

高压白云母中过剩氩的成因研究进展

陈文^{1,2)} 张彦¹⁾ 王清利¹⁾ 刘新宇¹⁾

1) 国土资源部同位素地质重点实验室, 中国地质科学院地质研究所, 北京, 100037;

2) 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京, 100029

摘要 高压白云母中过剩氩成因研究目前已经取得了如下进展: ① 已经将高压白云母中过剩氩的来源限定为由流体输送和由母岩继承两种; ② 高压白云母中过剩氩的赋存和矿物的 $Mg/(Fe+Mg)$ 比值、 Si^{4+} 含量及矿物的显微结构有关; ③ 初步认定高压白云母中过剩氩的赋存和岩性有关: 榴辉岩中的白云母含过剩氩最多, 高压副片麻岩中白云母仍含有少量过剩氩, 高压正片麻岩中白云母不含过剩氩。

关键词 高压白云母 过剩氩 成因

Major Advances in the Research on the Genesis of Excess Argon in High Pressure Muscovite

CHEN Wen^{1,2)} ZHANG Yan¹⁾ WANG Qingli¹⁾ LIU Xinyu¹⁾

1) *Institute of Geology, CAGS, Beijing, 100037;* 2) *Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100029*

Abstract Recent achievements in researches on the genesis of excess argon in high pressure muscovite are summarized as follows. ① Excess argon in high pressure muscovite comes from its country rock, derived either from fluid transportation or from inheritance. ② Excess argon in high pressure muscovite is related to the ratio of $Mg/(Fe+Mg)$, Si^{4+} content and microstructure of minerals. ③ the high pressure muscovite in eclogite contains large amounts of excess argon, that in high pressure paragneiss contains small amounts of excess argon, and that in high pressure orthogneiss contains no excess argon.

Key words high pressure muscovite excess argon genesis

很长一段时间内, 白云母是用作 $K-Ar$ 或 $^{40}Ar/^{39}Ar$ 定年的常用矿物。这不仅因为它有高的钾含量, 也因为它对放射成因氩有着良好的保存性。然而, 近年来国内外学者对全球范围内含有柯石英或金刚石的榴辉岩进行年代学研究时, 常常发现其中的白云母 $^{40}Ar/^{39}Ar$ 年龄异常地高于 $Sm-Nd$ 、 $U-Pb$ 、 $Rb-Sr$ 年龄 (Li 等, 1994; Hacker 等, 1995; Scaillet 等, 1996; Ruffet, 1997)。他们正确地指出了这是因为高压成因白云母中含有过剩氩所致, 但并没有给出过剩氩的校正方法, 更没有指出过剩氩的成因。陈道公 (1994) 通过高温高压下黑云母氩扩散研究推测在某种低温高压条件下, 氩有可能进行从介质到矿物的反向扩散, 使矿物获得过剩氩。这一研究结果带来了有益的启示, 但同时也带来了疑问: 为什么

在同样的低温高压条件下有些矿物颗粒含有过剩氩有些却不含? 显然, 矿物中过剩氩的成因另有关键性的控制因素。而用常规的研究手段已经无法进行更进一步的深入研究。

20 世纪 90 年代以来, 随着激光微区 $^{40}Ar/^{39}Ar$ 定年分析技术的成熟, 国内外有些科学家尝试用这一方法结合矿物的电子探针成分分析和矿物显微结构分析来探讨过剩氩的来源及其在矿物中的分布机制, 以期寻找过剩氩的分布和矿物主元素成分及矿物显微结构之间的关系, 并取得了一系列进展。

1 国外研究进展

Scaillet (1992) 在研究位于意大利境内阿尔卑斯山西部的 Dor&Maira 推覆体时发现, 部分白云母的

本文由国家重点基础研究发展规划项目 (编号: 2002CB2610、2001CB409807)、国家自然科学基金项目 (编号: 40373033) 和中国地质调查局项目 (编号: 1212010560901) 资助。

改回日期: 2005-08-18; 责任编辑: 宫月堂。

第一作者: 陈文, 男, 1962 年生, 研究员, 从事同位素年代学研究; E-mail: chenwenf@vip.sina.com。

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 全熔年龄数据和以前大量发表的遍及整个阿尔卑斯山的晚始新世年龄数据相吻合。而另一部分多硅白云母却表现出明显的氩同位素不和谐性: ①集合体矿物的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄谱呈上凸谱型; ②单颗粒矿物激光 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄谱受扰动; ③在一个面积约 2 mm^2 的白云母颗粒上, 垂直其(001)面进行了10个激光显微探针 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 点熔年龄分

