

# 热液金刚石压腔外压对包裹体均一温度的影响

于胜波<sup>1,2</sup>, 尚林波<sup>1\*</sup>, 王水龙<sup>1,2</sup>, 樊文苓<sup>1</sup>

1. 中国科学院 地球化学研究所 矿床地球化学国家重点实验室 贵阳 550002  
2. 中国科学院大学 北京 100049

**摘要:** 常压下通常用冷热台测定流体包裹体均一温度,然而因内压的存在使得包裹体在加热的过程中为非等容变化,较大的内压甚至可以使流体包裹体在测温过程中发生爆裂。本文利用热液金刚石压腔(HDAC),以水作为传压介质,通过施加一定的外压对利用高压釜合成的不同体系的合成流体包裹体样品和来自玉龙铜矿的H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub>体系的天然流体包裹体样品进行测温实验,来研究不同外压下的均一温度变化,结果显示随着外压的增大,包裹体均一温度降低,包裹体发生形变,体积变小。

**关键词:** 热液金刚石压腔; 外压; 流体包裹体; 均一温度

中图分类号: P599 文章编号: 1007-2802(2016)01-0178-05 doi: 10.3969/j.issn.1007-2802.2016.01.021

## Effects of External Pressures on Homogenization Temperatures of Fluid Inclusions by Using Hydrothermal Diamond Anvil Cell

YU Sheng-bo<sup>1,2</sup>, SHANG Lin-bo<sup>1\*</sup>, WANG Shui-long<sup>1,2</sup>, FAN Wen-ling<sup>1</sup>

1. State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China;  
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract:** The homogenization temperatures of fluid inclusions are usually measured in a heating-freezing stage at 1 atm pressure, however the inclusions are not isovolumic in the heating process due to the increase of internal pressure which could result in the decrepitation of some inclusions. In our study, experiments regarding effects on homogenization temperatures of fluid inclusions by various external pressures are conducted by using hydrothermal diamond anvil cell (HDAC) with water as the pressure transmitting medium. Results show that homogenization temperatures and volumes of natural H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub> fluid inclusions from Yulong copper deposit and those of various synthetic fluid inclusions, which were synthesized with a certain external pressure, are decreased with the increasing of the external pressure.

**Key words:** hydrothermal diamond anvil cell; external pressure; fluid inclusion; homogenization temperature

流体包裹体是研究存在于矿物和岩石包裹体中的古流体,对包裹体均一温度的测定可以获得流体被捕获时的温度下限。在测量均一温度的过程中,升温使得流体包裹体内压增大,特别是富气相和高盐度的流体包裹体在加热到均一的过程中会产生很高的内压,从而导致包裹体发生拉伸变形或爆破而使得测定的包裹体均一温度产生误差或由于爆裂而无法获得均一温度数据,阻碍了对热液、火成、中高级变质环境中包裹体的研究。热液金刚石压腔(HDAC)可以在加热包裹体的同时通过水等

介质对包裹体施加外压,从而减弱包裹体的拉伸变形或爆裂(Schmidt *et al.*, 1998),以获得较为准确的均一温度。

热液金刚石压腔(HDAC)可承受1000℃、10 GPa(Bassett, 2003; 周义明, 2003)。金刚石压腔在加热时可对置于其中的流体包裹体施加特定的外压,因此可以利用热液金刚石压腔研究外压对包裹体均一温度的影响机制,如果施加的外压与包裹体达到均一温度时的内压一致,即弹性应力对 $t_h$ (L-V)的作用接近于零(Schmidt *et al.*, 1998),不但可以

收稿日期: 2015-01-19 收到, 2015-04-07 改回

基金项目: 国家自然科学基金项目(40873051); 矿床地球化学国家重点实验室开放项目(SKLODG-ZY125-09)

第一作者简介: 于胜波(1988-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 实验地球化学. E-mail: yushengbo1998@126.com.

\* 通讯作者简介: 尚林波(1976-), 女, 研究员, 研究方向: 实验地球化学和成矿作用地球化学. E-mail: shanglinbo@vip.gyig.ac.cn.

