

# 硅铍石的包裹体及其形成条件研究

高诗佳, 白 峰

(中国地质大学 珠宝学院, 北京 100083)

**摘 要:** 对硅铍石样品进行放大观察, 可见大量杂乱分布的黄色透明针状固态包裹体、少量红色不透明粒状固态包裹体, 气液包裹体和愈合裂隙普遍存在。通过激光拉曼光谱分析, 测得硅铍石样品中气液包裹体的液态部分为含有  $\text{CO}_2$  等气体的  $\text{NaCl}$  盐水溶液, 气态部分的化学成分为  $\text{CO}_2$ 、水蒸气等。对硅铍石样品中气液包裹体的气体比和充填度进行估测, 利用冷热台测出其均一温度和冰点分别为  $378.9 \sim 425.5^\circ\text{C}$  和  $-12.1 \sim -6.3^\circ\text{C}$ 。经过计算, 得出硅铍石的近似形成温度为  $378.9 \sim 425.5^\circ\text{C}$ , 近似形成压力为  $234.44 \sim 428.56 \text{ MPa}$ 。

**关键词:** 硅铍石, 包裹体, 形成温度, 形成压力

中图分类号: P578.94

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2013)02-0180-09

## A study of the inclusions in phenakite and the formation conditions of phenakite

GAO Shi-jia and BAI Feng

(School of Gemology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

**Abstract:** The formation conditions of phenakite were studied through investigating its gas-liquid inclusions by means of Laser Raman spectrum analysis and microscopic heating/cooling stage. The observation of phenakite samples revealed numerous randomly-distributed yellow acicular transparent solid inclusions, a few red granular opaque solid inclusions, lots of gas-liquid inclusions and healed cracks. The gas-liquid inclusions in phenakite were divided into two types according to their forms and substances. Type I included rich liquid two-phase  $\text{H}_2\text{O}$ - $\text{NaCl}$  inclusions (I a) and pure liquid  $\text{H}_2\text{O}$ - $\text{NaCl}$  inclusions (I b), whereas Type II could be further divided into three-phase  $\text{H}_2\text{O}$ - $\text{NaCl}$ - $\text{CO}_2$  inclusions containing liquid  $\text{CO}_2$  (II a) and two-phase  $\text{H}_2\text{O}$ - $\text{NaCl}$ - $\text{CO}_2$  inclusions without liquid  $\text{CO}_2$  (II b). Then some gas-liquid inclusions of different types with clear demarcated gas part and liquid part were chosen to do further test. Using Laser Raman spectrum analysis, the authors affirmed that phenakite is a kind of silicate which contains Be as the matrix for inclusions, and that the gas part of the gas-liquid inclusions contain such components as  $\text{CO}_2$  and water vapor, whereas the liquid part is  $\text{NaCl}$  aqueous solution with the dissolution of a little  $\text{CO}_2$ . Two different gas-liquid inclusions were chosen for microscopic heating/cooling stage test, and the results show that the homogenization temperatures of the inclusions are from  $378.9^\circ\text{C}$  to  $425.5^\circ\text{C}$  by homogenization method, and their freezing points are about  $-12.1 \sim -6.3^\circ\text{C}$  by freezing method. These data were used to figure out the salinities of these inclusions, which are  $9.60\% \sim 16.14\%$ . Calculations show that the homogenization pressures range from  $234.44 \text{ MPa}$  to  $428.56 \text{ MPa}$ . The formation temperature and the formation pressure of phenakite estimated from homogenization temperature and homogenization pressure are about  $378.9 \sim 425.5^\circ\text{C}$  and  $234.44 \sim 428.56 \text{ MPa}$  respectively.

**Key words:** phenakite; inclusions; formation temperature; formation pressure

收稿日期: 2012-05-10; 修订日期: 2012-12-19

作者简介: 高诗佳 (1989-), 女, 汉族, 宝石学专业硕士研究生, E-mail: 19890816gaoshijia@sina.com; 通讯作者: 白 峰 (1971-), 男, 汉族, 岩石学、矿物学和矿床学专业博士, 副教授, 主要从事宝石学、矿物材料的教学与科研工作, E-mail: baifengbj@163.com。

现阶段,我国对硅铍石的研究主要是致力于工业上铍矿床的开采以及铍的提取和冶炼,而宝石学方面则涉及较少,主要是对硅铍石的基本宝石学特征进行了概括和介绍(李爱民等,2008;蔡佳等,2011)。本文通过对产自缅甸抹谷地区花岗伟晶岩中硅铍石中的气液包裹体进行激光拉曼光谱和冷热台测试,探明其气液包裹体成分,测得其均一温度及冰点,并进一步计算得出硅铍石的近似形成温度和压力,为硅铍石的形成条件和指导合成技术奠定理

论基础。

## 1 硅铍石样品观察

### 1.1 样品描述

硅铍石为含 Be 的硅酸盐矿物。本文所研究的硅铍石样品,均无色透明,共 4 颗原石(图 1),为柱状晶体,一端为菱面体锥,一端断裂,六方柱单形。放大检查可见硅铍石样品中含有大量的固态包裹体和

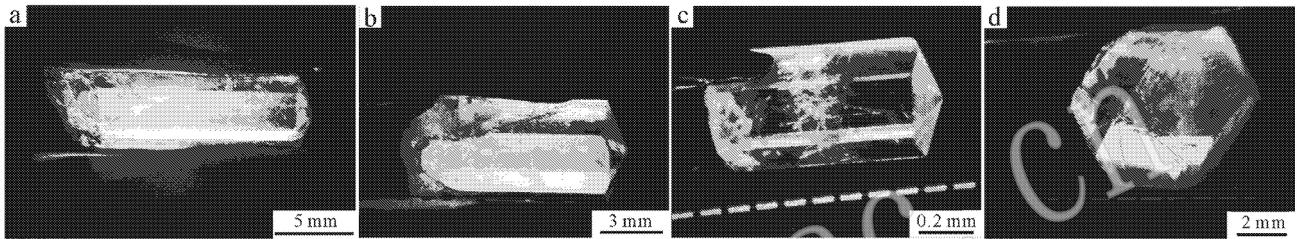


图 1 硅铍石样品

Fig. 1 Phenakite samples

a—1 号样品; b—2 号样品; c—3 号样品; d—4 号样品

a—Sample No. 1; b—Sample No. 2; c—Sample No. 3; d—Sample No. 4

气液包裹体。

样品 1 中可见大量杂乱分布的黄色透明针状固态包裹体、气液包裹体和愈合裂隙。样品 2 中可见红色不透明粒状固态包裹体、大量气液包裹体和愈合裂隙。样品 3 和样品 4 中可见大量气液包裹体和愈合裂隙(图 2)。本文主要对硅铍石中的气液包裹体进行研究,推断其形成条件。

