

文章编号: 1000-0550(2011)02-0293-10

松辽盆地南部红岗油田青山口组砂岩中片钠铝石的形成温度^①

于志超¹ 刘立¹ 曲希玉¹ 杨会东² 邵明礼²

(1. 吉林大学地球科学学院 长春 130026; 2. 中国石油吉林油田公司 勘探开发研究院 吉林松原 138001)

摘要 主要以松辽盆地南部红岗油田富含片钠铝石砂岩的红143和红146井为研究对象,通过普通薄片鉴定、茜素红-S染色、扫描电镜、能谱分析、显微测温等分析方法,对研究区含片钠铝石砂岩的成岩共生序列,尤其是流体包裹体均一温度进行了详细的研究。红岗油田成岩共生序列为:黏土矿物→石英次生加大边→方解石→片钠铝石→铁白云石→石英愈合微裂隙。通过流体包裹体测温得出:方解石胶结物的均一温度峰值在110~120℃;石英愈合微裂隙的均一温度峰值在130~140℃。片钠铝石的形成温度介于上述两者之间,在120~130℃。通过与国内外已有的研究成果相比较发现:经过岩浆改造后的砂岩中的片钠铝石的形成温度较低,在25~150℃;以子矿物产于包裹体中的片钠铝石的形成温度相对较高,在250~340℃。红岗油田片钠铝石属于第一种情况,形成温度较低,在120~130℃这个温度区间内。扫描电镜和能谱分析显示,形态上,红岗油田片钠铝石(形成温度在120~130℃)主要为针状,乌尔逊凹陷片钠铝石(形成温度在78.56~115.02℃)的片钠铝石主要为针柱状;化学成分上,红岗油田的片钠铝石与乌尔逊凹陷的片钠铝石相比,前者富Si,贫Na、Al和O,后者富Na、Al和O,贫Si。

关键字 红岗油田 片钠铝石 愈合微裂隙 流体包裹体 均一温度 形成温度

第一作者简介 于志超 男 1984年出生 博士研究生 储层地质学 E-mail: yuzhichao012@2008.sina.com

通讯作者 刘立 E-mail: liuli0892@vip.sina.com

中图分类号 P588.2 **文献标识码** A

0 前言

随着全球温室效应的加剧,如何减少CO₂气的排放量已经成为世界各国关注的焦点。要减少CO₂气的排放量,一个行之有效的办法就是将CO₂注入到地下深部渗透储层中参与地质反应,使其以碳酸盐的形式稳定捕获^[1]。CO₂在储集岩中可通过片钠铝石、菱铁矿^[2]和铁白云石^[3]三种碳酸盐有效固定。因此,作为CO₂的主要捕获矿物之一的片钠铝石越来越受到科学家的重视。片钠铝石(dawsonite),是一种含水、钠和铝的碳酸盐矿物,属于斜方晶系,化学式为NaAlCO₃(OH)₂,主要产自于陆相砂岩中^[3-7],此外,在火山碎屑岩^[8]、煤岩^[9]、砂岩^[10,11]、海相碳酸盐岩^[4]以及土壤中^[12]也有分布。由于片钠铝石的稳定性直接决定着CO₂能否永久的封存在地下,因此片钠铝石的稳定性成为研究的焦点,而温度作为衡量片钠铝石稳定性的一个重要参数成为研究的重点。例如:澳大利亚的BGS盆地砂岩中片钠铝石的形成温度在

25~35℃^[4];而也门Shabwa盆地砂岩中的片钠铝石的形成温度则要高一些,在85~100℃^[7];我国海拉尔盆地乌尔逊凹陷中的片钠铝石的形成温度与也门Shabwa的相近一些,在78.56~115.02℃^[13]。此外,片钠铝石的实验研究也已取得了一系列重要的成果:片钠铝石的合成实验证实,在80~180℃的温度区间内都可以合成片钠铝石,即片钠铝石在80~180℃温度区间内是可以稳定存在的^[14];CO₂流体-砂岩相互作用实验的研究发现:200℃下片钠铝石发生港湾状溶蚀现象;300℃下片钠铝石发生剧烈溶蚀,被溶蚀成孔、洞,甚至中央被溶空,而在地层水条件下片钠铝石稳定存在的上限温度为100~150℃^[15]。因此,进行片钠铝石形成温度的相关研究对于更好的探讨片钠铝石的稳定性具有十分重要的意义。

松辽盆地南部红岗油田的上白垩统青山口组砂岩中片钠铝石极其发育,是研究片钠铝石的天然实验室。笔者以研究区红143和红146两口富含片钠铝石的钻井为研究对象,通过普通薄片鉴定、茜素红-S

^①国家自然科学基金项目(批准号:40672074)和教育部博士点基金项目(编号:20070183137)联合资助。
收稿日期:2010-02-05;收修改稿日期:2010-11-15

染色、扫描电镜、能谱分析、显微测温等分析方法,对红岗地区含片钠铝石砂岩的成岩共生序列和流体包裹体均一温度进行了系统的研究,重点探讨了松辽盆地南部红岗地区砂岩中片钠铝石的形成温度。

1 地质背景

红岗油田位于吉林省大安市两家子镇境内,处于松辽盆地南部中央拗陷区红岗阶地南端的红岗构造带上,西邻西部斜坡区,东南与中央拗陷东部相接,北临嫩江,勘探面积约3500 km²(图1)。研究区地层齐全,自下而上依次沉积了白垩系火石岭组、河子组、营城组、登娄库组、泉头组、青山口组、姚家组、嫩江组、四方台组、明水组、第三系和第四系^[16]。依据地震资料分析,本区在明水组末期,由于受到太平洋板块向欧亚板块俯冲、挤压的影响,发生过构造反转运动^[16]。

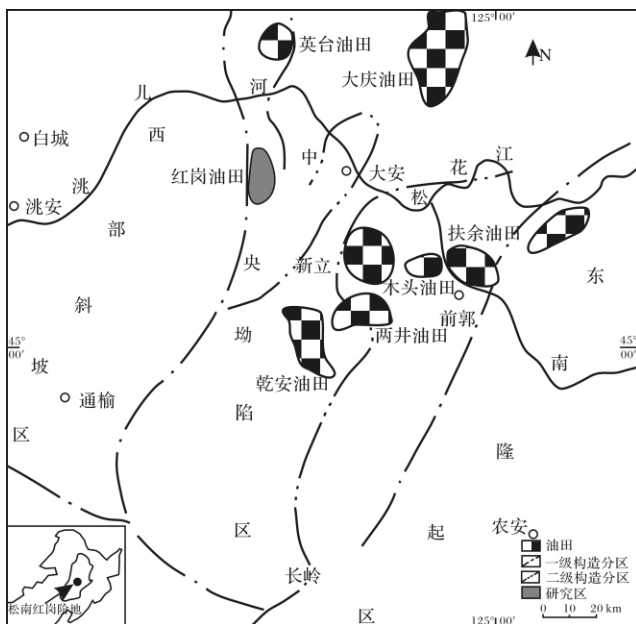


图1 松辽盆地构造分区及研究区位置图

Fig. 1 Tectonic division of the Songliao Basin and location of the study area

2 样品与研究方法

2.1 样品

样品采自红岗油田的红143和红146井上白垩统青山口组1256~1599.25 m处的岩芯。所采集的样品主要是含片钠铝石的岩屑长石砂岩和长石岩屑砂岩,骨架碎屑以长石、碎屑石英和岩屑为主,长石主要是斜长石和钾长石;石英主要为单晶石英,其次为

