

· ~ ~ ~ ~ ~ ·
{ 方法与实验 }
· ~ ~ ~ ~ ~ ·

碳酸盐颗粒成岩变化的实验研究

高计元

(中国科学院地球化学研究所, 贵阳)

引 言

碳酸盐岩是沉积岩中非常重要的岩石类型。近二十年来, 碳酸盐岩的成岩作用是国际上讨论得最热烈的问题之一。不同的人根据各自的观察和研究, 对碳酸盐岩的成因提出了许多不同的模式。福克(Folk, 1959)等人, 根据当时研究得比较深入的碎屑岩的沉积原理认为, 碳酸盐岩不是纯化学形成的, 而是与碎屑岩碎屑的机械沉积方式相同, 是一定的水动力条件的产物。据此, 提出了以异化颗粒和泥晶灰泥为两个端元组分对碳酸盐岩进行结构分类。这一研究成果对于碳酸盐岩的研究起了巨大的推动作用。近二十年来, 大多数研究者大都是基于福克的分类原则来划分碳酸盐岩的岩石类型, 并据此来推断它们的沉积环境。在地质实践过程中发现, 以异化颗粒和泥晶灰泥为两个端元组分来划分岩石类型, 并据此推断其沉积环境虽然有许多成功的经验, 但有时也会造成一些失误。究其原因, 是由于这两个组分中的一个重要组分——泥晶灰泥, 成因比较复杂, 控制因素较多。目前对泥晶灰泥的形成机制的研究远远不够详尽, 不够清楚。

关于泥晶灰泥的形成原因, 已有的研究多着重于碳酸盐沉积时的水动力条件, 认为是低能的、安静的盆地环境中的产物。而对碳酸盐颗粒在成岩阶段的泥晶化则很少注意。近十多年来, 已有较多的人注意到了生物的生命活动对碳酸盐的破坏是形成泥晶灰泥的非常重要的原因之一〔2、4〕。

成岩作用过程能使沉积物碎屑颗粒发生变化, 已有资料报道(如Griggs, 1938; 1946; Turner et al, 1954; Gar et al, 1964)。Deelman(1967)用实验研究了碎屑岩中碎屑颗粒的这种变化情况。他的实验是在室温和干压条件下进行的, 实验中未考虑温度和液体对颗粒变化的影响, 实验结果是碎屑颗粒发生了破碎、塑性变形及硬度大的矿物向硬度小的矿物嵌入等现象。成岩作用能否影响碳酸盐颗粒的变化, 影响的方式和程度如何, 这方面还研究得较少。笔者想通过对现代碳酸盐砂的成岩实验研究, 来探讨碳酸盐沉积物在成岩作用过程中结构、构造和矿物成分的变化。

一、实验用砂样的选择和处理

本实验选用的碳酸盐砂样是1981年从全富岛上采集的。全富岛是西沙群岛西北部永乐环礁上的一个现代砂岛。该岛露出水面高约2—3m, 整个岛几乎全部是由0.05—2cm左右的白色珊瑚和贝壳砂组成, 未胶结。岛上的砂明显地分为粗细两部分, 相间排列。粗粒部分多由0.5—2cm或更粗的珊瑚枝组成; 细粒部分多由0.05—0.5cm的生物碎屑组成, 实验用砂选自细粒部分。

碳酸盐砂样几乎全部都是由生物碎屑组成。通过显微镜薄片观察和双目镜下进行点计法目测估计, 在生物碎屑组分中, 以珊瑚骨屑最多, 约占砂样的60%; 其次为贝壳碎屑, 约占20%; 再次为藻屑(以珊瑚藻屑为主), 约占12%, 有孔虫壳屑, 约占总量的8%左右。无陆源碎屑物。

为便于将实验前后的砂样进行结构组分对比, 称取了728.9g砂样进行筛选, 将其分成四种不同的粒级, 各种粒级的砂的重量及所占的比例见表1。

因为砾级砂砾中有些珊瑚枝粗大, 模具的内径较小, 放入珊瑚枝后模具的相当大的部分空间就被砾枝所占据, 其它粒级的装砂量就会减少, 这样的装样情况与实际的地质情况相差太大, 故在实验时这

