

水银退出效率与岩石孔隙结构的关系

罗蛰潭 王允诚

(成都地质学院石油系)

压汞法是国内外应用最广泛的研究岩石孔隙结构的方法。过去主要应用毛细管压力曲线这一部份,1966年皮克尔(J.J.Pickell)等开始研究饱和水银的岩心在降低压力时,退出水银量与压降的关系。1976年沃德洛(N.C.Wardlaw)正式提出水银退出曲线有助于进一步研究岩石的孔隙结构,并首次提出了退出效率的概念。

一、退出效率的意义及研究现状

退出效率:在压汞仪的额定压力范围内,从最大注入压力降低到最小压力时,从岩样内退出的水银体积与压力降落以前注入水银总体积的百分比,实际上退出效率也就是非润湿相的毛细管效应采收率。如图1所示,退出效率(W_E)可由下式计算:

$$W_E = \frac{S_{max} - S_R}{S_{max}} \times 100$$

沃德洛发现,大量白云岩及石灰岩的退出效率可由10—60%,孔隙率愈低,退出效率也愈低。

通过岩石孔隙铸体的扫描电镜观察,结合毛细管压力曲线孔喉大小的计算,发现孔隙与喉道的大小比值(简称孔隙—孔喉比),随孔隙率的下降而增加。孔隙—孔喉比是控制退出效率大小的主要原因,即退出效率随

孔隙—孔喉比的增加而下降,并发现孔隙直径与岩石颗粒直径是正比关系,而孔隙直径与孔隙率之间并无线性关系。

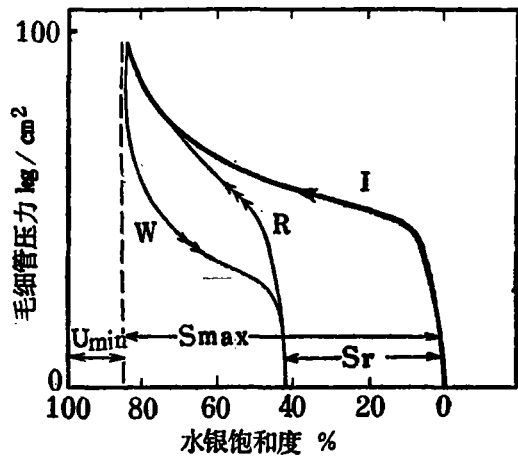


图1 水银注入(I)、退出(W)、重新注入(R)曲线与毛细管压力关系图

U_{min} : 最大注入压力时未饱和水银的最小体积百分数;

S_{max} : 最大注入压力时的水银饱和度;

S_R : 从最大注入压力降低到最小压力时的残余水银饱和度。

沃德洛为了进一步研究孔隙—孔喉比对退出效率的影响,还作了简单的透明模型模拟实验,发现当孔隙—孔喉比大时压力降低,只有孔喉中的水银退出,因而退出效率小;而当孔隙—孔喉比小时降低压力,不但

孔喉中的水银退出，孔隙中的水银也大部份退出，因而退出效率大为提高。

同年，沃德洛及泰勒进一步开展了孔隙结构及毛细管作用的深入研究，他们应用了两种二维孔隙系统模型：一种是喉道与孔隙的数目比为 1.5 : 1；另一种是喉道与孔隙的数目比为 3 : 1。每种模型的喉道均有六种大小不同的尺寸，而孔隙则为统一的一种尺寸。模型是透明的，可以观察注入水银及退出的详细情况。

通过模型实验，他们认为应引进两个新的概念：一个是可进率，另一个是可退率。可进率是由于小孔隙及小喉道遮挡大孔隙及大喉道引起的，也就是说，由于这种遮挡作用，在一定注入压力下，不是所有相当于这个压力的孔喉均能进入水银并充填所连通的孔隙，而只是那些没有被遮挡的孔喉才能进入水银。不仅模型存在遮挡现象，实际的岩石样品中这种遮挡作用更为普遍。因此，可进率可以这样理解：即在一定注入压力下，实际进入水银的大小孔喉数与总的可供进入水银的大小孔喉数的百分比。研究证明：可进率随着注入压力的提高而不断提高。

