的尺寸大大超过钢球的直

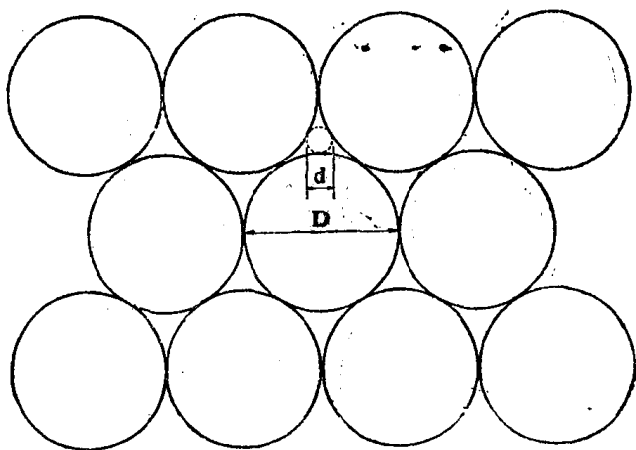


图 1 呈六角形排列的球粒($d = 0.1547D$)

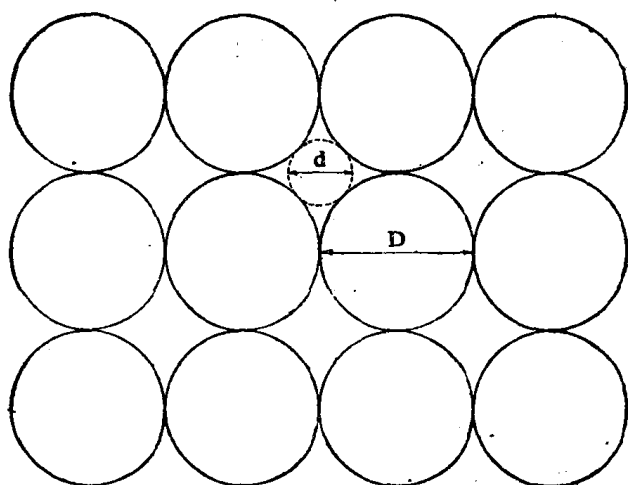


图 2 呈方形排列的球粒($d = 0.4142D$)

径，则竖直方向和水平方向都是六角形排列占优势。即便某一层为方形排列，其后面的层间孔隙最终还是会导致六角形排列。由图 1 可见，桥塞地层砂子的孔隙形状是球粒间的孔隙呈三角形。因此可利用球粒间孔隙的内接圆直径作为选择防砂砾石的依据。若钢球呈六角形排列，球粒间孔隙的内接圆直径为 $0.1547D$ ；若钢球呈方形排列，则其孔隙的内接圆直径为 $0.4142D$ 。 D 为钢球的直径。

为确定在理想条件下，需要被桥塞的球粒间孔隙的大小及形状与桥塞颗粒粒径之间的关系，曾利用钢球做过大量试验。首先研究了圆孔情况，发现若圆孔直径不超过钢球直径的三倍，桥塞效果很好；在直径为钢球直径的 3.25 倍的圆孔上也可以形成桥塞，但很不稳定；若圆孔直径大于钢球直径的 3.25 倍，则很难形成桥塞。

为了研究地层砂子在砾石颗粒之间孔隙内的桥塞情况，

曾用钢球做过一些试验：使钢球呈六角形和四方形排列堆在一起，然后加入若干直径较小的球粒，小球粒便会在大球粒之间的三角形孔隙和四方形孔隙内形成桥塞。曾用小球（代表地层内的砂粒）和大球（代表砾石滤层内的砾石颗粒）的多种组合进行过试验，试验结果见表1。由表1可得

表1 地层砂在砾石颗粒之间的孔隙内的桥塞情况(小钢球与大钢球)

Δ ①	六角形排列				四方形排列			
	极限桥塞①		稳定桥塞		极限桥塞		稳定桥塞	
	D	R	D	R	D	R	D	R
1/16	1②	2.47						
	1 1/16	2.63	13/16	2.02	3/8	2.49	11/32	2.27
3/32	1 1/2	2.48	1 1/4	2.06	9/16	2.49	1/2	2.27
1/8	1 7/8③	2.32	1 5/8	2.02	3/4	2.48	11/16	2.27

