

塔里木盆地巴楚隆起岩盐中原生包裹体特征及意义 ——以巴探5井为例

席斌斌^{1,2}, 钱一雄^{1,2}, 施伟军^{1,2}, 蒋宏^{1,2}, 尤东华¹, 王斌¹

(1. 中国石化石油勘探开发研究院无锡石油地质研究所, 江苏 无锡 214151; 2. 中国石化油气成藏重点实验室, 江苏 无锡 214151)

摘要: 塔里木盆地巴楚隆起发育一套中寒武统的膏岩盐层, 是较好的区域性盖层。本文对巴楚隆起中段巴探5井蒸发岩层石盐中的包裹体进行了岩相学、显微测温学、热力学计算等研究。岩相学结果表明虽然经历了多期构造以及深埋作用的影响, 在石盐中仍然发现了代表表生沉积环境的原生包裹体组合。包裹体的均一温度测温结果表明石盐沉积时的古水温约为 29.9℃, 与当时的古气候特征相一致。热力学计算表明, 石盐中包裹体在埋深过程中所表现出的非等容-非等组成体系的热力学特征, 可能是包裹体在后期地质改造过程中得以保存的重要因素之一。

关键词: 石盐; 包裹体; 均一温度; 巴楚隆起

中图分类号: P578.3⁺2

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2015)01-0079-08

The characteristics of primary inclusions in halite in Bachu Uplift of Tarim Basin and their implications for paleo-temperature: A case study of well Bt5

XI Bin-bin^{1,2}, QIAN Yi-xiong^{1,2}, SHI Wei-jun^{1,2}, JIANG Hong^{1,2}, YOU Dong-hua¹ and WANG Bin¹

(1. Wuxi Research Institute of Petroleum Geology, SINOPEC, Wuxi 214151, China; 2. SINOPEC Key Laboratory of Petroleum Accumulation Mechanisms, Wuxi 214151, China)

Abstract: The Middle Cambrian gypsum-salt rocks are widely distributed in the Bachu Uplift of the Tarim Basin. These rocks are good regional cap rocks. Fluid inclusion petrography, microthermometry and thermodynamic calculation were used to study the halite samples from well Bt5. According to the analysis of fluid inclusion petrography, the primary fluid inclusion assemblages were preserved during the alteration of tectonic movement and bury process. An average homogenization temperature of 29.9℃ was yielded, which is consistent with the paleo-temperature of surface water. According to the result of thermodynamic calculation, the increasing rate of internal pressure of the fluid inclusions in halite was low during the bury process and it was probably one of the important factors responsible for fluid inclusion preservation.

Key words: halite; fluid inclusion; homogenization temperature; Bachu Uplift

石盐是重要的蒸发岩矿物之一, 其在结晶过程中捕获的原生包裹体, 保存了沉积时的温度、成分等重要的地质信息, 是研究全球气候变化以及油气盖

层形成条件的重要载体 (Lowenstein *et al.*, 1998; Benison and Goldstein, 1999; 金之钧等, 2010; Meng *et al.*, 2013)。国内外学者对于石盐中包裹体的均一温

收稿日期: 2014-03-24; 修订日期: 2014-12-10

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 973 项目 (2012CB214802); 国家科技重大专项项目 (2011ZX05005-002, 2011ZX05008-003); 中国石油化工股份有限公司科技攻关项目 (P12009)

作者简介: 席斌斌 (1981-), 男, 汉族, 工程师, 江苏无锡人, 从事流体包裹体地质学方面的研究, E-mail: xibb.syky@sinopec.com。

度、离子及同位素组成等方面开展了较多的研究 (Roberts and Spencer, 1995; Lowenstein *et al.*, 1998; Benison and Goldstein, 1999; Khmelevska *et al.*, 2000; Timofeeff *et al.*, 2001; Zimmermann, 2001; Kovalevych *et al.*, 2002; Satterfield *et al.*, 2005; 刘兴起等, 2007; Meng *et al.*, 2011, 2013; 孟凡巍等, 2011; 王春连等, 2013; 张智礼等, 2013), 在恢复表生沉积环境方面取得了显著的成果。但是石盐是一种硬度低、塑性强、水溶性高的包裹体主矿物, 在后期的深埋、构造叠加等地质过程中容易发生破碎、塑性变形、重结晶等次生变化, 进而造成其中的包裹体发生拉伸、泄露甚者破裂再充填等不可逆的变化 (Goldstein and Reynolds, 1994)。另外由于在埋深过程中包裹体的内压增加的速率要远大于地压梯度 (Goldstein and Reynolds, 1994), 因此随着埋深的增加内外压差急剧变大, 当压差累计到一定程度时也容易造成包裹体发生体积增大甚至破裂等不可逆变化。因此在经历了复杂的地质过程之后, 石盐中的原生包裹体会发生怎样的物理化学变化, 是否还能够保存捕获时的地质信息等问题仍有待于进一步研究。基于此, 本文选取塔里木盆地巴楚隆起中段巴探 5 井中寒武统阿瓦塔格组石盐样品中的包裹体进行了详细的岩相学、显微测温学以及热力学计算等研究, 对包裹体在后期埋深过程中所受的影响

