

高压下多硅白云母的拉曼光谱学研究

曹淑慧, 张立飞, 孙 檣, 郑海飞, 崔光来

(造山带与地壳演化教育部重点实验室, 北京大学 地球与空间科学学院, 北京 100871)

摘要: 在金刚石压腔中, 通过原位拉曼光谱研究了多硅白云母在常温高压下的稳定性。实验获得了多硅白云母从常压到 20 GPa 的拉曼光谱数据, 研究了多硅白云母的 266、708 和 3 618 cm^{-1} 谱峰与压力的相关性。研究发现, 多硅白云母的 708 cm^{-1} 谱峰随压力增加有规律地向高频方向偏移, 与压力的增加呈明显的正相关性, 即 y (拉曼位移, cm^{-1}) = 0.523 8 x (压力, GPa) + 712.31, 相关系数 $R^2 = 0.965 6$, 并且该谱峰在压力 4.7 GPa 时消失, 这可能与多硅白云母中的 Si、Al 替代有关。羟基 3 618 cm^{-1} 谱峰则随压力增加向低频方向移动, 谱峰的降低与压力的增加呈明显的线性关系变化 ($y = -0.340 2 x + 3 617.8$, $R^2 = 0.966 2$) 并且强度随着压力的增加也在逐渐减弱, 在压力达 18 GPa 时开始消失, 推测该压力可能为多硅白云母在常温下脱羟基的极限压力。

关键词: 多硅白云母; 高压; 拉曼光谱; 相变

中图分类号: P578.959 O433

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2006)01-0071-06

A Raman spectroscopic study of phengite under high pressure

CAO Shu-hui, ZHANG Li-fei, SUN Qiang, ZHENG Hai-fei and CUI Guang-lai

(MOE Key Laboratory of Orogenic Belts and Crustal Evolution, School of Earth and Space Science, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: Within the diamond anvil cell, the Raman spectroscopic study of phengite was developed at room temperature and under various pressures from 1 atmp to 20 GPa. The authors analyzed the correlation of the modes 266, 708 and 3 618 cm^{-1} with the variation of pressure. The mode of 708 cm^{-1} increases linearly with the increase of pressure, i. e., y (Raman shift, cm^{-1}) = 0.523 8 x (pressure, GPa) + 712.31, and R^2 (correlation coefficient) = 0.965 6, and the mode disappears at 4.7 GPa as a result of substituting Si for Al. The mode of OH⁻ band and the intensity decrease linearly with the increase of pressure, i. e., $y = -0.340 2 x + 3 617.8$ and $R^2 = 0.966 2$, and the mode disappears at 18 GPa, which is assumed to be the maximum pressure for the dehydration of phengite at room temperature.

Key words: phengite; high pressure; Raman spectroscopy; phase transition

高温高压条件下含水矿物稳定性的研究是目前实验岩石学研究的前沿领域。通常认为, 含水硅酸盐矿物在俯冲带温压条件下的脱水是地质流体的主要来源, 是造成火山作用、中-深源地震的主要原因 (Kirby *et al.*, 1996; Brown, 2001)。因此, 这些含

水矿物高温高压条件下的实验数据对于建立含水矿物相的热、动力学模型, 探讨俯冲带中含水矿物的稳定性, 都具有重要意义。多硅白云母是俯冲带中最主要的含水硅酸盐矿物, 在化学成分上属介于白云母 $\text{KAl}_2[\text{AlSi}_3\text{O}_{10}](\text{OH})_2$ 和绿磷石 $\text{K}(\text{Mg}, \text{Fe}^{2+})$

收稿日期: 2005-04-01; 修订日期: 2005-05-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40325005, 40228003); 国家 973 项目“中国西部大陆深俯冲作用的研究”课题资助(G1999075508)

作者简介: 曹淑慧(1977-), 女, 硕士研究生, 矿物学、岩石学、矿床学专业, 通讯作者: 张立飞, E-mail: lfzhang@pku.edu.cn.