析, 年龄值呈分散分布: 年龄最大值为 129.2 Ma , 年龄最小值仅为 55.8 Ma , 二者相差2倍多(图1a)。在另一颗面积稍小的白云母片上, 垂直其(001)面进行了5个激光显微探针 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 点熔年龄分析, 结果从云母中心向边缘, 年龄值呈辐射状有规则递减, 核部高达 108.5 Ma , 边部最小年龄仅为 75.4 Ma (图1b); ④在同一岩石光片上, 不同云母颗粒

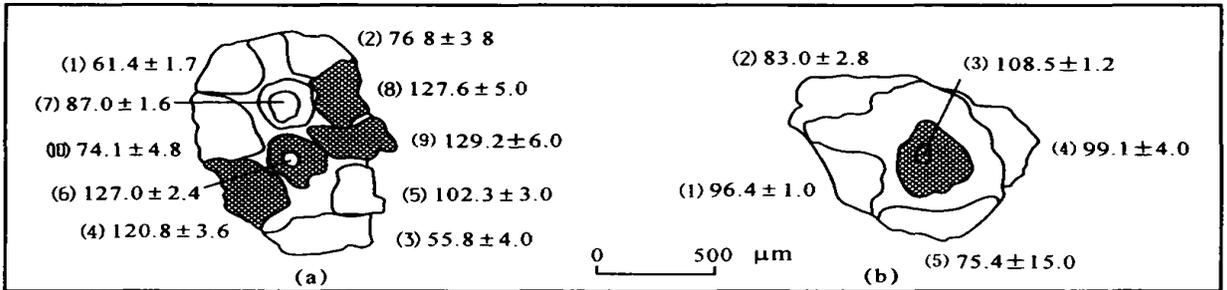


图1 (a, b) 单个高压白云母颗粒激光 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 点熔年龄分布图(据 Scaillet 等, 1992)

Fig. 1 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ spot analytical data on individual single grains from (a, b) the high pressure white mica (after Scaillet et al., 1992)

图中括号内数字表示激光分析编号; 括号边数字表示相应的年龄; 单位为 Ma; 大于 105 Ma 的激光点熔年龄区域用浅灰色表示
Each age is quoted with the respective sequential number of laser analysis (in brackets). The spot ages greater than 105 Ma are marked in light grey to illustrate the apparent age geometry across the grains

间年龄变化较大; ⑤时代相同但不同岩性中的白云母其年龄值差别较大。

为了解释上述现象, Scaillet 对用于年龄分析的白云母进行了电子探针成分分析, 结果表明, 多硅白云母中 Mg/Fe 比值控制着氩(包括过剩氩)的保存能力。在 $[(\text{Mg}, \text{Fe})\text{Si}-\text{Al}]$ 晶格中由于阳离子置换(Mg 置换 Fe)产生的扩散转移是引起颗粒内部氩同位素扰动的主要原因。在高硅($\text{Si}^{4+} \approx 3.5\text{ Pfu}$)、富铁 $[\text{Mg}/(\text{Mg} + \text{Fe}) = 0.10 - 0.55]$ 的正片麻岩中, 多硅白云母得出了 $40 \sim 35\text{ Ma}$ 的均一激光 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 坪年龄和激光点熔年龄, 这些年龄和区域内已有同位素年龄及区域地质事件很好地吻合。而在富镁白云母片岩中, 同样是 Si^{4+} 约为 3.5 Pfu 而 $\text{Mg}/(\text{Mg} + \text{Fe})$ 约为 0.90 的多硅白云母给出了 $58.6 \sim 174.7\text{ Ma}$ 的强烈分散而又无地质意义的高年龄值, 显示过剩氩的赋存和 $\text{Mg}/(\text{Mg} + \text{Fe})$ 有着正相关关系。这一研究初步揭示了过剩氩的存在和矿物成分之间的关系。

1996年, Scaillet 进一步研究了Dora-Maira 榴辉岩中的多硅白云母, 研究了其中的过剩氩的运移范围、运移机理和来源。同样地运用激光显微探针 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 点熔测年技术在毫米级单颗粒白云母上