### 1.2 分析方法

激光拉曼测试所用实验仪器为中国地质科学院矿产资源研究所激光拉曼光谱实验室的英国 Renishaw System-2000 显微共焦激光拉曼光谱仪,激发激光波长 514.53 nm,激光功率 20 mW,激光束斑最小直径 1  $\mu\text{m}$ ,光谱分辨率 1~2  $\text{cm}^{-1}$ 。

显微冷热台测试所用实验仪器为中国地质大学(北京)地质资源勘查实验教学中心资源勘查实验室流体包裹体室的英国产 Linkam MDSG 600 显微冷热台及 TS1500 高温热台,主要配套件及附件有 Linkam MDSG 冷热台、工具箱、ZEISS 显微镜、物镜、LENOVO 电脑, MDSG 600 冷热台的温度控制范围为 -196~600 $^{\circ}\text{C}$ ,可控的冷冻/加热速率范围为 0.01~130 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ,精确度及稳定性在 0.1 $^{\circ}\text{C}$  之

内,样品最大视域直径为 1cm。TS1500 高温热台的最高加热温度可至 1500 $^{\circ}\text{C}$ ,全程可控的升降温度加热速率为 1~130  $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ,全程精确度及稳定性为 1 $^{\circ}\text{C}$  之内,样品最大直径为 7 mm。

### 1.3 流体包裹体的岩相学特征

硅铍石中流体包裹体比较丰富,根据 Roedder (1984)和卢焕章等(2004)提出的流体包裹体在室温下相态分类准则及冷冻回温过程中的相态变化,可将流体包裹体划分为  $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}$  型包裹体(I 型)和  $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}-\text{CO}_2$  型包裹体(II 型)2 类(图 3)(王旭东等,2010)。

#### 1.3.1 I 型

I 型包括富液相两相  $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}$  型包裹体(I a)和纯液相  $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}$  型包裹体(I b)。

I a: 富液相两相  $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}$  型包裹体主要由水溶液和稀薄的水蒸气组成。本类包裹体是硅铍石中数量最多的流体包裹体,占包裹体总数的 80% 以上。包裹体个体变化较大,一般为 5~25  $\mu\text{m}$ ,长径约为 5~50  $\mu\text{m}$ ,形状一般为不规则形、椭圆形、长条形等,气相体积分数通常为 10%,个别可达到 30% 左右,随机或呈小群分布(图 3a)。