进行了探讨。

1 地质背景

巴楚隆起位于塔里木盆地中央隆起带的西段, 西以柯坪-沙井子断裂和柯坪逆冲带为界, 南以色力布亚-海米塔格-玛扎塔格断裂为界与麦盖提斜坡相接, 北以阿恰-吐木休克断裂与阿瓦提坳陷及卡塔克隆起相邻。经历了加里东、海西、印支、燕山、喜马拉雅等多期构造运动 (顾忆等, 2011), 属于早期 (早古生代) 形成晚期 (喜山期) 定型的活动古隆起 (贾承造, 1997; 何登发等, 2006, 2008; 李曰俊等, 2008), 总体来看巴楚隆起在早古生代为一个北东倾斜坡, 至古生代为一个南东倾水下低隆, 中生代为一个南东倾浅凹, 至新生代形成南东倾断隆 (顾忆等, 2011)。

塔里木盆地寒武纪总体为台盆东西分异的古地理格局, 在台地区自下而上超覆沉积了玉尔吐斯组、肖尔布拉克组、吾松格尔组、沙依里克组、阿瓦塔格组、丘里塔格下亚群, 局部隆起区缺失玉尔吐斯组, 以蒸发台地、局限台地相的厚层白云岩为主要特征。中寒武世干旱气候环境下形成了巴楚-英买力大泻湖 (图 1), 沉积了厚层的蒸发岩 (膏岩、盐岩), 与膏盐岩之下的白云岩构成了良好的储盖组合 (郑剑峰等,

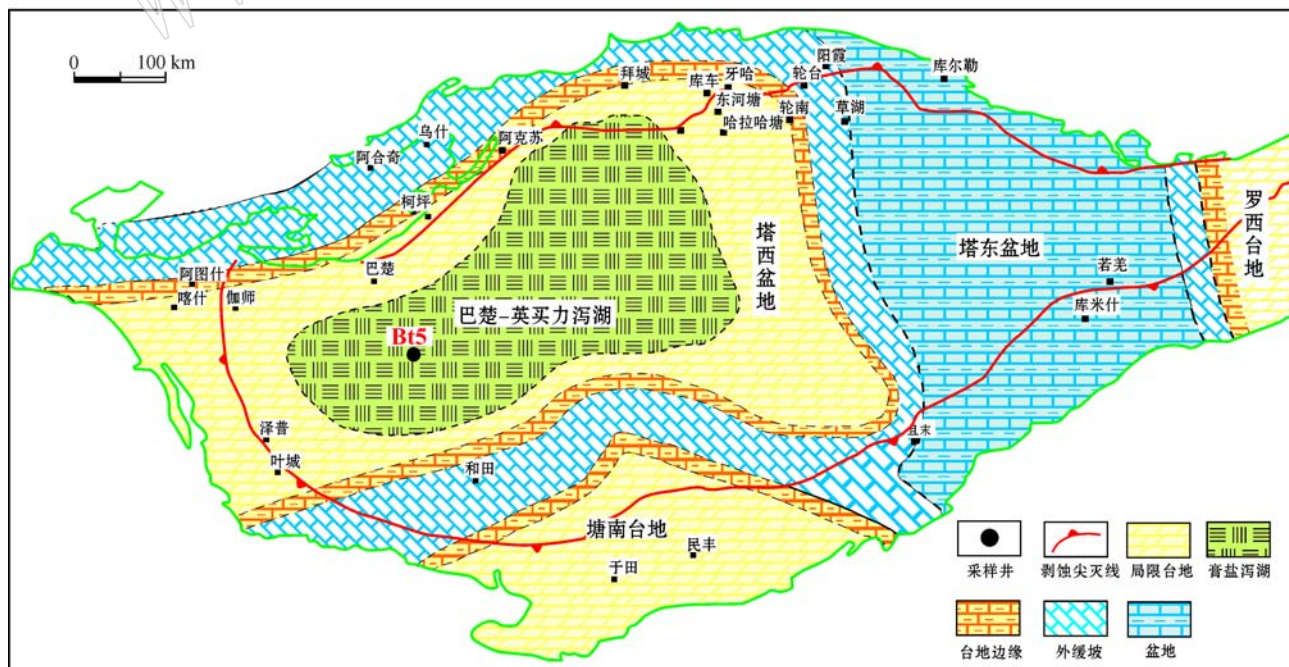


图 1 塔里木盆地中下寒武统膏岩盐分布图 (据郑剑峰等, 2013)