在降压退出水银时，水银的连续性在不断遭到破坏，在模型中孔隙远远大于孔喉。两种模型的孔隙均为 20 个单位，孔喉为 1 到 6 个单位，由于孔隙—孔喉比相当大，因此主要是孔喉退出，孔隙的退出微乎其微。在降压退出过程中，由于系统中水银的连续性不断在减小，以致一部份孔喉在压力还未降低到排空水银所需的排驱压力以前，由于较小的孔喉已排空水银而成孤立，从此不再被排空，不同压力下水银连续性的逐步破坏，在模型中形成残余水银饱和度。

因此，对于降压退出水银就提出了可退率的概念。即在一定压力下不是所有相应于这个压力的孔喉均能退出水银，而仅是其中仍然保持连续性的才能退出。一定压力下退

出水银的孔喉数与总的可供退出水银的孔喉数的百分比称为可退率。可退率在降压过程中不断减小。高压下小喉道的退出率大于低压下大喉道的退出率。

他们认为：可进率使实测毛管压力曲线所代表的孔分布，不是真正的实际孔分布，而只是视孔分布；可退率则是影响退出效率的主要因素，只有提高可退率，才能提高退出效率。显然，连通性好、孔喉与孔隙的体积比增大，有利于提高退出效率。

沃德洛等通过实际岩石样品的研究，认为退出效率是随着下列因素的增加而增加：即孔喉与孔隙大小的均一程度，连通孔隙的平均孔喉数目以及原始水银饱和度。

二、从某些样品探讨水银退出效率与岩石孔隙结构的关系

1. 苏北东44井样品

苏北东44井在高邮凹陷木垛低突起南缘，层位属于下第三系阜宁组，共测样品11块，退出效率及其它参数如表1所列：

苏北样品的孔隙率、渗透率变化范围较大，孔隙率的变化范围为 9.07~31.01%，渗透率最小为 0.07 毫达西，最大达到 413.79 毫达西。按照所测曲线的形态，铸体薄片在显微镜下的对比观察，根据计算出的退出效率的大小，可以将苏北样品划分为五种类型：

(1) 退出效率高于 80%。6 号及 10 号样品的曲线特征是：退出曲线与注入曲线极为靠近；重新注入曲线形态与退出曲线相似在低压时与退出曲线相重合（见曲线图版 I 中 6 号、10 号样品曲线图）。退出曲线与注入曲线极为靠近，说明在降压退出过程中，可退率减小的程度不大，退出曲线平缓下降说明退出水银是在不断增加，水银的连续性破坏不严重。只有孔喉与孔隙的连通性

表1

苏北东44井岩心样品数据表

样品号	煤油法孔隙率 m (%)	气测渗透率 K(毫达西)	毛管压力中值 P _C -S _{Hg} 50%	退出效率 W _E (%)
10	31.01	413.79	1.50	86.45
6	29.50	388.21	1.33	85.90
5	28.74	59.93	1.90	69.09
8	27.67	45.62	2.20	60.38
11	15.20	18.45	4.10	53.66
15	15.99	19.55	6.20	53.56
13	16.08	16.48	7.50	42.55
17	12.48	2.82	14.30	40.13
12	12.17	2.49	8.30	40.00
2	10.85	0.40	38.00	29.35
20	9.07	0.07	—	11.51

较好,孔喉直径较大,才会有这样的结果。通过样品铸体薄片的观察,发现样品的确具有这些特征。如6号样品,岩性为含粉砂的极细—细粒岩屑长石砂岩,石英具溶蚀结构,为粘土接触式胶结,面孔率达11.03%,粒间孔很发育,孔隙大,喉道多而粗,连通性很好,可以称为大孔粗喉道的类型。重新注入曲线在低压部分与退出曲线重合,说明在这一段的压力范围内退出水银与重新注入水银的压差相等。退出曲线与注入曲线之间的水平距离称为捕集滞后,捕集滞后的距离愈大,残余水银饱和度愈高。

(2) 退出效率在60—70%左右。8号及5号样品的曲线形态特征是退出曲线的初始段较陡,随后才逐步变缓,捕集滞后的距离较大。重新注入曲线与退出曲线的关系基本上与上一类相同,见曲线图版I中8号、5号样品的曲线图。退出曲线的初始段较陡,说明在高压下小喉道的可退率应该是高的,但这部分喉道的体积并不大,因而退

