

文章编号:1000-0550(2011)03-0475-11

白云岩的残余结构及由此引发的孔隙分类问题^①

张学丰^{1,2} 蔡忠贤³ 李林³ 谷晓丹² 赵文光³

(1. 北京大学石油与天然气研究中心 北京 100871; 2. 中国石油大学油气资源与探测国家重点实验室 北京 102249;
3. 中国地质大学资源学院 武汉 430074)

摘要 对碳酸盐岩的结构分类方法进行了评述,但目前的分类并未对白云岩的残余结构问题进行充分论述。为了能更准确地恢复岩相古地理和进行精细的成岩研究,有必要对残余结构进行细分。白云岩的残余结构是由于原始粒屑结构的灰岩经白云岩化、重结晶、溶蚀、胶结等成岩作用之后,岩石原始结构遭到不同程度的破坏,但仍残留有部分原始结构信息而形成的。根据颗粒与胶结物的可识别性和颗粒内部结构的保存程度,把残余结构划分为残余粒屑结构、残余粒形结构和残余影像结构,并分别给出相应的判别标准、鉴定特征、描述方法和相关实例。残余结构白云岩的孔隙分类也与原始粒屑结构灰岩有所不同。在 Choquette 和 Pray(1970)孔隙分类方法的基础上,把残余结构白云岩的孔隙分为组构选择性孔隙、部分组构选择性和非组构选择性孔隙三大类。其中,组构选择性孔隙包括粒内孔(含铸模孔)、粒间孔和晶间孔三大类,其中前两者还包括不同形态的亚类;非组构选择性孔隙主要包括溶蚀扩大孔;非组构选择性孔隙按孔隙形态和大小划分为溶孔、溶沟、溶洞、裂缝和角砾孔隙。

关键词 白云岩 残余结构 孔隙分类

第一作者简介 张学丰 男 1982 年出生 博士后 储层地质学 E-mail: jluzxf@163.com

中图分类号 P588.24⁺5 **文献标识码** A

对于碳酸盐岩储层的研究来讲,有两个重要的问题必须首先解决,即对岩石结构类型和对孔隙类型的合理划分。

人们对碳酸盐岩岩石结构类型的认识与碳酸盐岩的结构成因分类是同步的。目前应用最多的是 Folk^[1,2] 和 Dunham^[3] 的成果,或在他们的基础上进行修改了的分类方法^[4-8]。然而,前人提出的有关岩石结构的分类方案,大部分都是基于对灰岩的研究,而认为白云岩可基本照搬。但我们知道,因为全部或大多数白云岩都是次生的,因而含颗粒的灰岩发生白云岩化,且大多情况下又发生了重结晶作用(或新生变形作用^[7])之后,其原始岩石结构会遭到一定程度的破坏,有的甚至完全被改造,这就形成了所谓的白云岩的残余结构。

Folk^[1,2] 和 Dunham^[3] 的分类只把颗粒当作一种结构组分来处理,而未考虑“残余结构”问题;Friedman^[9]、Gregg 和 Sibley^[6] 和 Sibley 和 Gregg^[7] 对白云岩的结构进行了论述,虽然注意到白云岩化对异化颗粒原始结构的破坏问题,但主要还是针对白云石晶体本身及晶体之间的相互接触关系来论述的;San-

der^[4]、Sibley^[10] 和毕义泉等^[11] 注意到白云岩的残余结构问题,但他们的分类存在易于混淆和不便于应用的地方(见后文讨论)。

对于不含颗粒的晶粒结构灰岩或白云岩来说,不存在“残余”的问题。对于部分白云岩化的、含异化颗粒的灰岩来说,其结构基本上是清晰的,即一般划分为粒屑结构^[12],国外尤其是在野外常按照 Dunham^[3] 的方法进行命名。但对于完全白云岩化了的含颗粒岩来讲,由于原始结构遭受破坏的程度不同^[13],残余结构的“残余”程度也不同。如何区分这种“残余”程度,并有效地把原岩的原始沉积结构恢复出来,成为人们认识该碳酸盐岩的岩相古地理的关键。这就是本文所谓的含异化颗粒的白云岩的残余结构问题。

另外,在原始岩石结构遭受破坏的同时,岩石的孔隙结构也必将发生改变。极端的情况就是先前粒屑结构灰岩中的选择性粒内(溶)孔或粒间(溶)孔^[14],变为原始结构几乎破坏殆尽,现今可看作晶粒结构白云岩中的晶间孔。正是由于这种残余结构的存在,使得碳酸盐岩的孔隙类型划分变得更加复杂。

^①国家重点基础研究发展计划“973”项目(编号:2005CB422105)国家自然科学基金青年科学基金项目(批准号:41002029)和中国博士后科学基金(编号:20100470162)联合资助。

收稿日期:2010-04-30; 收修改稿日期:2010-07-04

目前常用的孔隙分类方法^[14~20]并没有完全、明确地解决该问题。因此在实际应用中,难免会让人感到迷惑,而且最关键的是对于不同学者,其划分方法存在很大的不同,这样就难免造成误解和不便。

为此,需要对这种特殊的岩石结构和孔隙结构进行分类标准的统一。本文拟专门就含颗粒的白云岩的残余结构及其相关的孔隙分类问题进行探讨,以抛砖引玉。

1 碳酸盐岩的结构分类方法

碳酸盐岩的结构与岩石成因有密切关系,是岩石分类命名的主要依据和环境分析的重要标志,还与油气储集性能有直接关系^[12]。传统上,碳酸盐岩的结构分为粒屑结构、生物结构、晶粒结构和残余结构。对这些结构的认识是逐步发展的,与对碳酸盐岩结构成因类型划分的认识发展是一致的。

结构成因分类最早开始于20世纪初,其后经过半个多世纪的发展,在20世纪60年代取得重大进展。1962年,AAPG和SEPM协会联合召开了碳酸盐岩分类讨论会,并出版了碳酸盐岩分类文集,其中收

录了Folk^[1,2]、Dunham^[3]、Leighton和Pendexter^[21]、Plumley^[22]等人的成果,具有划时代的意义。

Folk^[1,2]对碳酸盐岩的分类(表1)是一个具有重大历史意义的突破,“他吸收了Grabau关于碳酸盐岩‘碎屑’的观点,系统地把碎屑岩的结构概念引入到碎屑成因的石灰岩中,并把它们提高到极为重要的地位,从而打破了多年来碳酸盐岩纯化学成因观念的束缚,并把石灰岩分为三个基本类型——异常化学岩(allochemical rocks)、正常化学岩(orthochemical rocks)和原地礁岩(autochthonous rocks)和结构上的三个端元组分——泥晶方解石基质、亮晶方解石和颗粒质点,各自组合进行结构分类命名”^[12]。以这种思想进行分类的方法至今都得到了广泛的应用。

Dunham^[3]分类的核心思想是以岩石组构——颗粒与灰泥的相对含量、颗粒与灰泥的支撑性质为依据,来划分石灰岩的主要类型——灰泥岩(mudstone)、粒泥岩(wackestone)、泥粒岩(packstone)和颗粒岩(grainstone),并可由此判定各类岩石的环境和水动力学意义;又把沉积过程中原始组分已被粘结者划分为粘结岩,已发生重结晶作用和交代作用使沉积