多晶石英;岩屑则主要是流纹岩岩屑和凝灰岩岩屑^[17]。三个端元的矿物组分(石英、长石、岩屑)含量大致相等,都在30%左右。

2.2 仪器与方法

测温分析是在吉林大学地球科学学院测试科学实验中心完成的,所用仪器主要是OLYMPUS偏光显微镜和LinKam—THMS600型冷热两用台。所用方法主要是均一测温法,其中,冷热两用台经过标准样品校正,100℃以下误差为0.1℃,100℃以上不超过0.5℃。扫描电镜和能谱分析在吉林大学地层及古生物研究中心完成,扫描电镜型号为JSM—6700F型SEM,与之配套的是INCAX—SIGHT型能谱仪。

2.3 分析过程

研究过程中,共切割薄片13片,制备2~5 mm双面剖光的光薄片5片。首先利用OLYMPUS偏光显微镜对13片含片钠铝石砂岩薄片进行了镜下鉴定,识别出含片钠铝石砂岩中胶结物与自生矿物的类型和共生关系,得出主要自生矿物的成岩共生序列;其次将样品磨成2~5 mm双面剖光的光薄片,用酒精泡洗,对流体包裹体进行了显微测温研究。

红岗地区含片钠铝石砂岩内自生矿物方解石和石英愈合裂隙比较发育,本次实验主要对上述两种矿物(或产状)的包裹体进行研究。将制好的光薄片放在加热台上,通过显微镜观察选好测试区域,进行测温实验。在测温实验中,首先输入上限温度和加热时间,以10℃/min的速度加热,待接近均一时将加热速度改为5℃/min,以便观察均一过程。在均一过程中,大部分气液包裹体气泡逐渐缩小,最终均一为液相;部分包裹体可能捕获自超临界流体,这些包裹体在加热过程中相变甚微,最终相界模糊均一。

3 成岩共生序列

含片钠铝石砂岩中的自生矿物主要是次生加大石英、片钠铝石、方解石、铁白云石和自生黏土矿物。其中,自生黏土矿物包括伊/蒙混层、自生伊利石、自生高岭石^[17]。

经镜下鉴定,方解石以充填孔隙为主,少量交代碎屑颗粒,或充填在介形虫的骨架内,茜素红-S染色呈粉红色。方解石晶体粗大,连生现象发育(图2a),并且强烈的交代碎屑颗粒,局部还可见方解石充填于石英次生加大边剩余的孔隙里(图2a),因此其形成的时间要晚于石英次生加大边。

石英次生加大现象比较少见,仅在少数的几个薄

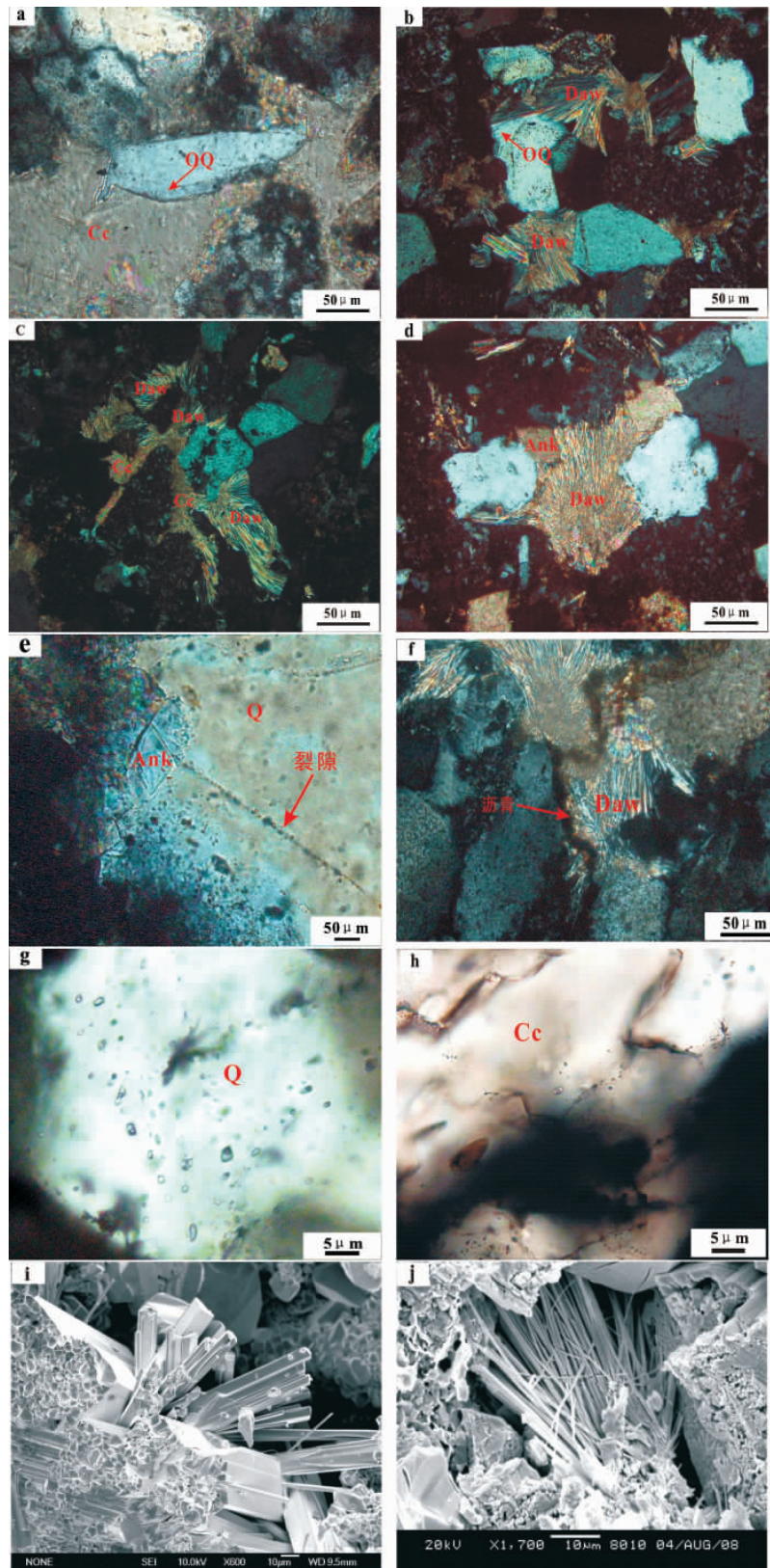


图 2 成岩作用特征和流体包裹体显微照片

a. 方解石交代石英次生加大边, 正交偏光; b. 片钠铝石交代石英次生加大边, 正交偏光; c. 片钠铝石交代孔隙充填方解石, 正交偏光; d. 铁白云石交代片钠铝石, 正交偏光; e. 愈合裂隙交代铁白云石, 正交偏光; f. 沥青切穿片钠铝石, 正交偏光; g. 石英裂隙里的流体包裹体, 单偏光; h. 方解石中的流体包裹体, 单偏光; i. 针柱状片钠铝石, 苏 101 井, 扫描电镜; j. 针柱状片钠铝石, 红 146 井, 扫描电镜。Daw-片钠铝石, Cc-方解石, Ank-铁白云石, Q-石英, 00-次生加大石英