出水银量有限。在压力退到水银从较大喉道内开始退出时,水银退出量才显著增多。从这类样品的注入曲线形态看,属于分选较差类型,也就是除了大中喉道外,还有一定数量的小喉道存在,而且各类喉道的集中程度较差。从铸体薄片的显微镜观察,孔隙及喉道均较前一类略小,非均质程度略高。可以认为基本上属于大孔中等喉道,并且有一定数量小喉道的类型。5号样品可以作为这一类的代表,岩性为细—中粒岩屑长石砂岩,粘土接触式胶结,面孔率为7.37%。粒间孔发育。

(3) 退出效率在50—55%左右。11号及15号样品的曲线形态特征是注入曲线与退出曲线之间距离较远,退出曲线下降较陡,毛管压力中值增高,捕集滞后距离增大(见曲线图版I中11号、15号样品的曲线图)。15号样品的铸体薄片镜下观察结果说明,得到这样的曲线是自然的。这种含细砂及粉砂的极细粒岩屑长石杂砂岩,为粘土孔隙式胶结,在粘土杂基及颗粒间,只具有少

量的粒间孔,喉道很小甚至不明显,非均质程度较高。这种孔隙结构属于小喉道中等孔隙类型。

(4) 退出效率为40%左右。样品17、12的曲线形态特征是注入曲线与退出曲线的距离更远,捕集滞后及阻滞后更大,毛管压力中值更高,退出曲线的低压阶段接近于垂直。见曲线图版I中17、12号样品的曲线图。所有这些特征都促使退出效率大为降低。从岩石铸体薄片看,均为孔隙式胶结,只有少量粒间孔,岩性致密,属于喉道及孔隙均小的类型。

(5) 退出效率小于30%。样品2及20的退出曲线在压力刚降低的高压阶段尚具有一定的可退率,随着压力下降可退率迅速减小,最后退出曲线成为直线而完全停止退出(见曲线图版I中的2号样品曲线图及曲线图版II中的20号样品曲线图)。这类样品的铸体薄片在镜下可见残留的极少量粒间孔。连通性很差,孔喉也不发育,属于孔隙及孔喉均差的类型。

从苏北11块样品的注入曲线、退出曲线及重新注入曲线的形态关系来看,符合沃德洛提出的A、B两种类型曲线对于退出效率的分析(见图2)。

A型曲线是重新注入曲线与注入曲线之间的水平距离大,表明水银的捕集程度大,

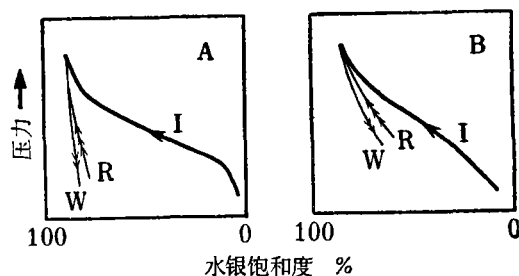


图2 两种假想岩样的注入(I)退出(W)及重新注入(R)典型曲线图

A型: 在高饱和度下具有相对低的退出效率;

B型: 在高饱和度下具有相对高的退出效率。

因而具有较高的残余饱和度及较低的退出效率。在B型曲线中,注入曲线与重新注入曲线之间的水平距离较小,表明捕集的水银较少,具有较低的残余水银饱和度及较高的退出效率。在A型曲线中退出曲线下降较陡,表明在一定压力降下退出的水银较少。反之,在B型曲线中退出曲线下降较缓,因而在一定压力降下退出的水银较多。

这两种类型曲线的分析同样也适用于河南及四川的样品。

2. 河南文26井样品

河南文留构造高点北侧轴线附近的文26井的岩心,层位属沙河街2—3段,共测5块样品。退出效率及其它参数如表2所列:

表2 河南文26井样品数据表

样品号	煤油法孔隙率 m (%)	气测渗透率 K(毫达西)	毛管压力中值 $P_C-S_{Hg50\%}$	退出效率 W_E (%)
R26—36	16.20	42.65	29.00	48.45
R26—20	15.79	4.692	10.40	46.80
R26—8	10.00	1.412	16.50	36.90
R26—29	7.12	0.348	22.00	27.78
R29—32	8.39	0.175	56.00	20.70