防止包裹体爆破,而且可以准确的获得流体包裹体的均一温度。目前利用金刚石压腔研究外压对包裹体均一温度影响程度的主要研究工作有以下进展:合成条件为 500℃,400 MPa 的包裹体,均一温度的理论值应该为 227.6℃,然而不同外压和常压下的均一温度数据相差约 15℃;对于组分为  $H_2O + 40\% NaCl_{(wt)}$ ,  $H_2O + 40\% NaCl_{(wt)} + 10\% CO_{2(mol)}$ ,  $H_2O + 20\% NaCl_{(wt)} + 20\% CO_{2(mol)}$  体系的包裹体,常压下测定的均一温度和在金刚石压腔中测定的均一温度相差几十度 (Schmidt *et al.*, 1998);对于天然的  $H_2O + NaCl + CO_2$  包裹体,当外压从 242.4 MPa 变化到 114 MPa 时,均一温度对应的从 214.8℃ 升高到 216.4℃ (Darling and Bassett, 2002);利用金刚石压腔还测得了 Adirondack 山的有很高内压的富水富气相包裹体的均一温度 (Bassett, 2003);李盛虎博士利用热液金刚石压腔测定川西甲基卡矿床中的不同外压下天然包裹体均一温度,对于  $H_2O + NaCl$  和  $H_2O + NaCl + CO_2$  体系包裹体测得  $dt/dp$  (°C/10<sup>8</sup>Pa) 分别为 5.6、1.5 (数据暂未发表)。

合成流体包裹体以 Roedder (1985) 的研究作为理论依据,沿用 Sterner 和 Bodnar 等人合成流体包裹体的方法,相继又有一些人做了一些不同体系和不同浓度的合成包裹体。合成流体包裹体的合成类型主要包括以下:不同密度的纯水、低盐度的  $H_2O - NaCl$ 、 $H_2O - CaCl_2$ 、 $H_2O - KCl$ 、 $H_2O - CO_2$  (Sterner 和 Bodnar, 1984; Bodnar *et al.*, 1985; Knight and Bodnar, 1989);  $H_2O - NaCl$  (Bodnar *et al.*, 1985);  $H_2O - NaCl - KCl$  (Sterner *et al.*, 1988);  $H_2O - NaCl - CaCl_2$  (Vanko *et al.*, 1988); 临界  $H_2O - NaCl$  (Becker *et al.*, 2008);  $H_2O - NaCl - CO_2$  (Schmidt and Bodnar, 2000);  $H_2O - CH_4$  (Lin and Bodnar, 2010);  $H_2O - NaCl - FeCl_2$  (Lecumberri *et al.*, 2015);同时对合成流体包裹体的  $p-V-t-X$  和相平衡做了相应的研究。合成包裹体实验说明包裹体圈闭的流体与呈现在包裹体形成时的均一流体相一致 (Shelton and Orville, 1980),因此可以用合成流体包裹体作为研究天然流体包裹体的样本。

由于传统的方法是在常压下测定包裹体的均一温度,急需研究包裹体外压条件下均一温度与常压下的均一温度的不同,本研究在前人已有工作的基础上,结合高压釜、热液金刚石压腔、冷热台等实验仪器,开展对比外压对合成和天然流体包裹体均一温度影响的实验工作,探讨外压对流体包裹体均一温度的影响机理,获得更准确的包裹体的均一温度数据。

## 1 实验方法

本实验研究分为 2 个主要部分:流体包裹体的合成和热液金刚石压腔 (HDAC) 中流体包裹体不同外压下均一温度的测定。

### 1.1 包裹体合成

合成流体包裹体以 Roedder (1985) 的理论作为依据,沿用 Sterner 和 Bodnar (1984) 的方法,即将不含包裹体的天然石英柱通过加热并快速淬火来产生微裂隙,然后再在一定的温度和压力条件下捕获特定组分的流体并愈合,从而产生含有特定流体组分的合成包裹体。实验中的石英柱取自于天然的不含包裹体的石英,尺寸为长约 1 cm、宽约 3 mm 的四方石英柱。石英柱通过热冲击产生微裂隙,即将石英柱放在 350℃ 马弗炉里恒温 3 h,然后迅速将石英柱放入到过冷的去离子水中使其产生裂隙。实验证明,350℃ 可以使石英柱产生较多的裂隙且石英柱不至于裂解,带裂隙的石英柱需要在 150℃ 的真空烘箱中恒温 24 h 使其烘干。