Fig. 1 The distribution of middle Cambrian gypsum-salt rocks in Tarim Basin (modified after Zheng Jianfeng *et al.*, 2013)

2013)。野外露头剖面及钻井资料揭示膏盐岩段具有较大的厚度变化范围(143~587 m),其中位于巴楚隆起海米东构造的巴探5井揭示的膏盐岩段达340 m。该膏盐层自形成以后受区域构造运动的影响,发生了较强烈的破碎、塑性变形以及重结晶等次生变化。本次研究的石盐样品取自巴探5井寒武统阿瓦塔格组,取样深度为5 297.1 m,现今古地温高达120℃。

2 实验仪器与方法

本次研究实验分析在中国石化油气成藏重点实验室进行,所涉及的实验内容包括样品的制备、镜下观察、显微测温等方面。

2.1 样品的挑选与制片

由于空气中的水蒸汽会腐蚀石盐样品,因此样品需要在干燥密封环境下进行保存。本次研究采用使用硅胶作为干燥剂的玻璃干燥器对样品进行保存。

由于岩盐遇水溶解,因此不能采用常规的岩石制片方法进行制片。国际上对于石盐的制片方法主要有两种(Benison and Goldstein, 1999):第1种利用刀片沿石盐解理将晶体切成小片,直接进行观察和测温;第2种与普通包裹体制片类似,对样品进行切片、磨片以及抛光等操作,只不过在制片过程中不使用水而使用不溶解NaCl的液体进行冷却降温及冲洗。由于本次研究的样品所受后期地质改造程度较高,埋深较深,石盐经历了比较强烈的压实、塑性流变等后期的改造,对石盐原始的晶型造成了较大的改造和破坏,在手标本上难以找到合适的解理面,因此本次研究主要参考第2种方法进行制片,具体的步骤为:①将样品从玻璃干燥器中迅速取出,利用研钵轻轻地将样品敲成碎块,从中选取表面相对平整、新鲜、尺寸合适的样品。②利用502胶将样品一面沾在载玻片上,然后迅速放入玻璃干燥器中,静置24 h至胶水固结。③逐次利用600、1 200、2 000目的砂纸对样品进行手工打磨,然后利用抛光粉在抛光布上对样品表面进行手工抛光,在整个打磨及抛光过程中利用煤油进行冷却以及清洗,打磨或抛光要控制力度,以免使样品受力破碎。④用丙酮对样品进行清洗,除去样品表面的煤油,然后将样品在丙酮中浸泡24 h,将样品从载玻片上移除下来。⑤重复步骤②~③,对样品另一面进行打磨及抛光,直至

样品厚度达到0.05~0.2 mm厚为止,然后重复步骤④。⑥将制备好的样品迅速放入到玻璃干燥器中保存,供后续实验分析使用。

2.2 样品的镜下观察

本次研究所使用的显微镜为Imager A2m型偏光显微镜(德国蔡司公司,放大倍数50~500倍)以及M165C型立体显微镜(德国徕卡公司,放大倍数7.3~120倍)。对于制片前的块状样品使用立体显微镜进行观察及拍照。对于制片后的样品,先在样品表面涂抹一层煤油,以改进镜下观察效果(Goldstein and Reynolds, 1994)并防止样品被空气中的水蒸汽腐蚀,然后采用立体显微镜或偏光显微镜由低倍到高倍的观察顺序,对石盐的结构形态,包裹体的分布特征等进行详细的观察拍照,并对欲进行后续分析的包裹体所在区域进行标记及编号,最后小心地将样品按编号分割成若干小片,以备后续分析使用。

2.3 包裹体的显微测温

本次显微测温使用由MDS600型冷热台(英国Linkam公司, -190~+600℃)与Axioskop40型显微镜(德国蔡司公司,放大倍数50~500倍)组成的显微观察测温系统。在进行测温前利用美国FLUID公司的纯水合成包裹体对冷热台进行校验,校验后仪器的误差为 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 。

由于石盐中的包裹体形成于表生低温(一般 $< 50^\circ\text{C}$)环境,包裹体在室温下多以纯液相的形式存在,无法直接进行测温。为了使包裹体能够形成气液两相,同时又不对包裹体造成变形及破坏,本次研究采用低温冷冻技术(Roberts and Spencer, 1995; Benison and Goldstein, 1999),即将样品放入冰箱冷冻室(约为 -15°C)中保存21天,使纯液相包裹体中的液体体积收缩形成气液两相。由于 -15°C 的温度不能使包裹体中的液体凝结成固体,因而不会改变包裹体的大小和体积,进而不会造成包裹体均一温度的改变(Benison and Goldstein, 1999; 孟凡巍等, 2011)。样品取出后迅速放入到已经预先降温到 -15°C 的冷热台中。由图2可知,部分纯液相包裹体变成了气液两相,并且包裹体的形态在放入冰箱前后基本保持一致。

