高温高压下黑云母中氩扩散实验初步研究*

陈道公　　贾命命　　谢鸿森　　蒲志平

(中国科学技术大学地球与空间科学系，合肥 230026)　(中国科学院地球化学研究所，贵阳 550002)

关键词　高温高压、氩扩散

了解氩在含钾矿物中的扩散行为是地质年代学领域中的一项基础工作．较早的研究主要着重在温度对氩扩散的影响．其后，Foland 对单相均质正长石在 500—800℃、2kb 下进行扩散研究[1]，用各向同性球状扩散模式计算了扩散系数．Giletti 等对金云母在 600—1080℃、1—15kb 条件下在真空和热液两种环境下进行了析氩实验[2]．限于条件，没有进行更高压力的实验，他们的结论是压力对扩散没有影响，矿物中氩的扩散系数遵循 Arrhenius 公式．本文对黑云母在 15—35kb、700—1000℃ 条件下的氩扩散进行了初步实验，发现在大于 15kb 时，氩的扩散明显受压力影响，在有限开放环境中氩的扩散方向和高温低压情况相反，即氩从外界有限大气介质进入矿物体系．我们计算了高压下氩的扩散系数，并对这一现象作出定性解释．

一、实 验 方 法

样品为从北京房山花岗闪长岩中分离提纯的商品黑云母标样[3]．

高压实验装置采用 3000t 六面顶紧装式油压机，传压介质为叶腊石，温度压力控制采用常规的实验岩石学方法，温压的标定误差分别不超过 ±20℃和 ±1kb．

氩量测定在 MM-1200 质谱计上用常规的同位素稀释法进行．

实验状态：压力分别为 1b 和 15、25、35kb，温度分别为 700、800、1000℃，维持时间分别为 10、3h 和 38min．

实验过程：将大约 1g 黑云母标样置于油压机样品管中，先升压后升温，维持一定时间后先降温后降压，升降温压时间短暂，均不超过一分钟．把经高温高压实验后的黑云母标样分别进行 X 光粉晶分析和质谱析氩测定．

二、结果及解释

由于采用黑云母标样，因此满足单相均质条件，原标样和经温压实验后样品的 X 射线粉晶分析表明两者晶胞参数等无差异，可以认为实验过程中氩扩散在单相体系中进行，未受相变和化学反应等因素影响，仅由温压变化控制．样品析氩实验的有关结果列于表 1．由表 1 可知，除样号 0B 是在高温常压下进行实验，氩在样品中有扩散丢失外，其余三个样号均得到了偏高的表面年龄，即发生了氩由外界大气介质进入样品黑云母的反向扩散现象，这可以从表中高压

本文 1991 年 1 月 21 日收到．

* 国家自然科学基金资助项目．

下得到的低放射成因氩 $^{40}Ar_r$ 百分数这一点说明。

表 1　析氩实验有关结果

样　号	温度 (℃)	压力 (b)	$^{40}Ar_r$ (10^{-9}mol/g)	$\frac{^{40}Ar_r}{\sum ^{40}Ar}$ (%)	表面年龄 (Ma)
原样			1.813	95.4	132.6
0B	800	1*	1.10	54.0	82.0
1A	700	15000	1.95	10.36	142.0
1C	700	25000	1.92	9.77	140.0
4C	1000	35000	1.92	10.88	140.0

* 样品在常压马弗炉中烘烤。

为了计算扩散系数，根据样品的实际大小，采用各向同性球状扩散模式，考虑到不同温压条件下存在二种方向相反的扩散，我们用扩散量的绝对值 $|f|$ 来求解该温压状态下的扩散系数。同时，稀释法测量氩同位素只能区分放射成因 $^{40}Ar_r$ 和其它所有各种成因的氩(统称大气氩)，这里暂以 $^{40}Ar_r$ 的扩散作为考虑问题的出发点。有

$$f = (^{40}Ar_{r_0} - {}^{40}Ar_{r_t})/{}^{40}Ar_{r_0},$$

$$|f| = 1 - \left(\frac{6}{\pi^2}\right)\sum_{n=1}^{\infty}\left(\frac{1}{n^2}\right)\exp(-Dn^2\pi^2 t/a^2),$$