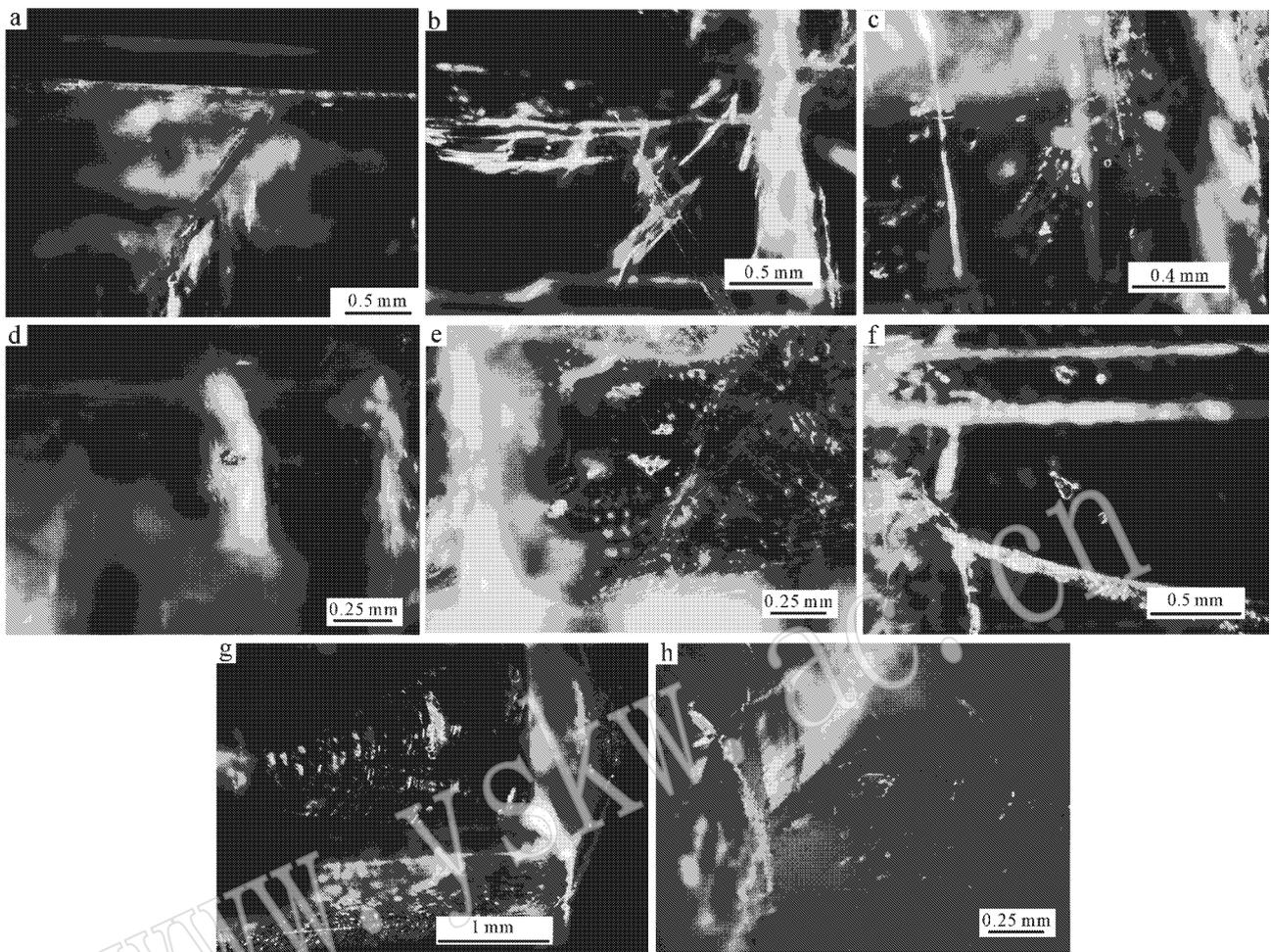


图 2 硅铍石样品中的包裹体

Fig. 2 Inclusions in phenakite samples

a—样品 1 中的固态包裹体；b—样品 1 中的固态包裹体和愈合裂隙；c—样品 2 中的固态包裹体；d—样品 2 中的气液包裹体；e—样品 2 中的愈合裂隙；f—样品 3 中的气液包裹体；g—样品 3 中的愈合裂隙；h—样品 4 中的气液包裹体  
a—solid inclusions in Sample No. 1；b—solid inclusions and healed fracture in sample No. 1；c—solid inclusions in Sample No. 2；d—gas-liquid inclusions in Sample No. 2；e—healed fracture in Sample No. 2；f—gas-liquid inclusions in Sample No. 3；g—healed fracture in Sample No. 3；h—gas-liquid inclusions in Sample No. 4

I b：纯液相  $H_2O-NaCl$  型包裹体出现量较少，在室温下呈纯液相产出，个体通常较小，大小一般为  $5\sim 8\ \mu m$ ，形态为不规则形、长条状、椭圆形等，呈串珠状分布或与 I a 型包裹体相伴生，为次生成因的包裹体（图 3b）或颈缩作用的产物（图 3c）。

### 1.3.2 II 型

II 型为  $H_2O-NaCl-CO_2$  型包裹体。该类包裹体也较为发育，占包裹体总数的 10% 以上。根据室温下的相态可将其进一步划分为含液相  $CO_2$  的三相  $H_2O-NaCl-CO_2$  型包裹体（II a）和不含液相  $CO_2$  的两相  $H_2O-NaCl-CO_2$  型包裹体（II b）。

II a：含液相  $CO_2$  的三相  $H_2O-NaCl-CO_2$  型包裹体由水溶液、液相  $CO_2$  和气相  $CO_2$  构成， $CO_2$  相体积

变化较大，从 20% ~ 80% 不等。形态一般为椭圆形、长条状和不规则形等，大小一般为  $10\sim 20\ \mu m$ ，最大者可达  $50\ \mu m$ 。呈孤立状或与 I a、II b 型包裹体相伴生产出，一般为原生包裹体（图 3d）。

II b：不含液相  $CO_2$  的两相  $H_2O-NaCl-CO_2$  型包裹体由气相  $CO_2$  和水溶液组成。室温条件下，与 I a 型包裹体相比，II b 型包裹体一般气相体积分数更大，气相  $CO_2$  占包裹体总体积的 10% ~ 75% 不等，在冷冻过程中则有液相  $CO_2$  的出现。形态呈不规则形、圆形、椭圆形等，大小一般为  $10\sim 30\ \mu m$ ，呈孤立状或与 I a、II a 型包裹体相伴生产出，一般为原生包裹体（图 3e）。