(Al Fe^{3+}] Si_4O_{10}] OH) $_2$ 间的类质同像系列。多硅白云母的分布十分普遍,从洋中脊玄武岩(MORB)到泥质沉积岩等各种岩石中都可以出现,可能为俯冲带深度从 110 km 到 300 km 主要的含 K 和含水(羟基水)矿物相(Schmidt, 1996)。目前,有关矿物在高压条件下的拉曼光谱特征及其与压力间相互关系的研究已成为矿物拉曼光谱学研究的重要方面,特别是有关地球内部常见造岩矿物如辉石、橄榄石、石榴石等的拉曼光谱研究(Chaplin *et al.*, 2000; Lin, 2001; Chopelas *et al.*, 2002)已开展了相当多的工作。虽然白云母类矿物的结构和拉曼光谱学都已有过深入的研究工作(Mckeown *et al.*, 1999; Wang *et al.*, 2002),但有关白云母类矿物在高压下的拉曼光谱却一直没有开展深入研究,尤其国内至今没有开展这方面的研究工作。本文首次利用金刚石压腔,在室温条件下测定了多硅白云母从常压到 20 GPa 的拉曼光谱变化特征,探讨了多硅白云母在高压下结构变化、羟基的稳定性及其可能的地质意义。

1 实验方法与装置

实验是在碳化硅压力腔体(Moissanite anvil cell)中进行的(Sun *et al.*, 2003)(图 1)。实验垫片为 0.2 mm 厚的钛片,样品孔直径为 0.3~0.4 mm,是通过电火花打孔(EDM)实验装置完成的。

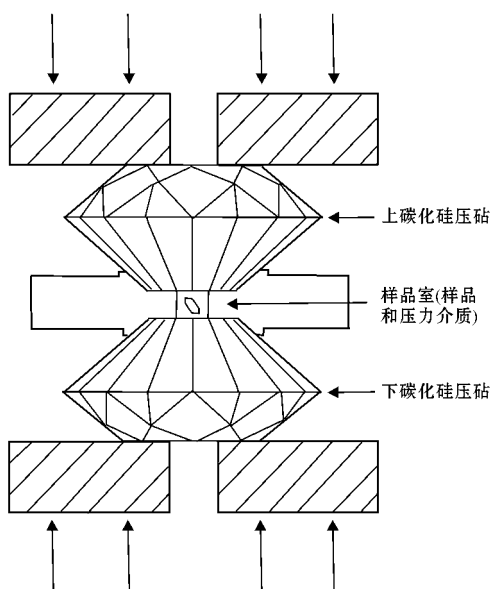


图 1 碳化硅压砧示意图(引自 Sun Qiang 等(2003))

Fig. 1 Sketch map of moissanite anvil cell

(from Sun Qiang *et al.*, 2003)

实验温度为 290 K,样品来自柴北缘榴辉岩中的多硅白云母,经电子探针测定样品的化学成分,并将其换算成化学式为 $\text{K}_{0.692}\text{Na}_{0.051}\text{Ca}_{0.002}(\text{Al}_{1.568}\text{Mg}_{0.378}\text{Fe}_{0.107})\text{Al}_{0.563}\text{Si}_{3.437}\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ 。实验过程中的压力是根据红宝石荧光 R1 强线的偏移确定的。为了获得静态压力分布,实验中选用硅油(silicone fluid)作为压力介质(Ragan *et al.*, 1996),在每次施加压力进行拉曼光谱测试前,均保持实验装置恒定 1 min,以获得实验体系的静态压力分布。

拉曼光谱测试是在北京大学地球与空间科学学院的显微图像、物相分析教学实验室中的 Renishaw1000 共聚焦显微拉曼成像系统上进行的,光源为 Ar^+ 等离子激光,波长 514.5 nm,强度 25 mW,扫描次数 1,收集时间 20 s,光谱分辨率为 $\pm 1\text{ cm}^{-1}$ 。