Fig. 2 The micrograph of diagenetic characteristics and fluid inclusion

片中可见,加大边宽约0.005 mm左右。镜下可见有石英次生加大边被片钠铝石交代现象(图2b),说明石英次生加大边形成时间要早于片钠铝石。

片钠铝石的含量较高,大约在4%~23%之间,一般以放射状(图2b)、栉状(图2c)和板状等集合体分布于砂岩的孔隙中,并且交代长石、石英(图2c)和岩屑等碎屑颗粒。呈放射状产出的片钠铝石其核部为密集的微晶集合体,呈团簇状,向末端过渡为放射状集合体(图2d)。此外,通过扫描电镜观察,发现片钠铝石充填在方解石形成后剩余的孔隙里,说明片钠铝石在方解石之后形成的^[17]。

铁白云石的含量较少,约在1%~5%,经茜素红-S染色呈蓝色。薄片中主要交代石英、长石等碎屑颗粒,局部还可见交代片钠铝石,故其形成的时间肯定晚于片钠铝石^[17](图2d)。

此外,碎屑石英中的愈合微裂隙比较发育,往往切穿了石英、长石等碎屑颗粒,局部还可见愈合微裂隙切穿了铁白云石的现象(图2e)。同时这些微小的愈合裂隙也是油气运移的通道,宏观上表现为脉状的沥青,局部还切穿了片钠铝石(图2f),说明愈合微裂隙形成的时间最晚。上述愈合裂隙的形成与本区的构造活动关系十分密切,在明水组末期,由于受到东西向的挤压应力(太平洋板块向欧亚板块俯冲的结果)作用,发生过一次大的构造反转运动:断层性质由正变逆,具有下正上逆的特点,红16、红7、红121一带相对抬高,红25、红118、红34一带相对下降,形成了背斜构造^[18]。正是由于这一时期的构造反转运动导致区内各种宏观裂缝十分发育,并且主要以高角度构造裂缝为主,裂缝倾角大于70°者占到了58%以上,它们广泛分布在砂岩和泥岩中^[19]。显然,愈合裂隙的形成应该与宏观裂缝同步。

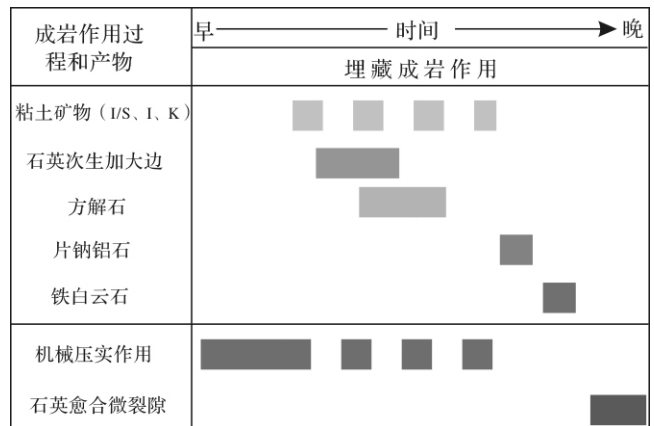
综上所述,红岗油田含片钠铝石砂岩的成岩共生序列为:黏土矿物→石英次生加大边→方解石→片钠铝石→铁白云石→石英愈合微裂隙(图3)。

4 流体包裹体特征

4.1 岩相学特征

红岗油田含片钠铝石砂岩样品中流体包裹体主要是气液两相盐水包裹体,以两种方式产出:一是产自于石英愈合微裂隙中的包裹体群;二是产自于方解石胶结物中的包裹体群。

石英裂隙中的气液两相包裹体数量较少,且形态不规则,直径较小,不易观察,基本上呈条带状展布,



(注: I/S - 伊蒙混层; I - 伊利石; K - 高岭石)

图3 含片钠铝石砂岩成岩共生序列

Fig. 3 The diagenetic paragenesis succession of dawsonite-bearing sandstones

经常与烃类包裹体相伴随产出,为次生成因的包裹体。该包裹体群的单个形态主要呈椭圆状,浑圆状,直径在1~3 μm,气液比变化范围较大,分布在5%~15%。(图2g)

方解石中的气液两相包裹体数量较多,形态也比较规则,直径较大,并且易于观察,是成岩时流体被捕获于宿主矿物晶格缺陷内与方解石同期形成的,为原生包裹体。该包裹体群的单个形态主要呈长条状、椭圆状,直径在2~4 μm,气液变化范围较小,多数集中在5%。(图2h)

4.2 均一温度

本次实验共测定包裹体均一温度数据55个,其中方解石胶结物中的原生包裹体29个,石英愈合微裂隙中的次生包裹体23个,石英次生加大边原生包裹体1个,石英颗粒内部原生包裹体1个,片钠铝石中的原生包裹体1个(表1)。方解石中的原生包裹体均一温度在80~120℃;石英愈合微裂隙中的次生包裹体均一温度较高并且分布范围广,在130~190℃。本次研究在片钠铝石中只测定到一个流体包裹体的均一温度数据,为125.7℃(表1)。

4.2.1 胶结物中的包裹体

虽然方解石中盐水包裹体的均一温度不能代表捕获温度,但可以视为岩石经历最大温度的有用记录^[20]。方解石中的流体包裹体与宿主矿物(方解石)同时形成,因而其均一温度基本上能够代表其形成时的温度。红岗油田方解石的形成温度集中在100~120℃(图4),此外,还有少量形成温度低于100℃的方解石,这可能是由于后期地层抬升造成的。本次研

究中在石英次生加大边中只测定出一个包裹体均一

表 1 红岗油田青山口组含片钠铝石砂岩盐水包裹体均一温度数据

Table 1 Data of the homogenization temperature of fluid inclusion of the dawsonite-bearing sandstone