表1 Folk^[1,2]的碳酸盐岩分类

Table 1 Carbonate classification by Folk^[1,2]

				石灰岩、部分白云石化石灰岩及原生白云岩				交代白云岩					
				异化颗粒>10% 异常化学岩(I和II)		异化颗粒<10% 正常化学岩(III)		未受搅动礁石灰岩(IV)	有异化痕迹	无异化痕迹			
				亮晶方解石胶结物>泥微晶基质	亮晶方解石胶结物<泥微晶基质	异化颗粒1%~10%	异化颗粒<1%				生物岩	异化颗粒明显	中晶白云岩、细晶白云岩
				亮晶异常化学岩	微晶异常化学岩								
异化颗粒的体积含量	内碎屑>25%			内碎屑亮晶砾屑石灰岩,内碎屑亮晶石灰岩	*内碎屑微晶砾屑石灰岩	最主要的异化颗粒类型	内碎屑:*含内碎屑微晶石灰岩	微晶石灰岩;假如受过搅动则称搅动微晶石灰岩;假如为原生白云岩则称微晶白云岩	生物岩	异化颗粒明显			
	内碎屑<25%	鲕粒>25%		鲕粒砾屑亮晶石灰岩,鲕粒亮晶石灰岩	*鲕粒微晶砾屑石灰岩,*鲕粒微晶石灰岩		鲕粒:*含鲕粒的微晶石灰岩				粗晶鲕粒白云岩		
		鲕粒<25%	化石与球粒的体积比	>3:1	生物亮晶砾屑石灰岩,生物亮晶石灰岩		微晶生物砾屑石灰岩,生物微晶石灰岩				化石:含化石的微晶石灰岩	隐晶生物白云岩	
				3:1~1:3	生物球粒亮晶石灰岩		生物球粒微晶石灰岩				球粒:含球粒的微晶石灰岩	极细晶球粒白云岩	
		<1:3	球粒亮晶石灰岩	球粒微晶石灰岩									

注:*表示不常见的岩石类型

表2 Dunham^[3]的灰岩结构分类
Table 2 Limestone classification by Dunham^[3]

沉积结构能够辨认				沉积结构不能辨认	
沉积组分未被粘结		沉积组分被粘结		crystalline carbonate	
有泥晶		无泥晶		结晶灰岩	
基质支撑		颗粒支撑		粗晶灰岩	
颗粒<5%	颗粒>5%	颗粒支撑	颗粒支撑	中晶灰岩	
mudstone	wackestone	packstone	grainstone	细晶灰岩	
灰泥岩	粒泥岩	泥粒岩	颗粒岩	极细晶灰岩	
				boundstone	
				叠层石灰岩	
				生物骨架灰岩	
				粘结灰岩	
				障积灰岩	

结构消失者划分为结晶碳酸盐岩(表2)^[12]。其分类简明扼要,尤其是在野外应用起来非常方便,非常适合进行岩相古地理研究,因此至今都应用广泛。

Embry 和 Klovan^[5]在 Dunham 的分类基础上,作了重要补充,增加了砾级颗粒部分,划分出基质支撑的漂浮岩(floatstone)和颗粒支撑的灰砾岩(rudstone),还按不同的生物作用把粘结灰岩细分为障积灰岩(bafflestone)、粘结灰岩(bindstone)和格架灰岩(framestone)。Sander^[4]将粒屑组分扩充为生物碎屑、球粒、鲕粒、加积碎屑、碳酸盐岩屑和陆源岩屑。Wright^[8]又把石灰岩的分类总结为三大基本类型,即沉积的、生物的和成岩的,新增的成岩大类主要由胶结、压实压溶和重结晶作用引起^[12]。近年来,有学者注意到由微生物作用所产生的灰岩和由事件性沉积所形成的灰岩的分类问题^[23]。

而有关白云岩的结构分类问题很少有文章专门提及。Folk^[1,2]有关异化颗粒的思想并未注意到白云岩化作用对异化颗粒原始结构的破坏程度问题。白云岩的残余结构问题使得人们在应用 Dunham^[3]的方法对含异化颗粒的白云岩进行分类时,必须考虑白云岩化及之后的成岩作用对原岩结构的破坏和保留程度,否则可能得出错误的岩相古地理认识,比如把高能环境下产生的(含)颗粒白云岩,当作低能条件下形成的晶粒结构白云岩^[11]。

Sibley 和 Gregg^[7]专门研究了白云岩的结构,但他们的贡献主要在于对白云石晶体结构的识别和划分,虽然他们也提到白云岩的交代残余结构,应用的是 Kaldi 和 Gidman^[13]提出的拟晶交代(mimic replacement)和非拟晶交代(nonmimic replacement)的定义,明显地,这种残余结构分类也主要针对单个颗粒而言,并未对整个岩石的残余结构提出明确的划分标准。Sibley^[10]在前面工作的基础上,把白云岩的交代分为结构保存的交代(mimetic replacement)和结构破坏的交代(nonmimetic replacement),前者指保存了

异化颗粒或胶结物的外形和内部结构,而后者仅保存了其外形,而内部结构完全被破坏。应该说 Sibley^[10]的分类具有很强的指导意义,但也一如作者本人所说,这种分类还是定性的,即没有一个严格的、统一的标准,这就难免会使得不同学者之间的分类存在差异和难以对比的地方;而且他认为,只要有哪怕是一个颗粒的外形和内部结构得到了保存,就应该划分为“mimetic replacement”,而不管该颗粒是否能代表薄片中的所有颗粒类型,也未考虑这个颗粒是否是经风暴搬运过来的砾屑——即并不代表原地沉积的颗粒;另外,对于“胶结物的结构保存”,实际上默认了该胶结物是原先方解石胶结物的交代产物,而胶结物还可能是直接沉淀的,二者难以区别^[7],如果是后者,就不存在“结构保存”的问题,所以不建议纳入白云岩的残余结构分类系统中来考虑。

在国内,很少有人研究这种残余结构问题。毕义泉等^[11]专门撰文对白云岩的残余结构及其与泥晶套发育之间的关系进行了探讨。他们根据碳酸盐岩结构组分的类型、交代强度及可识别性把次生白云岩的残余结构分为交代残余结构、交代影像结构、交代晶粒结构三大类,每类还可根据具体的结构组分类型进一步划分和命名如下表3。

毕义泉等^[11]认识到了白云岩的现今结构描述对恢复原岩的原始结构的重要性,并考虑了碳酸盐岩的结构组分的类型、交代强度和可识别性,这尤其对于国内的白云岩研究具有重要的启发意义。不过,在实际中应用该分类方案可能会出现,体现在:①交代强度与结构的可识别性有很大关系,但并不对应,因为很多完全白云岩化了的碳酸盐岩,交代强度应为“很强”,但因为颗粒内部为泥—粉晶结构,所以内部结构十分清晰,所以按照上述划分方法会出现问题;②至少还应该考虑重结晶作用对结构的影响;③结构的保存还跟溶蚀和充填等作用有关,必须加以讨论;④对(含)颗粒岩来讲,可能由于原始结构的破坏和

表3 毕义泉等^[11]对白云岩(交代)残余结构的分类Table 3 Relict texture classification by Bi *et al*^[11]