2 实验结果与讨论

2.1 常温常压下的拉曼光谱

白云母的晶体结构如图 2 所示,其简正振动模式为 $28\text{Ag} + 29\text{Bg} + 28\text{Au} + 29\text{Bu}$,其中,Ag 和 Bg 为 Raman 活性,Au 和 Bu 为红外活性(Mckeown *et al.*, 1999)。表 1 为 50 倍偏光显微镜下多硅白云母、金刚石压腔中多硅白云母和理论计算白云母的谱峰位置的对比数据(Mckeown *et al.*, 1999)。可以看出,196、267、376、427、708、1 094 和 $1\ 124\text{ cm}^{-1}$ 谱峰分别与理论值的 193、272、380、440、702、836、1 097 和 $1\ 118\text{ cm}^{-1}$ 位置处的谱峰位置大致一致,只有 905 和 917 cm^{-1} 与理论计算的 888 和 970 cm^{-1} 位置谱峰差别较大。导致实测谱峰与理论谱峰不能完全重合的原因可能是样品矿物成分与标样的矿物成分有差异造成的。由于高压装置中上下压力顶砧的影响,实验中只测试到 266 和 708 cm^{-1} 谱峰。此外,还观测到了 $3\ 618\text{ cm}^{-1}$ 位置的 OH 峰(理论计算值只给出较低波数位置的谱峰)。

Wang 等(2002)认为, 600 cm^{-1} 波数以下谱峰振动与阳离子交换及较长波长的晶格振动有关,故不能对 266 cm^{-1} 谱峰进行准确指认, $600\sim 800\text{ cm}^{-1}$ 位置的谱峰为 $\text{Si}-\text{O}_{\text{br}}-\text{Si}$ 四面体伸缩和弯曲振动所致,由于该区域的振动与晶格振动相分离,能提供结构信息,且强度一般都很强,故很容易指认;而 $800\sim 1200\text{ cm}^{-1}$ 以上的高波数谱峰振动是与硅酸盐矿物四面体中 $\text{Si}-\text{O}_{\text{nb}}$ 非桥氧的伸缩振动有关; $3\ 000\sim 3\ 800\text{ cm}^{-1}$ 区域为羟基的伸缩振动;徐培苍

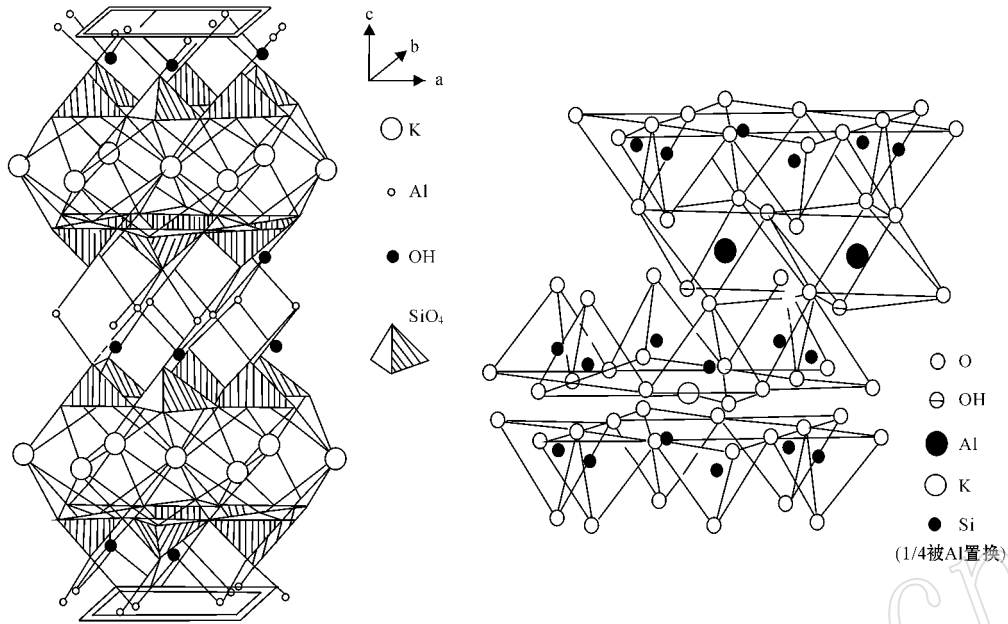


图 2 白云母的晶体结构(潘兆麟等,1994)

Fig.2 Crystal structure of muscovite(from Pan Zhaolu *et al.* ,1994)

表 1 常温常压下多硅白云母拉曼谱峰对比及谱峰指认

Table 1 Comparison of ambient Raman frequencies at room temperature and pressure and mode assignment