样品号	测定视域	类型	宿主矿物	包裹体类型	气液比	大小	T _h /°C
					%	/μm	
1	1	原生	方解石	气液两相	10%	2 × 3	106.9
	2	原生	方解石	气液两相	5%	2 × 2	112.7
	3	原生	石英裂隙	气液两相	15%	3 × 4	150
4	4	原生	方解石	气液两相	10%	2 × 3	115
	5	原生	方解石	气液两相	5%	2 × 3	115.4
	6	原生	方解石	气液两相	5%	2 × 3	106.3
7	7	原生	方解石	气液两相	5%	2 × 3	112.6
	8	次生	石英裂隙	气液两相	5%	2 × 1	145
	9	次生	石英裂隙	气液两相	10%	3 × 2	147.2
10	10	原生	方解石	气液两相	5%	1 × 2	103.5
	11	次生	碎屑石英	气液两相	5%	2 × 5	82.5
	12	原生	方解石	气液两相	5%	2 × 3	113.8
13	13	次生	石英裂隙	气液两相	5%	2 × 3	135.1
	14	原生	方解石	气液两相	10%	2 × 4	115.5
	15	原生	方解石	气液两相	10%	2 × 4	93.2
16	16	原生	方解石	气液两相	10%	2 × 3	93.6
	17	原生	方解石	气液两相	10%	3 × 4	108.5
	18	原生	方解石	气液两相	10%	2 × 3	136.2
6	19	原生	方解石	气液两相	10%	2 × 3	102.5
	20	原生	片钠铝石	气液两相	5%	2 × 3	125.7
	21	次生	石英裂隙	气液两相	5%	2 × 1	129.9
22	22	次生	石英裂隙	气液两相	5%	2 × 1	129.9
	23	次生	石英裂隙	气液两相	5%	2 × 1	129.9
	24	原生	方解石	气液两相	5%	2 × 3	87
7	25	原生	方解石	气液两相	5%	2 × 3	87
	26	原生	方解石	气液两相	5%	2 × 3	121.9
	27	次生	石英裂隙	气液两相	5%	2 × 3	136.4
28	28	原生	方解石	气液两相	5%	2 × 4	109.8
	29	次生	石英裂隙	气液两相	10%	2 × 4	189
	30	原生	方解石	气液两相	5%	2 × 3	107.9
31	31	次生	石英裂隙	气液两相	5%	2 × 3	108.2
	32	次生	石英裂隙	气液两相	5%	2 × 3	122.1
	33	原生	石英颗粒内	气液两相	15%	2 × 3	269
34	34	原生	石英加大边	气液两相	5%	2 × 4	92.7
	35	次生	石英裂隙	气液两相	15%	3 × 5	157.5
	36	原生	方解石	气液两相	10%	2 × 3	103.6
9	37	次生	石英裂隙	气液两相	5%	2 × 1	138.2
	38	次生	石英裂隙	气液两相	5%	1 × 2	138.2
	39	次生	石英裂隙	气液两相	5%	2 × 3	132
40	40	次生	石英裂隙	气液两相	5%	2 × 3	156.8
	41	次生	石英裂隙	气液两相	10%	3 × 4	132.7
	42	次生	石英裂隙	气液两相	5%	2 × 3	167.3
43	43	次生	石英裂隙	气液两相	5%	1 × 3	166.7
	44	原生	方解石	气液两相	10%	2 × 3	116.5
	45	原生	方解石	气液两相	5%	2 × 4	102.4
46	46	原生	方解石	气液两相	5%	2 × 1	89.8
	47	原生	方解石	气液两相	10%	2 × 3	118.9
	48	原生	方解石	气液两相	5%	2 × 1	105.8
49	49	原生	方解石	气液两相	5%	2 × 3	92.9
	50	原生	方解石	气液两相	5%	2 × 4	89.1
	51	次生	石英裂隙	气液两相	10%	3 × 4	188.6
52	52	次生	石英裂隙	气液两相	5%	2 × 3	190.2
	53	次生	石英裂隙	气液两相	5%	2 × 3	185.4
	54	原生	方解石	气液两相	5%	2 × 3	110.7
55	原生	方解石	气液两相	5%	2 × 3	107.9	

(注: 吉林大学地球科学学院测试科学实验中心地质流体实验室测定)

温度数据, 为 92.7°C (图 4)。

4.2.2 碎屑石英愈合微裂隙中的包裹体

裂隙往往是后期热液运移的通道, 当裂隙愈合时就会捕获其中的热流体形成流体包裹体, 因而流体包裹体也就成为记录这些热流体信息的“密码”^[21]。因此, 石英愈合微裂隙中的流体包裹体属于次生成因, 其均一温度代表后期沿着裂隙侵入的流体的温度。根据松南均一温度直方图可以将石英愈合微裂隙里的流体划分为两期: 第一期流体的均一温度集中在 130 ~ 140°C, 这一温度区间也是整个石英愈合微裂隙中包裹体均一温度的峰值区间; 第二期流体的均一温度集中在 180 ~ 190°C, 温度较高, 表明该期流体发生在成岩后。按照红岗油田在白垩纪末的最大地温梯度 (4.26 ~ 4.80°C/100 m) 计算^[22], 该深度正常情况下能够达到的温度范围是 60 ~ 76.8°C, 而这一深度包裹体的均一温度可达到 180 ~ 190°C, 远大于 60 ~ 76.8°C, 说明含片钠铝石砂岩在成岩后期遭受到了深部热流体的影响。

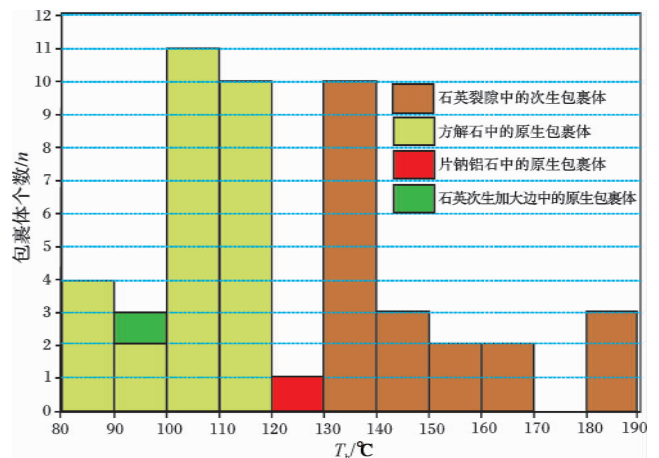


图 4 红岗油田流体包裹体均一温度直方图

Fig. 4 The homogenization temperature histogram of fluid inclusion in the Honggang Oilfield

5 讨论

5.1 片钠铝石的形成温度

目前确定片钠铝石形成温度的方法主要有以下三种: (1) 通过碳、氧同位素温度计的计算来确定片钠铝石的形成温度^[4, 13]; (2) 通过测定片钠铝石中原生包裹体的均一温度来确定片钠铝石的形成温度; (3) 通过成岩共生序列和包裹体测温相结合的方法来确定片钠铝石的形成温度。Worden 依据成岩共生序列先是确定出片钠铝石形成于两期石英次生加大

边之间,然后再通过流体包裹体均一测温法确定出二期加大边的均一温度,最后给出了片钠铝石的形成温度,介于上述第一期石英加大边(85℃)和第二期石英加大边(100℃)形成的温度之间,即在85~100℃这一温度区间内^[7]。

第一种方法在计算的过程中是用方解石—CO₂的分馏系数代替同温度下片钠铝石—CO₂的分馏系数,但是,方解石的分馏系数与片钠铝石的分馏系数是不一样的,因此这么代替是不合理的;第二种方法实际操作起来比较困难,这是由于受到片钠铝石的结晶习性(多呈放射状集合体)的影响,片钠铝石就其本身矿物晶体特征而言不容易捕获流体,较难形成流体包裹体;第三种方法的可操作性很强,这也是这种方法的优点,但是它只有在矿物连续生长的基础上才具有一定的可信度。在本次研究中,方解石、片钠铝石、铁白云石这三种矿物是连续生长的。因此,只要能够得到方解石和铁白云石的形成温度就能够比较准确的得出片钠铝石形成的温度区间。但是在铁白云石里没能够找到包裹体,只能用石英愈合裂隙里的盐水包裹体的均一温度来代替,这就造成了一定的误差。而本次研究在片钠铝石中找到了一个原生包裹体,其均一温度为125.7℃,用这一温度来约束裂隙的温度,进而得出形成片钠铝石的温度区间。