残余结构大类	残余结构类型	交代强度	主要特征	泥晶套变化强度
交代残余结构	残余颗粒结构	弱—较弱	原岩结构类型较清晰,容易恢复原岩结构(特征)	弱—较弱
	残余灰泥结构			
	残余格架结构			
交代影像结构	颗粒影像结构	较强—强	原岩结构类型,特别是一些细微结构基本被破坏,只保留宏观结构的轮廓或形态	强,部分被破坏但仍显轮廓
	格架影像结构			
交代晶粒结构	晶粒结构	很强	原岩结构全被破坏	全被破坏

变形作用,即使泥晶套得以保存,也难以分辨残余鲕粒和残余砂屑,因此在分类中过细反而不准,应当给予相应说明;⑤所划分的交代晶粒结构和晶粒结构指代不清,使人难以确定现今的晶粒结构是否指示原岩为粒屑结构,假设原岩即为灰泥结构,则白云岩化之后的白云岩即划分为晶粒结构即可,不必再强调“残余”或“交代”。

综上所述,前人认识到白云岩的残余结构问题,并给出了具有借鉴意义的划分方案,但是也存在一定的问题。因此,有必要在前人工作的基础上,对白云岩的残余结构进行更为合理和明确的分类。

2 白云岩的残余结构分类与描述

在进行分类描述之前,有以下几点需要引起注意。

(1) 一般来说,残余结构是指由于白云岩化和白云岩重结晶而造成岩石的原始结构遭到不同程度的破坏,而现今保存下来的结构信息是残留下来的,因而称具有这些残留结构信息的岩石具“残余结构”。由于“残余”程度的不同,残余结构的详细分类应给予体现。前人描述过这种白云岩的残余结构,如划分为 mimically 或 nonmimically replacement(结构保存/不保存的交代)和“ghosts”(幻影)^[7,13],或“fabric retentive”(结构保留)、“fabric destructive”(结构破坏)两种白云岩^[24],划分的依据主要是颗粒的外形和内部结构。这些分类思想值得借鉴。

(2) 对于颗粒含量小于10%(或5%)的晶粒结构的灰岩,白云岩化和重结晶作用之后仍为晶粒结构,那么可认为岩石结构没有遭到破坏,不存在“残余结构”的问题。

(3) 对于生物结构的碳酸盐岩,由于具有生物活动的典型特征,白云岩化和重结晶作用对这些岩石结构的破坏一般有限,因此作者不建议把生物结构的碳酸盐岩考虑到残余结构问题中,例如可直接定为生物

骨架结构的礁白云岩,不必再把问题人为复杂化。但要考虑生物碎屑作为颗粒组分的情况。

综上(1)~(3),本文认为,白云岩的残余结构可特指原始灰岩为粒屑结构的碳酸盐岩,即 Dunham^[3]分类中的 wackestone、packstone 和 grainstone,主要经过了白云岩化和重结晶等成岩作用,所形成的白云岩在目前所具有的结构。

(4) 由于粒屑结构可看作颗粒与基质或胶结物清晰可辨的结构,“残余”较多的残余结构其颗粒与基质或胶结物基本可辨;而“残余”较少的残余结构颗粒与基质或胶结物基本不可区分,而更接近于晶粒结构。因此,可认为粒屑结构、残余结构、晶粒结构三者构成了一个结构上“过渡”的序列。

(5) 对于部分白云岩化的粒屑结构灰岩,一般来说原始结构都保存较好,按灰岩的结构命名来划分即可;若白云岩化或重结晶作用程度稍高,原始结构遭到较强破坏,则可按下文中的残余结构来划分,只不过命名时须注意方解石和白云石的含量,命名为“xxx 含云/白云质灰岩”或“xxx 灰质/含灰白云岩”。

(6) 原始结构的保存还与溶蚀、胶结和充填等成岩作用有关,这些成岩现象对于我们判断和恢复岩石的原始结构具有参考意义。

(7) 由于颗粒类型在判断原始沉积环境时非常重要,因此应尽可能恢复原始颗粒的类型。鲕粒一般可由其部分残留的内部层圈构造、形态较圆、分选较好等来判断。但是,由于原始鲕粒可能内部结构被完全破坏且又发生压实变形和部分溶蚀,可能难以与残余砂屑、砾屑等区分,此时应避免分得过细,或在区域地质背景和层序地层格架中推断颗粒类型。

(8) 在分类时,应尽可能结合野外、手标本和显微镜下观察的结果,做到三者统一。在野外或手标本上一般即可判断是否含颗粒^[11],但判定的标准还是显微镜下能观察到颗粒或其残余,有时借助于阴极发光等手段可有效地恢复原岩结构。

表 4 白云岩的残余结构分类

Table 4 The classification of relict textures of dolostones

残余结构类型	残余粒屑结构 mimetic texture	残余粒形结构 nonmimetic texture	残余影像结构 ghost texture
划分原则	颗粒或其铸模孔与基质或胶结物基本清晰可分,可分别定量;大部分颗粒内部结构较清晰~清晰	颗粒或其铸模孔与基质或胶结物大部分清晰可分,基本可分别定量;颗粒内部结构基本被破坏,或少部分保存	颗粒或其铸模孔与基质或胶结物大部分不可区分,不可分别定量;颗粒内部结构基本被破坏,可能有个别保存
宏观特征	野外或手标本下可见清晰的颗粒,薄片对光颗粒清晰	野外或手标本下可见较清晰的颗粒,薄片对光颗粒清晰	野外或手标本下隐约可见颗粒,薄片对光可见颗粒外形
显微特征	原始结构(主要是颗粒内部)遭到一定破坏、模糊,或者部分颗粒被选择性溶蚀-胶结,如形成了鲕粒内的层圈孔,但保存了大部分内部结构,如鲕粒的纹层、颗粒泥晶套,有时因为层圈孔的发育和沥青的充填使得内部结构异常清晰;完全能区分颗粒、胶结物与孔隙,并可分别定量	原始结构遭到较强破坏,尤其常因为颗粒泥晶套不发育使得颗粒与胶结物大部分连片分布;颗粒内部结构基本消失,有时选择性粒内孔或粒间孔完全或部分被白云石、方解石、沥青、石英等充填;但由于颗粒和胶结物的白云石晶体结构不同,或因为孔隙充填物不同,而使得二者基本可区分,基本可根据颗粒外形分别定量	原始结构遭到强烈破坏,几乎变为晶粒结构,但在灯光或日光下显示有较多颗粒(>10%),在显微镜下隐见颗粒外形或幻影,尤其颗粒边缘发育的泥晶套一般能保留;白云石晶体大小一般较均一,大部分为细-中晶白云石,晶体表面一般很脏;颗粒与胶结物不可区分,不能分别定量
常见孔隙类型	若非有晚期溶蚀或裂缝,孔隙类型一般以选择性的粒间孔和粒内孔(包括铸模孔)为主,可部分被充填破坏	若非有晚期溶蚀或裂缝,孔隙类型以选择性的粒间孔和粒内孔,而有时则多为粒间晶间孔和粒内晶间孔	若非有晚期溶蚀或裂缝,孔隙类型仍部分受颗粒边界控制;但大部分为晶间孔、溶蚀扩大孔和非选择性溶孔等
命名-描述原则	泥晶/亮晶残余"xx颗粒"或残余"xx颗粒"泥晶/亮晶白云岩(明确指出颗粒类型)根据颗粒与泥晶、亮晶的相对含量按照 Dunham(1962)的分类命名,并分别按照 Sibley and Gregg(1987)注明颗粒、胶结物的晶体结构	泥/亮晶残余颗粒白云岩(根据颗粒与泥晶、亮晶的相对含量按照 Dunham 1962 分类),并根据原始结构保存相对较好的颗粒,以及颗粒的外形和分选,综合判断或推断颗粒类型;分别说明颗粒、胶结物的晶体结构	残余影像粉(~粗)晶白云岩,然后按照 Sibley and Gregg(1987)的白云石结构分类进一步描述