理论计算	50 倍镜下	压腔中	振动模式
1			
36			
55			
83			
126			
177			
193	196		
214			
272	267	266	与晶格振动及阳离子交换有关
274			
304			
315			
380	376		
394			
440	427		
540			
568			
573			
659			
702	708	708	与 Si—O _{br} —Si 伸缩和弯曲振动及 M2—O 伸缩振动有关
754			
820			
836	847		
888	905		
970	917		与 Si—O _{nb} 伸缩振动有关
1 023			
1 097	1 094		
1 118	1 124		
	3 618	3 618	与 OH 伸缩振动有关

等 1996)认为在整个硅酸盐系列的拉曼谱中, Si—O_{nb} 的伸缩振动频谱在 800~1 250 cm⁻¹ 之间, Si—O_{br}—Si 的反对称伸缩加弯曲振动频谱在 450~760 cm⁻¹ 之间, 并随着[SiO₄]由孤立→二聚体→环→链→层→架状结构的变化, Si—O_{nb} 的伸缩振动由 850 cm⁻¹ 逐渐增大到 1 250 cm⁻¹, 而 Si—O_{br}—Si 的弯曲振动从 760 cm⁻¹ 逐渐减少到 467 cm⁻¹ (石英)。最近 McKeown 等(1999)通过详细的拉曼分析和理论计算, 认为二八面体白云母的 708 cm⁻¹ 谱峰除了具有 Si—O_{br}—Si 四面体伸缩和弯曲振动模式外, 还与 M2 位置 Al—O 桥氧键的伸缩振动有关。3 618 cm⁻¹ 位置为羟基的伸缩振动(Cliff *et al.* , 2002)。

2.2 拉曼谱峰与压力的相关性

本实验是在常温条件下进行的, 采集了压力从常压到 20 GPa 多硅白云母的拉曼谱峰。从图 3a 可以看出, 随着压力的增加, 266 cm⁻¹ 谱峰的位置没有发生明显的变化, 而 708 cm⁻¹ 谱峰则随压力增加向高频方向发生偏移, 且谱峰的强度逐渐减弱, 逐渐变得平缓, 当压力到达约 3.6 GPa 时谱峰变得很弱, 已无法进行拟合, 之后加压的过程中, 平缓的 708 cm⁻¹ 峰仍然没有发生明显的可观测到的变化, 直到 4.7 GPa 时消失。3 618 cm⁻¹ 谱峰随压力增加向低频方向偏移(图 3b), 这与 Holtzet 等(1993)研究 2:1 型二八面体矿物(白云母和珍珠云母)的羟基位置与压力呈负相关是一致的。羟基峰随压力增加, 强度也相应