取长度约 6.5 cm 内径 4.5 mm 的圆柱形金管并将一端焊封,然后将烘干的石英柱、特定体系的流体组分、过量的石英粉按照装样顺序装入金管中,然后将另一端焊封。将焊封好的金管放在干燥箱中 24 h,温度为 110℃ 进行查漏,确定没有泄露 (两次称量相差小于 1 mg) 后,将两头都焊封好的金管放入 RQV-内冷淬火高压釜中,设定合适的温度、压力,在高压釜中恒温十天使带裂隙的石英柱捕获预定的流体组分,然后淬火并取出石英柱,将石英柱磨成厚度小于 250 μm 的包裹体薄片。

### 1.2 热液金刚石压腔 (HDAC) 中包裹体测温

HDAC 是 Bassett 在 1993 年为模拟地壳温压条件下的地质作用而设计的 (Bassett *et al.*, 1993),尤其适用于观测水或其他流体与地质样品之间的相互作用,HDAC 可对 -190 ~ 1200℃, 0 ~ 10 GPa 的热液体系进行实验,并可在实验温压条件下,用各种先进的光学方法 (拉曼、同步辐射等) 原位分析样品,更可以把实验的全程录像存档 (周义明, 2003)。HDAC 的腔体是由上下金刚石顶砧和垫片构成的,垫片的材质通常为铼或者不锈钢,为防止金刚石被氧化,在加热到较高温 (>200℃) 时通常需要开保护气 (Ar 2% ~ 4%)。在使用之前需要对 HDAC 的热电偶进行温度校正,利用 NaCl、NaNO<sub>3</sub> 的熔点校正热电偶,显示温度与实际温度相差小于 1%,能满足实验要求;同时此次实验中包裹体的盐度是利用型号为 Linkam CAP500 的冷热台来测定的,测定盐

度前对冷热台进行温度校正,校正采用人工合成的 $H_2O-CO_2$ 和临界密度的纯水包裹体来校正,校正结果显示,理论与实际的温度相差在1%以内,可以满足实验的要求。

本实验 HDAC 的型号为 Type V, 垫片的材质为铍, 铍片孔的厚度和直径分别为:  $250\ \mu m$ 、 $800\ \mu m$ , 通过计算得出未加压时铍片孔与金刚石压砧之间的体积为  $0.1256\ mL$ , 腔体内压力可以通过水的状态方程来计算 (Haar *et al.*, 1984)。实验前, 对于合成包裹体应首选生长包裹体较多的裂隙, 然后选择包裹体的生长方向与包裹体薄片平行的包裹体并且尺寸较大的, 然后在双目镜下用小刀将包裹体切下; 对于天然的样品, 可以直接用钢针将含有较多包裹体的小区域取下, 然后再用小刀切割到可以放入金刚石压腔中的尺寸; 样品准备完毕后, 将样品和超纯水放入金刚石压腔中, 然后密封加压。

在加热实验时, 首先应该记录金刚石压腔中气泡和水的大概比例, 从而可以确定压腔中的水均一时的相态, 然后再对金刚石压腔进行加热, 加热过程中记录压腔中水的均一温度和包裹体中流体的均一温度; 实验结束后, 通过调整上盖的螺丝可以调整金刚石压腔中的气泡和水的比例, 再次密封重复上述过程, 记录在不同的外压下包裹体的均一温度变化情况。实验结束后, 统计不同外压下包裹体的均一温度的变化情况。

## 2 实验结果及讨论

### 2.1 临界密度的纯水包裹体

临界密度的纯水包裹体是在温度、压力分别为  $650^\circ C$ 、 $100\ MPa$  时间为 7 天的条件下合成的。包裹体取出后在常压下测得包裹体的均一温度为  $373.5^\circ C$  均一到液相, 理论值为  $374.15^\circ C$ , 实测值与理论值相差  $0.65^\circ C$ , 包裹体的均一压力约为  $22\ MPa$ 。同时, 在 HDAC 中  $70\ MPa$  和  $110\ MPa$  的外压下, 对包裹体均一温度的测定结果显示, 均一温度随外压的增大而减小, 计算得出包裹体均一时的密度从常压的  $0.38\ g/cm^3$  增加到  $0.42\ g/cm^3$ 。通过对纯水包裹体在常压下的测温结果和不同外压下包裹体均一温度的测定可以看出, 包裹体的均一温度随着外压的增大而减小, 对比 Schmidt 等 (1998) 的密度为  $0.8286\ g/cm^3$  纯水包裹体的实验结果, 包裹体的均一温度同样表现为随外压的增大而减小。实验数据见表 1 和图 1, 其中虚线代表包裹体均一温度仅由石英的摩尔体积变化所导致的包裹体均一温度的变化, 其根据不同的温压条件下