文26井样品测出的注入曲线、退出曲线及重新注入曲线的形态表明:排驱压力及毛

管压力中值愈高，退出曲线下降愈陡，而退出效率也愈小，见曲线图版Ⅲ。从样品薄片的镜下观察发现粒间孔基本被充填，在充填物中尚残留一部分小孔隙及喉道，退出效率因此不可能高。R26—36 样品可作为文26井样品的代表，岩性为石英粗砂岩，分选中等，微晶白云石孔隙式胶结。有少量杂基充填，胶结物充填不均，局部为基底胶结。

石英溶蚀现象普遍，有白云石交代杂基现象。

3. 川北相A井等样品

样品采自川北相国寺构造的石炭系岩心，计相A井5块，相B井3块，部分采自纳溪构造的二迭系岩心2块。退出效率及其它参数如表3所列：

表3 四川相A井样品数据表

井号	样品号	煤油法孔隙率 m(%)	气测渗透率 K(毫达西)	毛管压力中值 P _C -S _{Hg} 50%	退出效率 W _E (%)
相A井	R16	10.52	—	1.44	81.74
	R14	7.83	—	2.00	75.56
	R40	12.30	—	1.79	74.86
	R6	5.33	—	1.10	74.25
	R24	4.54	—	1.10	63.14
相B井	11—7B	14.68	19.98	1.75	74.78
	11—13	11.33	—	2.00	60.20
	10—15	3.38	0.02	—	15.55
纳井C	589(2)	14.78	—	5.35	49.47
	589(1)	5.38	—	1.70	49.70

这些碳酸盐岩的孔隙结构远较砂岩复杂，规律性不及砂岩明显，按退出效率大小暂划分为三类：

(1) 退出效率大于70%。曲线形态基本上类似于苏北岩样的(1)类及(2)类，见曲线图版Ⅰ。从铸体薄片的镜下观察，可知不同岩性的孔隙及喉道发育均不相同。如相B井11—7B样品，岩性为溶孔粉晶角砾云岩，溶孔特别发育，大溶孔互相以喉道连通，为大溶孔粗喉道类型。

(2) 退出效率为60—65%。相A井R24及相B井11—13样品的曲线(见图版Ⅰ)看来相A井R24样品的注入曲线反映岩

石具有两类大小不同的分选性较好的孔隙喉道，故曲线出现两段平台，在退出曲线中反映出细喉道的数量较多，但体积并不大，因此在降压的前一阶段退出的水银量很微，曲线接近于直线而陡直下降。在降压的后一阶段，退出曲线才平缓向右移，使退出效率大大提高。相B井11—13岩样的注入曲线代表孔喉分选较差的类型，其岩性为溶孔粉晶角砾云岩，溶孔的发育程度较差，连通性不太好，喉道也较小。

(3) 退出效率为50%左右。纳溪构造纳C井的两块样品属于这种类型(见曲线图版Ⅰ)，尽管两块样品的注入曲线差别较大，

但退出曲线的形态却比较接近，如何合理解释这种现象，尚待进一步研究。从岩石薄片镜下观察可知，二者都是具有溶孔而晶间孔不发育的类型。

三、注入毛管压力曲线特征及常物性与退出效率的关系

毛管压力曲线的形态主要受孔喉分布的分选性及歪度两项因素所控制。分选性是指孔喉大小分布的均匀程度，歪度是指孔喉集中于粗喉道或细喉道。歪度愈粗，分选性愈好，曲线就愈向压力纵坐标及饱和度横坐标靠拢，凹向右方；否则曲线就偏在曲线图的左上角，而且曲线是凹向左方。在应用毛管压力曲线评价储油层时，如果储油层岩石所测毛管压力曲线歪度愈粗，分选性愈好，则这种储油层的储集性能就愈好，产能也愈大。

将苏北及河南部分典型样品的注入毛管压力曲线分别绘在两张图上（见图3），显然可见：退出效率与歪度及分选性具有密切关系。歪度愈粗、分选性愈好的样品，其退

出效率也愈高。即退出效率不仅反映非润湿相的毛细管效应采收率，也反映油气储层产能的大小。

在毛管压力曲线的分析中，排驱压力及毛管压力中值是两项重要的数值指标，排驱压力主要反映样品的渗透率高低。排驱压力愈低，说明样品的最大连通孔喉愈大。研究证明，在样品各类大小孔喉分布中，最大孔喉对样品的渗透率贡献值最大，可达80%左右。毛管压力中值通常可作为反映样品所代表的油气储层的产能大小的指标。毛管压力中值愈低，产能应该愈大，这是阿普斯（J. J. Arps）早在1964年应用同一样品的毛管压力曲线及相对渗透率曲线上下叠置后，计算出纯油所需的最小油柱高度得出的结论。在这项研究中，他是把毛管压力中值近似接近于水相开始流动那一点的毛管压力。