一粒级未选用。然后把粗砂级、砂级和粉、泥级的砂按其原始构成比例,即按 179.0 : 337.6 : 4.8 = 32.1 : 67.0 : 0.9 的比例混合,作为实验用砂。

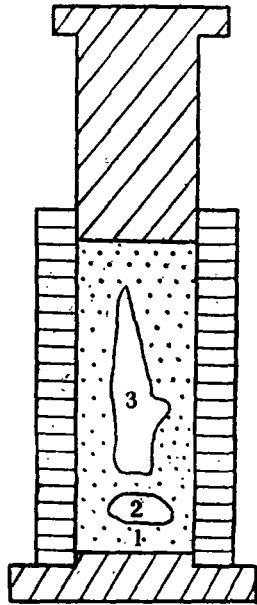
表1 各种粒度的砂在原样中所占的比例

Table 1 Ratios of various grained sands in the original samples

粒 级	粒 度 (mm)	重 量 (g)	所占比例 (%)
砾	> 2	171.5	23
粗 砂	0.92—2	179.0	25
砂	0.071—0.92	373.6	51
粉 泥	< 0.071	4.8	1

二、实验装置和实验过程

实验是在以千斤顶为动力的小型压力机上进行的。压力机的结构简单,操作方便。样品的加热系统是自制的小型管式炉,炉的内径要大于模具的外径。实验进行时把模具放入管式炉内,外接一台温度控制仪,用以控制样品加热时的温度。



1.生物碎屑砂 2.珊瑚屑 3.珊瑚枝

图1 模具装样图

Fig. 1 Filling of carbonate sands in the model

- 1.organic clastic sands
2.coral fragmental 3.coral branch

实验是在不同的温度和压力下分四次完成的。砂样按图1的方式装入模具中,模具对流体具有一定的封闭能力,但封闭性不太好。模具中第一次实验的砂样的总高度为5.2cm(图1)。样品中注满雨水,雨水的pH=5.5。

模具装好后,放入压机中加温加压。第一次实验所采用的温度为200atm,温度为80℃,这种压力和温度条件,按照一般的地质增温增压计算,相当于地质上埋深大约900m的温度和压力条件[1、3]。实验共持续了216小时。

第二次实验的装样方式与第一次实验基本相同,模具中所装的砂样的总高度为5.0cm。并装满正常的天然海水。实验温度为100℃,压力为220atm,经换算,相当于埋深为1,000m左右的温度和压力条件[1、3]。实验共持续了192个小时。

第三次实验所采用的样品为珊瑚砂和海底泥。珊瑚砂与前两次实验相同。海泥采自南黄海北部拗陷带,水深为50余米的海底表面样品,海泥是由伊利石、蒙脱石和高岭石等粘土矿物组成,有机碳含量为1.4%¹⁾。砂和泥相间放入,模具中样品的总高度为5.0cm。样品注满天然海水后放入压机中进行实验,实验温度为100℃,压

1)海泥样品由林茂福同志提供。

力为220atm，相当于埋深为1,000m左右的地质条件，实验共持续了264个小时。

第四次实验所选用的砂样，未加入粉泥级砂，仅为粗砂和中、细级砂的混合砂样，这两种粒级砂的混合比为 $179.0 : 373.6 = 32 : 68$ ，与原始砂样中的比例相同。模具中样品的装填方式同第一次实验。所装砂样的高度为5.8cm。样品注满海水后放入压机内进行实验。实验的温度为 150°C ，压力为710atm，这种温度和压力大致相当于埋深为3100多米的温度、压力条件[1、2]，实验共持续了336个小时。

三、实验的结果和讨论

1. 砂样粒度的变化

第一次和第二次实验时的温度较低，压力较小，实验结果所得到的样品较为疏松，当样品自模具中取出时，部分样品被破碎成砂，将这两次实验中破碎成砂的砂样，用手轻轻碾碎，手碾过程中尽量放轻，使之尽力避免产生砂粒间的磨损，将碾碎的砂样过筛，分成与原始筛分相同的三个粒级，其结果重量和所占的比重列于表2。

