

文章编号:0253-9985(2010)01-0013-09

塔河地区寒武系储层深埋藏白云石化特征

蔺军,周芳芳,袁国芬

(中国石油化工股份有限公司 西北油田分公司 石油勘探开发研究院,新疆 乌鲁木齐 830011)

摘要:塔河地区寒武系白云岩具过渡型成岩演化环境成因特征。寒武纪碳酸盐沉积物在经历了短暂的早期成岩作用(海底成岩加大气淡水成岩作用)后,即进入埋藏成岩环境,经历了准同生白云岩—早成岩浅埋藏白云岩—晚成岩深埋藏白云岩—热液成因白云岩的成岩作用演化过程;裂缝、溶蚀孔(洞)是塔河地区寒武系不同类型白云岩的主要储集空间类型。深埋藏白云石化条件下的与深部断裂热液流体有关的溶蚀作用是塔河地区寒武系白云岩储层储渗空间形成的主要机制,而不同期次的充填和胶结作用的强度及热液溶蚀之后稳定的埋藏过程、较小的构造变动是有效储集空间得以保存的主控因素。

关键词:热液溶蚀作用;深埋藏白云石化;储层;寒武系;塔河地区

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Features of deep-burial dolomitization of the Cambrian reservoirs in Tahe region

Lin Jun, Zhou Fangfang, and Yuan Guofen

(1. Petroleum Exploration & Production Research Institute, SINOPEC Northwest Company, Urumqi, Xinjiang 830011, China)

Abstract: The Cambrian dolomites in the Tahe region have genetic features of transitional diagenetic environment. After a short-time early diagenetic period (sea-bed diagenesis and meteoric water diagenesis), the Cambrian carbonate deposits went into burial diagenetic period, going through a diagenetic process from penecomtemporaneous dolomite to early diagenetic and shallow burial dolomite, to late diagenetic and deep burial dolomite, and finally to hydrothermal dolomite. Fractures and dissolved vugs (caves) are the main types of reservoir space of various Cambrian dolomites in the Tahe region. The major mechanism of the development of reservoir space of the Cambrian dolomites in the Tahe region is dissolution related to hydrothermal fluid flow through deep faults under deep-burial dolomitization background. And the main controlling factors responsible for the preservation of reservoir space are the intensity of filling and cementation in various periods, stable burial process after hydrothermal dissolution and relatively minor tectonic events.

Keywords: hydrothermal dissolution, deep burial dolomitization, reservoir, Cambrian, Tahe region

1 寒武系沉积背景及白云岩储层发育特征

1.1 寒武系沉积背景

塔河地区所在的阿克库勒凸起区寒武系地层普遍发育,厚度稳定,整合覆盖于震旦系之上。根

据钻井(塔河地区目前仅有塔深1井和于奇6井揭示了寒武系,前者钻厚达1 524 m,后者钻厚444 m,均未钻穿)及高精度二维和三维地震剖面的地质解释成果等资料综合分析,塔河地区寒武系是以一套连续过渡的、以海相碳酸盐岩为主的沉积建造。平面分布上从早期至晚期由西向东依次发育增生台地相—台地边缘相—陆棚+宽缓斜坡相等沉积相带,向东逐渐延伸至满加尔盆地相,其厚度

收稿日期:2009-09-27。

第一作者简介:蔺军(1958—),男,工程师,石油地质勘探与研究。

经钻井揭示和地震解释约为 1 500 ~ 2 500 m, 呈南厚北薄的分布趋势。阿克库勒凸起主体区以增生台地相沉积为主, 凸起东部以具有增生前积结构的台地边缘相沉积为主, 发育台地边缘颗粒滩及藻泥丘沉积, 即寒武系建隆体, 岩石沉积组合以结晶白云岩为主夹鲕粒、砂屑白云岩及藻粘结白云岩。建隆体在逐渐增生演化发展过程中, 在地震剖面上呈“丘状”反射波组特征, 在平面上呈南西-北东走向展布; 由西向东建隆体平均迁移距离约 31.11 km; 不同时期建隆体垂向叠加总体宽度约 40 km, 在塔河工区内南北长约 90 km, 总面积约 3 600 km²。

1.2 白云岩储层发育特征

裂缝、溶蚀孔(洞)是塔河地区寒武系不同类型白云岩的主要储集空间类型。储层评价结果反映出, I 类及 II 类储层主要发育在以台地边缘滩相沉积为主的层位, 而以台地相沉积为主的层位则以 III 类储层为主。塔深 1 井揭示寒武系厚度 1 524 m, 综合解释发育以裂缝、溶孔(洞)、裂缝+溶孔(洞)型为主的各类储层, 累计厚 706 m, 占本井寒武系厚度的 46.3%, 其中 I 类储层主要发育于建隆体内。