综合以上考虑之后,本文按照以下具优先顺序的两个原则:①首先,颗粒与基质或胶结物是否基本清晰可分,即是否可分别确定各自所占的面积百分含量,和②其次,颗粒(专指具内部原始结构的颗粒,如鲕粒或豆粒)内部结构是否大部分被保留,把残余结构分为残余粒屑结构、残余粒形结构和残余影像结构三大类,并给出具体的分类命名方法(表4)和相应的实例(图1)。

3 白云岩的残余结构所引起的孔隙分类问题

对于碳酸盐岩储层孔隙类型的划分,主要有两类:一类是用于油藏描述和工程方面,综合考虑了孔隙度和渗透率的相关关系,主要应用的是 Archie^[15]和 Lucia^[17-19]的分类思想;一类服务于勘探,主要从成因方面考虑,继承了 Murray^[16]的原生和次生孔隙的思想,主要应用的是 Choquette 和 Pray^[14]的分类。

Lønøy^[20]在整合了 Lucia^[17]关于“孔隙大小是理解孔渗关系的关键”的思想,并结合 Choquette 和 Pray^[14]的分类方法,提出了一套改进过的分类方法,其主要目的在于提高了分类孔和渗透率的相关系数,以利于储层模型预测。因此,有可能适用于孔隙成因和演化研究的孔隙类型划分,差不多都是应用或借鉴了 Choquette 和 Pray^[14]的分类。

Choquette 和 Pray^[14]的孔隙分类主要贡献在于把孔隙和岩石结构联系起来,根据孔隙是否受岩石结构控制而分为组构选择性和非组构选择性两个端元。组构选择性的孔隙主要包括粒间孔、粒内孔、晶间孔、铸模孔、鸟眼孔、遮蔽孔和生长格架孔;非组构选择性的孔隙主要有裂缝、溶沟、非选择性溶孔和溶洞;另外还有角砾孔、生物钻孔、潜穴和收缩孔等中间类型。对于孔隙的改造方面,他们用了一系列修饰限定语,如溶蚀扩大、胶结减小、完全充填等;并介绍了对孔隙大小进行定性及对孔隙含量进行定量描述的方法和原则。

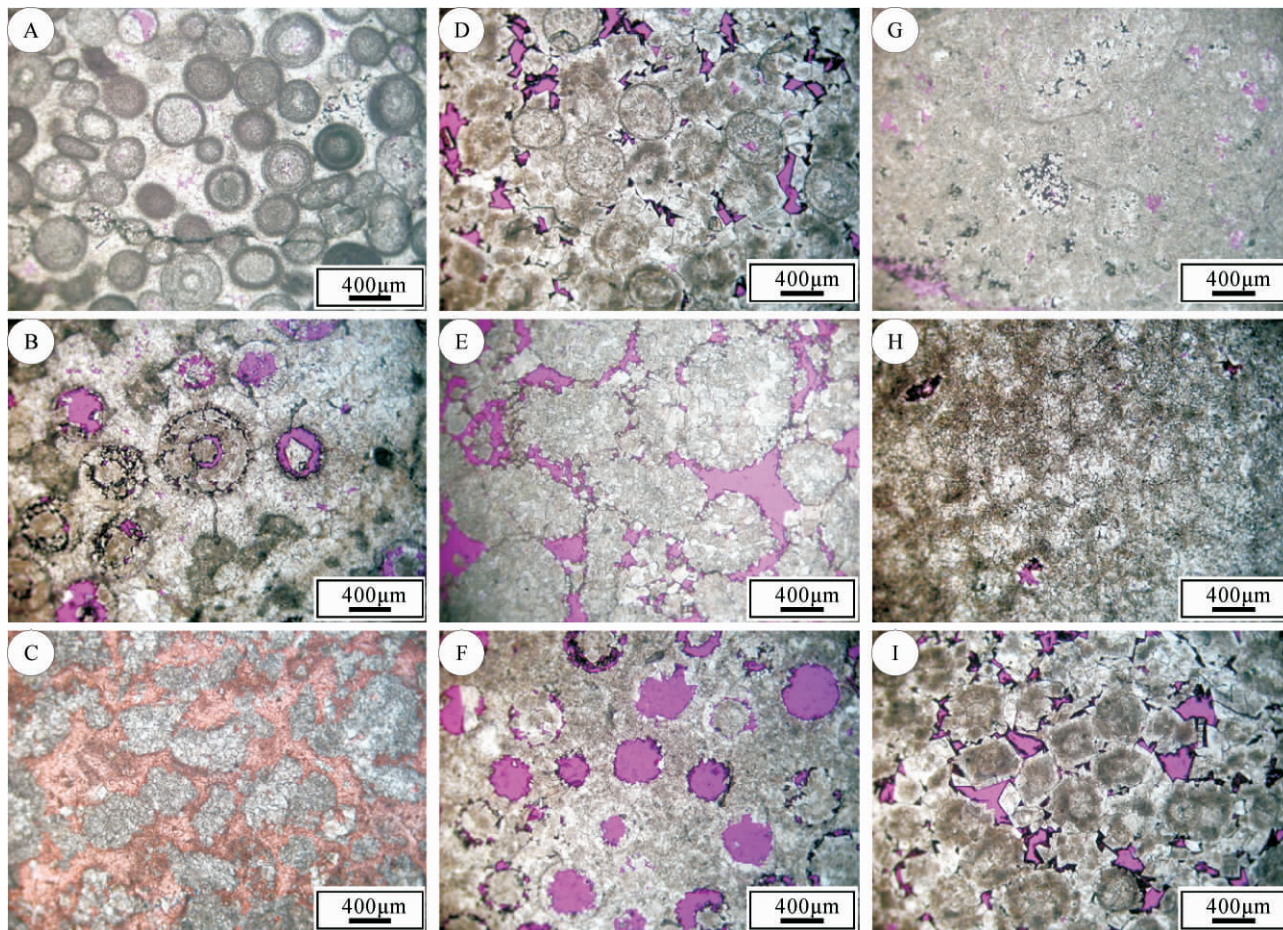


图1 (含) 颗粒白云岩的残余结构类型

A ~ C: 残余粒屑结构。A. 亮晶残余鲕粒白云岩, 颗粒内部为泥—粉晶白云石 (nonplanar, polymodal) 细晶白云石胶结 (planar - s, unimodal), 颗粒与胶结物清晰可辨, 部分颗粒内部可见层状构造, 且颗粒较圆、分选好, 是典型的鲕粒; B. 亮晶残余鲕粒白云岩, 鲕粒内部细晶 (nonplanar, unimodal), 部分鲕粒被溶, 形成粒内溶蚀孔, 部分颗粒内部因溶蚀和沥青充填而使内部纹层状构造清晰, 细晶白云石胶结 (nonplanar, unimodal); C. 亮晶残余砂屑白云岩, 颗粒内部为细晶白云石 (nonplanar, unimodal) 细晶方解石胶结, 由于颗粒与胶结物成分不一样而清晰可分, 颗粒为不规则的砂屑;