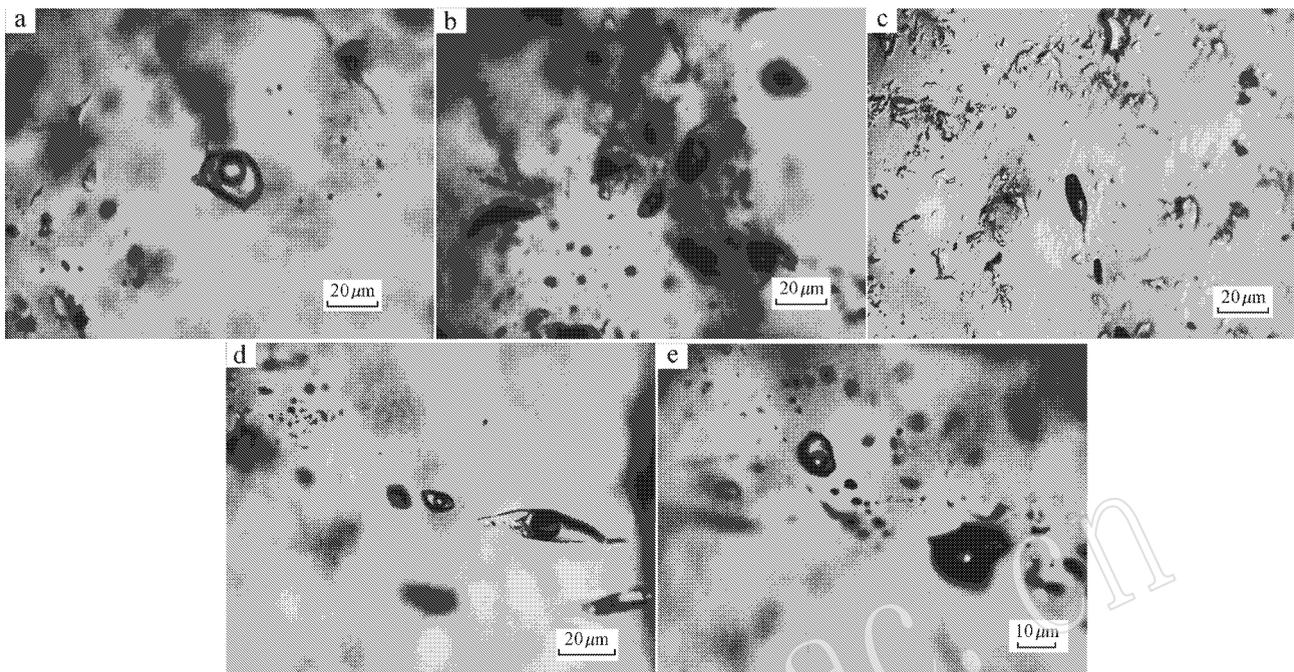


图 3 硅铍石样品中的包裹体分类

Fig. 3 Different kinds of inclusions in phenakite samples  
a— I a 型包裹体 ; b, c— I b 型包裹体 ; d— II a 型包裹体 ; e— II b 型包裹体  
a—Type I a ; b c—Type I b ; d—Type II a ; e—Type II b

## 2 结果分析

### 2.1 硅铍石中的气液包裹体成分分析

首先选择硅铍石样品基本不含包裹体的位置进行拉曼光谱分析,将分析结果与硅铍石标准拉曼光

谱图( Hazen & Au , 1986 ; Downs & Gibbs , 1987 ; Hofmeister *et al.* , 1987 ; Martin-Izard *et al.* , 1995 ) 进行对比( 图 4 ),发现硅铍石样品光谱与标准光谱特征峰位基本相同,仅强度略有不同,这可能与样品的厚度有关。本文以此作为激光拉曼透射光谱测试背景,以便去除主晶光谱对包裹体光谱的干扰。

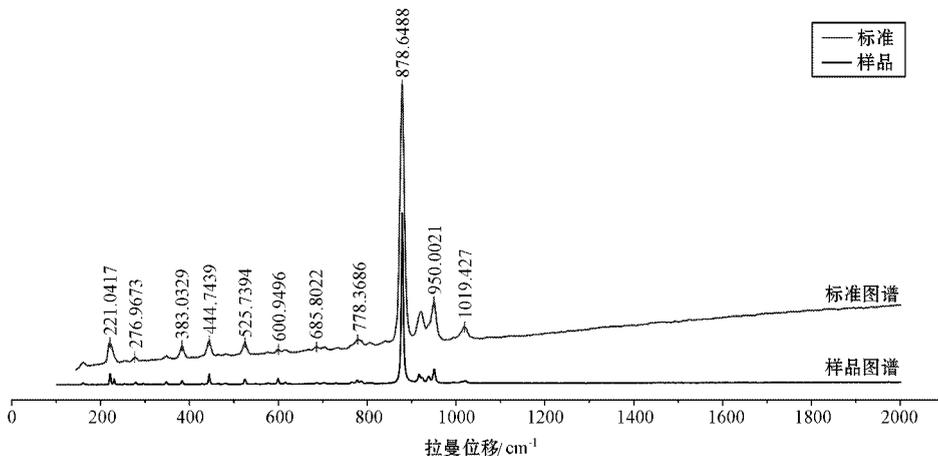


图 4 硅铍石样品拉曼光谱与标准光谱对比图

Fig. 4 Raman spectra of phenakite samples in comparison with standard curve

随后对硅铈石样品中原生 I<sub>a</sub> 型包裹体和 II 型包裹体进行了激光拉曼透射光谱测试,测试的位置

点及获得的拉曼光谱图谱见图 5 和图 6。据此进行的拉曼光谱特征分析见表 1。

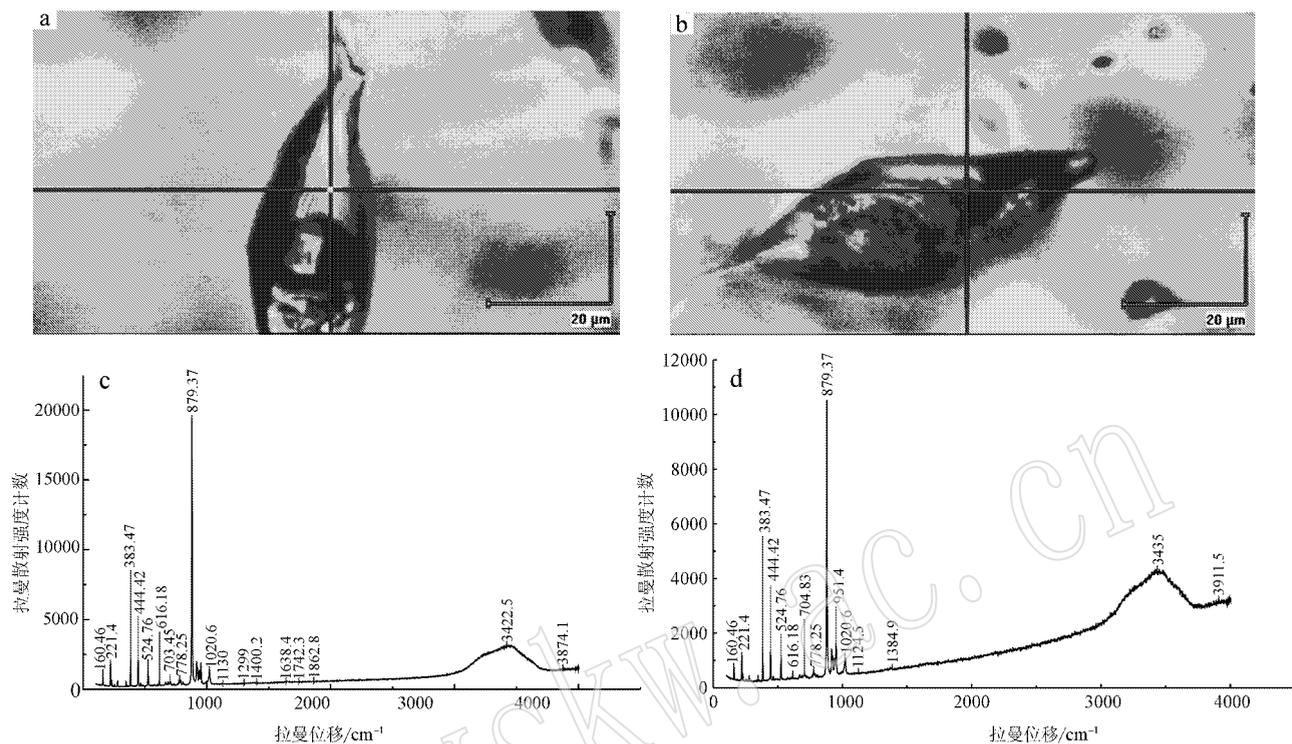


图 5 硅铈石样品气液包裹体液态部分测试点(a, b)及其对应的激光拉曼光谱图(c, d)