测温采用分段加热的方法进行,先以 $5^\circ\text{C}/\text{min}$ 的速率升温到 0°C ,然后以 $1^\circ\text{C}/\text{min}$ 的速率升温到 15°C ,再以 $0.5^\circ\text{C}/\text{min}$ 的速率进行升温,当接近包裹体的均一温度时,每升高 0.3°C 便保持2~3 min,

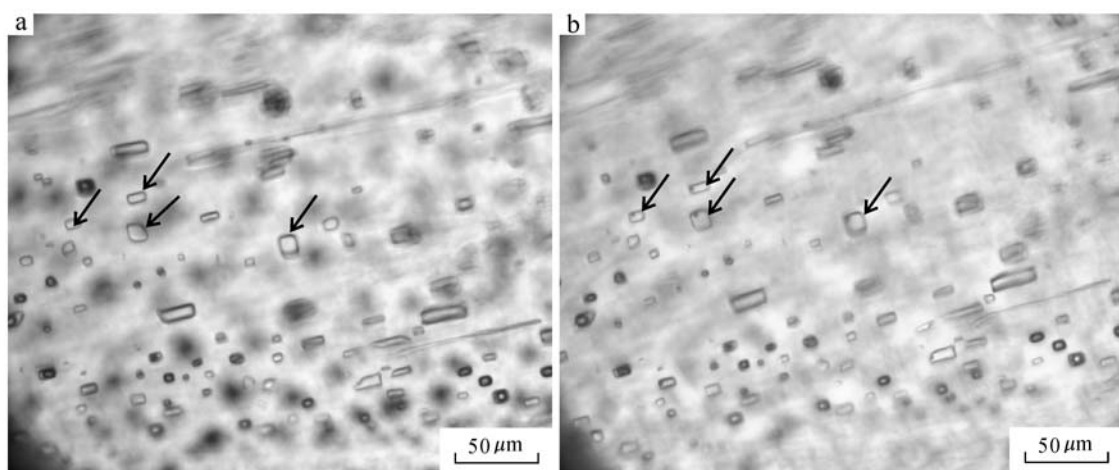


图2 放入冰箱前(a)后(b)包裹体样品对比图

Fig. 2 Fluid inclusions before (a) and after (b) cooling by the “cooling nucleation” method

以保证包裹体中达到气液平衡,待镜下观测到包裹体达到气液均一时,再将温度降低 $3\sim 5^{\circ}\text{C}$,若气泡不再出现,则所测定的温度即为均一温度,反之则需要在上次观测到的气液均一温度的基础上继续升高 0.3°C ,然后再降温观察气泡是否再现,重复上述步骤直至气泡不再出现为止。采用上述测温程序,所测定的均一温度误差不超过 0.3°C ,能够满足研究的需要。

3 实验结果与讨论

3.1 包裹体的岩相学特征及意义

磨片前的样品呈现致密块状的形态,颗粒边界模糊,晶面及晶型难以识别(图3a);磨片后镜下观察发现石盐颗粒以他形为主,并呈现出定向排列趋势,局部区域的石盐颗粒发生了破碎(图3b)。样品中找不到在地表条件下所形成的典型的“人字形”与“漏斗形”晶体(Benison and Goldstein, 1999; 孟凡巍等, 2011)。

与典型的“人字形”与“漏斗形”晶体中包裹体发育情况相比,巴探5井样品中包裹体的丰度要明显偏低,包裹体仅在少数晶体的局部部位发育,包裹体富集的部位与不发育的部位存在明显的界限(图3c)。包裹体的产状大致有两种:一种沿裂隙分布,呈现出次生包裹体的特征;一种成群分布,呈现出原生包裹体的特征(图3d)。由于次生包裹体代表成岩后的流体活动,不能反映石盐沉积时的流体环境,因此本文仅针对原生包裹体进行研究。由图3e、3f可

知,原生包裹体呈现出近似平行的条带状分布,包裹体的尺寸变化较大,形状较规则以正方形、长方形、六边形为主,可见少量包裹体呈不规则状;包裹体的气液比变化较大,在同一视域中,从纯液相包裹体到纯气相包裹体均有发育。上述包裹体的产状特征与“人字形”与“漏斗形”晶体中包裹体产状特征基本一致,只是包裹体的形态规则程度相对差一些。

上述镜下特征表明,石盐样品在表生环境沉积后经历了比较强烈的埋深压实、塑性流变、重结晶等后期地质作用的改造,晶体的晶型、岩石结构等遭受了较大的破坏,上述过程可能对原生包裹体造成了较大的破坏作用,造成包裹体的丰度相对较低。尽管如此,少数晶体的原生包裹体产状仍然呈现出与表生环境形成的“人字形”与“漏斗形”晶体一致的特征,说明仍然有少数原生包裹体得以保存至今。