D ~ F: 残余粒形结构。D. 亮晶残余颗粒白云岩, 颗粒内部为细晶白云石 (nonplanar, polymodal) 细晶白云石胶结 (nonplanar, unimodal), 颗粒保存了泥晶套, 由颗粒形态较圆、分选好, 推断为残余鲕粒, 颗粒与胶结物部分连片分布, 部分因为泥晶套和粒间孔的发育而可分辨, 但内部结构基本消失; E. 亮晶残余颗粒白云岩, 颗粒内部为细晶白云石 (nonplanar, unimodal), 少量细晶白云石胶结 (nonplanar, unimodal), 由于颗粒不显示泥晶套和任何内部结构, 但因为粒间(溶)孔的发育使得残余结构清晰, 颗粒本身较圆, 由区域地层特征推断为残余鲕粒; F. 亮晶残余颗粒白云岩, 颗粒内部大部被溶蚀形成铸模孔, 粒间为细晶白云石胶结 (nonplanar, unimodal), 由于铸模孔的发育, 使得颗粒外形较清晰, 但无内部结构, 由颗粒形态较圆、分选较好, 结合区域地层特征判断为残余鲕粒;

G ~ I: 残余影像结构。G. 残余影像细晶白云岩, 颗粒与胶结物基本连片分布, 不可分辨和分别定量, 仅少部分由于泥晶套和晶间孔在其中的发育, 可判断含颗粒, 不能判断原始颗粒类型; H. 残余影像粉—细晶白云岩, 仅可隐见由粉晶白云石构成的颗粒幻影, 但基本不能识别颗粒外形; I. 残余影像中一粗晶白云岩, 由白云石晶体内部或几个白云石组成的团块内部所显示的阴影, 判断原岩为颗粒岩。所有样品均来自川东北地区普光和毛坝构造下三叠系飞仙关组一段地层 (T_1^f)。

Fig. 1 Examples for relict textures of grain-containing dolostones

特别地, Choquette 和 Pray^[14] 注意到了孔隙在成岩演化过程中的改造问题, 并对这些改造过的孔隙在基本孔隙分类的基础上加上了有关成因的限定修饰语, 如溶蚀扩大、胶结减小、完全充填等, 包含了孔隙

演化的意思。另外, Choquette 和 Pray^[14] 还注意到一些过渡性的孔隙类型, 以及成岩作用过程中组构选择性孔隙向非组构选择性孔隙的转化, 例如当潜穴孔隙形成之后, 再有白云石晶体在其中充填, 那么这部分

孔隙既可称为洞穴孔隙,也可称之为晶间孔。

综上所述,可以发现 Choquette 和 Pray^[14] 的分类系统涵盖了碳酸盐岩中所发育的大部分孔隙。在实际应用中,既为大家留下了一定的空间,以适应不同学者不同的研究目的,但同时也可能出现较大的问题和不确定性,尤其是在不同研究者对同一孔隙进行分类和统计的过程中,可能会出现很大的不一致,这给交流和对比研究造成很大的不便。这种情况在残余结构白云岩中尤为突出。

如前所述,由粒屑结构含颗粒的灰岩(或部分白云岩化的灰岩),转化为白云岩之后,随着原始结构保存越来越少,残余结构的白云岩会逐渐由残余粒屑结构过渡为残余粒形结构,再到残余影像结构,后者与晶粒结构接近。在岩石结构发生变化的过程中,在不考虑其它溶蚀作用的前提下,岩石的孔隙结构也必将发生相应变化。极端的情况就是,当岩石由残余粒屑结构变为残余影像结构时,孔隙类型由受颗粒和晶体两个因素控制,并发育粒间孔、粒内孔和晶间孔,转变为大部分只受晶体外形和晶体之间的接触关系控制,发育晶间孔。

归纳起来,残余结构白云岩的孔隙结构变化主要有:

(1) 从残余粒屑结构—残余粒形结构—残余影像结构,随着岩石原始结构残余程度的降低,颗粒与胶结物越来越不可分,颗粒对孔隙发育的控制作用越来越弱,而白云石晶体对孔隙发育的控制越来越强;

(2) 出现较多选择性发育的晶间孔,即晶间孔只发育在颗粒内部或发育在粒间白云石胶结物中,这些晶间孔很可能是在先前铸模孔或粒内孔的基础上经白云石充填、结晶而形成;

(3) 对于颗粒外形不十分清晰的情况,即使是残余影像结构,也发育一些明显不受白云石晶体控制的孔隙,而显示部分颗粒外形,表明先前为粒间孔、铸模孔或粒内孔,部分已发生变形和部分被白云石晶体或

其它矿物充填;

(4) 残余结构发育的白云岩,孔隙结构类型不但跟白云岩化和重结晶作用直接相关,还跟多期胶结、充填和后期溶蚀作用有关,常见的胶结物或填隙物类型有白云石、沥青、黄铁矿、石英和亮晶方解石等,而溶蚀则可在原来孔隙基础上进行溶蚀扩大。

因此,本文建议,有必要在 Choquette 和 Pray^[14] 的孔隙分类基础上,专门对残余结构白云岩中主要的孔隙类型划分进行必要的补充和说明。

4 残余结构白云岩的孔隙分类

首先按照孔隙是否具有组构选择性^[14],划分为:①组构选择性孔隙,常见的包括粒内孔、粒间孔和晶间孔;②部分组构选择性孔隙,常见的有溶蚀扩大孔,是在晶间孔、粒间孔或粒内孔基础上溶蚀扩大而形成的;和③非组构选择性孔隙,按照孔隙本身的大小和形态细分为非选择性溶孔、溶沟、溶洞、裂缝和角砾孔(表 5)。

①组构选择性孔隙

残余结构孔隙分类的特殊性主要体现在这类孔隙。在①类孔隙中,粒内孔表示在颗粒内部发育的孔隙,粒间孔表示在颗粒之间发育的孔隙,均包括原生的、经溶蚀形成的和被充填残留的三种情况,这在残余粒屑结构和残余粒形结构中常见,但部分地发育于残余影像结构中。晶间孔表示白云石晶体之间发育的——既可以是残余粒屑结构或残余粒形结构中的胶结物,也可以是残余影像结构中的白云石、只受晶体大小和相互接触关系控制的孔隙,在残余影像结构中常见。

为了体现原始颗粒对孔隙发育的控制作用,那些选择性地颗粒内部发育的晶间孔,也划分到粒内孔大类,因为颗粒实际上控制了孔隙的分布,但另一方面,而晶体本身也控制了孔隙(或充填后残留孔隙)的大小,因此,要划分为粒内孔大类中的粒内晶间孔。

表 5 残余结构白云岩中常见孔隙的分类

Table 5 Porosity classification of relict texture dolostones

组构选择性孔隙		部分组构选择性孔隙		非组构选择性孔隙				
粒内孔	粒间孔	晶间孔	溶蚀扩大孔	非选择 性溶孔	溶 沟	溶 洞	裂 缝	角砾 孔
包括原生粒内孔、粒内溶孔、铸模孔和粒内晶间孔	包括原生粒间孔、粒间溶孔、粒间晶间孔	\	包括溶蚀扩大粒内孔、溶蚀扩大粒间孔和溶蚀扩大晶间孔	\	\	\	\	\