Fig. 5 Laser Raman test points (a, b) on the liquid part of gas-liquid inclusions in phenakite samples and Raman spectra (c, d)

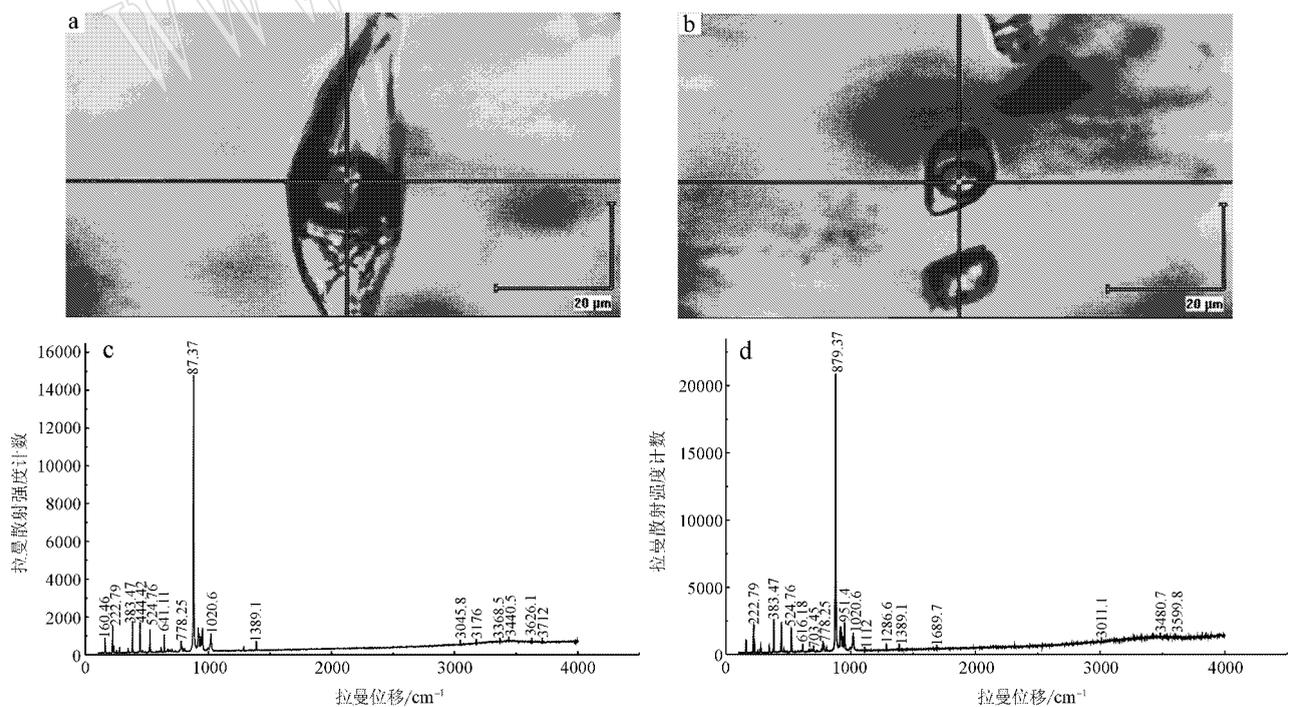


图 6 硅铈石样品气液包裹体气态部分测试点(a, b)及其对应的激光拉曼光谱图(c, d)

Fig. 6 Laser Raman test points (a, b) on the gas part of gas-liquid inclusions in phenakite samples and Raman spectra (c, d)

表 1 硅铍石样品中气液包裹体拉曼光谱峰值指派  
Table 1 Analyses of Raman spectra of gas-liquid inclusions in phenakite sample

测试点	峰位波数/cm <sup>-1</sup>	对应官能团	振动类型及强度
主晶	1 019.8、950.07、916.78	Si—O—Si	对称伸缩振动
	525.16、444.29	Si—O—Si	反对称伸缩振动
	878.73、777.25、704.32、599.68	Be—O	
	384.04、347.58、279.4、220.74、160.49	晶格	
液态部分	3 874.1、3 422.5	H <sub>2</sub> O	伸缩振动
	1 742.3、1 638.4	H <sub>2</sub> O	弯曲振动
	1 400.2、1 299	CO <sub>2</sub>	微弱
	1 124.5~160.46	硅铍石的结构振动区	
	3 911.5、3 435	H <sub>2</sub> O	伸缩振动
	1 384.9	CO <sub>2</sub>	微弱
气态部分	1 124.5~160.46	硅铍石的结构振动区	
	3 712、3 626.1、3 440.5、3 368.5、3 176、3 045.8	H <sub>2</sub> O	伸缩振动
	1 389.1	CO <sub>2</sub>	微弱
	1 020.6~160.46	硅铍石的结构振动区	
	3 599.8、3 480.7、3 011.1	H <sub>2</sub> O	伸缩振动
	1 638.4	H <sub>2</sub> O	弯曲振动
2	1 286.6、1 389.1	CO <sub>2</sub>	微弱
	1 112~160.46	硅铍石的结构振动区	