① 容器的大小和小球所在的深度对极限桥塞情况有一定影响。3/32英寸和1/8英寸小球的试验结果与1/16英寸小球所得试验结果相同的情况不是太多。表中D：大钢球(代表砾石)直径，英寸； Δ ：小钢球(代表地层砂)直径，英寸；R：大钢球间孔隙的内接圆直径。

② 偶而形成桥塞。

③ 很难形成桥塞。

出如下结论：

1. 若大钢球的排列形式为六角形，且球粒间孔隙的内接圆直径不超过小钢球直径的2倍，则大钢球间的孔隙内可以形成稳定的桥塞。

2. 若大钢球的排列形式为四方形，且球粒间孔隙的内接圆直径不超过小钢球直径的2 1/4倍，则大钢球间的孔隙内可以形成稳定的桥塞。

3. 对呈六角形和四方形两种形式排列的大钢球,只要球粒间孔隙的内接圆直径不超过小钢球直径的 $2\frac{1}{2}$ 倍,都可以形成桥塞。但这种桥塞非常不稳定,没有实际意义。

用经筛分的砂子做的试验

用钢球做过试验之后,又对经过筛分的砂粒的桥塞作用进行了研究。各次试验所用的砂子都是 Monterey 海滨砂。这种砂的砂粒呈多角形,尖角处磨得很圆滑,但较大的砂粒并不是很接近球形。

在直径为砂粒粒径 3 倍的圆孔上形成了稳定的桥塞。但形成桥塞的孔径范围扩大到了砂粒粒径的 $4\sim 4.5$ 倍,而且大孔的桥塞极不稳定。形成桥塞的孔径范围扩大的原因好象是因为砂粒呈多角形。

为了研究经过筛分的各种粒度的砂粒在较大砂粒(即砾石)堆上的桥塞情况,将 2 英寸高的各种细砂粒堆到玻璃管内筛子上的 3 英寸厚的各种粗砂粒堆上,然后在玻璃管内的砂样上方灌入 24 英寸高的汽油液柱。由于玻璃管末端与真空度为 $12\sim 13$ 磅/英寸²的真空腔室连通,故汽油被向下抽吸而通过砂层(见图3)。由此观察了砂粒在有液体流动的情况下的桥塞作用。由于真空度较高,不断产生的汽油气泡有助于模拟井下条件。试验结果见表 2。

试验所用最大砂粒(-6+8)已达到专用玻璃管(其内径为 $15/16$ 英寸)试验的极限粒径。小砂粒趋于沿玻璃管侧面大砂粒与玻璃管的交界处向下流动;用-6+8号砂子时这种趋势尤为明显。

由表 2 可以得出如下结论:假定大砂粒的排列形式为六角形,当大砂粒之间孔隙的内接圆直径接近小砂粒直径的两倍时,大砂粒之间的孔隙内可以形成稳定的桥塞。为了稳定

表 2 经过筛分的小直径砂粒在经过筛分的大直径砂粒层内的运移

粗砂粒层的 粒度 (号) (3 英寸厚)	粗砂粒上的细 砂粒的粒度 (号) ①	比 率 ②					砂粒的 排列方 式 ③	附 注
		$\frac{d_1}{\Delta_2}$	$\frac{d_1}{\Delta_1}$	$\frac{d_0}{\Delta_1}$	$\frac{d_2}{\Delta_1}$	$\frac{d_A}{a}$	$\frac{D_1}{\Delta_2}$	
-6+8	-65+100	3.5	2.5	2.5	1.7	2.5	23	H
		9.3	6.6	6.6	4.7	6.6	22	C
		2.5	1.7	1.7	1.2	1.7	16	H
	-48+65	6.6	4.7	4.7	3.3	4.7	16	C
		1.7	1.2	1.2	0.88	1.2	11	H
		4.7	3.3	3.3	2.3	3.3	11	C
-8+10	-100+150	3.5	2.5	2.5	1.7	2.5	23	H
		9.4	6.6	6.6	4.6	6.6	23	C
		2.5	1.8	1.7	1.2	1.7	16	H
	-65+100	6.6	4.7	4.6	3.3	4.7	16	C

-10 + 14	-150 + 200	3.5	2.5	2.5	1.7	2.4	22	H	能运移并连续移动
		9.3	6.5	6.5	4.7	6.6	22	C	
	-100 + 150	2.6	1.7	1.7	1.2	1.7	16	H	仅在形成桥塞的过程中出少量砂子，然后不再出砂子
		6.5	4.6	4.6	3.3	4.6	16	C	
-14 + 20	-150 + 200	2.5	1.7	1.7	1.2	1.7	16	H	出一些细砂子
		6.6	4.7	4.7	3.3	4.7	16	C	
-20 + 28	-150 + 200	1.7	1.2	1.2	0.88	1.2	11	H	运移1/2英寸，出砂量极少
		4.7	3.3	3.3	2.3	3.2	11	C	