在前面各类样品的退出效率与曲线形态的分析中，已经看出毛管压力中值与退出效率之间有一定的关系。即退出效率随毛管压力中值的增高而减小，河南文26井样品在这方面反映最明显。为了进一步探讨二者之间的

关系，我们试将所测样品的退出效率与毛管压力中值作图，结果发现在双对数座标纸上，二者为一反向的直线关系（见图4），即毛管压力中值愈低，退出效率应愈大。这就进一步证明退出效率是反映产能的重要指标。我们过去对四川、长庆的储集岩进行过孔隙结构研究，在划分储集岩类别时，对毛管压力中值是相当重视的，总是把它作为分类的一个灵敏度较高的重要指标。看来今后在评价储层产能时，增加退出效率这项指标的分析是非常必要的。

孔隙率及渗透率是常规特性必测的重要参数。虽然在认识及评价

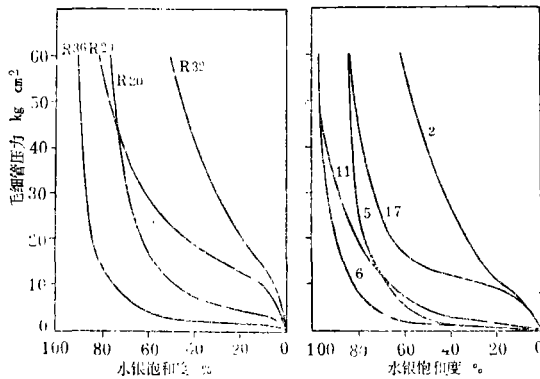


图3 典型样品的毛管压力曲线特征对比图

样号	W_E %	K (毫达西)	m%	样号	W_E %	K (毫达西)	m%
R36	48.45	12.65	16.20	6	85.90	388.21	29.50
R20	46.80	4.96	15.79	5	69.09	59.95	28.74
R29	27.78	0.348	7.12	11	53.66	18.46	15.20
R32	20.70	0.175	8.39	17	40.13	2.82	12.18
				2	29.35	0.40	10.85

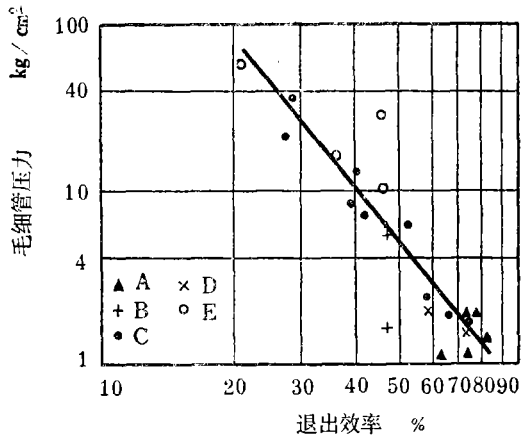


图4 退出效率与毛管压力中值的关系曲线
A、相A井样品 B、相B井 C、纳C井样品
D、河南样品 E、江苏样品

储集层时这项参数并不十分精确，特别是在评价孔隙结构比较复杂的碳酸盐岩时精度更差，往往需要结合孔隙结构资料才更可靠。但总的说来，孔隙率及渗透率仍然是应用得最广泛的物性资料。因此探讨一下他们与退出效率的关系也是必要的。