发现了年龄值从中心向外同轴辐射递减的图形, 中心最老为 321.6 Ma , 边部最年轻处为 285.0 Ma , 表明了过剩氩的组分是在矿物结晶的早期阶段被捕获的, 在后来的绿片岩相热脉冲期间因体积扩散而再活动。通过建立颗粒范围和相应的氩分级丢失之间的数学模型证实了在高压变质作用期间白云母中存在着局部的厘米级的氩同位素梯度。这表明, 在这种岩性的白云母中, 在没有流体加入的干变质条件下, 仅靠体积扩散带来的同位素扩散距离是很有限的。关于过剩氩的来源, Scaillet 通过构造岩石学方面的研究提出了一个内部同位素缓冲模型, 证明了过剩氩起源于内部, 即来自榴辉岩本身。

Ruffet (1995, 1997) 在对位于阿尔卑斯西部的Sesia 高压变质带进行研究时也发现了多硅白云母中过剩氩的存在。他在用常规阶段升温 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 法、激光微区阶段升温 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 法和激光显微探针 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 点熔法对榴辉岩相变质岩中晚始新世期的多硅白云母进行年龄分析后得发现在白云母的坪年龄和其变形之间存在相关性: 变形最弱的样品给出了最年轻的年龄, 而变形最强的样品却给出了最老的年龄。他认为, 这一现象证实了流体在输送过剩氩进入白云母中扮演了重要角色: 在榴辉岩相变

质峰期因围岩和矿物去气作用而富集了 ^{40}Ar 的流体循环进入岩石中,在K-Ar系统封闭之前,随着变形的发展,流体相被捕获充填在多硅白云母因扭结和弯曲作用而产生的膨胀裂隙中,与此同时同位素系统封闭。榴辉岩相条件下的低循环的流体相在冷却期间可保存高的 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 值直到K-Ar系统封闭。

Boundy(1997)用激光显微探针 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 测年技术结合电子探针成分分析和透射电镜结构分析对挪威西部加里东变质带中Hopsnøy岛榴辉岩相剪切带的高压白云母进行了研究,结果表明,局部共生的白云母和钠质云母是出溶关系,正是在钠质白云母成分增长的过程中成分多变的流体介质带来了过剩 ^{40}Ar 的混入。

2 国内研究进展

在中国的中、东部的大别-苏鲁地区,沿东西向展布的中朝和扬子板块缝合带分布着兰片岩和含柯石英、金刚石的超高压榴辉岩。大量的Sm-Nd和锆石U-Pb年龄证明超高压变质作用发生在三叠纪(Li等,1993,1994,2000;Wang等,1989;李曙光等,1992;Hacker等,1998;Ames等,1996;Rowley等,1997;Chavagnac等,1996)。然而,Mattauer等(1991)认为榴辉岩形成于晚元古代,其依据就是从榴辉岩中得到的白云母的500~700 Ma的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄。其后,Li等(1994)综合应用 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 、Sm-Nd、U-Pb等多种方法对苏北青龙山含柯石英榴辉岩进行了年龄测定,结果发现白云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄(约900 Ma)远高于Sm-Nd、U-Pb年龄(约226 Ma),表明高压白云母中含有大量过剩氩。王松山在碧溪岭榴辉岩和横冲榴辉岩的白云母中测定出528 Ma和825 Ma的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄(Wang,1998),计算出其中的过剩氩含量超过50%;Giorgis等(2000)也对青龙山榴辉岩中的白云母进行了详细的紫外激光 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 微区测年研究,揭示了从云母中心表面年龄高达1100 Ma到边部400 Ma的过剩氩扩散环带。Hacker等(1995)分析了大别山榴辉岩的围岩高压副片麻岩中的高压白云母,5个样品的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 等时线年龄在178~225 Ma之间,年龄值已很接近Rb-Sr等时线年龄,但仍含有少量过剩氩。陈文对中国西部昆仑造山带正片麻岩及苏鲁地区榴辉岩的围岩高压正片麻岩进行了年代学研究,发现其中高压白云母的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄和区域地质年龄很好的吻合,表明其中不含过剩氩(Chen等,1996;陈文等,2003)。

3 取得的主要成果

总结国内外关于高压白云母中过剩氩成因研究结果,目前已经取得了如下成果:

(1)关于高压变质成因白云母中过剩氩的来源,以前争论颇多,现在已将其限定为两种:由流体输送过剩氩(外部来源)和由母岩继承过剩氩(内部来源)。

(2)含有过剩氩的高压白云母存在年龄梯度,年龄值从中心向外同轴辐射递减,中心最老,边部最年轻。

(3)高压白云母中过剩氩的赋存和矿物的Mg/(Fe+Mg)比值、 Si^{4+} 含量及矿物的显微结构有关。

(4)初步认定高压白云母中过剩氩的赋存和岩性有关:①榴辉岩中的白云母含过剩氩最多因而 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄最老;②高压副片麻岩(榴辉岩的围岩)中白云母的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄要低得多,但仍含有过剩氩;③高压正片麻岩(榴辉岩的围岩)中白云母的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄和区域地质年龄很好的吻合,表明其中不含过剩氩。

4 存在的主要问题及研究展望

国际上在高压白云母过剩氩成因研究方面取得了很大的进展,但依然没有解决如下问题:

(1)高压白云母中的过剩氩究竟是从哪里来的?目前,有内部来源(内部继承过剩氩)和外部来源(由流体输送过剩氩)两种争论。

(2)为什么高压-超高压变质岩中的白云母较其他岩石中的白云母更容易捕获过剩氩?

(3)为什么高压白云母中有些含有过剩氩有些却不含过剩氩?

(4)已经证明高压白云母过剩氩的赋存和矿物的Mg/(Fe+Mg)、 Si^{4+} 含量有关,但这几种成分中哪种对过剩氩的赋存起主要作用仍然无法确定。

(5)高压白云母中过剩氩的存在和其他主元素是否存在相关关系仍有待继续研究。

由于开展此项研究对实验条件的要求极高:要有好的激光微区 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 实验室,好的电子探针实验室及透射电子显微镜,并且在一个毫米级的单颗粒矿物上要同时开展上述多项研究,难度极大。因此,国际上只有少数几个实验室在开展这方面的研究,研究结果尚未能发现带有普遍规律性的认识。

此前,虽然我国科学家在高压白云母中发现了过剩氩的存在并被国际地质年代学界普遍接受,但

在过剩氩成因研究方面并没有取得能够引起国际同行强烈关注的成果,主要原因是实验条件简陋。进入本世纪以来,国内陆续或即将引进高精度稀有气体质谱计、紫外激光器、高分辨率透射电子显微镜和电子探针仪等仪器,为我国科学工作者在过剩氩成因研究这一同位素基础理论研究领域取得突破奠定了坚实物质基础。相信在不久的将来,我国的同位素地质研究者能够通过定位的激光微区 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年分析,结合矿物的电子探针成分分析和矿物显微结构分析来探讨过剩氩在高压白云母中赋存的主要控制因素,并将研究结果与国外同行在阿尔卑斯等地的研究结果相对比,确定过剩氩在高压白云母中赋存和迁移的更带有普遍性的规律,发展出一种简单的判别高压白云母中是否有过剩氩存在的方法,从而为同位素地质基础理论研究做出贡献。

参考文献

- 陈道公,贾明明,李彬贤等. 1994. 高温高压下黑云母氩扩散研究. 中国科学(B辑), 24(2): 194~201.
- 陈文,李曙光,张彦等. 2003. 苏鲁超高压变质带东海青龙山高压正片麻岩中白云母的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代学研究. 地质论评, 49(5): 537~543.
- 李曙光,刘得良,陈移之等. 1992. 大别山南部含柯石英榴辉岩的Sm-Nd年龄. 科学通报, 37(6): 432.

References

- Ames L, Zhong G, Xiang B. 1996. Geochronology and isotopic character of ultrahigh-pressure metamorphism with implications for collision of the Sino-Korea and Yangtze cratons. *Central China. Tectonics*, 15: 472~489.
- Boudry T M, Hall C M, Li G. 1997. Fine-scale isotopic heterogeneities and fluids in the deep crust: a $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ laser ablation and TEM study of muscovites from a granulite-eclogite transition zone. *E. P. S. L.*, 148: 223~242.
- Chavagnac V, Jahn B M. 1996. Coesite-bearing eclogites from the Bixiling complex, Dabie Mountains, China: Sm-Nd ages, geochemical characteristics and tectonic implications. *Chem. Geol.*, 133: 29~51.
- Chen D G, Jia M M, Li B X et al. 1994. Study of the argon distribution in high pressure and high temperature. *Scientia Sinica (D)*, 24(2): 194~201 (in Chinese with English abstract).
- Chen Wen, Li Shuguang, Zhang Yan. 2003. Study of the $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age and Ar isotope distribution of muscovite in high pressure orthogneiss (the surrounding rock of the Qinglongshan eclogite). *Geological Review*, 49(5): 537~543 (in Chinese with English abstract).
- Chen Wen, Li Haibing, Xu Zhiqin. 1996. Using the laser microprobe $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating technique and the $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ stepwise incremental heating technique to date the ages of Xidatan shear zone (Kunlun terrane, Tibetan plateau). *Acta Geoscientia Sinica, Special Issue*,