2 白云岩的成岩演化、地球化学特征和白云石化机理

塔河地区寒武系白云岩主要发育胶结作用、压实压溶作用、白云石化作用、硅化作用、碎(破)裂化作用、热液溶蚀作用、去云化作用、自生石英充填作用、黄铁矿化作用、自生萤石成岩作用等。其中, 溶蚀、白云石化、碎(破)裂化、热液溶蚀作用等主要起到建设性作用, 而胶结、压实压溶、自生矿物形成及充填作用对储层起到了破坏作用。

根据寒武系储层岩石的成岩作用特征、成岩矿物之间的关系、岩石的形成条件、成岩结构和矿物晶出顺序及其相互关系, 可将塔河地区寒武系白云岩划分为同生期与埋藏期两个成岩演化阶段, 埋藏期又可分为埋藏早期成岩和埋藏晚期成岩两个演化阶段(图 1)^[1]。

2.1 同生期的成岩演化

同生期白云石化作用形成的白云石晶粒较细

成岩类型(作用)	同生期	早期成岩	晚期成岩
		$R_o < 0.5\%$	$R_o > 0.5\%$
胶结			
白云石化			
压实			
压溶			
白云石重结晶			
自生海绿石			
自生黄铁矿			
自生粘土			
自生萤石			
热液白云石化			
破裂			
热液溶解			
去白云石化			
有机质			

图 1 塔河地区寒武系岩石的成岩演化

Fig. 1 Diagenetic process of the Cambrian rocks in Tahe region

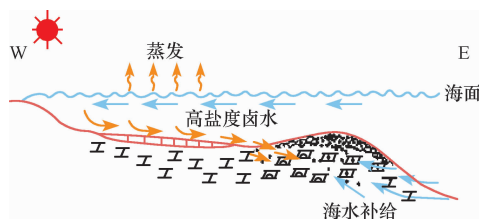


图 2 塔河地区寒武系同生期渗滤回流白云石化模式

Fig. 2 Contemporaneous percolation and backflow dolomitization mode of the Cambrian in Tahe region

小是其主要特征之一, 且往往含一定量的泥质, 主要原因是由于结晶速度快、比表面积大、吸附能力强, 悬浮在水体的分散泥质被吸附在细小晶体的表面而沉淀下来^[1]。据寒武系微晶白云岩、鲕粒、藻球粒、藻团粒以及凝块石等藻类组合在一起的岩石组合类型, 以及在岩心中未见到由于藻类的发育而形成层纹石和叠层石等特征, 说明了其成因属于蒸发环境下的海水在浓度和盐度差的驱动下形成渗滤回流, 高盐度的海水使得碳酸盐泥发生白云石化作用(图 2)^[2]。

2.2 埋藏期的成岩演化、地球化学特征和白云石化机理

2.2.1 埋藏期的成岩演化

埋藏期的成岩演化分为早期成岩和晚期成岩两个阶段。

早期成岩阶段是指沉积物脱离盆地底部水体, 不再和上覆水体发生交换, 从而进入封闭式

表 1 于奇 6 井寒武系中-深埋藏期白云石 X-衍射结晶有序度

Table 1 Crystal degree of order from X-diffraction of dolomite formed in the middle-deep burial period of the Cambrian in Well YQ6

深度/m	岩性	摩尔分数, %		结晶有序度	成岩阶段
		CaCO ₃	MgCO ₃		
7 116. 60	中- 细晶白云石	51. 18	48. 82	0. 70	中- 深埋藏期 (白云石结晶有序度 平均为 0. 73)
7 117. 20	粗- 中晶白云石	51. 91	48. 09	0. 69	
7 117. 38	中- 细晶白云石	51. 98	48. 02	0. 68	
7 118. 70	不等晶白云石	51. 55	48. 45	0. 78	
7 119. 20	中- 细晶白云石	51. 45	48. 55	0. 88	
7 315. 36	网状缝充填白云石	52. 45	47. 55	0. 67	

统,所有的成岩作用和变化都是在孔隙水和颗粒或者晶粒之间的反应。沉积物的白云石化作用^[2,3]和重结晶作用是这一阶段主要的成岩作用。白云石的重结晶作用和埋藏白云石化作用可形成较好的孔隙空间。早期成岩作用阶段的晚期可能有有机质向石油转变,并运移到储层中或赋存于晶间孔隙中,如我们所见到的晶间孔隙中的沥青质。晚期成岩作用与早期成岩作用阶段没有明确的界限,一般将晚期成岩作用阶段定义为开放的成岩体系,亦即当有外来流体改变原有孔隙水性质时,即认为进入了晚期成岩作用阶段。