① 表中所有砂子标号都是根据 Tyler 筛子标号划分的。

② d_1 ——大砂粒之间孔隙的内接圆直径。假定砂粒为球形，其直径 D_1 等于砂粒能通过筛子的筛孔宽度。

d_2 ——大砂粒之间孔隙的内接圆直径。假定砂粒为球形，其直径 D_2 等于砂粒通不过筛子的筛孔宽度。

Δ_1 ——假定直径等于砂粒能通过筛子的筛孔宽度的小砂粒的直径。

Δ_2 ——假定直径等于砂粒通不过筛子的筛孔宽度的小砂粒的直径。

a ——小砂粒的平均粒径。

d_A ——大砂粒之间孔隙的内接圆直径。假定砂粒为球形，其直径等于砂子能通过及通不过筛子筛孔的平均宽度。

③ H 表示六角形排列，C 表示四方形排列。

1. 带筛

2. 有机玻璃板 $35 \times 10 \times 2 \text{ cm}$

3. 胶皮管长 5 cm

4. 透明胶带 $\phi 3 \sim \phi 4$

5. 胶塞带孔能密封
能中进 $2 \times 2 \text{ cm}$

6.

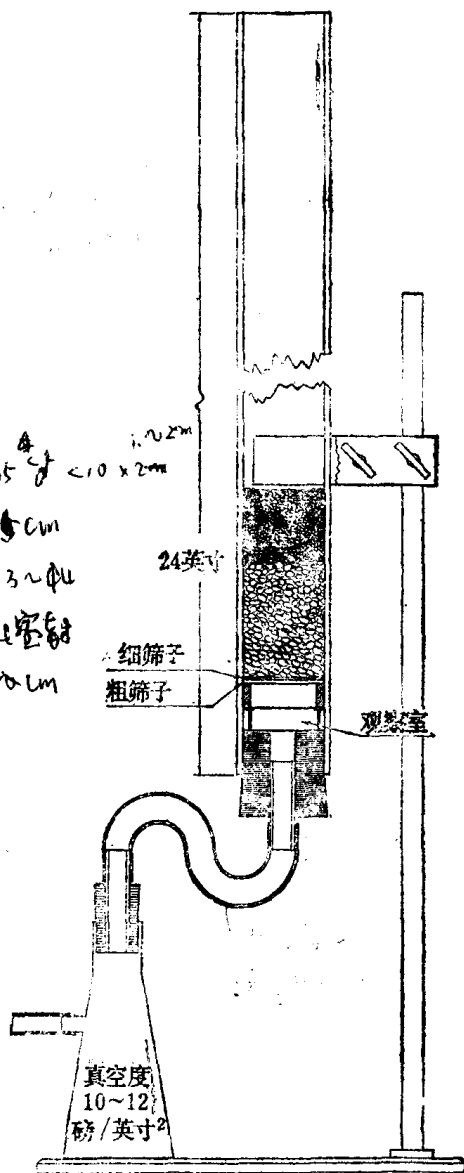


图 3 研究经过筛分的砂子和岩芯砂的桥塞情况的方法

这种关系，假定大砂粒的直径等于它们能通过的筛子的筛孔宽度，其上覆盖的小砂粒的直径等于它们通不过的筛子的筛孔宽度。这是最坏的情况——最细的砂子在最粗的砂粒层之间形成桥塞。如果砂粒的排列形式为四方形，形成稳定桥塞时砂粒之间的孔隙大于用钢球作试验形成稳定桥塞时钢球之间的孔隙。上述结论说明，在砂粒的排列形式中，六角形占优势；而且，砂粒的排列形式是确定砂粒之间需要桥塞的孔隙大小的重要因素。同时还验证了用钢球在大容器内所做试验得出的结果。当然，由于试验用的砂粒不是球形，它们既不可能严格地呈六角形排列，也不可能严格地呈四方形排列。