3.2 包裹体的均一温度特征及意义

由于气液两相包裹体可能为古大气-水界面流体不混溶捕获的产物,亦可能为纯液相包裹体拉伸变形的结果(Roberts and Spencer, 1995; Benison and Goldstein, 1999),其均一温度要高于捕获时的温度,不具有代表性,因此本次研究仅选择纯液相包裹体进行测温。对样品中的35个纯液相包裹体进行了测温,结果(表1)表明包裹体的均一温度范围为 $25.7\sim 38.5^{\circ}\text{C}$,平均温度为 29.9°C ,约有80%的包裹体的均一温度集中在 $26\sim 32^{\circ}\text{C}$ 范围之内(图4),并且不同尺寸、形状的包裹体的均一温度差别不大。上述特征表明所测温的纯液相包裹体捕获的应为同一期流体。

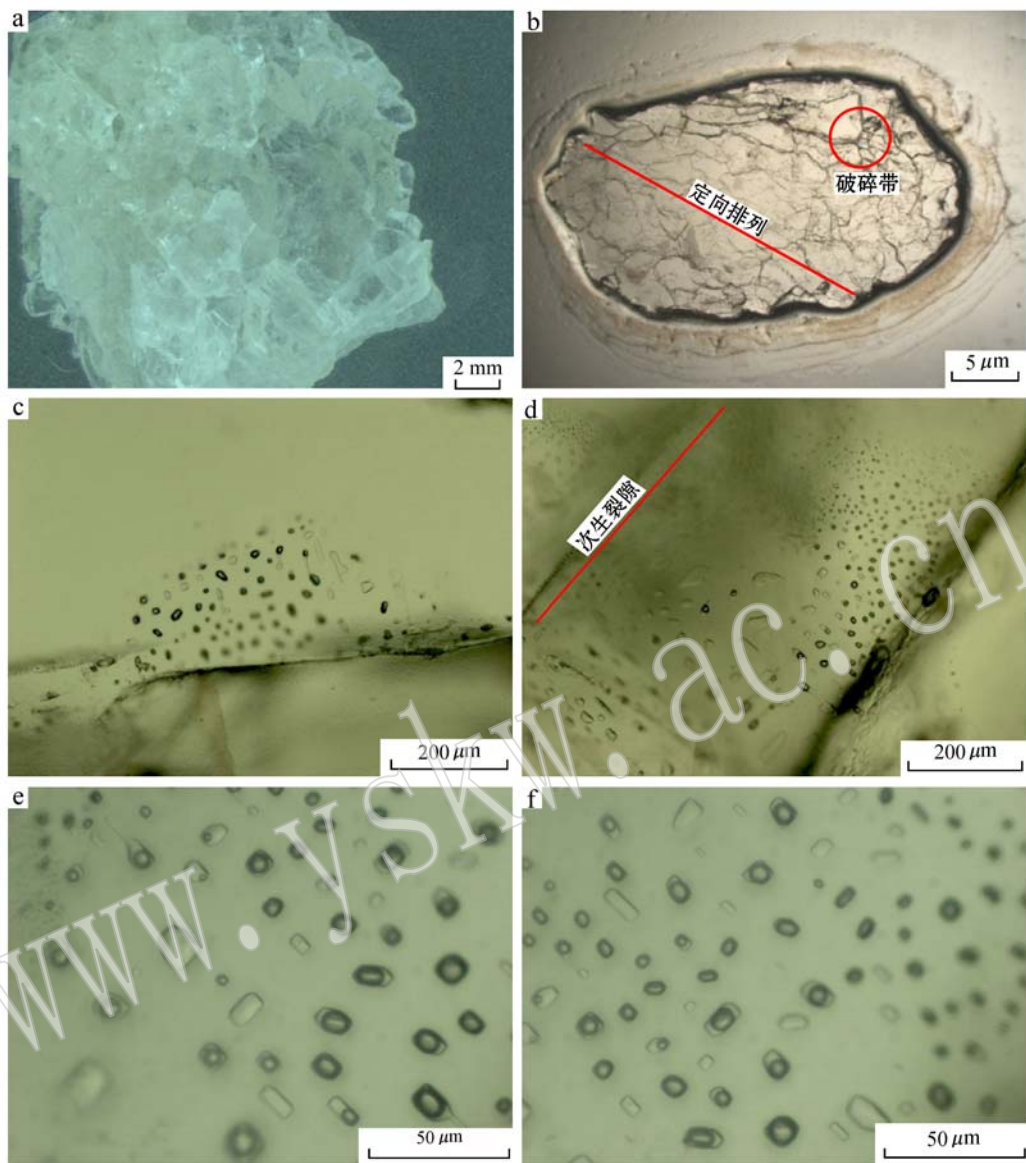


图 3 Bt5 井石盐样品显微照片

Fig. 3 Photomicrograph of halite and fluid inclusions in halite from well Bt5

Roberts 等(1995)研究认为气温要低于水温 5℃,巴探 5 井石盐包裹体的均一温度平均值为 29.9℃,据此可以推算当时的古气温在 24.9℃左右。根据全球统一的沉积水界面温度-时间模板(SWIT)(Wygrala, 1989),结合巴探 5 井的地理位置,推测当时的古气温约为 22.5℃,与本次研究结果基本一致。