晚期成岩阶段的成岩作用主要与构造活动产生的裂缝系统关系密切^[4]。深部热液流体进入到成岩体系中,热液流体对碳酸盐岩不饱和,致使基岩发生溶蚀作用,形成溶蚀孔(洞)。随着溶蚀作用的进行,流体性质发生变化,热液白云石从流体中沉淀下来,白云石的晶间孔隙由于热液作用发生重结晶,在原来晶体的边部“次生加大”,或称之为白云石的胶结作用;这也是目前在塔河地区寒武系晶粒白云岩中晶间孔隙欠发育的主要原因。在白云石沉淀之后,流体中的 SiO₂ 以及原岩中被溶的泥质物质开始沉淀,自生石英与粘土矿物一起沉淀充填于溶蚀孔洞和白云石晶间孔隙中;最后一期的充填作用是方解石的晶出,充填在裂缝、晶间孔隙及溶蚀孔洞中,并对前期形成的白云石进行交代,发生去白云石化作用。这一时期成岩作用与区域构造的强烈活动相互结合,由于断裂和裂缝系统的发育,不但为热液活动提供了活动场所,也为油气演化生成的液态烃提供了良好的油气运移通道,油气可在这一时期向储层中运移。这也是我们在裂缝中以及溶蚀孔洞中见到油气显

示的主要原因。

2. 2. 2 埋藏期的地球化学特征

1) X-衍射分析

X-衍射分析发现,晶粒较小的白云石的结晶有序度较低;而中-粗晶白云石、异形白云石的结晶有序度相对较高,可达到 1。于奇 6 井结晶有序度偏低,可能与镁离子浓度偏低有关(表 1)。

2) 微量元素分析

对塔深 1 井、于奇 6 井全岩微量元素测试分析结果反映出,寒武系白云岩的 Ba, Mn, Cu, Sr, Zn, K, Ni, Rb, Cr, Pb, Fe, Ca, Mg, V, La, Al, B 等元素具有相同的变化趋势。随着 Fe 含量的增加, Mn 的含量也增加,两者呈明显的正相关。对比岩石的成岩作用发现,随着成岩作用的进行,Fe 和 Mn 的含量都有增加的趋势;而且在经过热液改造过的岩石中, Mn 的含量似乎增加更为明显(图 3)。

3) 碳、氧同位素分析

塔深 1 井和于奇 6 井寒武系埋藏期基岩白云石及充填于溶蚀孔(洞)、缝内的白云石的碳、氧同位素统计结果见表 2、表 3^[5,6]。

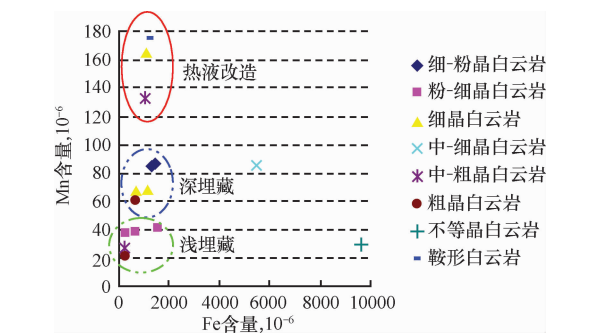


图 3 塔深 1 井寒武系不同白云岩中 Fe 和 Mn 的关系

Fig. 3 Relationship between Fe and Mn in different Cambrian dolomite from Well TS1

表 2 塔深 1 井寒武系埋藏期白云石碳、氧同位素分析统计

Table 2 Statistics on oxygen and carbon isotopes of dolomite formed in burial period of the Cambrian in Well TS1

白云石产状	深度/m	岩性	$\delta^{13}\text{C}(\text{PDB}), \text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}(\text{PDB}), \text{‰}$
基质白云石[$\delta^{13}\text{C}(\text{PDB})$ 平均为 -0.52‰, $\delta^{18}\text{O}(\text{PDB})$ 平均为 -8.49‰]	7 102.53	粗-中晶白云岩	-0.60	-9.10
	8 406.70	中-粗晶白云岩	-0.43	-7.88
溶蚀缝半充填自形粗晶白云石	7 875.80	中-粗晶白云岩	-0.99	-8.64
	7 876.22	中-粗晶白云岩	-0.91	-8.13
	8 405.05	中-粗晶白云岩	-0.43	-8.48
	8 407.50	中-粗晶白云岩	-0.26	-9.03
	8 406.90	中-粗晶白云岩	-0.61	-8.69
小溶洞半充填白云石	8 407.70	中-粗晶白云岩	-0.43	-9.88

表 3 于奇 6 井寒武系埋藏期白云石、方解石碳、氧同位素分析统计

Table 3 Statistics on oxygen and carbon isotopes of dolomite and calcite formed in burial period of the Cambrian in Well YQ6