石英的摩尔体积不同导致包裹体均一温度不同所画出的, 由石英的状态方程计算 (Hosieni *et al.*, 1985) 得出, 其中假定流体包裹体的体积变化仅与一定温度、压力条件下石英的摩尔体积相关, 图 2 中的虚线(两条虚线分别为 A、B 包裹体的模拟曲线)的计算方法与图 1 中的虚线是相同的。

表 1 纯水包裹体在不同外压下均一温度数据

Table 1 Homogenization temperatures of pure  $H_2O$  fluid inclusions under different external pressures

| 序号 | 水均一温度 / $^\circ C$ | 水密度 /( $g/cm^3$ ) | 外压 /MPa | 包裹体均一温度 / $^\circ C$ |
|----|--------------------|-------------------|---------|----------------------|
| 1  |                    |                   | 0.1     | 373.5                |
| 2  | 311.6              | 0.68725           | 69.2    | 372.7                |
| 3  | 280.5              | 0.74955           | 113.8   | 371.2                |

注: 水均一温度系指金刚石压腔中作为传压介质的水的均一温度; 水密度系指金刚石压腔中传压介质水均一时的密度; 外压为纯水包裹体均一时的外压。

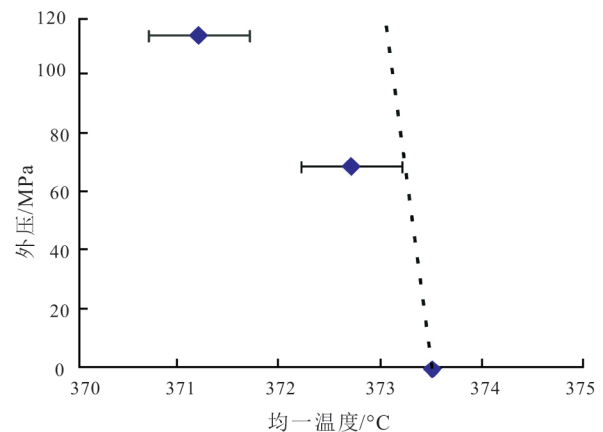


图 1 纯水包裹体均一温度随外压变化散点图

Fig.1 Homogenization temperatures versus external pressures of pure  $H_2O$  inclusions

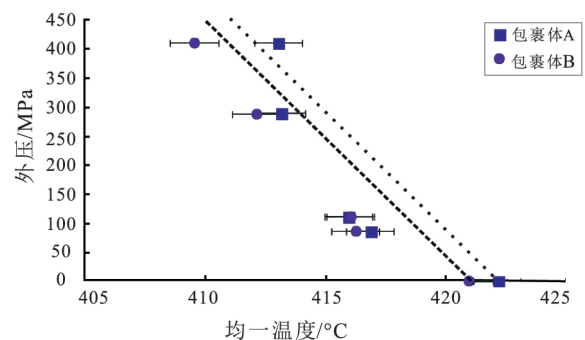


图 2 盐度为  $18.72\% NaCl_{eq}$  的  $H_2O-NaCl$  体系的包裹体均一温度随外压变化散点图

Fig.2 Homogenization temperatures versus external pressures for fluid inclusions with a composition of  $H_2O + 18.72\% NaCl_{eq}$

### 2.2 H<sub>2</sub>O-NaCl 体系合成包裹体

对于 H<sub>2</sub>O-NaCl 体系人工包裹体的合成条件为 600℃、100 MPa, 时间为 10 天。通过在型号 Linkam CAP500 的冷热台下对包裹体的冷冻实验, 测得包裹体冰点为 -15.1℃, 利用冰点和盐度的关系方程  $w(\text{NaCl}\%) = 0.00 + 1.78\theta - 0.0442\theta^2 + 0.000557\theta^3$  计算得到包裹体的盐度为 18.72% NaCl<sub>eqv</sub> (Bodnar, 1993)。实验针对编号为 A、B (图 3) 的包裹体分别进行了不同压力下的测温实验。