总结上述方法并结合本次研究的具体情况,本文采用第三种方法。早于片钠铝石形成的自生矿物为方解石,因而可以将方解石中原生盐水包裹体的均一温度上限值视为片钠铝石形成的温度下限,晚于片钠铝石形成的是石英愈合微裂隙,因而可以将石英愈合微裂隙中的次生盐水包裹体的均一温度下限值视为片钠铝石形成的温度上限。因此,片钠铝石的形成温度应该介于上述两者之间。通过前面均一温度的研究得出:方解石胶结物的均一温度峰值在100~120℃之间,因此120℃是片钠铝石形成温度的最低下限;石英愈合微裂隙中流体的均一温度的峰值在130~140℃之间,因此130℃是片钠铝石形成温度的上限。根据 Worden 的方法,片钠铝石的形成温度区间应该是120~130℃。

5.2 不同温度下片钠铝石矿物形态和化学组成特征

自然界中产出的片钠铝石其单个晶体形态主要为针柱状,其晶胞参数为 $a = 6.77(3) \text{ \AA}$, $b = 10.40 \text{ \AA}$, $c = 5.58(3) \text{ \AA}$ ^[23],并且沿着c轴一向延长生长。不同温度下形成的片钠铝石其针柱的长度和宽度有着很大差别。本文通过扫描电镜对比了乌尔

逊凹陷和松辽盆地南部红岗地区的片钠铝石的形态特征发现:乌尔逊地区的片钠铝石(形成温度较低)的形态大多呈针柱状,柱体较宽,宽约2μm,长度在10~35μm之间(图2i),而松南红岗地区的片钠铝石(形成温度较高)的形态大多呈针状,柱体较窄,长度在15~40μm之间(图2j)。张向峰等的水—热合成实验^[24]也很好的证实了这一点:随着温度的升高,合成的片钠铝石颗粒直径(长径)是逐渐增大的,80℃下,颗粒的直径大约为100nm,120℃下颗粒的直径增大到150nm,180℃下颗粒的直径甚至达到了300nm。

形成于不同温度下的片钠铝石其化学组成有着明显的差别,编号A-003、A-014、B-003和D-002的样品来自于乌尔逊凹陷,与之相对应的含片钠铝石砂岩样品中片钠铝石的形成温度在78.56~95.08℃之间^[13,25],而本文中片钠铝石的形成温度在120~130℃之间,可以看出两者的化学组成存在着很大差异性(表2)。形成温度相对较低的片钠铝石具有高的钠、铝和氧元素含量,其平均值为Na:14.38%,Al:23.48%,O:59.6%(图5),形成温度相对较高的片钠铝石则具有低的钠、铝和氧元素含量(图5),其平均值为Na:10.47%,Al:11.52%,O:47.82%。

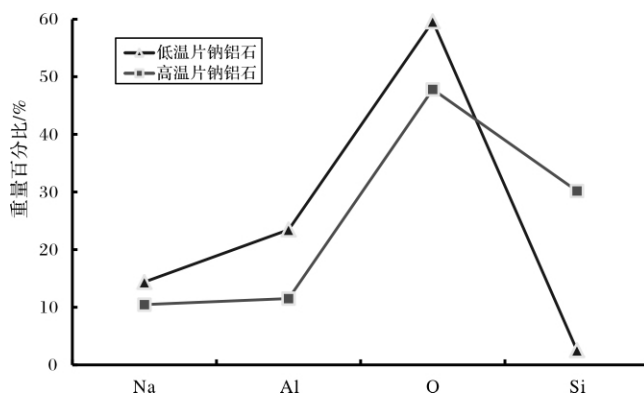


图5 高、低温片钠铝石化学成分对比图

Fig. 5 Chemical composition comparison chart of dawsonite of high and low temperature species

形成温度相对较低的片钠铝石其硅的含量非常低,几乎为零(图5),而形成温度相对较高的片钠铝石其硅的含量较高,几乎占到上述四种元素总和的1/3(表2),这可能是由于形成片钠铝石的高温、富CO₂流体强烈的交代石英和长石颗粒,导致硅元素残留于片钠铝石矿物中形成的,其含量越高说明交代作用进行的越强烈,同时也说明红岗地区的片钠铝石的

形成与来自幔源的、高温的富 CO₂ 流体关系十分密切。

表 2 INCA-SIGHT 能谱仪测定的片钠铝石成分数据

Table 2 Data of dawsonite components by INCA-SIGHT energy spectrometer

编号	质量百分比/%				片钠铝石 形成温度	数据来源
	Na	Al	O	Si		
A-003	11.25	29.84	58.91	0	78.56 ~ 95.08℃	高玉巧, 2008
A-003	14.11	24.59	61.29	0		
A-003	14.14	23.42	62.44	0		
A-003	11.18	27.9	60.91	0		
A-003	14.27	24.4	61.32	0		
A-003	14.08	20.49	58.16	7.27		
A-003	15.48	28.35	56.18	0		
A-003	13.83	27.49	58.68	0		
A-003	6.39	27.3	66.32	0		
A-003	14.13	24.03	61.85	0		
A-003	15.79	27.58	56.63	0		
A-003	17.45	20.98	61.57	0		
A-003	12.92	12.73	60.96	1.52		
A-003	14.24	19.68	57.29	8.79		
A-014	17.42	27.82	54.76	0		
A-014	14.09	26.06	59.85	0		
A-014	13.83	28.93	57.24	0		
A-014	16.3	24.7	53.64	5.37		
A-014	13.97	29.42	56.61	0		
A-014	16.3	18.92	61.21	3.57		
A-014	14.53	26.14	59.33	0		
A-014	17.07	22.75	60.17	0		
B-003	16.63	22.84	60.53	0		
D-002	12.01	15.43	60.83	0		
D-002	15.24	23.79	60.97	0		
D-002	15.59	24.62	59.8	0		
D-002	11.22	11.57	60.29	2.57		
D-002	15.78	25.87	58.35	0		
D-002	10.48	14.08	61.6	0		
D-002	17.42	19.49	63.09	0		
D-002	16.47	23.81	59.71	0		
D-002	16.58	26.49	56.93	0		
平均值 ^①	14.38	23.48	59.6	0.9		
H146-2	11.72	13.71	47.32	27.25	120 ~ 130℃	本文
H143-12	9.23	9.33	48.32	33.13		
平均值 ^②	10.47	11.52	47.82	30.19		

(注: 上述数据由吉林大学地层及古生物研究中心测定, H146-2 和 H143-12 的数据为多点平均值, 平均值^①代表乌尔逊凹陷低温片钠铝石的平均化学组成; 平均值^②代表红岗油田高温片钠铝石的平均化学组成。)

5.3 与国内外片钠铝石形成温度的对比

红岗油田砂岩中片钠铝石的形成温度略高于国内外已发表的砂岩中片钠铝石的形成温度。例如: 高玉巧计算了海拉尔盆地乌尔逊凹陷砂岩中的片钠铝

石的碳同位素温度, 得出了片钠铝石的形成温度在 78.56 ~ 115.02℃^[13]; Worden 研究了与片钠铝石共生的两期次生加大石英中的流体包裹体均一温度, 给出了也门 Shabwa 盆地砂岩中片钠铝石的形成温度为 85 ~ 100℃^[7]; Baker 通过氧同位素计算得出, 澳大利亚 BGS 盆地砂岩中的片钠铝石的形成温度在 25 ~ 35℃^[4]。上述片钠铝石的形成都具有以下两个相同的特点: (1) 具有相同的成因, 形成片钠铝石所需的 CO₂ 都来源于与岩浆活动关系密切的幔源 CO₂ 气; (2) 成岩体系是一个相对开放的体系。在岩浆上升的过程中, 随着压力和温度不断下降以及岩浆成分的变化, 挥发份的溶解度也随之降低, 从而导致富含碱和挥发份的深部热液流体与硅酸盐岩浆熔体分离, 这就是幔源岩浆的去气作用^[26]。当这些热流体沿着裂隙向上侵入、逸散, 渗透到砂岩的孔隙中, 与先期形成的砂岩相互作用, 热流体中的挥发组份 (CO₂ 气) 被捕获, 以片钠铝石、铁白云石等碳酸盐的形式固定下来, 保存于砂岩中, 即岩浆活动—砂岩成岩 (片钠铝石形成)—幔源 CO₂ 气成藏模式^[13]。可以看出, 以这种方式产出的片钠铝, 其形成温度较低, 范围较广, 从 25℃ 到 115.02℃ 不等, 这可能与热流体沿着裂隙运移至地表的过程中热量和组分不断的流失 (开放体系) 有关。