白云石产状	深度/m	岩性	白云石粒径/mm	$\delta^{13}\text{C}(\text{V-PDB}), \text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}(\text{V-PDB}), \text{‰}$
基质白云石 [$\delta^{13}\text{C}(\text{V-PDB})$ 平均为 -0.71‰, $\delta^{18}\text{O}(\text{V-PDB})$ 平均为 -9.62‰]	7 116.60	中-细晶白云岩	0.16~0.32	-0.7	-8.9
	7 117.09	中-细晶白云岩	0.16~0.32	-0.6	-9.7
	7 117.83	粗-中晶白云岩	0.25~0.83	-0.7	-9.6
	7 118.25	砂屑中-细晶白云岩	0.16~0.50	-0.6	-9.0
	7 118.45	细晶白云岩	0.12~0.25	-1.0	-9.6
	7 118.70	粉-细晶白云岩	0.06~0.20	-0.6	-9.5
	7 119.20	粉-细晶白云岩	0.06~0.20	-0.6	-9.6
	7 119.34	不等晶白云岩	0.16~0.72	-0.6	-9.7
	7 119.37	细-中晶白云岩	0.16~0.40	-0.7	-9.5
	7 119.53	不等晶白云岩	0.08~0.96	-0.7	-9.4
	7 119.85	不等晶白云岩	0.10~0.88	-1.0	-11.3
	7 115.30	中-细晶白云岩	0.10~0.50	-0.9	-9.6
缝内白云石	7 116.50	细-中晶白云岩	0.16~0.50	-0.7	-9.1
孔缝内方解石	7 315.14	细-粉晶白云岩		-0.9	-6.4
	7 315.18	碎裂化粉-细晶白云岩		-0.7	-8.1
	7 315.46	细晶白云岩		-1.4	-10.9

4) 包裹体分析

无论是中-细晶白云石还是充填于裂缝、溶洞的中、粗、巨晶白云石和方解石中,均含成群分布的原生盐水包裹体。可供测温的原生气-液两相盐水包裹体,气液比为 5%~10%,包裹体组合以气-液两相含烃包裹体为主,少量液烃包裹体。包裹体均一温度最低为 77.5℃,最高为 152.5℃,主要温度集中在 100~150℃,峰值出现在 110~120℃;冰点温度最低为 -20.2℃,最高为 -5.0℃,较均匀地分布在 -5.0~20.0℃;对应盐度(NaCl)为 7.86%~22.5%,峰值出现在 9.2%~15.0%^[4]。

方解石中的包裹体均一温度分布范围比较广(87.5~152.5℃),集中分布在 100~150℃,峰值在 100~110℃,主要形成于 3 个温度区间(表 4)。而在 100~120℃ 温度段,盐度突升至 20.22%~21.68%,也是矿物大量晶出充填时期^[4]。

白云石边缘的包裹体均一温度表现为 3 个温度区间(表 4)。由冰点温度的变化可以看出,白云石最后生长时期的孔隙水和盐度是变化的,与方解石的盐度变化都在一个范围内,反映了方解石形成时的孔隙水盐度和白云石形成时的孔隙水盐度是一致的^[4]。

表 4 寒武系裂缝、溶洞中流体包裹体均一温度、冰点温度、盐度对应关系

Table 4 Relationships between homogenization temperature, ice point and salinity of fluid inclusions from the Cambrian fractures and vugs

包裹体产状	均一温度/℃		冰点温度/℃	盐度 (NaCl) , %
方解石中	80 ~ 100 (3)		- 5 ~ - 10	7. 86 ~ 13. 84
	100 ~ 120 (12)		- 6 ~ - 11	9. 21 ~ 14. 97
			- 17 ~ - 19	20. 22 ~ 21. 68
	130 ~ 140 (6)		- 5 ~ - 8	7. 86 ~ 11. 70
白云石边缘	80 ~ 90 (1)		- 13	16. 89
	100 ~ 120		- 16. 8 ~ - 19. 8	20. 70 ~ 22. 24
	100 ~ 130 (29)	120 ~ 130	- 7. 0 ~ - 13. 5	10. 50 ~ 17. 30
			- 16. 5 ~ - 19. 8	19. 80 ~ - 22. 20
	130 ~ 150 (11)	130 ~ 140	- 10 ~ - 13	13. 90 ~ 16. 90
		140 ~ 150	- 15. 5	19. 00
白云石内部	95 ~ 110 (2)		—	
	110 ~ 130 (21)		- 8. 5 ~ - 20. 2	12. 28 ~ 22. 51
	130. 0 ~ 152. 5 (6)		—	

注:括号内为样品数。

白云石内部的包裹体均一温度最低为 95.7℃,最高为 152.5℃,峰值在 110 ~ 120℃ (表 4)。仅在均一温度 110 ~ 130℃测得对应的冰点温度,分布范围为 - 8.5 ~ - 20.2℃。该均一温度范围内的冰点温度变化范围要较白云石边部和方解石包裹体的变化区间大,表明白云石在结晶时孔隙水的变化较大^[4]。

不论是在白云石内部还是边部,包裹体的均一温度变化区间都较大,盐度变化也明显,而且都有均一温度在 100℃以下的包裹体存在。因此,白云石的包裹体均一温度反映了埋藏期白云石化作用的特征,同时也反映了热液对白云石改造作用的存在^[7,8]。