3.3 后期埋深对石盐中原生包裹体影响的探讨

Goldstein 等(1994)研究认为,石英、方解石等主矿物中的盐水包裹体在埋深过程中,包裹体内压增加的速率要大于地层压力的增压速率,当埋深达到一定深度时包裹体内外压差将超过主矿物的承受能

力而导致包裹体的拉伸变形甚至爆裂。上述包裹体内压是在等容-等组成体系的前提下进行计算的,即认为在整个埋深过程中,包裹体的体积与组成将保持恒定。但是由于 NaCl 易溶于水且其溶解度随着温度增加而增大,因此在埋深过程中,石盐中包裹体壁上的 NaCl 将会溶解于包裹体中,造成包裹体的体积与 NaCl 浓度均增加,不符合等容-等组成体系的计算前提。基于此,本次研究利用 Lecumberri-Sanchez 等(2012)的方程外推到 30℃ 的条件下对包裹体内压进行近似计算。计算结果表明(图 5 中曲线 a),一个形成于地表温度为 30℃ 条件下的石盐中

表 1 BT5 井包裹体显微测温数据
Table 1 Homogenization temperature of fluid inclusions
in well BT5

编号	形状	大小/ μm	均一温度/ $^{\circ}\text{C}$
1	六边形	12.3	35.2
2	正方形	9.4	28.7
3	正方形	7.6	26.7
4	长方形	15.2	30.4
5	六边形	16.1	30.6
6	六边形	10.6	27.7
7	正方形	13.7	30.9
8	正方形	10.2	28
9	长方形	11.6	26.6
10	正方形	18.2	31.2
11	正方形	16.2	25.7
12	长方形	10.9	26.9
13	长方形	32.6	27
14	六边形	12.3	30.4
15	长方形	11.8	31.4
16	长方形	14.2	35.7
17	不规则	17.7	28.3
18	正方形	11.9	28.8
19	不规则	22.4	31
20	椭圆形	39.5	30
21	不规则	44.6	36.8
22	长方形	42.3	28.6
23	六边形	30	28.2
24	长方形	19.3	28.6
25	不规则	30.4	28.6
26	六边形	56.5	38.5
27	不规则	50.2	29.4
28	正方形	15	28.5
29	六边形	34.5	28.3
30	正方形	8.5	28.5
31	六边形	18	28.4
32	长方形	14	32.4
33	长方形	18.1	31
34	六边形	21.2	32.3
35	正方形	21.3	28.7

的包裹体,当被埋深到5 000 m,地温达到 120℃ 时,计算得到包裹体的内压为 109.4 MPa,仅为按照等容-等组成体系的计算结果(图 5 中曲线 b, 223.3 MPa)的一半(Bodnar and Viesyk, 1994)。若按照静水压力梯度为 10 MPa/km 计算(图 5 中曲线 c),此时地层压力为 50 MPa,包裹体的内外压差为 59.4 MPa;若按照静岩压力为 22.6 MPa/km 计算(图 5 中曲线 d),此时地层压力为 113 MPa,包裹体的内外压差仅为 - 3.6 MPa,远低于按照等容-等组成体系计算的包裹体内外压差值。

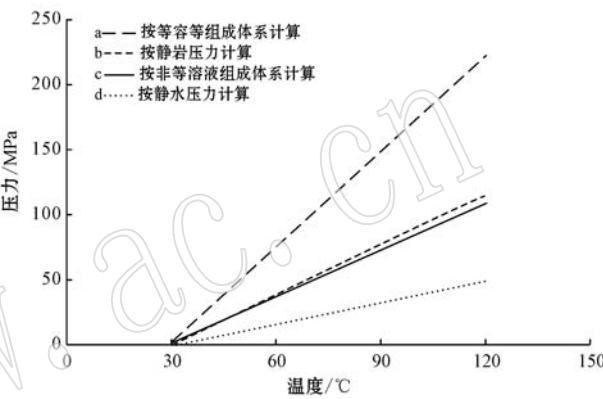


图 5 包裹体内压与地层压力随埋深变化曲线
Fig. 5 Sketch diagram showing the change of initial pressure of fluid inclusion, hydrostatic pressure and hydrostatic pressure during bury