表2 两次实验后粒度变化
Table 2 Variation of the grain size after experiments

	<0.071 mm		0.071—0.92 mm		0.92—2 mm	
	重量(g)	所占百分比(%)	重量(g)	所占百分比(%)	重量(g)	所占百分比(%)
原 样	4.8	0.9	373.6	67.0	179.0	32.1
第一次实验	0.65	8	5.75	71	1.75	21
第二次实验	0.7	11	4.3	70	1.1	19

由表2可以看出，实验前后砂样的粒度发生了非常明显的变化：粒度为0.92—2mm的粗砂级颗粒由实验前的32%左右降低到20%左右；<0.071mm的粉、泥级颗粒，由实验前的0.9%分别增加到8%和11%，约增加了一个数量级。由于第二次实验的压力和温度都比第一次实验高，所以在第二次实验结果的砂样中，粉、泥级质点的含量也明显地大于第一次实验的结果。表明在成岩作用过程中，泥晶化的程度随压力和温度的增高有逐渐增强的趋势。实验结果中，粒度为0.071—0.92mm的中、细砂级部分所占的比例没有表现出明显的变化。这是由于该粒级的砂虽有一部分在成岩作用过程中碎裂变细微晶化，但同时又得到了较粗砂粒变细的那一部分的补偿，而达到平衡。

还可以看到，珊瑚枝有相当一部分破碎成碎片。表明原地生长的珊瑚骨架在沉积过程中由于海浪等的破坏，只能少量保持原地生长的状态，即使是这一小部分保留下来的骨架，在其埋藏后的成岩作用过程中，还会有相当一部分破碎成砂，减少了生物骨架在碳酸盐岩中的比例。

实验前后砂样的构造，无论是在光面上还是在薄片中都可以见到一些变化。砂样是随机地装入模具的，不具方向性。然而在实验后砂粒的排列具一定的方向性，部分颗粒的长轴的排列方向与压力的方向垂直；沿着与压力垂直的方向出现一些细小的裂隙。

压缩率随压力的增加而增加的趋势很明显。第二次实验所得到的岩样长度为3.3cm，压缩率为 $5.0 - 3.3 / 5.0 = 34\%$ ，第三次实验所得到的岩样长度为2.9cm，压缩率为 $5.0 - 2.9 / 5.0 = 42\%$ ；第四次实验所得到的岩样长为2.9cm，压缩率为 $5.8 - 2.9 / 5.8 = 50\%$ 。上述三次实验的压缩率的变化表明，在成岩作用过程中，岩石的孔隙率随着成岩作用进行时的压力和温度的增加而减小，压缩率随压力和温度的增加而增加，同时随原样组成成分的不同而有所改变。

笔者对实验后的岩样作了薄片和光面的显微镜观察,对碳酸盐砂粒的泥晶化作用归纳如下:

(1) 颗粒及颗粒间的挤压破碎形成泥晶颗粒

在实验之初,碳酸盐砂粒之间以点式接触的方式支撑,砂粒周围有很多空隙(图版 I, 1)。这些砂粒大部分是珊瑚枝破碎后所成,在这些砂粒内有很多由生物体腔形成的空隙(图版 I, 1)。当加压时,颗粒间的空隙逐渐变小,颗粒相互接触的部位,由于压应力的作用而破碎,变成了细颗粒,同时颗粒间的接触也逐渐由点式接触变成镶嵌面式或镶嵌接触。体腔孔隙较大的颗粒更易于破碎成粉(图版 I, 2)。在薄片中可以见到两种破碎情况,一种是破碎形成的细颗粒没有发生移动,而原地停积,部分保持其原来颗粒的轮廓(图版 I, 2),但其内部已破碎成镶嵌状的细颗粒了。细小颗粒的粒径一般为0.02mm左右。另一种破碎了的细小颗粒位置发生了移动,分布在较大颗粒的周围或充填在较大颗粒之间的空隙中,形成微细的碳酸盐充填物(图版 I, 2)。