本文所探讨的砂岩，其退出效率与孔隙率的关系正相相关，在直角坐标纸上为直线关系（见图5）。

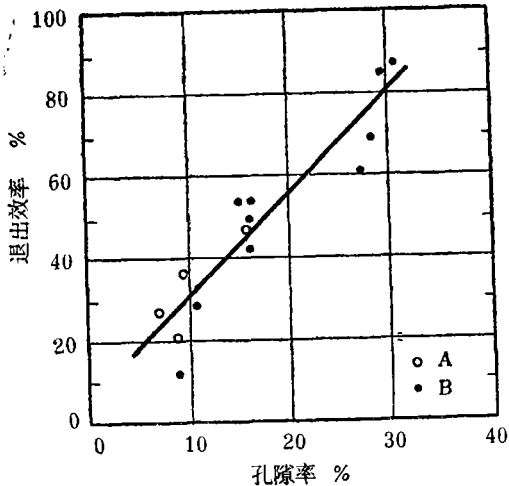


图5 孔隙率与退出效率的关系曲线（砂岩）
A、河南文26井样品 B、苏北东41井样品
对于所探讨的碳酸盐岩，可能由于所作

样品不多，也可能由于孔隙结构类型不一样，结果点子比较分散，从所有样品点子的分布看，显示为双曲线型（见图6）。但仔细观察，则相A井样品的孔隙类型主要是晶间孔，藻架孔及部分溶孔。而相B井及纳C井样品的孔隙类型主要为溶孔，其中相B井样品的溶孔发育程度又远较纳C井好。由此可见，孔隙类型及发育程度对退出效率的影响较大。在研究碳酸盐岩的退出效率时应特别注意孔隙结构的复杂性。

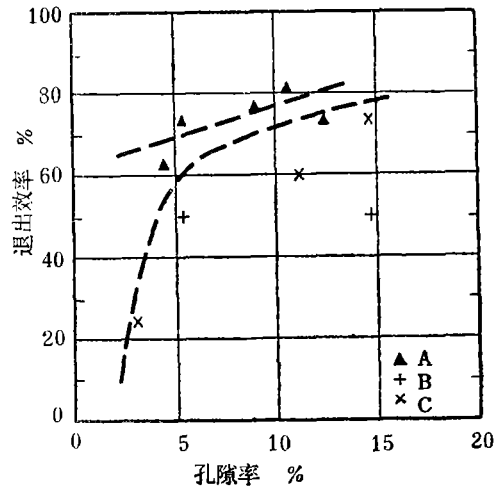


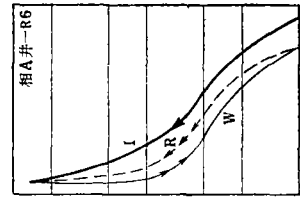
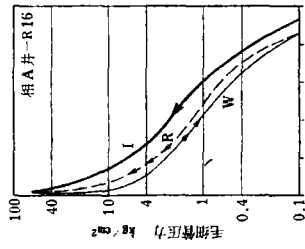
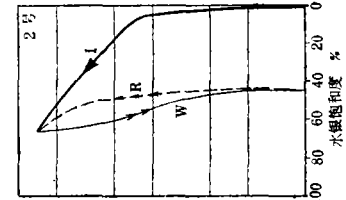
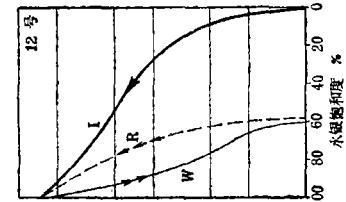
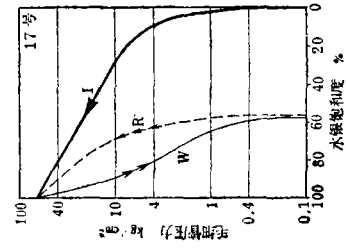
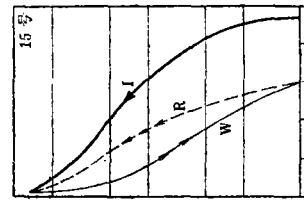
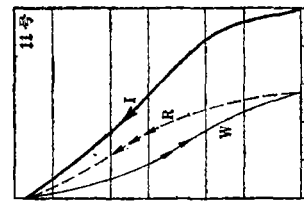
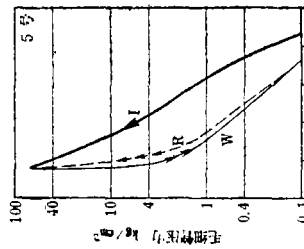
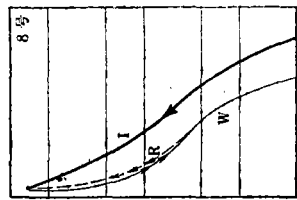
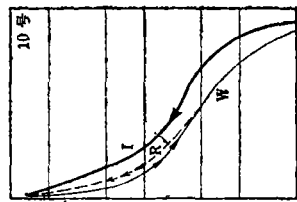
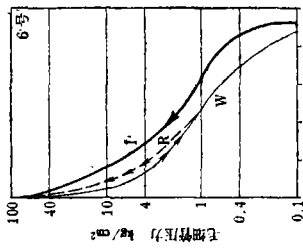
图6 孔隙率与退出效率的关系曲线（碳酸盐岩）
A、相A井 B、纳C井 C、相B井