经过官能团峰值对比(朱自莹等,1981;中西香尔,1984;陈勇等,2002;廖尚宜等,2005)对激光拉曼光谱的测试进行分析(见表1的分析结果),可推测硅铍石样品中的气液包裹体的液态部分为溶有微量CO<sub>2</sub>气体的水溶液,气态部分为CO<sub>2</sub>、水蒸气等气体。

## 2.2 硅铍石中的气液包裹体测温

为节省实验时间,测试中升温速率较快,为保证测温数据可靠,实验在升温过程中分阶段进行,接近相变点时稳定一段时间观察,等待温度与包裹体状

态均稳定不变后,再进入下一升温阶段。硅铍石样品包裹体的升温速率见表2。

本文从硅铍石样品4中选取13个气液包裹体进行均一法测试。包裹体从室温条件开始加热,逐渐升温,最终达到完全均一。图7显示了10号气液包裹体的均一过程。

另选取与均一法测试相同的13个包裹体进行冷冻法测试。包体从室温条件开始冷冻,逐渐降温,最终在-90℃达到完全凝固。再重新加热,逐渐升温,最终在冰点达到完全熔化。具体测试数据见表

表 2 样品包裹体的升温速率及均一温度  
Table 2 Heating rate and homogenization temperature of inclusion samples

包裹体序号	包裹体类型	大小/ $\mu\text{m}$	气体比/%	起始温度/℃	升温至200℃速率/ $^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$	升温至300℃速率/ $^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$	升温至400℃速率/ $^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$	升温至500℃速率/ $^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$	均一温度/℃
1	I a	5×9	10	24.3	30	30	20	10	425.5
2	I a	5×12	10	33.6	50	30	20	10	425.1
3	II a	6×16	10	30.1	50	30	20	10	409.6
4	I a	10×11	30	35.0	70	50	30	10	407.6
5	II b	7×14	30	34.5	70	50	30	10	399.9
6	II a	4×8	10	30.2	70	50	30	10	400.0
7	II a	6×12	10	29.6	70	50	30	10	424.9
8	II a	11×46	15	29.6	70	50	30	10	378.9
9	I a	5×26	10	30.4	70	30	20	10	400.4
10	I a	18×22	15	28.0	70	30	20	10	418.8
11	II b	18×21	15	30.5	70	30	20	10	394.4
12	II b	6×22	10	27.9	70	30	20	10	407.8
13	II b	12×16	20	30.0	70	30	20	10	405.2