据包裹体冰点温度的测定,不同均一温度区间的冰点温度是不相同的,说明这些矿物在结晶过程中孔隙水是变化的,且随着均一温度和结晶过程的变化而变化。从均一温度和盐度之间的关系(图 4)可以看出,鞍形白云石形成时的孔隙水盐度相对比较集中,变化不大;白云石内部或边缘的包裹体形成的盐度变化区间大,但是形成均一温度相对集中,说明白云石的结晶环境对盐度的要求并不苛刻,在很大的盐度范围内都可以形成,同时也说明白云石在结晶过程中孔隙水是不不断在变化的。而方解石形成时孔隙水的盐度分布在相对高盐度和相对低盐度两个区域,以相对低盐度区间为主。据方解石的产状,其大部分是在热液

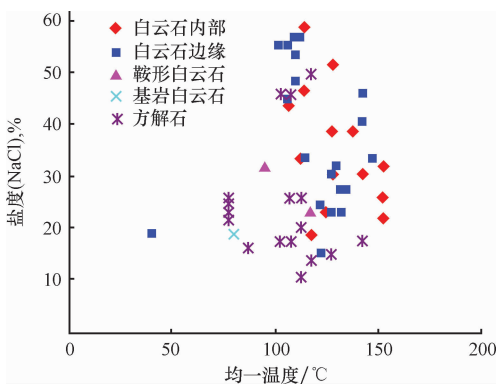


图 4 均一温度与盐度的关系

Fig. 4 Homogenization temperature vs. salinity

白云石形成之后而沉淀的,热液的盐度因矿物的不断沉淀而变低。

包裹体的均一温度一般随着深度的加大而增加^[4],但是在塔河地区均一温度与深度的关系图中并没有出现这样明显的趋势(图 5)。这一特征表明,含包裹体矿物的形成和深度的关系不明显,显示不受埋藏深度的控制,佐证了方解石和大量白云石的形成与热液的关系密切,仅与热液的运移过程中和热液流过的岩石有关,而不反映由深度增加而增加均一温度的影响^[8]。

2.2.3 埋藏白云石化机理

随着埋深的增加,成岩温度逐渐增高,地下岩

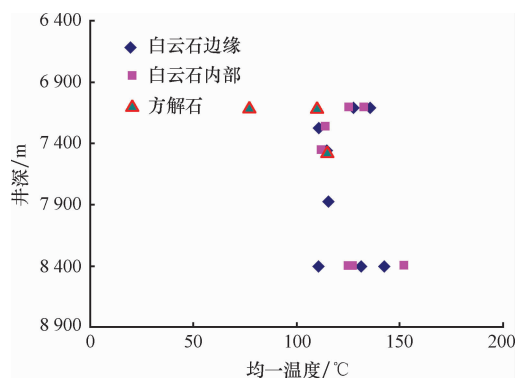


图5 塔深1井均一温度与深度的关系

Fig. 5 Homogenization temperature vs. depth of Well TS1

石中富含镁离子的流体使碳酸盐岩发生白云石化作用^[2]。在塔河地区,寒武系因无泥质岩沉积,不存在泥质沉积物被压实脱水形成的白云石化流体的条件。据元素化学特征和包裹体冰点温度分布特征分析,也没有发现淡水的对流特征,因此在浅埋藏期间不存在混合水的白云石化作用,而是富含镁离子的高盐度的海水在埋藏过程中随着温度的升高而发生的白云石化作用;而早期高盐度海水的回流渗透机理(图6a),致使发生白云石重结晶作用,使白云石的晶形变好,岩石的孔隙度得到改善,给孔隙水在本层内部的流动提供了良好的条件,亦为后来的油气进驻提供了空间。

对于中-深埋藏白云石化的机理而言(图6b),当沉积物持续埋藏,孔隙水中的离子浓度逐渐增加,在地温梯度的作用下,孔隙水发生循环的

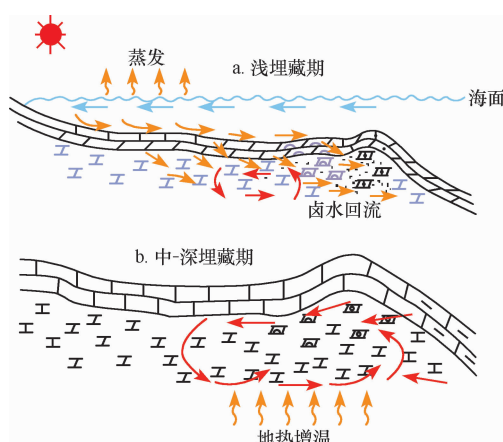


图6 塔河地区寒武系埋藏期白云石化机理模式

Fig. 6 Burial dolomitization mechanism of the Cambrian in Tahe region

对流作用,使得白云石化作用^[9]进一步进行,此时以重结晶作用为主,多形成中-粗晶白云石;由于重结晶作用的进行,可能使得原来白云石的晶间孔隙因重结晶或者白云石的“次生加大”而消失,从而破坏了储层的储集空间^[10]。

2.3 热液白云石化机理

在塔河地区寒武系岩石中,典型的热液白云石主要分布在溶蚀孔洞缝中,呈斑块状充填孔洞或者在溶蚀洞壁上生长成一个壳层(图7)^[11~13]。电镜下可见完好的菱面体晶形,多为呈镶嵌状的中-粗晶白云石,晶间孔隙不发育。它们均具有波状消光特征,可以将它们和其他白云石相区分。