依据侯启军等人的研究^[27], 松辽盆地南部红岗油田中 CO₂ 气藏属于幔源岩浆成因, 在地质过程中片钠铝石往往与 CO₂ 天然气藏相伴生, 由于片钠铝石的形成过程需要一个高的 CO₂ 分压, 因此片钠铝石的出现或富集表明曾存在大量 CO₂ 的运移或聚集^[28]。现已研究证实, 与松辽盆地南部红岗油田毗邻的孤店和乾安无机 CO₂ 气田中, 形成片钠铝石的 CO₂ 绝大部分属于幔源—岩浆型^[29, 30], 而本文中含片钠铝石砂岩样品即取自于红岗无机 CO₂ 气藏, 据此可以推断形成红岗片钠铝石的 CO₂ 也应属于幔源岩浆成因, 其形成过程类似于海拉尔盆地的乌尔逊凹陷。即上地幔岩浆脱气后形成的富含 CO₂ 的热流体沿着红岗断裂上升改造砂岩形成的 (图 6)。在这一过程中, 富含 CO₂ 热流体溶于地下水系统中, 由于地下水的温度远远低于 CO₂ 热流体, 从而导致其热量大量流失, 因此, 红岗油田砂岩中片钠铝石应该形成于一个相对开放的体系, 形成温度较低。

相对于砂岩中片钠铝石的形成温度, 在石英脉和结晶岩中以子矿物包裹体形式存在的片钠铝石形成温度要高很多。Mona 等人在 Tin-Mountain 地区的伟

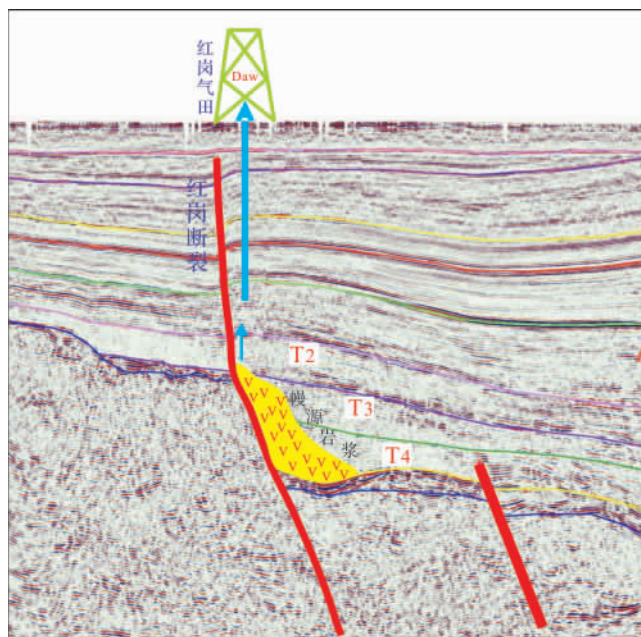


图6 红岗油田片钠铝石成因示意图(原图引自李福来, 2009)

Fig. 6 Schematic diagram illustrating the origin of dawsonite in the Honggang Oilfield

晶岩石英脉中发现了以片钠铝石作为子晶矿物产出的气—液—固三相包裹体,其中气相为 CO_2 气,液相主要是水,并且指出片钠铝石子矿物是“原生固体”,捕获自出溶的流体,与包裹体中的流体几乎同时形成。并由此得出,片钠铝石形成的温度、压力条件应该与该包裹体中不混溶的流体是一致的,为 340°C , 2.7 kbar ^[31]。后来, Mona 等人对含片钠铝石子晶的包裹体进行了加热实验,研究发现:当加热温度达到 430°C 时,片钠铝石晶体依然保存完好^[31, 32],并没有消失,可见其形成时的温度是很高的。Eileen 等人研究了加拿大魁北克省经过片钠铝石改造后的响岩中的流体包裹体,经过对其中含片钠铝石子晶的三相包裹体显微测温研究发现:其中一个包裹体中的片钠铝石在 275°C 的时候开始发生溶解,而另一个包裹体中的片钠铝石子晶则是在 300°C 的时候开始分解,从而得出片钠铝石的形成温度在 $250\sim 300^\circ\text{C}$ 之间^[33]。可以看出上述包裹体中的片钠铝石的形成温度都远远大于砂岩中片钠铝石的温度,这可能与形成的环境有关。众所周知,片钠铝石形成于高的 CO_2 分压,富碱性的流体环境中。含片钠铝石子晶的包裹体中流体成分主要为 $\text{CO}_2\text{—H}_2\text{O}$ 体系^[31],而 Tin-Mountain 地区的伟晶岩是由高碱性的岩浆流体演化来的^[31],响岩是一种典型的碱性岩浆岩,上述片钠铝石形成于一

个富碱性的、相对封闭的流体环境中,即没有外来物质的加入也没有内部物质的逸出。所以,作为子矿物产于包裹体中的片钠铝石的形成温度明显的要高于经过热流体改造后的砂岩中片钠铝石的温度。

以上研究表明,片钠铝石在相对开放、有复杂流体参与交换的体系下形成温度较低,范围较广($25\sim 115.02^\circ\text{C}$)。而在相对封闭、单一流体($\text{CO}_2\text{—H}_2\text{O}$)的环境下以子矿物包裹体形式存在于石英脉和结晶岩中的片钠铝石形成温度较高($250\sim 340^\circ\text{C}$)。此外,大量的实验研究也已证明了这一观点:曲希玉等所进行的 CO_2 流体—砂岩相互作用实验研究发现,在地层水条件下片钠铝石稳定存在的上限温度为 $100\sim 150^\circ\text{C}$ ^[15];张向峰等通过片钠铝石的合成实验研究得出:片钠铝石是在 $80\sim 180^\circ\text{C}$ 的温度条件下合成的,即片钠铝石在 $80\sim 180^\circ\text{C}$ 温度区间内是可以稳定存在的^[14]。但是,在相对封闭、单一流体($\text{CO}_2\text{—H}_2\text{O}$)的体系下,片钠铝石稳定存在的温度则要高很多:Charles 等人在封闭的体系下,通过片钠铝石的热分解实验研究得出,片钠铝石经过加热可分解为 H_2O 、 CO_2 和 NaAlO_2 三种物质,其分解过程可分为两个阶段:(1)片钠铝石晶体在 $300\sim 375^\circ\text{C}$ 这一温度区间内开始分解,全部的羟基水和三分之二的 CO_2 释放出去,只剩下一些无晶体形态的碳酸钠;(2)随着温度的继续升高,当达到 $360\sim 650^\circ\text{C}$ 温度区间时,剩下的 CO_2 平衡被打破,全部释放出去,与此同时有新的含钠的铝酸盐(NaAlO_2)晶体产出^[34]。曲希玉等通过 CO_2 流体—砂岩相互作用实验发现, 200°C 下片钠铝石发生港湾状溶蚀现象; 300°C 下片钠铝石发生剧烈溶蚀,被溶蚀成孔、洞,甚至中央被溶空^[15]。因此,当处于相对封闭的体系中,并且只有 $\text{CO}_2\text{—H}_2\text{O}$ 流体存在的情况下,片钠铝石的形成温度是很高的。