成岩泥晶化作用对颗粒有一定的选择性,泥晶化作用的强弱与砂粒的形状、大小和成分有一定的关系。在薄片中所见到的未破碎的颗粒中,粒度在0.1—1mm之间且有较好圆度的颗粒相对较多,棱角状的、粒度大于1mm的颗粒在薄片中的出现率少。这一结果表明,较大的棱角状颗粒在挤压力的作用下,易于应力集中而破碎成较细小的颗粒。在薄片中的另一个现象就是较大的未破碎的颗粒中,有相当一部分是圆度较好的珊瑚藻屑,这些珊瑚藻屑具拉长现象,它的较长的轴多与压应力的方向垂直。这种现象表明,珊瑚藻屑抵抗破碎的能力较强。

珊瑚骨屑和贝壳屑的破碎泥晶化作用相对较强,在薄片中所见到的破碎泥晶化颗粒大多为珊瑚骨屑、贝壳砂屑和有孔虫壳屑,珊瑚藻屑较少。

(2) 压溶泥晶化作用 在颗粒之间的接触部位,可以见到一层很薄的暗色灰泥边,边的宽度不大,不均匀地分布在颗粒和颗粒之间,同时还可以看到颗粒的相互嵌入和齿状交错接触的现象(图版 I, 3)。在颗粒之间的接触部位,由于承受的压力较大,颗粒除产生破坏外,还发生了溶解作用,溶解了的物质向侧向移动,而不溶和未溶的物质则留在接触面处形成一层灰泥,从而增加了碳酸盐中灰泥成分的含量。这种作用即是缝合线形成的原理。

(3) 溶析泥晶化作用 在薄片中还可见到,在颗粒间构成的空隙中边缘部分及部分较大颗粒的微裂隙中有一层较薄的灰泥边。这层灰泥边分布不均匀,在有些空隙和裂隙中较明显,而在另一个空隙和裂隙中则不明显或不存在。在明显出现的空隙中,这层边也未完全包满整个空隙的边缘(图版 I, 2)。笔者认为这层灰泥边的形成除部分来自压碎了的微细颗粒外,还有一部分可能是由于压溶作用溶解出来的碳酸盐运移到此,由于压力的骤然降低,或是溶液从其它地方溶解而来的碳酸盐运移到该空隙中,由于蒸发等作用浓度增加而从溶液中析出并沿边缘形成细粒的灰泥边。

在笔者所设计的实验装置中,模具不能够循环充水,模具对流体虽有一定的封闭能力,但不是太好,当实验的压力和温度增高时,样品中的水就会慢慢地蒸发跑掉,从而使得流体这一成岩作用的重要成分的作用时间变短,尽管如此,仍可见到溶析泥晶化作用的存在。

根据实验结果,在上述三种泥晶化作用中,以第一种为最重要,第二、三种次之。由于在实验中,水这个非常活跃的重要组分的作用没有得到充分发挥。而如果考虑到压力、温度的增加是在长时间内并且以非常缓慢的速度进行的话,压溶和溶析作用就有可能是很重要的了。而后两种情况更加接近地质时期的成岩作用条件。

2. 砂粒的胶结类型

碳酸盐岩的胶结物和胶结类型是判断碳酸盐岩成岩作用过程的一个重要参数。本文的实验结果所形成的胶结物全部都是微细粒的碳酸盐,显微镜下未见到亮晶、纤维状晶等古代碳酸盐岩中常见的一些胶结物。

根据岩样中的胶结物的胶结方式、胶结物的特点及与碳酸盐颗粒之间的关系;胶结类型主要有下列两种:

(1) **开放空间充填式胶结** 胶结物为微细晶质的碳酸盐, 胶结物沿颗粒间的空隙及颗粒内部的裂隙充填, 从而把颗粒胶结起来。在未填满的空隙内, 胶结物一般沿空隙的边缘分布, 形成一圈宽度大致相同的环边。