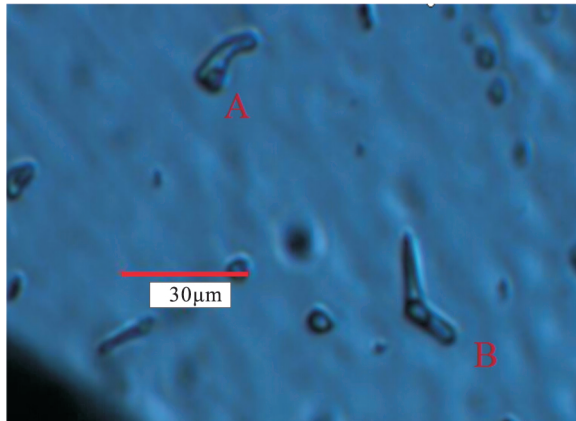


图 3 H<sub>2</sub>O+18.72%NaCl<sub>eqv</sub> 体系的合成流体包裹体

Fig.3 Synthetic fluid inclusion containing H<sub>2</sub>O + 18.72%NaCl<sub>eqv</sub> system

表 2 不同外压下 H<sub>2</sub>O + 18.72%NaCl<sub>eqv</sub> 体系的合成流体包裹体均一温度数据

Table 2 Homogenization temperatures of synthetic fluid inclusions with H<sub>2</sub>O + 18.72%NaCl<sub>eqv</sub> under different external pressures

| 序号 | 水均一温度 /℃ | 水密度 / (g/cm <sup>3</sup> ) | 外压 /MPa | 包裹体均一温度 /℃ |
|----|----------|----------------------------|---------|------------|
| A1 |          |                            | 0.1     | 422.2      |
| A2 | 330.0    | 0.64087                    | 85.5    | 416.9      |
| A3 | 312.7    | 0.68473                    | 110.6   | 416.0      |
| A4 | 223.3    | 0.83600                    | 287.2   | 413.2      |
| A5 | 173.8    | 0.89354                    | 408.5   | 413.1      |
| B1 |          |                            | 0.1     | 421.0      |
| B2 | 330.0    | 0.64087                    | 85.0    | 416.3      |
| B3 | 312.7    | 0.68473                    | 110.6   | 416.1      |
| B4 | 223.3    | 0.83600                    | 285.7   | 412.2      |
| B5 | 171.8    | 0.89561                    | 407.6   | 409.6      |

注: A1-A5 和 B1-B5 分别代表包裹体 A、B 的 5 次不同的实验。

对于盐度为 18.72%NaCl<sub>eqv</sub> 的 H<sub>2</sub>O-NaCl 体系的包裹体, 其临界温度、压力、密度分别为 552.4℃、69 MPa、0.64 g/cm<sup>3</sup> ([http://models.kl-edi.ac.cn/fluidinc/h2o\\_nacl/calc.php](http://models.kl-edi.ac.cn/fluidinc/h2o_nacl/calc.php)), 而对于此包裹体中气

体所占比例为 48.15%, 气液比例约为 1:1。对于在本次实验条件 (600℃、100 MPa) 下合成的 H<sub>2</sub>O-NaCl 体系的包裹体, 通过包裹体的均一温度可以得出包裹体均一时的密度为 0.73~0.76 g/cm<sup>3</sup>, 包裹体均一到液相, 均大于此盐度包裹体的临界密度, 均一时的压力在 27~31 MPa, 而气体占比为 38%~42%, 都小于 48.15%。由不同外压下测定的包裹体的均一温度可以看出, 均一温度随外压的增大而减小, 当外压足够大时, 外压的增大对包裹体的均一温度影响似乎有减小的趋势, 主要是因为石英有更高的压缩强度相对于拉张强度 (Sterner and Bodnar, 1989), 从而可以使得石英包裹体在较高的外压作用下而不发生较大的体积变化, 更不会发生包裹体被压破的现象。总之, 结合密度为 0.8286 g/cm<sup>3</sup> 的纯水包裹体和盐度为 18.72%NaCl<sub>eqv</sub> 的 H<sub>2</sub>O-NaCl 的包裹体在不同外压下包裹体均一温度的数据, 可以得出当包裹体均一时的密度大于其临界密度时, 包裹体的均一温度随外压的增大而减小 (图 4)。