综上所述,片钠铝石的形成温度并不是由单一因素决定的,这与它形成的环境及流体体系有着密不可分的关系。不同的环境、流体体系下片钠铝石的形成温度有着很大的差别。因此,只有与片钠铝石的形成环境紧密结合的情况下,才能够得出接近于片钠铝石实际形成时的温度。

6 结论

通过以上对松辽盆地南部红岗油田含片钠铝石砂岩的研究,得出以下四点结论:

(1) 含片钠铝石砂岩主要是长石岩屑砂岩和岩屑长石砂岩,其成岩共生序列为:黏土矿物→石英次

生加大边→方解石→片钠铝石→铁白云石→石英愈合微裂隙。

(2) 含片钠铝石砂岩中方解石、石英次生加大边等胶结物的形成温度较低, 在 100 ~ 120℃; 石英愈合微裂隙中的流体形成的温度较高, 在 130 ~ 140℃。

(3) 研究区片钠铝石形成温度在 120 ~ 130℃, 位于国内外其它地区砂岩中片钠铝石的形成温度范围内(25℃ ~ 150℃);

(4) 红岗油田砂岩中片钠铝石的形态主要为针状, 化学成分上富 Si, 贫 Na、Al 和 O; 与之相比形成温度相对较低乌尔逊凹陷片钠铝石的形态主要为针柱状, 化学成分上富 Na、Al 和 O, 贫 Si。

参考文献(References)

- Gunter W D, Wiwchar B, Perkins E H. Aquifer disposal of CO₂-rich greenhouse gases: extension of the time scale of experiment for CO₂-sequestering reactions by geochemical modeling [J]. *Mineral Petrology*, 1997, 59: 120-137
- Biniam Zerai, Beverly Z, Saylor G M. Computer simulation of CO₂ trapped through mineral precipitation in the Rose Run Sandstone, Ohio [J]. *Applied Geochemistry*, 2006, 21: 223-240
- Xu T, Apps J A, Pruess K. Mineral sequestration of carbon dioxide in a sandstone shale system [J]. *Chemical Geology*, 2005, 217: 298-317
- Baker J C, Bai G P, Hamilton P J, et al. Continental-scale magmatic carbon dioxide seepage recorded by dawsonite in the Bowen-Gunnedah-Sydney basin system, eastern Australia [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1995, 65 (3): 522-530
- Watson M N, Zwingmann N, Lemon N M. The Ladbroke Grove—Katonook carbon dioxide natural laboratory: A recent CO₂ accumulation in a lithic sandstones reservoir [J]. *Energy*, 2004, 29: 1457-1466.
- 刘立, 高玉巧, 曲希玉, 等. 海拉尔盆地乌尔逊凹陷无机 CO₂ 气储集层的岩石学与碳氧同位素特征 [J]. *岩石学报*, 2006, 22 (8): 2229-2236 [Liu Li, Gao Yuqiao, Qu Xiyu, et al. Petrology and carbon-oxygen isotope of inorganic CO₂ gas reservoir in Wuersun depression, Hailaer Basin [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 22 (8): 2229-2236]
- Worden R H, Dawsonite cement in the Triassic Lam Formation, Shabwa basin, Yemen: A natural analogue for a potential mineral product of subsurface CO₂ storage for greenhouse gas reduction [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2006, 23: 61-77
- Heritsch H. Dawsonite as a product of low-hydrothermal transformation of a volcanic breccia from a borehole in eastern Styria (Austria) [J]. *Neus Jahrbuch für Mineralogie, Monatshefte*, 1975, 8: 360-368
- Goldbery R, Loughnan F C. Dawsonite and nordstrandite in Permian Berry Formation of the Sydney Basin, New Wales [J]. *Australia Sedimentology*, 1970, V. 24, P. 565-579
- 杜韞华. 一种次生的片钠铝石 [J]. *地质科学*, 1982, (4): 434-437 [Du Yunhua. Secondary dawsonite in Shengli Oilfield, China [J]. *Acta Geologica Sinica*, 1982, (4): 434-437]
- 徐衍彬, 陈平, 徐永成. 海拉尔盆地碳钠铝石分布与油气的关系 [J]. *石油与天然气地质*, 1994, 15 (4): 322-327 [Xu Yanbin, Chen Ping, Xu Yongcheng. NaAlCO₃(OH)₂ distribution and its relationship with oil and gas in Hailaer Basin [J]. *Oil and Gas Geology*, 1994, 15 (4): 322-327]
- Hay R L. Zeolitic weathering in Olduvai Gorge Tanganyika [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1963, 74: 1281-1286
- 高玉巧, 刘立, 张福松, 等. 海拉尔盆地乌尔逊凹陷片钠铝石的碳氧同位素组成及流体来源探讨 [J]. *岩石学报*, 2007, 23 (4): 831-838 [Gaoyuqiao, Liu Li, Zhang Fusong, et al. C-O isotope composition of dawsonite and its implication on the fluid origin in Wuersun sag, Hailaer basin, China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23 (4): 831-838]
- Xiangfeng Zhang, Zhaoyin Wen. Hydrothermal synthesis and thermodynamic analysis of dawsonite-type compounds [J]. *Journal of Solid State Chemistry*, 2004, 177: 849-855
- 曲希玉, 刘立, 马瑞, 等. CO₂ 流体对岩屑长石砂岩改造作用的实验研究 [J]. *吉林大学学报: 地球科学版*, 2008, 38 (6): 959-964 [Qu Xiyu, Liu Li, Ma Rui, et al. Experiment on debris-arkosic sandstone reformation by CO₂ fluid [J]. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 2008, 38 (6): 959-964]
- 聂逢君. 松辽盆地构造演化与东吐莫地区层序地层及隐蔽圈闭研究 [D]. 北京: 中国地震局地质研究所, 2004 [Nei Fengjun. Study on tectonic evolution and sequence stratigraphy and hidden traps for petroleum in Dongtumo area of the Songliao Basin [D]. Beijing: Institute of Geology, China Earthquake Administration, 2004]
- 董林森, 刘立, 曲希玉, 等. 松辽盆地南部红岗油田青山口组片钠铝石的结晶特征及其成因探讨 [J]. *吉林大学学报: 地球科学版*, 2009, 39 (6): 1032-1033 [Dong Linsen, Liu Li, Qu Xiyu, et al. Crystal characteristics and origin of formation of dawsonite of the Qingshankou Formation in the Honggang Oilfield in the southern Songliao Basin [J]. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 2009, 39 (6): 1032-1033]
- 赵荣. 松辽盆地南部红岗油田高台子油层油藏地质特征研究 [D]. 大庆: 大庆石油学院, 2003 [Zhao Rong. The study of geological character of Gaotaizi oil layer in Honggang Oil Field in the southern part of Songliao Basin [D]. Daqing: Daqing Petroleum Institute, 2003]
- 曾联波, 田崇鲁, 刘刚. 松辽盆地南部低渗透砂岩储层裂缝特征及其对油田开发的影响 [J]. *石油大学学报: 自然科学版*, 1998, 22 (2): 11-13 [Zeng Lianbo, Tian Chonglu, Liu Gang, et al. Characteristics of fracture of sandstone reservoir with low permeability in southern Songliao Basin [J]. *Journal of the University of Petroleum*, 1998, 22 (2): 11-13]
- Burruss R C. Diagenetic palaeotemperatures from aqueous fluid inclusions: reequilibration of inclusions in carbonate cements by burial heating [J]. *Mineral Magazine*, 1987, 51: 477-481
- Rodder E. Fluid inclusion [J]. *Reviews in Mineralogy*, 1984, 12: 11-45, 251-290
- 任战利, 萧德铭, 迟元林. 松辽盆地古地温恢复 [J]. *大庆石油地*