228~232.

- Giorgis O, Cosca M, Li S. 2000. Distribution and significance of extraneous argon in UHP eclogite (Sulu terrain, China): insight from in situ $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ UV-laser ablation analysis. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 181: 605~615.
- Hacker B R, Qingchen Wang. 1995. Ar/Ar geochronology of ultrahigh-pressure metamorphism in central China. *Tectonics*, 14(4): 994~1006.
- Hacker B R, Ratschbacher L, Webb L et al. 1998. U/Pb zircon ages constrain the architecture of the ultrahigh-pressure Qinling-Dabie orogen, China. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 161: 215~230.
- Li S S, Liu D L, Chen Y Z et al. 1992. The Sm-Nd age of coesite-bearing eclogite in Southern Dabie mountains. *Chinese Science Bulletin*, 37(6): 432 (in Chinese with English abstract).
- Li S, Wang S, Chen Y. 1994. Excess argon in phengite from eclogite: evidence from the dating of eclogite minerals by the Sm-Nd, Rb-Sr and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ methods. *Chem. Geol.*, 112: 343~350.
- Li S, Jagoutz E, Chen Y et al. 2000. Sm-Nd and Rb-Sr isotopic chronology and cooling history of ultrahigh pressure metamorphic rocks and their country rocks at Shuanghe in the Dabie Mountains, Central China. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 64: 1077~1095.
- Li S, Jagoutz E, Lo C H et al. 1999. Sm/Nd, Rb/Sr and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ isotopic systematics of the ultrahigh-pressure metamorphic rocks in the Dabie-Sulu Belt, central China: A retrospective view. *International Geol. Review*, 41: 1114~1124.
- Li S, Xiao Y, Liu D et al. 1993. Collision of the North China and South China blocks and formation of coesite-bearing eclogites: Timing and Processes. *Chem. Geol.*, 109: 89~111.
- Mattauer M, Matte P, Maluski H. 1991. La limite Chine du Nord-Chine du Sud au Paleozoique et au Trias. *Nouvelles donnees structurales et radiometriques dans le massif de Dabie-Shan, eastern China*. *C. R. Acad. Sci., Ser. II*, 312: 1227~1233.
- Ruffet G, Feraud G, Ballevre. 1995. Plateau ages and excess argon on phengites: a $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ laser probe study of alpine micas (Sesia zone). *Chem. Geol. (Isot. Geosci. Sect.)*, 121: 327~343.
- Ruffet G, Gruau G, Ballevre M. 1997. Rb-Sr and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ laser probe dating of high-pressure phengites from the Sesia zone (Western Alps): underscoring of excess argon and new age constraints on the high-pressure metamorphism. *Chem. Geol. (Isot. Geosci. Sect.)*, 141: 1~18.
- Scailliet S, Feraud G, Lagabrielle Y. 1992. Mg/Fe and [(Mg, Fe) Si-Al₂] on argon behaviour in high-pressure white micas: a $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ continuous laser probe from the Dora Maira nappe of the internal Western Alps, Italy. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 56: 2851~2872.
- Scailliet S. 1996. Excess ^{40}Ar transport scale and mechanism in high-pressure phengites: a case study from an eclogitized metabasite of Dora Maira nappe, Western Alps. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 60: 1075~1090.
- Wang X, Liou J G, Mao H K. 1989. Coesite-bearing eclogite from the Dabie Mountains in central China. *Geology*, 17: 1085~1088.
- Wang S S. 1998. Excess argon-bearing phengite from UHPM eclogite: a new geochronological evidence. *Chinese Science Bulletin*, 43 (Sup.): 140.