2.3.1 热液白云石地球化学特征^[14]

1) 结晶有序度分析

热液白云石在高温条件下沉淀,热液流体的盐度或者矿化度比较高,结晶有序度也比较高。多数热液白云石的有序度为1或者接近1^[9](表5)。

2) 元素分析

电子探针分析和X-衍射分析结果(表6—表8)表明,热液白云石的元素分布特征中Na, Fe, Ba, Zn含量高,说明流体不是原来残余的海水,也不是区域对流流体的孔隙水或地层水。只有高温热液中才有这样的重金属大量存在。

3) 阴极发光分析

阴极发光分析表明,塔河地区寒武系不同类型的白云岩中,白云石、方解石均发光较弱,仅在孔、洞、缝的边缘形成的白云石发相对较亮的光,



图7 塔深1井岩心(四回次)内生石英呈皮壳状分布于溶蚀孔洞表层

Fig. 7 Core of Well TS1 (four trips)

表 5 塔深 1 井寒武系深埋藏-热液作用期白云石 X-衍射结晶有序度

Table 5 Crystal degree of order from X-diffraction of dolomite formed in the deep burial-hydrothermal dolomitization period of the Cambrian in Well TS1

井深/m	岩性	结晶有序度	摩尔分数, %		成岩阶段
			CaCO ₃	MgCO ₃	
7 106. 10	粗晶白云石	1. 00	50. 80	49. 20	深埋藏-热液期 (白云石结晶有序度 平均为 0. 91)
7 264. 15	中晶白云石	1. 00	49. 87	50. 13	
7 265. 30	粗晶白云石	0. 76	50. 73	49. 27	
7 874. 50	中-细晶白云石	0. 80	50. 63	49. 37	
7 876. 00	中-粗晶白云石	1. 00	49. 80	50. 20	
7 267. 10	鞍形白云石	1. 00	51. 20	48. 80	热液期(白云石结晶 有序度平均为 0. 98)
8 406. 30	洞充填白云石	0. 96	50. 60	49. 40	

表 6 塔深 1 井热液白云石电子探针分析结果

Table 6 Results from electron probe analysis of hydrothermal dolomite from Well TS1

井深/m	序号	化合物含量, %							总量, %
		Na ₂ O	K ₂ O	MnO	FeO	SrO	BaO	CO ₂	
8 407. 10	22	0. 049	0. 003	0	0. 035	0	0. 031	47. 836	100
	23	0. 334	0. 040	0. 006	0. 139	0. 078	0. 079	47. 305	100
	24	0. 047	0. 007	0. 014	0. 002	0	0	48. 064	100

表 7 于奇 6 井热液白云石电子探针分析结果

Table 7 Results from electron probe analysis of hydrothermal dolomite from Well YQ6

井深/m	岩性	化合物含量, %							总量, %
		Na ₂ O	K ₂ O	MnO	FeO	SrO	BaO	CO ₂	
7 315. 75	热液白云石	0. 004	0	0	0	0. 034	0	48. 77	100
		0	0. 002	0. 013	0	0	0. 021	48. 033	100
	斑内白云石	0. 010	0	0. 018	0	0	0. 041	48. 155	100
		0. 034	0. 002	0. 003	0. 023	0. 075	0	48. 035	100

表 8 塔深 1 井热液白云石 X-衍射元素分析结果

Table 8 Elemental analysis results from X-diffraction of hydrothermal dolomite from Well TS1

井深/m	元素含量, 10 ⁻⁶												
	Sr	Cu	Zn	Fe	Ba	Mn	V	Al	K	Cr	Ni	La	Pb
7 267. 10	136	10. 7	9. 9	1126	1828	175. 0	6. 6	5 460	3 285	11. 9	4. 2	12. 8	7. 1
8 406. 60	101	11. 4	10. 0	447	171	29. 1	1. 1	840	1362	10. 8	5. 4	1. 6	

这说明流体在孔、洞、缝的边缘改造现象明显。总体上,塔河地区寒武系白云岩阴极发光具较弱的光性特征。

4) 碳、氧同位素分析

塔深 1 井和于奇 6 井寒武系热液白云石碳、氧同位素统计结果见表 9、表 10。

由于热液活动不仅形成了热液白云石,而且还伴随着有其他矿物的形成,尤其是方解石。在

塔河地区发现的方解石仅存在于溶蚀孔洞缝以及热液白云石之后的晶间孔隙中,表明方解石的形成是晚于热液白云石的。从两口钻井方解石的同位素分析结果(表 11,表 12)看,碳同位素的数值变化不大,而氧同位素的数值明显要偏轻。因此,在方解石中随着温度的升高,氧同位素逐渐变轻,证明了方解石是在高温条件下形成的^[14]。