(2) **接触式胶结** 碳酸盐颗粒和颗粒互相接触。在较高的压力和温度作用下, 碳酸盐颗粒发生塑性变形, 使得颗粒紧密接触, 镶嵌在一起, 颗粒间没有或只有少量的细粒胶结物; 若在较高的压力下, 相互接触的颗粒之接触部位发生压溶, 形成一层很薄的细粒胶结物将颗粒胶结在一起。

3. 矿物成分的变化

现代正在形成的珊瑚、贝壳等生物骨骼大部分都是由文石组成; 而古代碳酸盐岩中的生物碎屑则多为方解石所构成。构成生物屑的矿物在成岩作用过程中的变化是怎样的呢? 对于这个问题, 本文的实验也取得了较有意义的结果。实验前后矿物成分的变化见表 3。

矿物鉴定是在 Ramk-60 型衍射仪上进行的¹⁾, 其矿物的衍射图见图 2。

表 3 实验前后矿物成分的变化

Table 3 Variation of the mineral composition before and after experiments

样品号	实验号	砂的名称	粒 度 (mm)	实验温度 (℃)	压 力 (atm)	时 间 (h)	流 体 性 质	结 果
Xs-12 (1)	原 砂	珊瑚砂	0.5-1.0					
Xs-12 (2)		贝壳砂	0.5-1.0					
Xs-1 (1)	第 一 次 实 验	岩 屑	<0.071	80	200	216	雨 水	方解石 文 石
Xs-1 (2)		岩 屑	0.071-0.92					
Xs-2 (1)	第 二 次 实 验	岩 屑	<0.071	100	220	192	海 水	文 石 文 石 文 石
Xs-2 (2)		岩屑(珊瑚)	0.1-0.92					
Xs-2 (3)		岩屑(贝壳)	0.1-0.92					
Xs-3	第三次实验	岩 屑	0.1-0.92	100	220	264	海 水	文石(?)
Xs-4	第四次实验	岩 屑	0.1-0.92	150	710	336	海 水	方解石

由表 3 和图 2 可以看出, 在实验前后碳酸盐矿物发生了比较明显的有规律的变化。实验前的生物碎屑砂, 无论是珊瑚还是各种贝壳砂都是由文石组成的。在成岩作用过程中, 在一定的温度和压力的作用下, 在液体的参与下, 文石逐渐变为方解石。影响这种转变的因素主要有三个。

(1) **参与成岩作用过程的液体的性质** 在压力和温度较低的情况下, 由文石向方解石的转变主要取决于成岩作用过程中液体的性质。正如实验 1 的结果所表明的那样, 参与成岩作用的液体是雨水或其它淡水, 在不太高的温度和压力下, 文石会很快地转变为方解石; 若参与成岩作用的液体是海水或其它咸水, 则文石向方解石转变就缓慢得多。第二次和第三次实验, 虽然实验的温度和压力均高于第一次, 但因所用之液体为海水, 文石都没有发生变化。