注:如果孔隙被充填了,则相应地加上 Choquette and Pray^[14] 所应用的修饰语

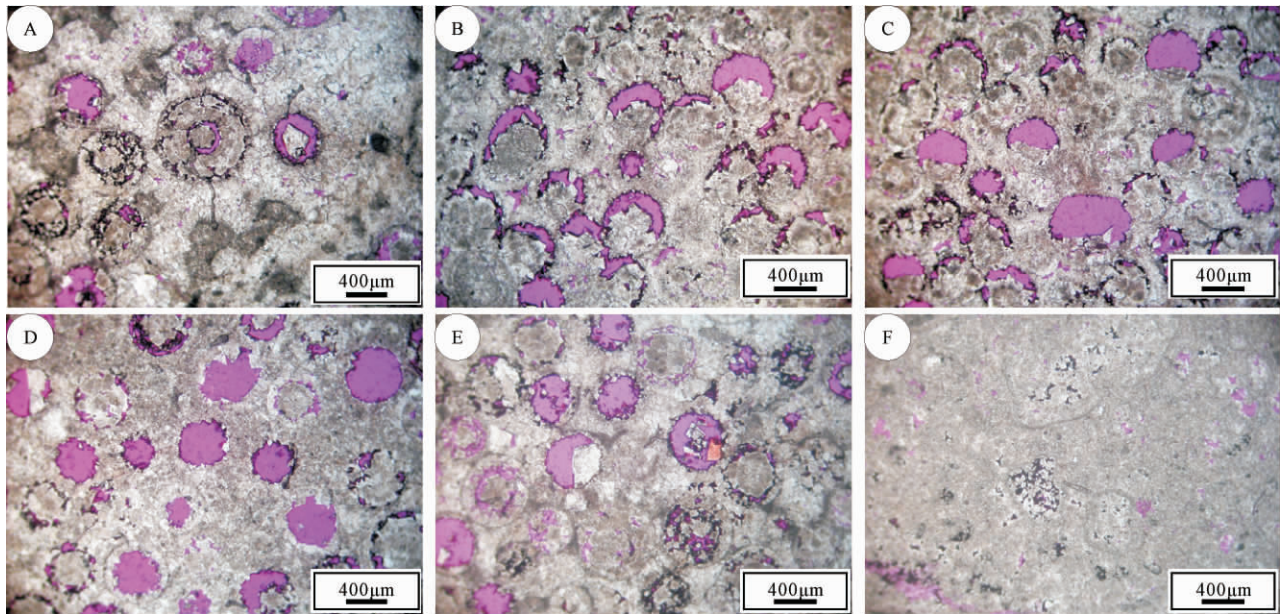


图2 不同形态的粒内孔

A. 粒内层圈孔; B. 弯月形粒内孔; C. 半球形粒内孔; D. 铸模孔; E. 部分被亮晶方解石充填的铸模孔; F. 粒内晶间孔。所有样品来自川东北地区下三叠统飞仙关组鲕粒岩

Fig. 2 Intragranular pores with different occurrences

同样地,对于被其它矿物(沥青、黄铁矿、石英、方解石等)所充填的粒内孔或粒间孔,也要划分为相应的粒内孔或粒间孔,只是要注意这些孔隙被“充填减小(cement-reduced)”或者被“完全充填了(filled)”,需要加上相应的修饰语^[14]。这对于我们认识孔隙演化的问题尤其重要。

对粒内孔来说,原生的粒内孔在残余结构中很少见。经溶蚀及其后的胶结或填隙作用形成的粒内孔包含各种形态,鲕粒岩中常见的有层圈孔(图2A)、弯月形孔(即所谓的半月形鲕粒, half-moon oolites, 或收缩鲕, shrunken oolites; 图2B)^[25-27]、半球形孔(图2C)、铸模孔(图2D、E)和粒内晶间孔(图2F),且常发育示顶底构造(geopetal structure)。

需要说明的是,本文把铸模孔合并为粒内孔中,与 Choquette 和 Pray^[14]有所不同。这是因为残余结构白云岩中的铸模孔,大部分与粒内孔是同期、同成因的,只不过是粒内孔的不同发展阶段和发育的程度不同而已(图3)。

对于粒间孔来说,残余结构中完全可能保存了原生的粒间孔,条件是含颗粒的原始岩石白云岩化和重结晶较早,而胶结物又不发育或少部分发育。但是,现今大多数残余结构白云岩的粒间孔也是次生的,即经过了溶蚀、胶结或充填等成岩作用。注意这里的

“粒间”表示孔隙发育的位置受颗粒外形控制,即使颗粒发育环边胶结物而使颗粒之间的孔隙减小了,也应该划分为粒间孔。但如果在粒间发育的是镶嵌状白云石胶结物,孔隙只受白云石晶体本身控制,那么就应该划分为晶间孔的范畴(图4)。

另外,在国内,有人认为“粒内孔”、“粒间孔”是特指原生孔隙,而次生的则为“粒内溶孔”和“粒间溶孔”。但是,在实际应用中,可能会出现很多问题。比如,对于“粒间孔”和“粒间溶孔”来说,我们很难判断颗粒之间的孔隙是原生的,还是粒间基质或胶结物经过了溶蚀而形成了“粒间溶孔”(如图4A)。因此,本文不建议人为区分。

②部分组构选择性孔隙

部分组构选择性孔隙是在先前选择性孔隙的基础上发育而来的,但孔隙的部分边界仍受颗粒外形控制,或在晶体之间有部分溶蚀扩大(图5)。

③非组构选择性孔隙

若孔隙的发育不受颗粒和晶体控制,则称这类孔隙不具组构选择性。可按照孔隙本身的大小和形态细分为非选择性溶孔、溶沟、溶洞、裂缝和角砾孔^[14]。这基本上与残余结构是否发育无关,所以在此不详细讨论。