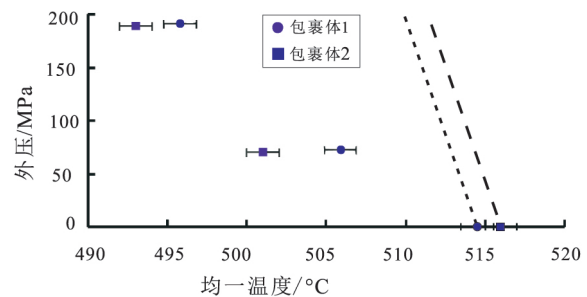


图 4 H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub> 体系包裹体均一温度随外压变化散点图

Fig.4 Homogenization temperatures versus external pressures for H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub>-bearing fluid inclusions

### 2.3 H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub> 体系天然包裹体

本文中流体包裹体样品来自玉龙铜矿。包裹体显微测温表明, 斑岩铜矿成矿期流体均一温度多为 250~500℃, 高者可达 650℃ 及以上, 盐度多为 10%~50%NaCl<sub>eqv</sub>, 但也有高达 70% 及以上者 (王蝶等 2011)。本文选取特定的包裹体在热液金刚石压腔 (HDAC) 中进行加热, 测定不同外压下的均一温度 (表 3), 通过下表可以看出包裹体的均一温度随外压的增大而减小。

## 3 结论

本文测定了人工合成的临界密度的纯水包裹体和盐度为 18.72%NaCl<sub>eqv</sub> 的 H<sub>2</sub>O-NaCl 体系的包裹体, 通过对比在常压下和热液金刚石压腔 (HDAC) 中不同外压下包裹体均一温度的数据, 可以得出这 2 种体系的包裹体的均一温度随包裹体外压的增加

表 3 不同外压下 H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub> 体系包裹体均一温度数据Table 3 Homogenization temperatures of H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub> fluid inclusions under different external pressures

| 序号  | 水均一温度 / °C | 水密度 / (g/cm <sup>3</sup> ) | 外压 / MPa | 包裹体均一温度 / °C |
|-----|------------|----------------------------|----------|--------------|
| 1-1 |            |                            | 0.1      | 514.5        |
| 1-2 | 372.8      | 0.40481                    | 72.1     | 505.9        |
| 1-3 | 312.0      | 0.68633                    | 191.3    | 495.8        |
| 2-1 |            |                            | 0.1      | 516.0        |
| 2-2 | 372.8      | 0.40481                    | 72.1     | 510.0        |
| 2-3 | 312.0      | 0.68633                    | 188.5    | 493.0        |

注: 序号代表包裹体的 6 次不同的实验。

而减小, 主要归因于压力的存在引起包含包裹体的主矿物石英发生弹性形变, 导致包裹体体积变小及内部流体密度变大, 据此可以获得压力对均一温度的校正依据。对于天然流体包裹体玉龙铜矿中的 H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub> 体系的包裹体, 数据同样显示包裹体均一温度随外压的增大而减小。

综上所述, 通过利用热液金刚石压腔(HDAC)研究纯水包裹体、盐度为 18.72%NaCl<sub>eqv</sub> 的 H<sub>2</sub>O-NaCl 体系的包裹体、H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub> 体系的天然包裹体不同外压下的均一温度数据, 得出此类包裹体的均一温度随外压的增大而减小。

致谢: 本文实验中的天然包裹体样品由昆明理工大学王蝶博士提供; 研究工作得到中国科学院深海科学与工程研究所(筹)周义明研究员和中国地质科学院李建康副研究员、李盛虎博士, 以及中国地质大学(北京)毛世德教授的指导和帮助, 在此一并表示感谢。