表 9 塔深 1 井寒武系热液白云石碳、氧同位素分析统计

Table 9 Statistics on carbon and oxygen isotopes of the Cambrian hydrothermal dolomite in Well TS1

成岩阶段	白云石产状	深度/m	岩性	$\delta^{13}\text{C}(\text{PDB})$, ‰	$\delta^{18}\text{O}(\text{PDB})$, ‰
深埋藏期	鞍状白云石	7 461.73	泥晶白云岩	-2.00	-9.40
	[$\delta^{13}\text{C}(\text{PDB})$ 平均为	8 405.52	残余粉晶白云岩	-0.65	-13.01
	-1.09‰, $\delta^{18}\text{O}(\text{PDB})$	8 407.50	残余粉晶白云岩	-0.87	-12.48
	平均为 -11.63‰]	8 407.55	碎裂化白云岩	-0.84	-11.62

表 10 于奇 6 井寒武系热液白云石碳、氧同位素分析统计

Table 10 Statistics on carbon and oxygen isotopes of the Cambrian hydrothermal dolomite in Well YQ6

成岩阶段	白云石产状	深度/m	岩性	白云石粒径/mm	$\delta^{13}\text{C}(\text{PDB})$, ‰	$\delta^{18}\text{O}(\text{PDB})$, ‰
深埋藏期	白云石	7 116.54	中-细晶白云岩	0.16~0.36	-3.5	-12.9
	[$\delta^{13}\text{C}(\text{PDB})$ 平均为	7 117.15	不等晶白云岩	0.16~0.88	-2.9	-12.6
	-2.80‰, $\delta^{18}\text{O}(\text{PDB})$	7 118.58	不等晶白云岩	0.10~0.96	-2.0	-12.7

表 11 塔深 1 井寒武系方解石碳、氧同位素分析统计

Table 11 Statistics on carbon and oxygen isotopes of the Cambrian calcite in Well TS1

成岩阶段	方解石产状	深度/m	岩性	$\delta^{13}\text{C}(\text{PDB})$, ‰	$\delta^{18}\text{O}(\text{PDB})$, ‰
埋藏-热液期 [方解石 $\delta^{13}\text{C}(\text{PDB})$ 平均为 -2.37‰, $\delta^{18}\text{O}$ 平均为 -12.14‰]	缝、洞自形巨晶方解石	7 102.06	中-粗晶白云岩	-2.64	-14.05
	缝、洞自形巨晶方解石	7 102.07	中-粗晶白云岩	-2.45	-12.71
	缝内方解石	7 268.68	细晶白云岩	-3.09	-14.28
	缝内方解石	7 461.69	泥晶白云岩	-2.62	-10.89
	缝、洞方解石	7 461.20	藻粘结鲕粒白云岩	-2.00	-14.10
	溶洞充填方解石	7 462.67	泥晶白云岩	-2.36	-12.49
	灰白色斑块状方解石	7 102.35	中-粗晶白云岩	-2.94	-12.93
	灰白色斑块状方解石	7 103.62	细-中晶白云岩	-2.20	-11.72
	灰白色斑块状方解石	7 461.84	泥晶白云岩	-2.15	-11.58
	灰白色斑块状方解石	7 461.84	泥晶白云岩	-2.16	-11.19
	深灰、灰白色斑块状方解石	7 461.10	藻粘结白云岩	-1.48	-10.10
	黄灰色斑块状方解石	7 462.17	藻粘结白云岩	-3.06	-11.68
	黄灰色斑块状方解石	7 462.27	深灰色泥晶白云岩	-1.62	-10.13

表 12 于奇 6 井寒武系方解石碳、氧同位素分析统计

Table 12 Statistics on carbon and oxygen isotopes of the Cambrian calcite in Well YQ6

成岩阶段	白云石产状	深度/m	岩性	$\delta^{13}\text{C}(\text{PDB})$, ‰	$\delta^{18}\text{O}(\text{PDB})$, ‰
埋藏-热液期 [方解石 $\delta^{13}\text{C}(\text{PDB})$ 平均为 -2.5‰, $\delta^{18}\text{O}(\text{PDB})$ 平均为 -13.1‰]	洞内巨晶方解石	7 115.30	中-细晶白云岩	-2.6	-13.1
	方解石	7 115.80	中-细晶白云岩	-1.8	-12.6
	方解石	7 117.83	粗-中晶白云岩	-2.5	-13.9
	方解石	7 118.70	粉-细晶白云岩	-2.8	-12.1
	方解石	7 119.20	粉-细晶白云岩	-2.4	-12.7
	缝、洞内中晶方解石	7 116.50	细-中晶白云岩	-2.5	-13.0
	孔、洞内中晶方解石	7 116.50	细-中晶白云岩	-4.0	-12.5
	洞内巨-粗晶方解石	7 117.09	不等晶白云岩	-2.4	-15.5
	洞内中晶方解石	7 118.25	中-细晶白云岩	-2.6	-12.4
	缝、洞内方解石	7 118.45	细晶白云岩	-2.0	-13.3
	缝、洞内方解石	7 119.34	不等晶白云岩	-2.9	-12.4
	缝、洞内巨晶方解石	7 119.37	细-中晶白云岩	-2.3	-13.6
	缝、洞内巨晶方解石	7 119.53	不等晶白云岩	-2.3	-13.5