1) 由地化所邓秉均同志分析。

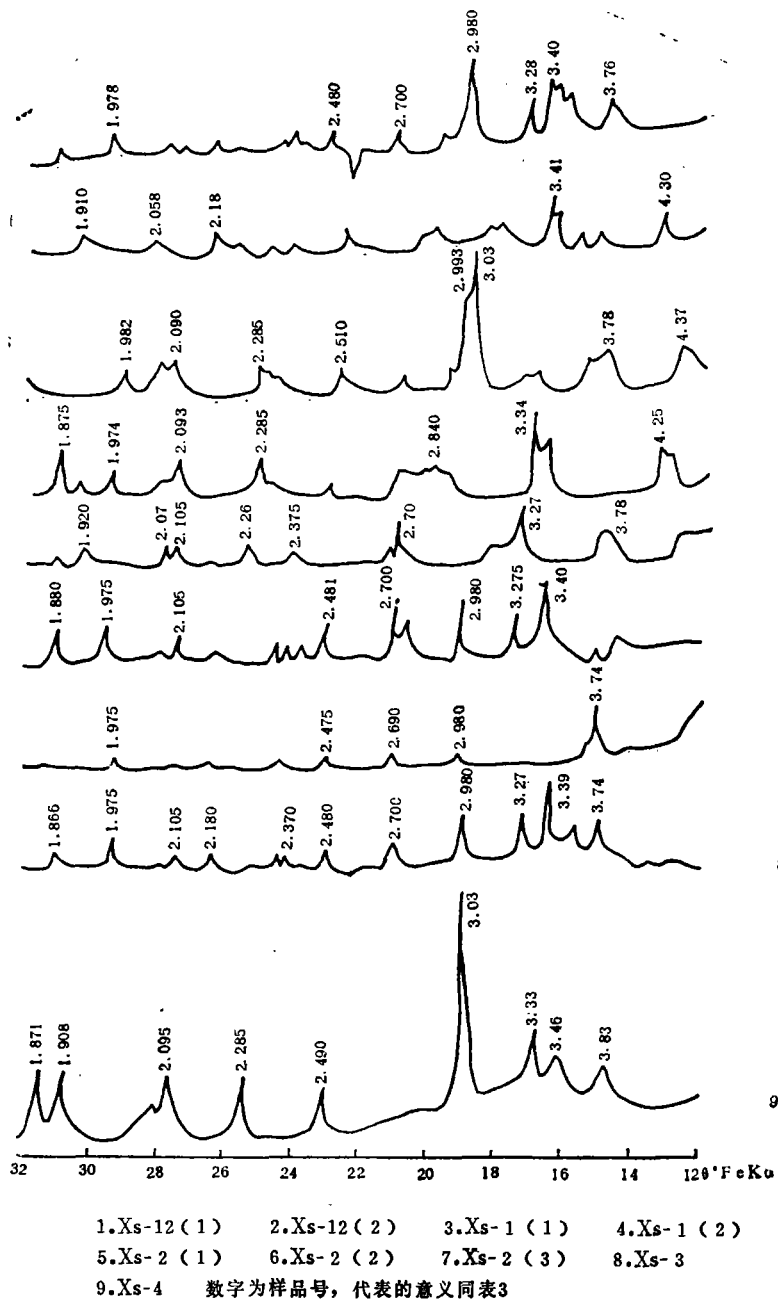


图2 实验前后矿物的衍射图

Fig.2 X-ray diffracted diagram of minerals before and after experiments

(2) **温度和压力** 在成岩作用过程中, 温度和压力是矿物发生变化的重要因素。在第二次和第三次及第四次实验中所用之液体均为海水, 参与实验的液体条件相同, 但是, 因为第二、第三次实验的温度和压力较低, 文石都没有转变成方解石; 而在第四次实验中, 实验的温度增加到150℃, 压力增加到710atm, 随着温度和压力的增高, 文石变成了方解石。

(3)时间因素 在第一次实验中, $<0.071\text{mm}$ 粒级的粉、泥晶的文石变成了方解石; 而在同一次实验中的粗粒碎屑颗粒则未发生变化, 仍然是文石。作者认为矿物颗粒的大小不是一个决定矿物是否变化的独立因素, 而是时间因素的反映。细小的颗粒因其表面积大, 接触溶液的机会多, 反应的面积大, 因此转变的速度就快; 而较粗大的颗粒, 表面积小, 接触溶液的机会少, 反应的面积小, 因而转变的速度就低, 故在较短的时间内未显示出明显的变化, 若增加作用的时间, 在同样的温度和压力及溶液条件下, 较大的颗粒也会变成为方解石。

四、实验结果的地质意义

目前国内外应用比较广泛的福克和顿哈姆分类, 是以碳酸盐岩中颗粒和泥晶灰泥这两种组分的含量的多少来划分岩石类型, 并确定其沉积环境的。因此, 对碳酸盐岩结构组分中的一个重要组分——泥晶灰泥的形成过程和形成机理的研究是至为重要的。