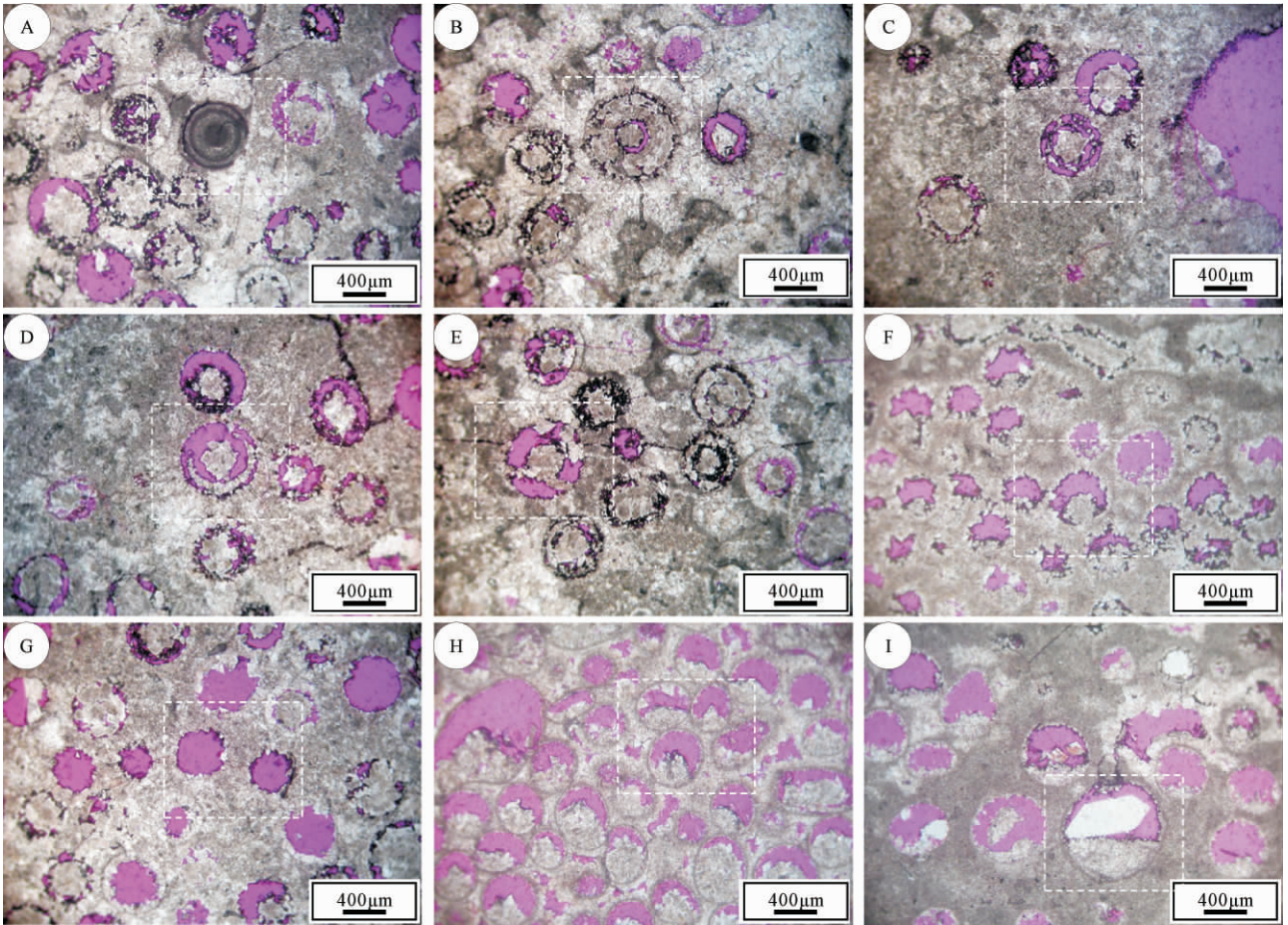


图 3 粒内孔的不同发展阶段

注意虚线框内: A. 局部残留的鲕粒, 原始结构保存清晰, 不发育粒内孔; B. 部分纹层被选择性溶蚀, 形成层圈孔; C. 层圈孔进一步溶蚀扩大; D. 大部分纹层被溶, 粒内仅有部分纹层和核心保留; E. 粒内几乎只剩下鲕粒核心; F. 由于纹层完全被溶, 鲕粒核心下沉到颗粒底部, 形成半月形鲕粒或收缩鲕, 形成示顶底构造^[25-27]; G. 鲕粒完全被溶, 形成鲕模孔; H. 鲕模孔中白云石的结晶沉淀, 填充了部分鲕模孔, 且由重力悬垂和微钟乳石状胶结物的发育, 判断其很可能形成于渗流环境; I. 鲕模孔底部粉晶或细晶白云石沉淀, 并由这些填隙物的水平顶面判断形成于潜流或埋藏环境, 形成半球状粒内孔, 孔的上部可有晚期石英和方解石充填。另外, 注意图片中黑色沥青的充填或贴边现象。所有样品来自川东北地区下三叠统飞仙关组鲕粒岩。

Fig. 3 Intragranular pores occurred during different development stages

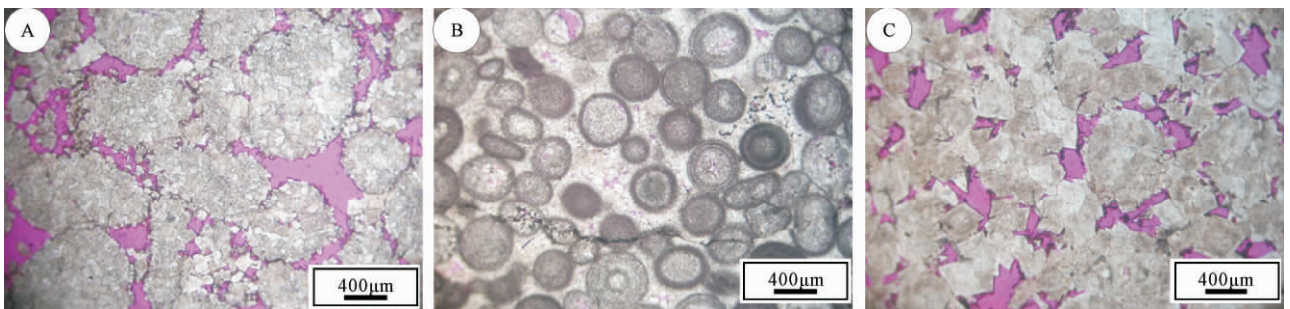


图 4 残余结构中粒间孔、粒间晶间孔和晶间孔之间的区别

A. 残余粒形结构白云岩中的粒间孔; B. 残余粒屑结构白云岩中的粒间晶间孔(在粒间胶结物中发育); C. 残余影像结构白云岩中的晶间孔。所有样品来自川东北地区下三叠统飞仙关组鲕粒岩。

Fig. 4 Examples for intergranular pores(A) , intergranular-intercrystalline pores(B) and intercrystalline pores(C)

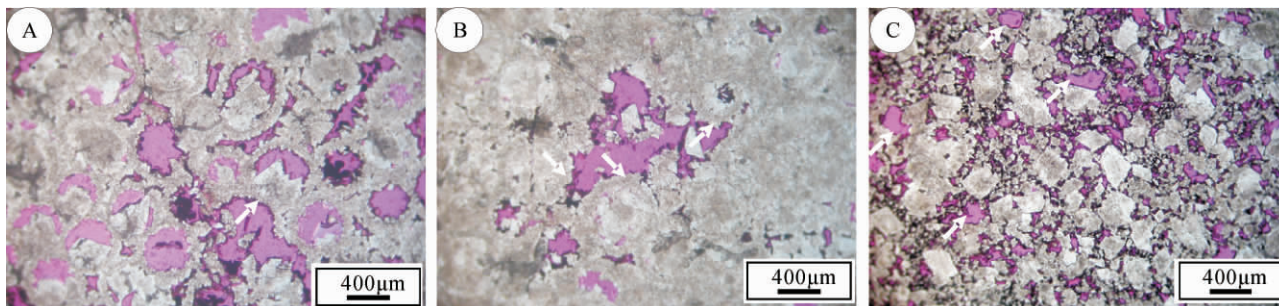


图5 溶蚀扩大孔

A. 溶蚀扩大粒内孔 箭头指示颗粒内边界; B. 溶蚀扩大粒间孔 箭头指示颗粒外边界; C. 溶蚀扩大晶间孔 箭头所指。所有样品来自川东北地区下三叠统飞仙关组鲕粒岩

Fig. 5 Dissolution-enlarged intragranular, intergranular, and intercrystalline pores, respectively