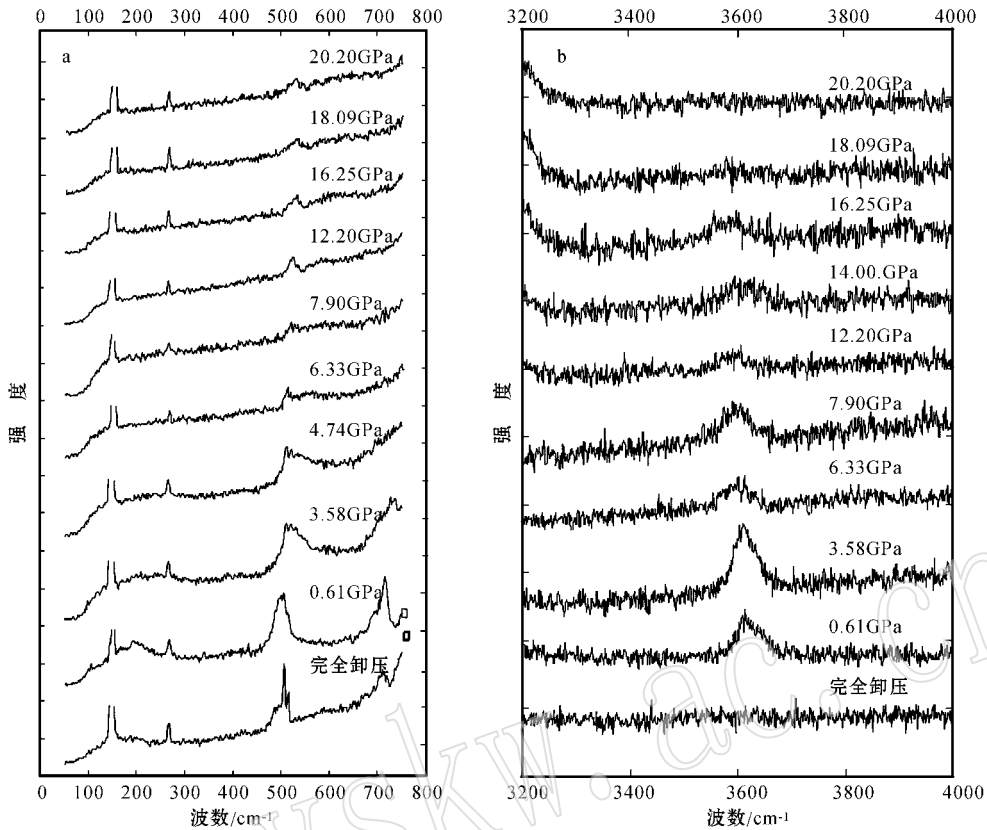


图 3 多硅白云母高压下的拉曼光谱

Fig. 3 Selected Raman spectra of phengite as a function of increasing pressure at room temperature

有所变弱,在压力约 14 GPa 时,谱峰的峰形变得平缓,强度也变得很弱,很难再进行拟合,压力到达 18 GPa 时,已看不到羟基峰;由图 3 可以看出,卸压后 266 cm^{-1} 谱峰仍然能够还原(由于实验装置的限制,卸压过程不能逐步进行,只能获得完全卸压后的实验数据);而 708 cm^{-1} 和 3618 cm^{-1} 谱峰能够恢复到加压前谱峰的位置,说明谱峰的消失并不是非晶质化引起,但其峰形不如加压前好,强度也不如加压前强,原因可能是卸压时间短,样品还未完全复原,也可能是多硅白云母的结构发生部分调整,且该过程不是完全可逆。在加压的整个过程中没有出现新谱峰。

为了具体地反映这种加压导致谱峰位置的变化,将拉曼谱峰进行高斯拟合,得到波数、压力数值(表 2),并绘成波数-压力关系图(图 4)。

可以看到 3618 cm^{-1} 谱峰随压力增加向低频方向偏移,其拉曼偏移量与压力的相关性使用线性回归较适合,如图 4a,拟合公式为: $y = -0.3402x + 3617.8$, $R^2 = 0.9662$;如图 4b 所示, 708 cm^{-1} 谱峰则随压力增加有规律地向高频方向偏移,与压力的相关性通过线性拟合得到: $y = 0.5238x + 712.31$,

相关系数 R^2 为 0.9656, 266 cm^{-1} 谱峰随压力的增加,其波数并不发生大的变化,而是在 266 cm^{-1} 上下波动(图 4c)。从图 4 可以看出在加压的整个过程中 3 个谱峰与压力的相关趋势都没有发生突变。

2.3 讨论

266 cm^{-1} 位置谱峰与晶格的平动密切相关 (McKeown *et al.*, 1999),在加压过程中谱峰位置和强度都没有发生大的变化,这表明多硅白云母在加压范围内晶体结构没有发生大的变化。 708 cm^{-1} 谱峰为 $\text{Si}-\text{O}_{\text{br}}-\text{Si}$ 弯曲振动,随着压力增加向高频方向线性变化,这与其他矿物如透辉石在室温下的金刚石压腔中观测到的 $\text{Si}-\text{O}_{\text{br}}-\text{Si}$ 振动是一致的 (Chopelas *et al.*, 2002),表明随着压力的增加向高频方向移动,与理论计算也是一致的。但在加压的过程中, 708 cm^{-1} 谱峰在 3.6 GPa 时谱峰已经很弱,无法拟合,在 4.7 GPa 时消失,消失后并没有新的谱峰出现,且 266 cm^{-1} 和 3618 cm^{-1} 谱峰的趋势也没有发生突变,这说明在该处多硅白云母的结构对称性 ($\text{Si}-\text{O}_{\text{br}}-\text{Si}$ 键) 和含水性都没有发生明显的改变,对此笔者的解释是多硅白云母在这样的压力条