关于泥晶灰泥的形成机理问题。在已发表的文献中常提到的有: 颗粒的机械破碎作用, 藻类等生物生命活动中的沉淀作用; 方解石对文石的转换作用; 生物的掘食、破坏作用等。除此之外, 根据本实验的结果, 成岩作用过程中的颗粒间的挤压、压溶、溶解等成岩作用在一定程度上也能够产生泥晶灰泥。

由于泥晶灰泥形成机理的多样性, 形成时间的长期性(自沉积阶段直至成岩作用阶段), 因此它们的形成环境也应有多种解释。但在碳酸盐的研究中, 一个被人们普遍接受并遵循的原则是, 泥晶灰泥是在沉积时的水体局限性较强、水体较深、比较安静、风浪作用很少波及的低能环境中沉积形成的; 而在海水较浅、水体局限性较差、波浪频繁波及的动荡高能环境中, 泥晶灰泥质点大都在流水的冲刷、筛选作用下被带走, 只能沉积较粗的颗粒。目前应用较广的碳酸盐岩的岩石分类及沉积环境的推定, 主要就是基于上述原则进行的。

诚然, 这种以沉积时的水动力条件来解释泥晶灰泥形成的基础是正确的。碳酸盐岩中泥晶灰泥含量的多少, 在一定程度上反映了它沉积时水动力条件的强弱, 即在一定程度上反映了它沉积时的环境, 但是, 从上述的讨论中知道, 泥晶灰泥质点的形成不仅仅是低能的水动力条件下原始沉积的结果, 而且也是碳酸盐沉积以后的整个成岩作用历史过程中, 不断地受到生物的、各种机械的及化学作用的结果。它的存在不仅提供了岩石沉积时期沉积作用的信息, 同时也提供了成岩作用期间的信息。所以, 以颗粒和泥晶灰泥的相对含量为主要依据进行岩石分类和确定沉积环境, 似乎需要慎重考虑。

鉴于上述原因, 笔者认为目前广泛应用的以颗粒和泥晶灰泥为两端元组分的结构分类中, 作为一个重要组分的泥晶灰泥反映沉积环境的能力较差, 形成的因素多样, 因此仅用这两个组分来解释岩石的沉积环境必然会出现一些失误。笔者认为成因意义和环境意义最为明确的另一组分, 即生物骨架应特别加以重视。

本文在实验过程中得到了陈先沛同志的热情帮助和指导, 特此表示感谢。

收稿日期 1984年7月13日

参 考 文 献

- (1) Chilingarian, G.V and Wolf, K.H., 1975, Compaction of coarse-grained sediments, 1, (Developments in Sedimentology, 18 A) Amsterdam, Elsevier,
- (2) Friedman, G. and A., 1981, Jour.Sedim.Petro.and SEMP Special Publication, N.13, P.180—200
- (3) Kieke, H.H and Chilingarian, G.V., 1974, Compaction of argillaceous sediments, Developments in Sedimentology 16, Amsterdam, Elsevier,
- (4) Larsen, G. and Chilingar, G.V., 1979, Diagenesis in sediments and sedimentary rocks. N.Y., Amsterdam, Oxford,

EXPERIMENT STUDY OF DIAGENETIC VARIATION OF MODERN CARBONATE GRAINS

Gao Jiyuan

(Guiyang Institute of Geochemistry, Academia Sinica)

Abstract

Based on the diagenetic experiment of the modern carbonate sand sampled from Xisha Archipelago, this paper studies in detail the diagenetic changes of the texture, construction and mineral composition of carbonate in higher temperature and higher pressure. The results of the experiment show that the sand grains of carbonate are micritized in three ways during the diagenetic process: (1) fractured micritization, under higher pressure coarse carbonate grains are fractured into fine micritic grains with closely mosaic texture. (2) pressolutional micritization, along the contact zone between carbonate grains a micro-mudband is formed because of mutual squeeze and the band width is generally not large. (3) solution micritization. The carbonate dissolved under various actions is deposited and forms micritic-muddy grains in pores and cracks of rocks. In which the most important one is the fractured micritization in the experiment, but the other two may be very important factors in the practical diagenetic process.