用岩芯砂做的试验

下一步是将实际的岩芯砂撒到经筛选的粗砂粒层上，以便确定能挡住砂粒的“砾石”的粒度。试验得到的结果是：能形成稳定桥塞的带眼套管或筛管上孔眼的宽度的上限大约是砾石中正态分布率为10%的颗粒粒径的两倍。因此，假定砂粒中正态分布率为10%的砂粒粒径为能在粗“砾石”层上形成桥塞的岩芯砂的有效粒径。用几种岩芯进行试验的结果列于表3中。试验用岩芯的分析结果见图4、5、6和7。

由表3可知，砾石的选择依据应是：假定为六角形排列，需桥塞的孔隙应为正态分布率为10%的粒径的两倍。所谓孔隙是指直径等于筛孔直径的砾石颗粒之间的孔隙。上述结论的成立条件是所用堆成层的砂粒为同一种砂粒。用多种砂粒堆成层的情况尚未进行过研究。

上述结论还有一种说法，即适用于砾石充填作业的同种砂粒中最大砂粒的直径约为地层砂样中正态分布率为10%的颗粒粒径的13倍。

表 3 岩芯砂形成桥塞的情况

岩 芯 ^①	砾石层粒 度(号) ^④	D ₁ ^⑤	正态分布率 为10%一点 的粒度(δ)	$\frac{d_1}{\delta}$	$\frac{D_1}{\delta}$	$\frac{d_2}{\delta}$	排列 方式	备 注
Brinn 1号	-8+10	0.110	0.0085	1.7 4.5	11 11	1.2 3.2	H C	形成稳定 桥塞, 出砂 量极少, 可 以用该粒度
Brinn 1号	-10+14	0.110		1.2 3.2	8 8	0.84 2.2	H C	不出砂, 与-8+10号 砾石相比, 没有明显的 砂流
Carson 8号	-3+4 ^③	0.290	0.022	1.9 4.9	12 12	1.3 3.5	H C	能形成桥 塞, 但还是 要出大量砂 子
Carson 8号	-4+6 ^③	0.290		1.3 3.5	8 8	0.92 2.5	H C	形成稳定 桥塞, 出 一些砂子
Balboa 61	-8+10	0.123	0.0095	1.5 4.1	10 10	1.1 2.8	H C	形成稳定 桥塞, 出砂 量极小
Lakeview ^②		0.431	0.033					

- ① 用取自加利福尼亚的岩芯做试验的目的仅在于列举一个可能遇到的实际砂粒混合物的例子, 并不说明取岩芯的井存在出砂问题。所用砂样都被破碎成最小粒径的砂粒, 以确保实验结果的重复性, 没有考虑实际条件下砂子固结或粘结成团可能产生的影响。
- ② Lakeview 岩芯的 D₁ 为 0.431 英寸, 砾石粒径是正态分布率为 10% 的粒径的 13 倍。该直径超过了所用试验装置的能力。不过, 说明大颗粒砾石只能用于比较粗的砂子。
- ③ 该范围内的砾石颗粒选得不好, 它们的形状与球形相差甚大, 大多数砂粒都是细长的。粒度为 -4+6 号的砂粒稍好一些, 但两种砾石颗粒间的孔隙都比接近球形的砾石颗粒要大。
- ④ 所有颗粒标号都是根据 Tyler 筛号划分的。
- ⑤ 以正态分布率为 10% 的粒度为根据。

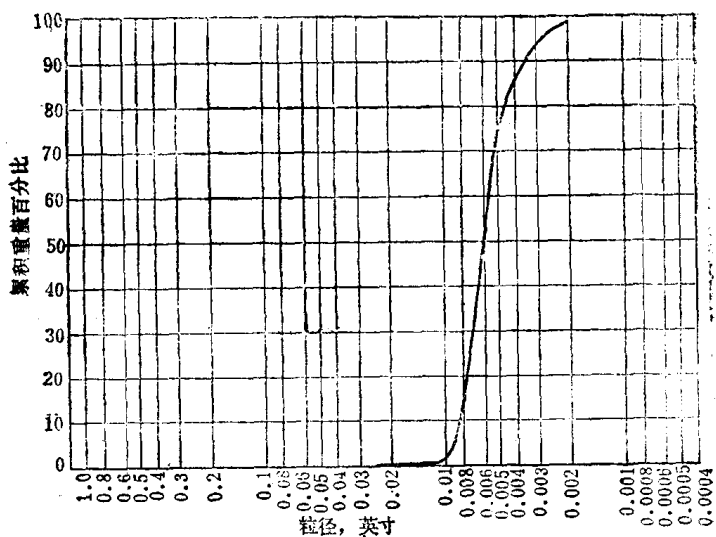


图 4 Brimm 1 号岩芯分析结果 (俄克拉何马城Phillips石油公司, 1934.12.10)