计算结果表明,与石英方解石等主矿物相比石盐中的包裹体在埋深过程中所表现出的非等容-非等组成体系的特征会显著地降低包裹体的内外压差,更有利于包裹体在埋深过程中的保存。但是由于缺少精确的热力学方程,本次研究对 Lecumberri-Sanchez 等(2012)的方程进行了外推,因而计算结果可能存在不确定性,有待于进一步的验证。

4 结论

巴探 5 井石盐经历了比较强烈的后期改造,发生了破碎、塑性变形等后期变化,对其中的包裹体产生了一定的破坏作用,造成了原生包裹体的丰度要明显低于典型的“人字形”与“漏斗形”晶体中的包裹体丰度。但是部分晶体中依然保存了原生包裹体组合,其产状、均一温度特征等与表生沉积环境特征相一致。石盐中的包裹体在埋藏过程中,所表现出的非等组成-非等容体系的热力学相行为,可能是包裹体在后期改造过程中得以保存的重要原因之一。本

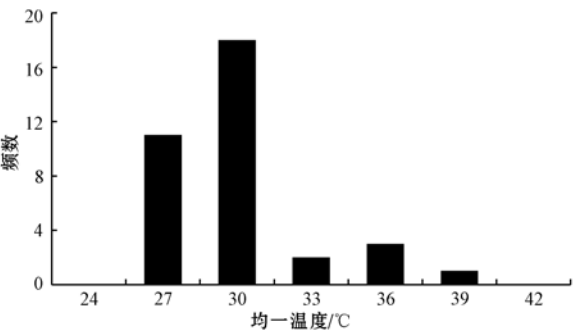


图 4 包裹体均一温度-频数分布直方图
Fig. 4 Histogram of homogenization temperature plotted against number of fluid inclusions

次塔里盆地巴楚隆起石盐包裹体研究填补了国内在中寒武世岩盐中包裹体研究的空白, 为了解塔里木盆地古气候变化以及探讨石盐中包裹体捕获后的热力学相行为提供了重要参考。

References

- Benison K C and Goldstein R H. 1999. Permian paleoclimate data from fluid inclusions in halite[J]. *Chemical Geology*, 154: 113~132.
- Bodnar R J and Vityk M O. 1994. Interpretation of microthermometric data for H₂O-NaCl fluid inclusions[A]. de Vivo B and Frezzotti M L. *Fluid inclusion in Minerals: Methods and Applications*[C]. Blacksberg: Verginia Tech, 117~130.
- Goldstein R H and Reynolds T J. 1994. *Systematics of Fluid Inclusions in Diagenetic Minerals*[M]. Tulsa Oklahoma: SEPM short course. 31. Society for Sedimentary Geology, 1~199.
- Gu Yi, Shao Zhibing, Zhao Ming, *et al.* 2011. Hydrocarbon preservation and exploration in Bachu Uplift of Tarim Basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 33(1): 50~55(in Chinese with English abstract).
- He Dengfa, Li Desheng, Tong Xiaoguang, *et al.* 2008. Accumulation and distribution of oil and gas controlled by paleo-uplift in poly-history superimposed basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 29(4): 475~488 (in Chinese with English abstract).
- He Dengfa, Zhou Xinyuan, Zhang Chaojun, *et al.* 2006. Characteristics of Geologic Framework of Multicycle Superimposed Basin in Tarim Basin[J]. *China Petroleum Exploration*, (01): 31~41 (in Chinese with English abstract).
- Jia Chengzao. 1997. *Tectonic Characteristic and Petroleum, Tarim Basin, China*[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1~438(in Chinese with English abstract).
- Jin Zhijun, Zhou Yan, Yun Jinbiao, *et al.* 2010. Distribution of gypsum-salt cap rocks and near-term hydrocarbon exploration targets in the marine sequences of China[J]. *Oil & Gas Geology*, 31(6): 715~724(in Chinese with English abstract).
- Khmelevska O, Kovalevych V and Peryt T M. 2000. Changes of seawater composition in the Triassic-Jurassic time as recorded by fluid inclusions in halite[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 69~70: 83~86.
- Kovalevych V, Peryt T M, Beer W, *et al.* 2002. Geochemistry of Early Triassic seawater as indicated by study of the Röt halite in the Netherlands, Germany, and Poland[J]. *Chemical Geology*, 182: 549~563.
- Lecumberri-Sanchez P, Steele-MacInnis M and Bodnar R J. 2012. A numerical model to estimate trapping conditions of fluid inclusions that homogenize by halite disappearance[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 92(0): 14~22.
- Li Yuejun, Wu Genyao, Meng Qinglong, *et al.* 2008. Fault systems in central area of the Tarim Basin: geometry, kinematics and dynamic settings[J]. *Chinese Journal of Geology*, 29(1): 82~118(in Chinese with English abstract).
- Liu Xngqi, Ni Pei, Dong Hailiang, *et al.* 2007. Homogenization temperature and its significance for Primary fluid inclusion in halite formed in Chaka salt lake, Qardam basin[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(1): 113~116(in Chinese with English abstract).
- Lowenstein T K, Li J and Brown C B. 1998. Paleotemperatures from fluid inclusions in halite: method verification and a 100 000 year paleotemperature record, Death Valley, CA[J]. *Chemical Geology*, 150: 223~245.
- Meng F, Ni P, Schiffbauer J D, *et al.* 2011. Ediacaran seawater temperature: Evidence from inclusions of Sinian halite[J]. *Precambrian Research*, 184: 63~69.
- Meng F W, Ni P, Yuan X L, *et al.* 2013. Choosing the best ancient analogue for projected future temperatures: A case using data from fluid inclusions of middle-late Eocene halites[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 67~68: 46~50.
- Meng Fanwei, Ni Pei, Ge Chendong, *et al.* 2011. Homogenization temperature of fluid inclusions in laboratory grown halite and its implication for paleotemperature reconstruction[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 27(5): 1 543~1 547(in Chinese with English abstract).
- Roberts S M and Spencer R J. 1995. Paleotemperatures preserved in fluid inclusions in halite[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59: 3 929~3 942.
- Satterfield C L, Lowenstein T K, Vreeland R H, *et al.* 2005. Paleobrine Temperatures, Chemistries, and Paleoenvironments of Silurian Salina Formation F-1 Salt, Michigan Basin, U S A, from Petrography and Fluid Inclusions in Halite: Erratum[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 75: 964~965.
- Timofeeff M N, Lowenstein T K, Brennan S T, *et al.* 2001. Evaluating seawater chemistry from fluid inclusions in halite: examples from modern marine and nonmarine environments[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 65: 2 293~2 300.
- Wang Chunlian, Liu Chenglin, Xu Haiming, *et al.* 2013. Homogenization temperature study of salt inclusions from the upper section of