- 质与开发, 2001, 20(1): 11-13 [Ren Zhanli, Xiao Deming, Chi Yuanlin. Restoration of the palaeo-geotherm in Songliao Basin [J]. Petroleum Geology and Oilfield Development in Daqing, 2001, 20(1): 11-13]
- 23 Corraza E, Sabelli C, Vannucci S. Dawsonite: new mineralogical data and structure refinement [J]. Neues Jahrbuch fur Mineralogie Monatshefte, 1977, 9: 381-397
- 24 Xiangfeng Zhang, Zhaoyin Wen, Guo Zhonghua, et al. Hydrothermal synthesis and thermodynamic analysis of dawsonite-type compounds [J]. Journal of Solid State Chemistry, 2004, 177: 849-855
- 25 高玉巧, 刘立, 曲希玉, 等. 海拉尔盆地乌尔逊凹陷与松辽盆地孤店 CO₂ 气田含片钠铝石砂岩的岩石学特征 [J]. 古地理学报, 2008, 10(2): 117-118 [Gao Yuqiao, Liu Li, Qu Xiyu, et al. Petrologic characteristics of dawsonite-bearing sandstone in Wuerxun Sag of Hailaer Basin and Gudian CO₂ Gas field in Songliao Basin [J]. Journal of Palaeogeography, 2008, 10(2): 117-118]
- 26 鲁雪松, 宋岩, 柳少波, 等. 幔源 CO₂ 释出机理、脱气模式及成藏机制研究进展 [J]. 地学前缘, 2008, 15(6): 293-302 [Lu Xuesong, Song Yan, Liu Shaobo, et al. Progress in the studies of mantle-derived CO₂ degassing mechanism, degassing model and pool-forming mechanism [J]. Earth Science Frontiers, 2008, 15(6): 293-302]
- 27 侯启军, 赵志魁, 王立武, 等. 火山岩气藏: 松辽盆地南部大型火山岩气藏勘探理论与实践 [M]. 北京: 科学出版社, 2009: 269-271 [Hou Qijun, Zhao Zhikui, Wang Liwu, et al. Volcanic Gas Reservoirs Principle & Exploration-Examples from Southern Songliao Basin [M]. Beijing: Science Press, 2009: 269-271]
- 28 高玉巧, 刘立, 曲希玉, 等. 片钠铝石的成因及其对 CO₂ 天然气运聚的指示意义 [J]. 地球科学进展, 2005, 20(10): [Gao Yuqiao, Liu Li, Qu Xiyu, et al. Genesis of dawsonite and its indication significance of CO₂ migration and accumulation [J]. Advances in Earth Science, 2005, 20(10): 293-302]
- 29 高玉巧, 刘立, 杨会东, 等. 松辽盆地孤店二氧化碳气田片钠铝石的特征及成因 [J]. 石油学报, 2007, 28(4): 65-66 [Gao Yuqiao, Liu Li, Yang Huidong, et al. Characteristics and origin of dawsonite in Gudian carbon dioxide gas field of Songliao Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(4): 65-66]
- 30 李福来. 松辽盆地南部长岭凹陷-华字井阶地含片钠铝石砂岩成岩流体演化 [D]. 长春: 吉林大学, 2009 [Li Fulai. The Evolution of Diagenetic Fluid in Dawsonite-bearing Sandstone, Changling Depression-Huazijing Step, Southern Part of Songliao Basin [D]. Changchun: Jilin University, 2009.]
- 31 Mona-Liza C, Peter I. Dawsonite: An inclusion mineral in quartz from the Tin Mountain pegmatite, Black Hills, South Dakota [J]. American Mineralogist, 2003, 88: 1055-1060
- 32 Coveney R M, Kelly W C. Dawsonite as a daughter mineral in hydrothermal fluid inclusions [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1971, 32: 334-342
- 33 Eileen Vard, Anthony E. A fluid inclusion study of vug minerals in dawsonite-altered phonolite sills, Montreal, Quebec: implications for HFSE mobility [J]. Contrib Mineral Petrol, 1993, 113: 410-423
- 34 Charles W, Thomas E. Thermal decomposition of dawsonite [J]. American Mineralogist, 1973, 58: 548-550

Formation Temperature of Dawsonite from Qingshankou Formation in the Honggang Oilfield, Southern Songliao Basin

YU Zhi-chao¹ LIU Li¹ QU Xi-yu¹ YANG Hui-dong² SHAO Ming-li²

(1. College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130026;

2. Exploration and Development Research Institute, PetroChina, Jilin Oilfield Company, Songyuan Jilin 138001)

Abstract This article mainly use the Hong-143 and Hong-146 well that rich in dawsonite-bearing sandstones as reearch objects. According to the analysis of conventional thin sections, alizarin red-staining, SEM, INCA energy spectromete, micro-thermometry, the diagenetic paragenesis succession of dawsonite-bearing sandstones, in particular, the homogenization temperature of fluid inclusion have been studied in detail. The diagenetic paragenesis of the Honggang Oilfield is clay minerals→secondary quartz overgrowths→calcite→dawsonite→ankerite→quartz healing microfracture. On the basis of intensive micro-thermometry, the peak of the homogenization temperature is 110 ~ 120°C in the calcite; while 130 ~ 140°C in the quartz healing microfracture. The formation temperature of dawsonite is between calcite and quartz healing microfracture, which is 120 ~ 130°C. Comparing with research results at home and abroad, the formation temperature of dawsonite that is transformed by magma is relatively low, which is 25 ~ 150°C. The formation temperature of dawsonite that appeared in the inclusion as daughter mineral is relatively high, which is 250 ~ 340°C. The dawsonite in the southern Songliao Basin belong to the first situation, the formation temperature is relatively low, which is 120 ~ 130°C. Scanning electron microscopy and energy spectrum analysis shows that the dawsonite of Hong gang oil filed (The formation of temperature between 120 ~ 130°C) is mainly needle-like, the chemical composition is rich in Si, poor in Na, Al and O; the dawsonite of Wuerxun Depression (The formation of temperature between 78.56 ~ 115.02°C) is mainly columnar pin, chemical composition is rich in Na, Al and O, poor in Si.

Key words Honggang Oilfield; dawsonite; healing microfracture; fluid inclusion; homogenization temperature; formation temperature