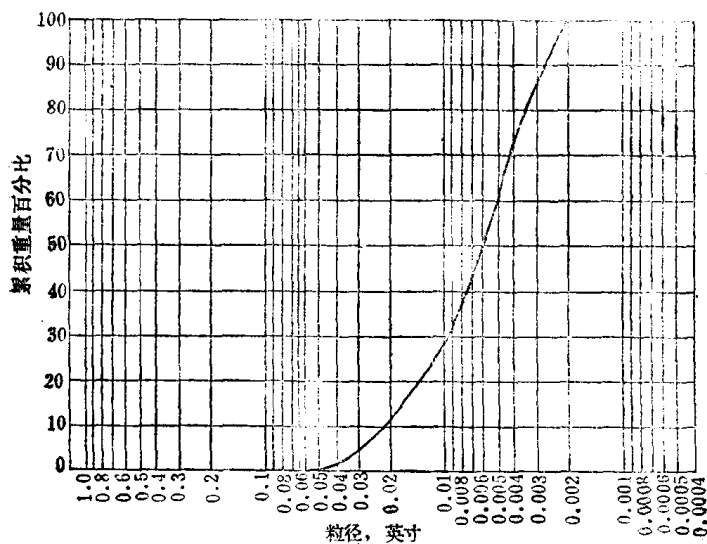


图 5 Carson 8 号岩芯分析结果 (加利福尼亚州Union石油公司的Dominguez油田, 1936.10.5)

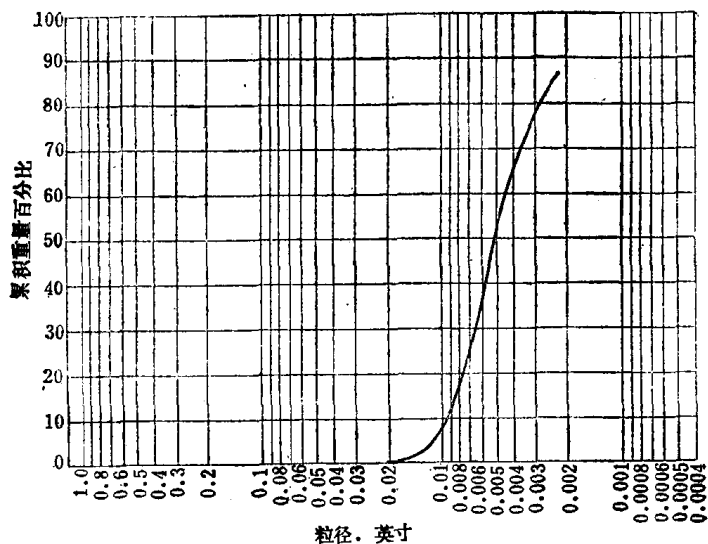


图 6 Balboa61岩芯分析结果 (加利福尼亚州General石油公司的 Buena Vista, 1936.7.22)

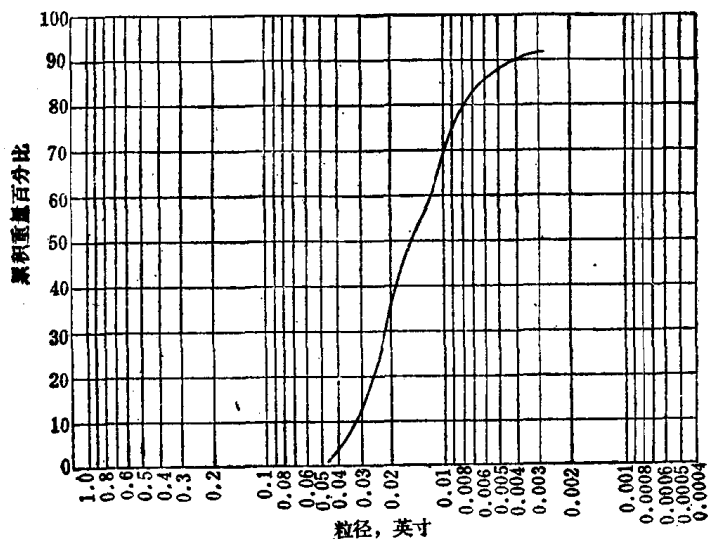


图 7 Lakeview岩芯分析结果 (加利福尼亚州Lakeview油田 1936.9.24)