- Shashi Formation in Jiangling depression[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 32(3): 383~392(in Chinese with English abstract).
- Wygrala B P. 1989. Integrated study of an oil field in the southern Po basin, Northern Italy[D]. University of Köln.
- Zhang Zhli, Meng Fanwei, Cai Xiyao, *et al.* 2013. Middle Cambrian halite chlorine isotope in the Bachu Uplift of Tarim Block, Xinjiang, Northwestern China[J]. *Acta Micropalaeontologica Sinica*, 30(3): 239~243(in Chinese with English abstract).
- Zheng Jianfeng, Shen Anjiang, Liu Yongfu, *et al.* 2013. Main controlling factors and characteristics of Cambrian dolomite reservoirs related to evaporite in Tarim Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 31(1): 89~98.
- Zimmermann H. 2001. On the origin of fluids included in Phanerozoic marine halite-basic interpretation strategies[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 65: 35~45.
- 何登发, 周新源, 张朝军, 等. 2006. 塔里木多旋回叠合盆地地质结构特征[J]. *中国石油勘探*, (01): 31~41.
- 贾承造. 1997. 中国塔里木盆地构造特征与油气[M]. 北京: 石油工业出版社, 1~438.
- 金之钧, 周 雁, 云金表, 等. 2010. 我国海相地层膏盐岩盖层分布与近期油气勘探方向[J]. *石油与天然气地质*, 31(6): 715~724.
- 李曰俊, 吴根耀, 孟庆龙, 等. 2008. 塔里木盆地中央地区的断裂系统: 几何学、运动学和动力学背景[J]. *地质科学*, 29(1): 82~118.
- 刘兴起, 倪 培, 董海良, 等. 2007. 内陆盐湖石盐流体包裹体均一温度指示意义的现代过程研究[J]. *岩石学报*, 23(1): 113~116.
- 孟凡巍, 倪 培, 葛晨东, 等. 2011. 实验室合成石盐包裹体的均一温度以及古气候意义[J]. *岩石学报*, 27(5): 1 543~1 547.
- 王春连, 刘成林, 徐海明, 等. 2013. 江陵凹陷沙市组上段石盐包裹体测温学研究[J]. *岩石矿物学杂志*, 32(3): 383~392.
- 张智礼, 孟凡巍, 蔡习尧, 等. 2013. 新疆塔里木板块巴楚隆起区寒武系石盐氯同位素研究[J]. *微体古生物学报*, 30(3): 239~243.
- 郑剑锋, 沈安江, 刘永福, 等. 2013. 塔里木盆地寒武系与蒸发岩相关的白云岩储层特征及主控因素[J]. *沉积学报*, 31(1): 89~98.
- 顾 忆, 邵志兵, 赵 明, 等. 2011. 塔里木盆地巴楚隆起油气保存条件与勘探方向[J]. *石油实验地质*, 33(1): 50~55.
- 何登发, 李德生, 童晓光, 等. 2008. 多期叠加盆地古隆起控油规律[J]. *石油学报*, 29(04): 475~488.

附中文参考文献