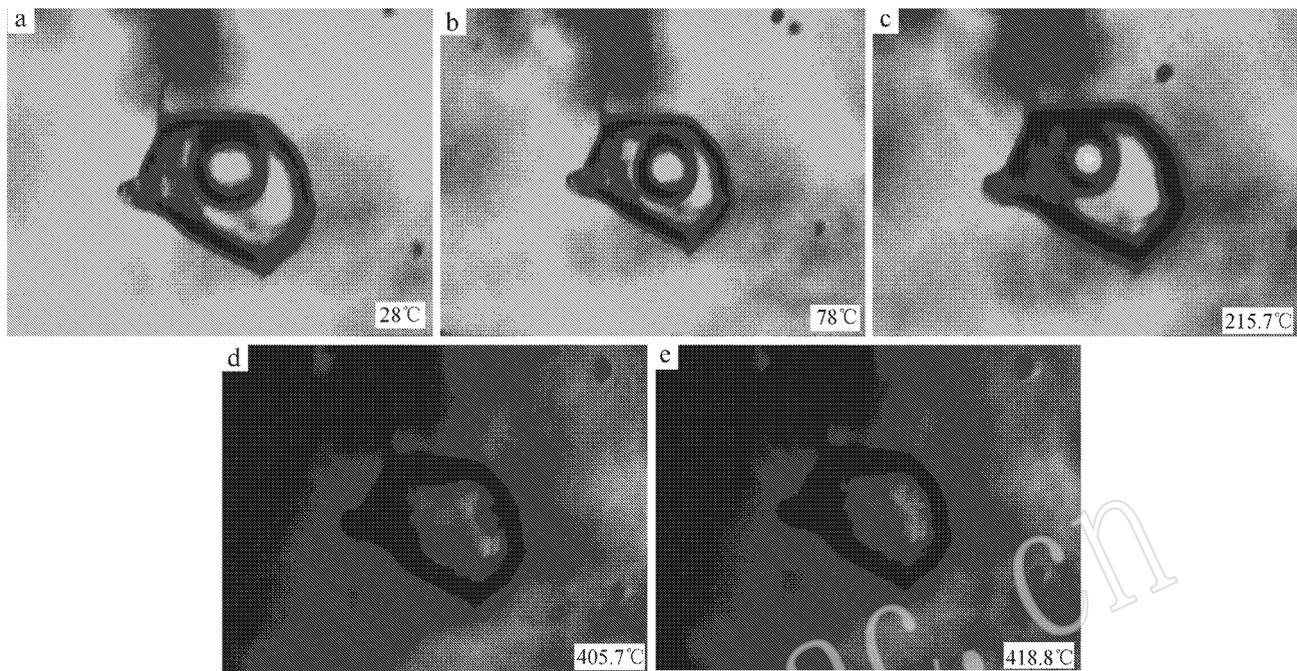


图 7 包裹体 10 在不同温度下的图像

Fig. 7 Photos of inclusion No. 10 at different temperatures

表 3 样品包裹体的变温速率及冰点

Table 3 Salinities and homogenization pressures of inclusion samples

包裹体 序号	包裹体 类型	大小/ $\mu\text{m}$	气体比/%	起始温 度/ $^{\circ}\text{C}$	降温至	升温至	升温至	升温至	冰点/ $^{\circ}\text{C}$	
					$-90^{\circ}\text{C}$ 速率	$-15^{\circ}\text{C}$ 速率	$-10^{\circ}\text{C}$ 速率	$0^{\circ}\text{C}$ 速率		
					$/^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$	$/^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$	$/^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$	$/^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$		
1	I a	5×9	10	24.3	30	10	10	1	-8.2	
2	I a	5×12	10	33.6	50	30	30	1	-12.1	
3	II a	6×16	10	30.1	30	30	10	10	-10.0	
4	I a	10×11	30	35.0	30	30	10	10	-7.2	
5	II b	7×14	30	34.5	40	30	10	10	-10.5	
6	II a	4×8	10	30.2	40	30	10	10	-8.1	
7	II a	6×12	10	29.6	40	30	10	10	-8.3	
8	II a	11×46	15	29.6	40	30	10	10	-8.3	
9	I a	5×26	10	30.4	30	30	10	10	-7.2	
10	I a	18×22	15	28.0	30	30	10	10	-10.7	
11	II b	18×21	15	30.5	30	30	10	10	-7.0	
12	II b	6×22	10	27.9	30	30	10	10	-6.3	
13	II b	12×16	20	30.0	30	30	10	10	-7.2	

3. 图 8 显示了 11 号气液包裹体的冷冻过程。

### 3 讨论

根据显微冷热台测试,可得出硅铍石样品中的气液包裹体的均一温度为  $378.9\sim 425.5^{\circ}\text{C}$ ,则硅铍石样品的形成温度近似为  $378.9\sim 425.5^{\circ}\text{C}$ 。硅铍石样品中气液包裹体的冰点为  $-6.3\sim -12.1^{\circ}\text{C}$  据此

范围可推测其液态部分的溶质成分为 NaCl。

根据 Potter 等(1978)提出的公式可以计算溶液的盐度:

$$\omega_B = 0.00 + 1.76985\theta - 4.2384 \times 10^{-2}\theta^2 + 5.2778 \times 10^{-4}\theta^3 \quad \text{公式(1)}$$

式中,  $\omega_B$  为溶液中的 NaCl 质量分数(%),  $\theta$  为冰点下降温度( $^{\circ}\text{C}$ ), 计算得到 NaCl-H<sub>2</sub>O 体系冰点-盐度数据(刘斌, 1999)。

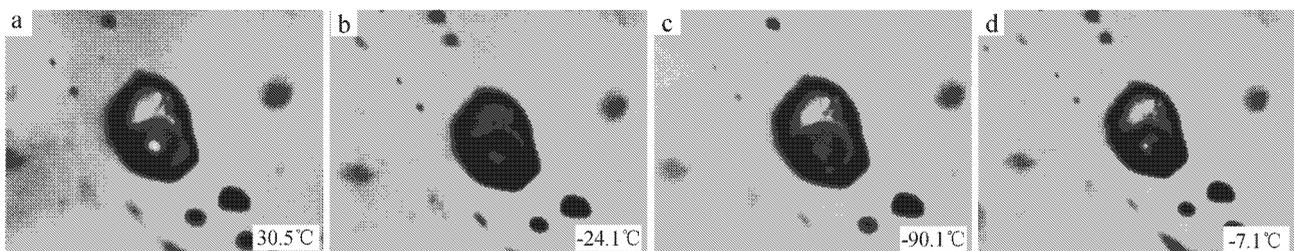


图 8 包裹体 11 在不同温度下的图像

Fig. 8 Photos of inclusion No. 11 at different temperatures

Bair(1964)和Haa(1976)推导的用来计算 NaCl 水溶液包裹体均一压力  $p_h$  (bar) 的公式为(刘斌, 1999):

$$\ln p_h = e_0 + e_1/z + e_2 w [ \exp( e_3 e_m w^2 ) - 1 ] / z + e_4 \exp( e_5 e_m Y ) \quad \text{公式(2)}$$

式中,  $w = z^2 - 2.937 \times 10^5$ ,  $Y = ( T_{H_2O} - 647.27 )^{1.25}$ ,  $e_m = \ln 10$ ,  $z = T_{H_2O} + 0.01$ ,  $T_{H_2O} = \exp [ \ln T / ( A + B T ) ]$ ,  $T$  为均一温度(K)。其中:  $A = 1 + 5.93582 \times 10^{-6} m - 5.19386 \times 10^{-5} m^2 + 1.23156 \times 10^{-5} m^3$ ,  $B = m ( 1.1542 \times 10^{-6} + 1.4125 \times 10^{-7} m - 1.92476 \times 10^{-8} m^2 - 1.70717 \times 10^{-9} m^3 + 1.0539 \times 10^{-10} m^4 )$ ,  $e_0 = 12.50849$ ,  $e_1 = -4616.913$ ,  $e_2 = 3.193455 \times 10^{-4}$ ,  $e_3 = 1.1965 \times 10^{-11}$ ,  $e_4 = -1.013137 \times 10^{-2}$ ,  $e_5 = -5.7148 \times 10^{-3}$ 。  $m$  为含盐度(质量摩尔浓度),与质量分数的关系为:

$$m = 1000 w_B / [ 58.4428 \times ( 100 - w_B ) ] \quad \text{公式(3)}$$

当测定出盐水包裹体的盐度 ( $w_B$ ) 和气-液均一温度 ( $T$ ) 后, 代入公式(2)和公式(3), 即可计算盐水包裹体均一化压力  $p_h$ , 即硅铍石样品形成的近似压力。本文将实验数据代入公式(1)、公式(2)和公式(3) 所得计算结果见表 4。由表 4 可以看出硅铍石样品中的气液包裹体的均一压力为 234.44 ~ 428.56 MPa, 可认为形成压力与之近似。

## 4 结论

本文通过对硅铍石样品及其包裹体的激光拉曼光谱特征和其气液包裹体的冷热台测试的研究, 得出以下结论:

(1) 在硅铍石中可见大量不规则排布的黄色透明针状固态包裹体、少量红色不透明粒状固态包裹

表 4 样品包裹体的盐度和均一压力

Table 4 The salinity and homogenization pressures of inclusion samples

包裹体序号	包裹体类型	盐度/%	均一压力/MPa
1	I a	11.95	428.56
2	I a	6.14	425.97
3	II a	13.99	345.29
4	I a	10.74	336.50
5	II b	14.52	304.79
6	II a	11.83	305.23
7	II a	12.07	424.92
8	II a	12.07	234.44
9	I a	10.74	306.81
10	I a	14.73	390.31
11	II b	10.49	284.43
12	II b	9.60	337.41
13	II b	10.74	326.23