苏北及河南的砂岩样品，渗透率的变化范围较大。将渗透率与退出效率在半对数坐标纸上绘图得出一条很标准的直线（见图7）。可见岩石的渗透率与退出效率的关系非常密切，随着渗透率增大，退出效率也相应增高。

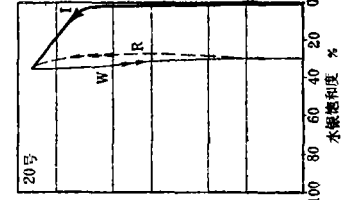
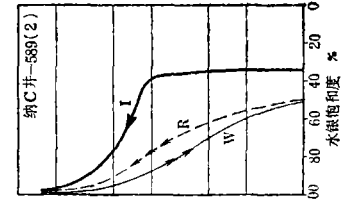
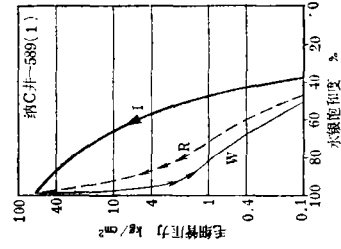
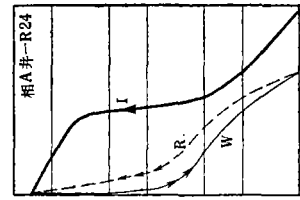
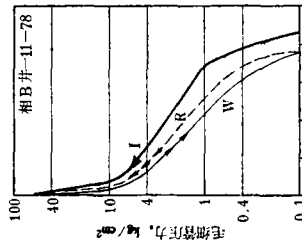
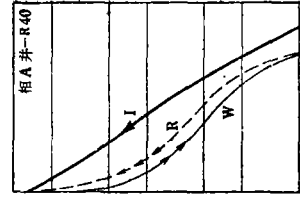
结 论

1. 退出效率是研究岩石孔隙结构的有效方法之一。退出效率的高低基本上可从岩石铸体薄片的观察得到印证及解释。对于砂岩，喉道的粗细及孔隙的大小以及相互连通

曲线图版 I



曲线图版 II



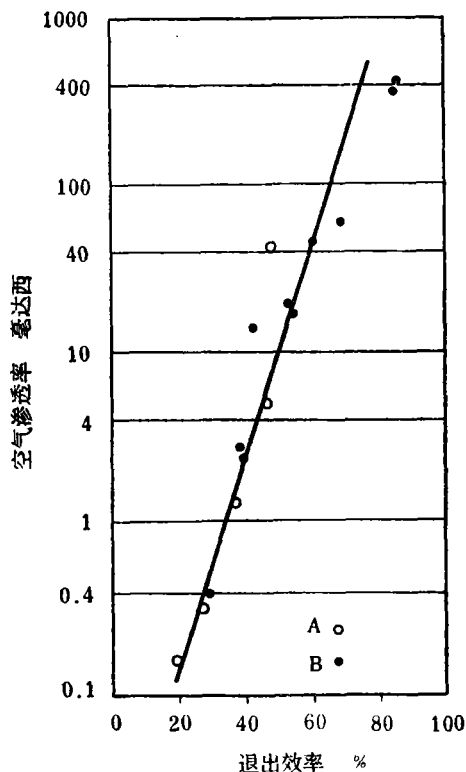
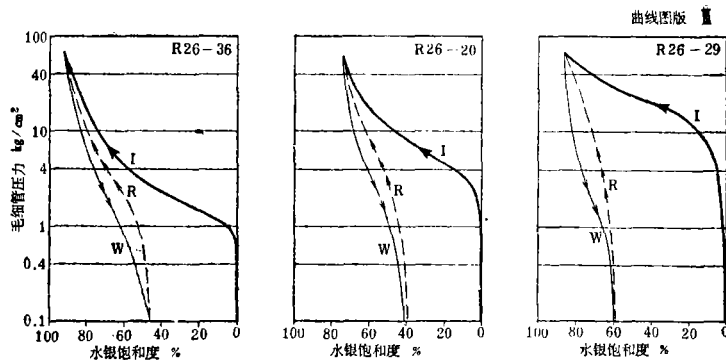