锶同位素的分析结果,基岩白云石(1个样品)同位素值为0.707 284,而充填于缝、洞内的白云石(8个样品)为0.708 980~0.710 749,平均值为0.709 622;方解石(10个样品)同位素值为0.708 704~0.712 159,平均值为0.709 428。这些值均大于现今海洋中海水的锶同位素值($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=0.708$),同时又均小于古老花岗质岩石以及由这些岩石形成的沉积岩($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=0.715$)的风化产生的各种不同锶同位素混合产物的同位素值(Faure 和 Powell,1972)。此外,塔深1井锶同位素值均远远大于上寒武统波峰同位素值,说明寒武系白云岩锶的来源丰富,其主要特征与基岩白云石相比,较基岩的锶同位素值明显偏重^[15]。结合方解石和白云石的碳、氧同位素和包裹体均一温度分析,异形白云石以及方解石结晶时的孔隙流体不是残余在岩石孔隙中的同生期海水,而是外来的、富含锶的深部热液流体。

2.3.2 热液白云石化机理

塔河地区寒武系白云岩中热液白云石的生成主要与热液活动相关,是发生在张性断裂活动的背景下,深部的热液流体通过断层向上运移,对上覆地层进行改造,尤其是在断层上盘热液的作用更为明显。据三维及高精度二维地震剖面解释成果认识,断裂活动在加里东期和海西期较为发育,尤其是海西晚期的构造活动(岩浆侵入活动)可能与之关系最为密切。

塔河地区寒武系在埋藏条件下,伴随着断裂的活动,张性断裂沟通了深部的热液流体,热液沿断层运移至裂缝系统中或进入寒武系岩石中孔隙性比较好的层位,由于热液本身对白云石不饱和而在寒武系白云岩中发生强烈的溶蚀作用,形成大小不等的溶蚀孔洞缝。随着溶蚀作用的进行,热液流体和原来地层中的孔隙水混合,逐渐达到白云石的饱和度,热液白云石开始沉淀,同时热液流体对原有的白云石进行改造,发生白云石的重结晶作用。在白云石沉淀过后,残余的热液流体根据所含的物质逐渐沉淀萤石、黄铁矿和石英,最后发生方解石的沉淀,充填于溶蚀孔洞,并交代热液白云石。由于方解石形成量比较少,不能充填满已有的孔洞,因而保留了大量的溶蚀空间(图8)。在此期热液活动时,并没有油气的充注,因而

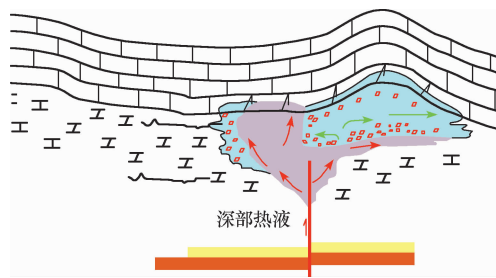


图8 塔河地区寒武系热液白云石化模式

Fig. 8 Hydrothermal dolomitization mode of the Cambrian in Tahe region

无论是方解石还是热液白云石,其碳同位素基本上保持不变,没有有机碳的参与,所以碳同位素偏重^[6]。

从目前获得的与热液白云石化伴生的、能够代表热液活动的矿物仅有萤石、坡缕石等热液活动的标形矿物;而黄铁矿、石英及热液活动的标形矿物伴随着热液活动,代表了塔河地区寒武系热液活动的矿物组合特征。这种组合特征可能反映了热液流体的矿化度不高,无重晶石、天青石和铅锌矿等的沉淀;另一方面,岩石的溶蚀作用非常强。这些都说明本区热液流体矿化度低。在垂向上,溶蚀作用表现为下部溶蚀孔洞比上部溶蚀孔洞发育,反映了流体的运移方向是由下向上运移;而在多孔段为横向运移。从流体的特征也可以推断,本区的断裂可能不是幔源断裂,而是与壳源有关的断裂。

3 结论

塔河地区寒武系白云岩储层经历了热液作用改造,热液的运移通道是加里东—海西期发育的张性断裂,自下而上热液进入到寒武系白云岩岩石中发生热液溶蚀作用和充填作用。因此,埋藏白云石化条件下的与深部断裂热液流体有关的溶蚀作用是塔河地区寒武系白云岩储层储渗空间形成的主要机制,而不同期次的充填和胶结作用的强度及热液溶蚀之后稳定的埋藏过程、较小的构造变动是有效储集空间得以保存的主要控制因素。

参 考 文 献

- 1 张学丰. 白云岩成因相关问题及主要形成模式[J]. 地质科技情报, 2006, 25(5): 32~38

(下转第27页)