体、气液两相包裹体和大量愈合裂隙。根据拉曼光谱特征, 可确定硅铍石中气液包裹体气态部分为 CO<sub>2</sub>、水蒸气, 液态部分为溶有微量 CO<sub>2</sub> 的 NaCl 的水溶液。

(2) 通过冷热台测试得出其均一温度和冰点, 经过计算, 得出硅铍石的近似形成温度为 378.9 ~ 425.5°C, 近似形成压力 234.44 ~ 428.56 MPa。

## References

Bain R W. 1964. Steam tables, 1964: Physical Properties of Water and Steam, 0 ~ 800 Degrees/0 ~ 1 000 Bars [ M ]. H. M. Stationery Office, 147.

Cai Jia, Yu Xiaoyan and Liu Chunhua. 2011. Gemological Characteristics of Phenakite [ J ]. Journal of Guilin University of Technology, 31(03): 339 ~ 343 ( in Chinese ).

Chen Yong, Zhou Yaoqi and Li Binyang. 2002. Raman characteristics of CO<sub>2</sub> and its application in calculating of inclusions' pressure in the volcanic rock [ A ]. National Academic Symposium of fluid inclusion [ C ]. Nanjing: 21 ~ 22 ( in Chinese ).

- Downs J W and Gibbs G V. 1987. An exploratory examination of the electron density and electrostatic potential of phenakite [ J ]. *American Mineralogist*, 72( 7~8 ): 769~777.
- Haas J L. 1976. Physical properties of the coexisting phases and thermodynamic properties of the H<sub>2</sub>O component in boiling NaCl solution [ J ]. U. S. Geol. Survey Bull., 1421-A: 73.
- Hazen R M and Au A Y. 1986. High-pressure crystal chemistry of phenakite ( Be<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> ) and bertrandite ( Be<sub>4</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>7</sub>( OH )<sub>2</sub> ) [ J ]. *Physics and Chemistry of Minerals*, 13( 2 ): 69~78.
- Hofmeister A M, Hoering T C and Virgo D. 1987. Vibrational spectroscopy of beryllium aluminosilicates: heat capacity calculations from band assignments [ J ]. *Physics and Chemistry of Minerals*, 14( 3 ): 205~224.
- Li Aimin, Jiang Jinguang and Wang Hui. 2008. The latest development and prospects of beryllium minerals flotation [ J ]. *Rare Metals and Cemented Carbides*, 36( 3 ): 58~61 ( in Chinese ).
- Liao Shangyi and Peng Mingsheng. 2005. A new gem mineral – the vibrational spectroscopic characterization of pezzottait [ J ]. *Acta Mineralogica Sinica*, 25( 1 ): 60~63 ( in Chinese with English abstract ).
- Liu Bin. 1999. Thermodynamics of Fluid Inclusions [ M ]. Beijing: Geological Publishing House, 46~187 ( in Chinese ).
- Martin-Izard A, Paniagua A, Moreiras D, et al. 1995. Metasomatism at a granitic pegmatite-dunite contact in Galicia: the Franqueira occurrence of chrysoberyl ( alexandrite ), emerald, and phenakite [ J ]. *The Canadian Mineralogist*, 33: 775~792.
- Potter R W, Clyne M A and Brown D L. 1978. Freezing point depression of aqueous Sodium Chloride Solutions [ J ]. *Econ. Geol.*, 73: 284~285.
- Roedder E. 1984. Fluid in clusions [ A ]. *Mineralogical Society of America, Reviews in Mineralogy* [ C ], 12: 644.
- Wang Xudong, Ni Pei, Zhang Bosheng, et al. 2010. Fluid inclusion studies of the Pangushan quartz vein type tungsten deposit in southern Jiangxi Province [ J ]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 25( 1 ): 60~63 ( in Chinese with English abstract ).
- Zhongxixianger. 1984. Infrared Spectroscopy 100 Cases [ M ]. Beijing: Science Press, 483 ( in Chinese ).
- Zhu Ziyang and Fang Yixing. 1981. Laser Raman spectra ( b ) [ J ]. *Chinese Journal of Organic Chemistry*, 5: 377~380 ( in Chinese ).

## 附中文参考文献

- 蔡佳,余晓艳,刘春花. 2011. 硅铍石的宝石学特征 [ J ]. *桂林理工大学学报*, 31( 3 ): 339~343.
- 陈勇,周瑶琪,李滨阳. 2002. CO<sub>2</sub> 的拉曼特征及其在火山岩包裹体内压求取中的应用 [ J ]. *全国包裹体及地质流体学术研讨会* [ C ]. 南京, 21~22.
- 李爱民,蒋进光,王晖. 2008. 含铍矿物浮选研究现状与展望 [ J ]. *稀有金属与硬质合金*, 36( 3 ): 58~61.
- 廖尚宜,彭明生. 2005. 一个新的宝石矿物——草莓红“绿柱石”的振动光谱特征 [ J ]. *矿物学报*, 25( 1 ): 60~63.
- 刘斌. 1999. 流体包裹体热力学 [ M ]. 北京: 地质出版社, 46~187.
- 卢焕章,范宏瑞,倪培,等. 2004. 流体包裹体 [ M ]. 北京: 科学出版社, 406~419.
- 王旭东,倪培,张伯声,等. 2010. 江西盘古山石英脉型钨矿床流体包裹体研究 [ J ]. *岩石矿物学杂志*, 29( 5 ): 539~550.
- (美)中西香尔. 1984. 红外光谱分析 100 例 [ M ]. 北京: 科学出版社, 483.
- 朱自莹,方一行. 1981. 激光拉曼光谱 ( 二 ) [ J ]. *有机化学*, 5: 377~380.