图7 渗透率与退出效率的关系曲线

A、河南文26井样品 B、苏北东44井样品

程度，直接控制退出效率的高低。对于碳酸盐岩，由于成岩后生变化比较复杂，从薄片上判断退出效率比较困难，但晶间孔及溶孔的发育程度对退出效率的影响极大。

2. 退出效率不仅反映非润湿相的毛细管效应采收率，而且也反映储油岩石的产能大小。过去评价储层产能大小常用排驱压力、

毛管压力中值、歪度及分选性等，而退出效率的高低同样也反映了储层产能的大小。因此研究退出效率不但具有理论意义，也具有很大的现实意义。

3. 常规物性中的孔隙率及渗透率对于砂岩的退出效率有相当大的控制作用，分别在直角座标及半对数座标上成直线关系。对于碳酸盐岩，由于样品作得太少，尚不能得出一致的结论。

4. 退出效率既能反映产能大小，因此研究退出效率对于寻找有利的储层分布带有一定的指导意义。

本文所用的岩石薄片的鉴定工作得到成都地质学院石油系黄仰洲、朱永铭及四川石油勘探开发研究院周炜等同志的协助，在此一并致谢。

主要参考文献

- [1] N. C. Wardlaw; "Pore geometry of carbonate rocks as revealed by pore casts and capillary pressure", A.A. P.G. Bull. Vol. 60 No. 2 Feb. 1976
- [2] N. C. Wardlaw and R. P. Taylor; "Mercury capillary pressure curves and the interpretation of pore structure and capillary behaviour in reservoir rocks". Bull. C.P.G. Vol. 24, No. 2 June. 1976.

岩石孔隙空间的复制技术及其应用

王 允 诚

(成都地质学院石油系)

孔隙铸体能够提供贮集岩的有关孔隙和渗滤方面的特征，是研究岩石孔隙结构的一种直观方法。通过对岩石孔隙铸体的观察，可研究致密砂岩和碳酸盐岩中的孔隙形状和它们的分布连通状况，为研究油（气）层的物理模型和数学模型提供直接依据。

孔隙空间复制技术，国外在50年代以前早有研究。随着科学的发展，各种浸染剂的问世，复制技术不断改进。目前岩石孔隙结构的复制技术有了飞速的发展。

我国这方面的研究开展得较晚。50—60年代，四川石油研究所张荫本同志使用过加拿大树胶充填岩石孔隙，以区分矿物和孔隙。1978年大庆油田流体室用6101工业环氧树脂注入砂岩，首次拍出了砂岩孔隙结构的电子扫描照片。成都地质学院石油系储层组1973—1979年系统地开展了此项工作。用苯乙烯、甲基丙烯酸甲脂、低粘度环氧树脂制

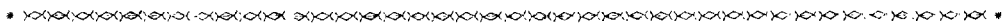
备岩石孔隙铸体薄片和孔隙铸体开展储层研究，获得成功。同时建立了一套真空—加压流程。随着这一技术的推广应用，必将在石油地质工作中发挥其应有的作用。

一、制备孔隙铸体的浸染剂及其注入方法

（一）浸染剂

在制备孔隙铸体时，需要使用浸染剂。一般来说，对浸染剂的要求如下：

1. 粘度低、流动度大，能进入岩石的细小孔隙；
2. 固结硬度大，最好能与岩样的硬度接近，且有一定的韧性，以使它在磨制薄片时不易发生破裂或脱落；
3. 不受盐酸及氢氟酸的腐蚀。因为在制备孔隙铸体时需要用盐酸及氢氟酸侵蚀掉砂



[3] J. J. Arps: "Engineering concepts useful in oil finding", A. A. P. G. Bull. Vol. 48 №2 Feb. 1964

[4] J. L. Stout: "Pore geometry as related to carbonate stratigraphic traps", A. A. P. G. Bull. Vol. 48, №3 1964.

[5] J. J. Pickell: "Application of air-

mercury and oil-air capillary pressure data in the study of pore structure and fluid distribution", S. P. E. J. March 1966.

[6] (美) G. V. 奇林加等编辑: "碳酸盐岩石油与天然气开采"。科学出版社, 1978。