With the increase of the experimental temperature and pressure the compacting ratios of the sand columns and the micritization of carbonate grains gradually increase. The strong or weak micritization somewhat depends on the grain size and composition of the fragments. Coral and shall fragments are more easily micritized than other fragments.

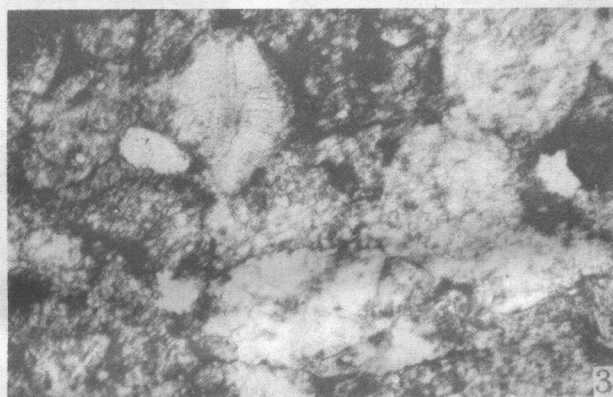
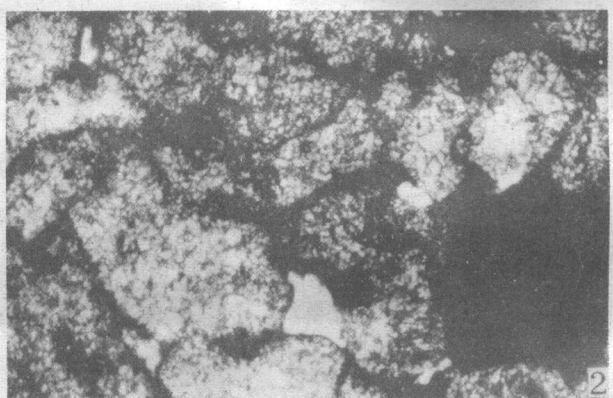
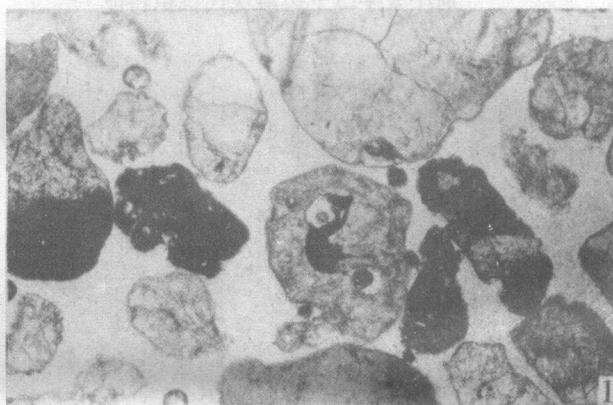
The arrangement of carbonate grains, in which the longer axis is perpendicular to the direction of the pressure force, shows a certain orientation under higher pressure.

There are two cement types in the rock samples of the experiment: (1) open-filled cementation and (2) touched cementation, with the increase of temperature and pressure, the porosity of rocks samples rapidly decreases.

The mineral composition of rock samples shows a distinct change during the diagenesis, aragonate of some rocks samples changes gradually into calcite. This change mainly related to the properties of the fluid involved in the diagenesis as well as the temperature and pressure. Among these factors the most important one is the

property of the fluid. If the fluid used in the experiment is fresh or rainwater, aragonate quickly changes into calcite under the same pressure and temperature; if the fluid is normal marine water or other saline water, the change is more difficult. Therefore, fresh water, higher temperature and pressure are favourable to the mineral change.

EXPERIMENT OF DIAGENETIC VARIATION OF CARBONATE GRAINS
高计元 碳酸盐颗粒成岩变化的实验研究 图版 I



1. 原砂样颗粒 $\times 33$ 2. 破碎后的岩样颗粒 $\times 33$ 3. 岩样薄片, 在颗粒间及其空隙中的微细灰泥边