表 2 不同压力下多硅白云母的拉曼谱峰

Gauss 函数拟合结果

Table 2 Gaussian data of selected Raman bands of phengite dependent on pressures

红宝石波数	压力/GPa	266 cm^{-1}	3 618 cm^{-1}	708 cm^{-1}	
1	5 034.2	0.292 16	265.12	3 615.3	712.11
2	5 034.9	0.385 12	265.65	3 616.9	713.06
3	5 036.6	0.610 88	267.2	3 615.3	715.22
4	5 037.6	0.743 68	267.43	3 614.5	716.55
5	5 038.5	0.863 20	266.88	3 615.5	717.17
6	5 040.1	1.075 68	268.48	3 615.1	718.6
8	5 042.2	1.354 56	267.08	3 612.5	721.31
9	5 048	2.124 8	266.66	3 611.3	724
10	5 049.5	2.324 0	267.96	3 611.9	724.46
11	5 050	2.390 4	266.68	3 611	726.83
12	5 051.5	2.589 6	266.7	3 609	725.74
13	5 052.6	2.735 68	266.95	3 610.9	727.39
14	5 056.2	3.213 76	266.95	3 611.1	728.27
15	5 057.1	3.333 28	266.72	3 610.8	728.06
16	5 059.1	3.598 88	266.68	3 608.5	730.7
18	5 059	3.585 6	266.87	3 607.1	
20	5 061	3.851 2	266.49	3 604.7	
21	5 062.2	4.010 56	268.06		
22	5 063.9	4.236 32	265.58	3 602.7	
23	5 067.1	4.661 28	265.87		
24	5 067.7	4.740 96	266.9	3 599.8	
25	5 071	5.179 2	266.64	3 596.7	
26	5 073.5	5.511 2	266.31	3 598	
27	5 074.5	5.644 0	265.28	3 591.8	
28	5 074.5	5.644 0	267.8	3 597.6	
29	5 076.2	5.869 76	266.64		
30	5 077.2	6.002 56		3 593.7	
31	5 079.7	6.334 56	267.34	3 594.1	
32	5 091.5	7.901 60	266.78	3 584.1	
33	5 112.2	10.650 56	267.06	3 582.1	
34	5 113.7	10.849 76	266.84	3 582.3	
35	5 124.6	12.297 28	266.85	3 575.9	
36	5 124.7	12.310 56	267.02	3 577	
37	5 136.4	13.864 32	266.84	3 573.1	
38	5 137.4	13.997 12	266.73	3 572.6	
39	5 140.4	14.395 52	266.76		
40	5 140.6	14.422 08	266.35		
41	5 140.8	14.448 64	266.13		
42	5 145.3	15.046 24	266.22		
43	5 154.4	16.254 72	266.01		
45	5 163.6	17.476 48	264.1		
48	5 168.2	18.087 36	266.58		
49	5 173.7	18.817 76	265.96		
50	5 173.9	18.844 32	265.76		
51	5 174.5	18.924 00	266.43		
52	5 174.6	18.937 28	266.93		
53	5 175	18.990 40	267.11		
54	5 178.1	19.402 08	266.59		
55	5 184.1	20.198 88	266.46		