#### 参考文献 (References):

- Bassett W A, Shen A H, Bucknum M J, Chou I M. 1993. A new diamond anvil cell for hydrothermal studies to 2.5 GPa and from -190 to 1200°C. *Review of Scientific Instruments*, 64(8): 2340-2345
- Bassett W A. 2003. High pressure-temperature aqueous systems in the hydrothermal diamond anvil cell (HDAC). *European Journal of Mineralogy*, 15(5): 773-780
- Becker S P, Fall A, Bodnar R J. 2008. Synthetic fluid inclusions. XVII. PVTX Properties of High Salinity H<sub>2</sub>O-NaCl Solutions (>30 wt% NaCl): Application to Fluid Inclusions that Homogenize by Halite Disappearance from Porphyry Copper and Other Hydrothermal Ore Deposits. *Economic Geology*, 103(3): 539-554
- Bodnar R J, Burnham C W, Sterner S M. 1985. Synthetic fluid inclusions in natural quartz. III. Determination of phase equilibrium properties in the system H<sub>2</sub>O-NaCl to 1000°C and 1500 bars. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 49(9): 1861-1873
- Bodnar R J. 1993. Revised equation and table for determining the freezing

point depression of H<sub>2</sub>O-NaCl solutions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 57(3): 683-684

- Darling R S, Bassett W A. 2002. Analysis of natural H<sub>2</sub>O+CO<sub>2</sub>+NaCl fluid inclusions in the hydrothermal diamond anvil cell. *American Mineralogist*, 87: 67-78
- Haar L, Gallagher J S, Kell G S. 1984. NBS/NRC Steam Tables: Thermodynamic and transport properties and Computer programs for vapor and liquid states of water in SI units. Washington D C: Hemisphere Publishing Corporation, 320
- Hosieni K R, Howald R A, Scanlon M W. 1985. Thermodynamics of the lambda transition and the equation of state of quartz. *American Mineralogist*, 70: 782-793
- Knight C L, Bodnar R J. 1989. Synthetic fluid inclusions: IX. Critical PVTX properties of NaCl-H<sub>2</sub>O solutions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 53(1): 3-8
- Lecumberri-Sanchez P, Steele-MacInnis M, Bodnar R J. 2015. Synthetic fluid inclusions XIX. Experimental determination of the vapor-saturated liquidus of the system H<sub>2</sub>O-NaCl-FeCl<sub>2</sub>. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 148: 34-49
- Lin F, Bodnar R J. 2010. Synthetic fluid inclusions XVIII: Experimental determination of the PVTX properties of H<sub>2</sub>O-CH<sub>4</sub> to 500°C, 3 kbar and X<sub>CH<sub>4</sub></sub> ≤ 4 mol%. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 74(11): 3260-3273
- Roedder E. 1985. Uses for synthetic fluid inclusions in quartz crystals. *Nature*, 315(6020): 544-545
- Schmidt C, Chou I M, Bodnar R J, Bassett W A. 1998. Microthermometric analysis of synthetic fluid inclusions in the hydrothermal diamond-anvil cell. *American Mineralogist*, 83: 995-1007
- Schmidt C, Bodnar R J. 2000. Synthetic fluid inclusions: XVI. PVTX properties in the system H<sub>2</sub>O-NaCl-CO<sub>2</sub> at elevated temperatures, pressures, and salinities. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64(22): 3853-3869
- Shelton K L, Orville P M. 1980. Formation of synthetic fluid inclusions in natural quartz. *American Mineralogist*, 65: 1233-1236
- Sterner S M, Bodnar R J. 1984. Synthetic fluid inclusions in natural quartz I. Compositional types synthesized and applications to experimental geochemistry. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 48(12): 2659-2668
- Sterner S M, Hall D L, Bodnar R J. 1988. Synthetic fluid inclusions. V. Solubility relations in the system NaCl-KCl-H<sub>2</sub>O under vapor-saturated conditions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 52(5): 989-1005
- Sterner S M, Bodnar R J. 1989. Synthetic fluid inclusions. VII. Re-equilibration of fluid inclusions in quartz during laboratory-simulated metamorphic burial and uplift. *Journal of Metamorphic Geology*, 7(2): 243-260
- Vanko D A, Bodnar R J, Sterner S M. 1988. Synthetic fluid inclusions: VIII. Vapor-saturated halite solubility in part of the system NaCl-CaCl<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O, with application to fluid inclusions from oceanic hydrothermal systems. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 52(10): 2451-2456
- 王蝶, 卢焕章, 毕献武. 2011. 与花岗质岩浆系统有关的石英脉型钨矿和斑岩型铜矿成矿流体特征比较. *地学前缘*, 18(5): 121-131
- 周义明. 2003. 热液金刚石压腔在地质流体研究中的应用. *岩石学报*, 19(2): 213-220

(本文责任编辑: 龚超颖)