5 结论

原始粒屑结构的灰岩,经白云岩化、重结晶、溶蚀、胶结等成岩作用之后,岩石原始结构遭到不同程度的破坏,这就形成了残余结构。根据颗粒与胶结物的可识别性和颗粒内部结构的保存程度,把残余结构划分为残余粒屑结构、残余粒形结构和残余影像结构,并分别给出相应的判别标准、鉴定特征和描述方法。白云岩的残余结构,引发相关的孔隙分类问题。在 Choquette 和 Pray^[14] 孔隙分类方法的基础上,把残余结构白云岩的孔隙分为组构选择性孔隙、部分组构选择性孔隙和非组构选择性孔隙三大类。其中,组构选择性孔隙包括粒内孔(其中包含铸模孔)、粒间孔和晶间孔;部分组构选择性孔隙主要包括溶蚀扩大孔;非组构选择性孔隙按孔隙形态和大小划分为溶孔、溶沟、溶洞、裂缝和角砾孔隙等。

参考文献(References)

- Folk R L. Practical petrographic classification of limestones [J]. AAPG Bulletin, 1959, 43: 1-8
- Folk R L. Spectral subdivision of limestone types [J]. AAPG Memory, 1962, 1: 62-84
- Dunham G R. Classification of carbonate rocks according to depositional texture [J]. AAPG Memory, 1962, 1: 108-121
- Sander N J. Classification of carbonate rocks of marine origin [J]. AAPG Bulletin, 1967, 51 (3): 325-336
- Embry A, Klován J E. A late Devonian reef tract on northeastern Banks Island, Northwest Territories [J]. Bulletin of Canadian Petroleum Geology, 1971, 19: 730-781
- Gregg J M, Sibley D F. Epigenetic dolomitization and the origin of xenotopic dolomite texture [J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1984, 54: 908-931
- Sibley D F, Gregg J M. Classification of dolomite rock texture [J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1987, 57: 967-975
- Wright V P. A revised classification of limestones [J]. Sedimentary Geology, 1992, 76: 177-185
- Friedman G M. Terminology of crystallization textures and fabrics in sedimentary rocks [J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1965, 35: 643-655
- Sibley D F. Secular changes in the amount and texture of dolomite [J]. Geology, 1991, 19: 151-154
- 毕义泉, 田海芹, 赵勇生, 等. 论泥晶套与次生白云岩原岩结构特征的恢复及意义 [J]. 岩石学报, 2001, 17(3): 491-496 [Bi Yiquan, Tian Haiqin, Zhao Yongsheng, et al. On the micrite envelope to restoration of primary texture character of secondary dolomites and its significance [J]. Acta Petrologica Sinica, 2001, 17 (3): 491-496]
- 强子同主编. 碳酸盐岩储层地质学 [M]. 山东东营: 石油大学出版社, 1998: 5-16 [Qiang Zitong, eds. Carbonate Reservoirs [M]. Dongying, Shandong: China University of Petroleum (East China), 1998: 5-16]
- Kaldi J, Gidman J. Early diagenetic dolomite cements: examples from the Permian Lower Magnesian limestone of England and the Pleistocene carbonates of the Bahamas [J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1982, 52 (4): 1073-1085
- Choquette P W, Pray L C. Geologic nomenclature and classification of porosity in sedimentary carbonates [J]. AAPG Bulletin, 1970, 54 (2): 207-250
- Archie G E. Classification of carbonate reservoir rocks and petrophysical considerations [J]. AAPG Bulletin, 1952, 36(2): 278-298
- Murray R C. Origin of porosity in carbonate rocks [J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1960, 30 (1): 59-84
- Lucia F J. Petrophysical parameters estimated from visual description of carbonate rocks: a field classification of pore space [J]. Journal of Petrology Technology, 1983, 35: 626-637
- Lucia F J. Rock-fabric/petrophysical classification of carbonate pore space for reservoir characterization [J]. AAPG Bulletin, 1995, 79: 1275-1300
- Lucia F J. Carbonate Reservoir Characterization [M]. Springer, Ber-

- lin, 1999: 226
- 20 Lin Y A. Making sense of carbonate pore system[J]. AAPG Bulletin, 2004, 90 (9): 1381-1405
- 21 Leighton M W, Pendexter C. Carbonate rock types [C]// Ham W E, ed. Classification of carbonate rocks: a symposium. AAPG Memory, 1962, 1: 33-61
- 22 Plumley W J, Risley G A, Graves Jr R W, et al. Energy index for limestone interpretation and classification [J]. AAPG Memory, 1962, 1: 85-107
- 23 梅冥相. 灰岩成因—结构分类的进展及其相关问题讨论 [J]. 地质科技情报, 2001, 20(4): 13-18 [Mei Mingxiang. A review on genetic-textural classification of limestones and the discussion of related problems [J]. Geological Science and Technology Information, 2001, 20 (4): 12-18]
- 24 Jones B. Inside-out dolomite [J]. Journal of Sedimentary Research, 2007, 77: 539-551
- 25 Wherry E T. A Peculiar Oolite from Bethlehem, Pennsylvania. U. S [M]. National. Museum Publications, 1916, 49: 153-156
- 26 Carozzi A V. Half-moon oolites [J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1963, 33: 633-645
- 27 Mazzullo S J. Shrunk (geopetal) ooids: Evidence of origin unrelated to carbonate-evaporite diagenesis [J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1977, 47 (1): 392-397

Relict Textures of Dolomite and the Related Porosity Classification

ZHANG Xue-feng^{1,2} CAI Zhong-xian³ LI Lin³ GU Xiao-dan² ZHAO Wen-guang³

(1. Oil and Gas Institute, Peking University, Beijing 100871;

2. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing 102249;

3. Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074)

Abstract The popular theory on texture classification of carbonates has not shed much light on the relict texture of dolomites, which is defined here as the texture remained of original limestone with >10% of grains after complete dolomitization and associated recrystallization, dissolution, fillings, and so on. It is emphasized for its important role in reconstructing the paleo-environment of sedimentation. Based on whether most of the grains can be clearly and quantitatively distinguished with matrix and cements, and the inner texture of grains is preserved or not under microscope, the relict textures can be classified as the mimetic texture, the nonmimetic texture, and the ghost texture. These textures are described in detail with typical examples. The porosity classification of these relict textures should coincidentally be refined after Choquette and Pray (1970). The pores are firstly classified as selective, partly selective or non-selective. Intragranular, intergranular, and intercrystal pores are selectively developed within individual grains, between grains, or between individual dolomite crystals, respectively. Furthermore, if the intercrystal pores are selectively developed within individual grains, then they are classified into intragranular and called intragranular-intercrystal pores. Similarly there are intergranular-intercrystal pores. Notably, moldic porosity hereby is also intragranular because they are always within individual grains. Partly selective pores in this case refer to dissolution enlarged intragranular, intergranular, or intercrystal pores. And the common non-selective pores are vugs, channels, caverns, fractures and breccia pores, as defined by Choquette and Pray (1970).

Key words dolomite; relict texture; porosity classification