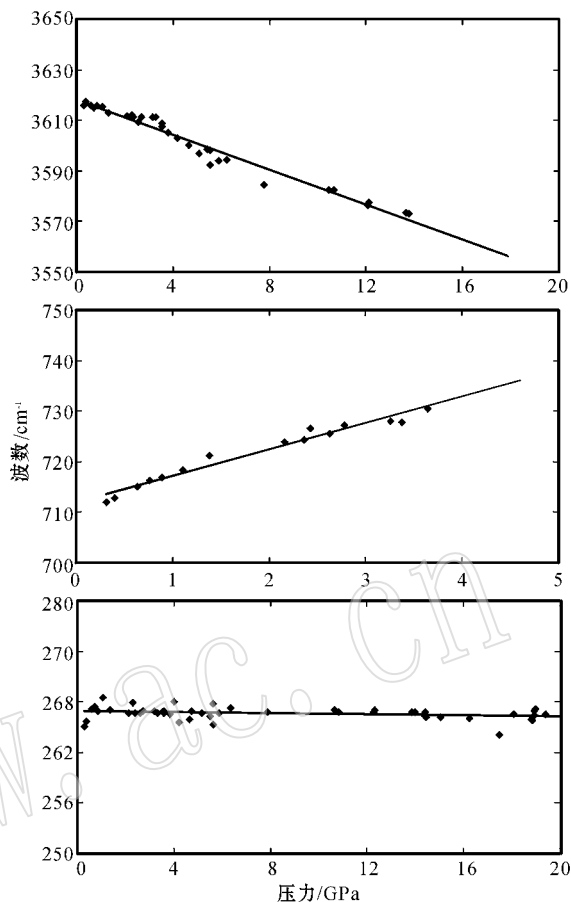


图 4 多硅白云母波数与压力的相关图

Fig. 4 Pressure dependence of the Raman modes of phengite

件下, M2 位置 Al—O 桥氧键中由于 $\text{Si}^{4+} + \text{Mg}^{2+} = 2\text{Al}^{3+}$ 的替代发生较大程度的改变所致, 这可能指示实验样品多硅白云母中的 Si、Al 替代的最大限度。据多硅白云母的实验研究, 在 5.5 GPa 时, 多硅白云母中的 Si 含量为 3.65 pfu; 在 11 GPa 时, 多硅白云母 Si 含量为 3.81 pfu (Domanik *et al.*, 1996), 在目前实验压力为 4.7 GPa 条件下, 多硅白云母中的 Si 含量至少应在 3.50 pfu 以上, 但目前实验用样品的 Si 含量却只有 3.347 pfu, 故 708 cm^{-1} 谱峰消失。这说明多硅白云母的 708 cm^{-1} 谱峰可能具有压力变化的指示意义。对于 $3 618 \text{ cm}^{-1}$ 谱峰, 在压力约 14 GPa 处, 谱峰的峰形变得平缓, 强度也变得很弱, 在压力约 18 GPa 时(开始消失)该谱峰已看不到, 表明羟基开始脱离, 但直到压力达 20 GPa 时也没有新的谱峰出现, 并且其间 266 cm^{-1} 谱峰也没有发生明显的变化, 说明虽然多硅白云母在该处开始发生脱水反应, 但其整体的晶体结构和对称性都没有发生大的变化。这表明 18 GPa 处可能为多硅白云母脱羟

基的极限压力。如果在一定的温度条件下,使得多硅白云母的活化能增加,便会出现白云母由于脱水而导致整个晶体结构发生相变,因此可以推断 18 GPa 的压力可能是多硅白云母的极限压力,即在板块俯冲带中,随着俯冲深度的增加,温度压力都在增加的情况下,多硅白云母最大的稳定压力应低于 18 GPa。目前实验岩石学的研究表明,在俯冲洋壳中(玄武岩 NCMASH 体系)多硅白云母的稳定上限由反应(多硅白云母 = K-hollandite + 水)确定,这个反应的斜率近于平行温度轴,其稳定压力在 10 GPa 左右(Schmidt *et al.*, 1998)。

3 结论

(1) 实验测得了常温条件下多硅白云母从常压到 20 GPa 条件下的拉曼谱峰,在压力不断增加的过程中各谱峰的变化特点为: 266 cm^{-1} 谱峰峰形没有发生明显的变化,谱峰位置围绕 266 cm^{-1} 上下波动,强度变化无明显规律性; 708 cm^{-1} 峰向高频方向有规律地移动,强度逐渐减弱,峰形逐渐变差,且在压力低于 4.7 GPa 的条件下,压力与波数呈明显的线性相关性,其拟合公式为: $y = 0.5238x + 712.31$, $R^2 = 0.9656$,可能是与多硅白云母中 Si、Al 替代有关,因此可以进一步考虑作为多硅白云母压力的指示; 3 618 cm^{-1} 谱峰随压力增加向低频方向移动,强度逐渐减弱,峰的对称性逐渐变差,压力与波数相关性经二次拟合得 $y = -0.3402x + 3617.8$, $R^2 = 0.9662$ 。

(2) 708 cm^{-1} 谱峰与压力间具有明显的线性变化关系,并在压力约为 4.7 GPa 时消失,但在随着压力增加并没有发现新谱峰的出现,表明是多硅白云母中 Si、Al 替代所致; 3 618 cm^{-1} 谱峰约在压力为 18 GPa 时消失,直到压力到达 20 GPa 也没有新谱峰出现。在加压的过程中,虽然 708 cm^{-1} 和 3 618 cm^{-1} 峰都消失了,但是 266 cm^{-1} 谱峰始终存在,且谱峰位置和趋势都无大的变化,因此可以说明多硅白云母并没有发生相变,还稳定存在。压力为 18 GPa 时已看不到羟基,说明该压力可能为脱羟基的极限压力。

致谢 本工作为国家自然科学基金资助(40325005, 40228003)和国家 973 项目的“中国西部大陆深俯冲作用的探究”课题(G1999075508)联合资助。工作中曾得到任景秋老师的帮助,在此致谢!

Reference

Brown M. 2001. From microscope to mountain belt: 150 year of petrolo-

gy and its contribution to understanding geodynamics, particularly the tectonics of orogens[J]. *Journal of Geodynamics*, 32: 115 ~ 164.

Chaplin T D, Ross N L and Reynard B. 2000. A high-temperature and high-pressure Raman spectroscopic study of CaGeO_3 garnet[J]. *Phys. Chem. Minerals*, 27: 213 ~ 219.

Chopelas A and Serghiou G. 2002. Spectroscopic evidence for pressure-induced phase transitions in diopside[J]. *Phys. Chem. Minerals*, 29: 403 ~ 408.

Cliff T, Johnston and Wang S. 2002. Novel pressure-induced phase transformation in hydrous layered materials[J]. *Geophysical Research Letters*, 29, NO. 0, 10. 1029.

Domanik K D and Holloway J R. 1996. The stability and composition of phengitic muscovite and associated phases from 5.5 to 11 GPa: Implication for deeply subducted sediments[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 60(21): 4 133 ~ 4 150.

Holtz M, Solin S A and Pinnavaia T J. 1993. Effect of pressure on the Raman vibrational modes of layered aluminosilicate compounds[J]. *Physical review*, 48: 312 ~ 317.

Kirby S, Engdahl E R and Denlinger R. 1996. Intermediate-depth intraslab earthquakes and arc volcanism as physical expressions of crustal and uppermost mantle metamorphism in subducting slabs[J]. *American Geophysical Union*, 195 ~ 214.

Lin C C. 2001. High-pressure Raman spectroscopic study of Co- and Ni-olivines[J]. *Phys. Chem. Minerals*, 28: 249 ~ 257.

Mckeown D A, Bell M I and Edgar S E. 1999. Vibrational analysis of the dioctahedral mica: 2M1 muscovite[J]. *American Mineralogist*, 84: 1 041 ~ 1 048.

Pan Zhaolu, Zhao Aixing and Pan Tiehong. 1994. Crystallography and Mineralogy[M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).

Sun Qiang, Zheng Haifei, Xu Ji'an, *et al.* 2003. Raman spectroscopic studies of the stretching band from water up to 6 kbar at 290 K[J]. *Chemical Physics Letters*, 379: 427 ~ 431.

Ragan D D and Clarke D R. 1996. Silicone fluid as a high-pressure medium in diamond anvil cells[J]. *Review of Scientific Instruments*, 67(2): 494 ~ 496.

Schmidt M W. 1996. Experimental constraints on recycling of potassium from subducted ocean crust[J]. *Science*, 272: 1 927 ~ 1 930.

Schmidt M W and Poli S. 1998. Experimentally based water budgets for dehydrating slabs and consequences for arc magma generation[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 163: 361 ~ 379.

Wang A, Freeman J, Kuebler K E, *et al.* 2002. Raman spectroscopic characterization of phyllosilicates[J]. *Lunar and Planetary Science XXXIII*, 1 374.

Xu Peicang, Li Rubi, Wang Yongqiang, *et al.* 1996. Raman Spectroscopic of Earth Science[M]. Xi'an: Science and Technology Press of Shaanxi (in Chinese).

附中文参考文献

潘兆橹, 赵爱醒, 潘铁虹. 1994. 结晶学及矿物学[M]. 北京: 地质出版社.

徐培苍, 李如璧, 王永强, 等. 1996. 地学中的拉曼光谱[M]. 西安: 陕西科学技术出版社.