其中 $^{40}Ar_{r_0}$ 和 $^{40}Ar_{r_t}$ 分别为原有的和经过实验时间 t 之后样品中还保存的数量，a 为矿物粒径。

表 2　算得的扩散系数值

样号	f	$\|f\|$	t(s)	a(cm)	D(cm²/s)
0B	3.93×10^{-1}	3.93×10^{-1}	10800	7.40×10^{-3}	8.754×10^{-11}
1A	-7.56×10^{-2}	7.56×10^{-2}	36000	7.40×10^{-3}	7.903×10^{-12}
1C	-5.90×10^{-2}	5.90×10^{-2}	36000	7.40×10^{-3}	4.868×10^{-12}
4C	-5.90×10^{-2}	5.90×10^{-2}	2280	7.40×10^{-3}	7.530×10^{-11}

由计算机算得的扩散系数值列于表 2。这些扩散系数值在数量级上和 Foland 及 Giletti 等在该温度区间所得到的扩散系数值相近，但它们不服从仅仅是温度函数的 Arrhenius 公式，即在 $\log D$ 对 $1/T$ 图 1 上不构成线性关系(图 1)，同一温度下压力增大 D 值变小(1A 与 1C)。高温高压和高温常压二数据点和它们结果有所不同，在图 1 中偏离直线区域之外，并且高温常压点(0B)扩散系数值偏大，而高温高压点(4C)值偏低，这和我们讨论的压力增大易引起反向扩散结论是一致的。

试图用热力学模型定性解释这一现象。如果把实验用的黑云母当作体系，那么其周围空间便是环境。当被研究的体系和环境处于常温常压时，体系和环境中氩的化学位相等，或者两者的化学位虽不等，但由于没有足够的活化能而使得两者之间不能产生明显的扩散作用。当体系和环境处于高温常压(高温低压)，或者环境又处于真空的状态下，这时体系中氩的化学位明显高于环境，升高了的温度又激活了体系中的氩，这时便发生了体系中的氩向环境扩散的现象。当体系和环境处于高温高压，或者环境又处于有限开放体系，有一定量的氩分压，这时氩

的扩散方向就取决于体系和环境两者化学位的相对大小，它是由体系和环境中氩的浓度、两者

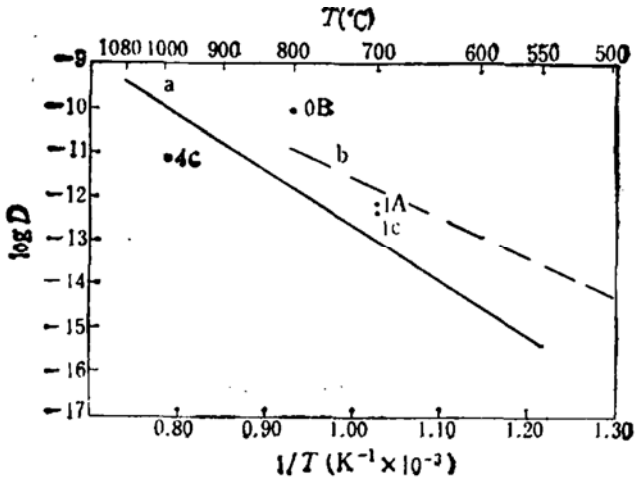


图 1　氩在矿物中的扩散

图中线 a 是 Giletti 等在金云母实验中所得的扩散曲线，采用无限圆筒式模式；b 是 Foland 在单相均质正长石实验所得扩散曲线，采用各向同性球状模式．黑圆点是本文实验点

所处的温压条件以及体系(矿物)本身的结构构造等诸因素所制约的，压力的作用总是和温度的作用相反。

因此，压力在一定条件下对氩的扩散具有重要意义，和温度一样能控制氩的扩散作用。从全面的意义上讲，扩散系数是温度和压力的函数，需要更清楚了解 D、P、T 三者的关系。

本文实验表明，在某种高温高压条件下，至少象黑云母那样的矿物可以从周围环境中获得氩。当研究诸如陨石冲击作用、板块俯冲等高温高压地质作用时，都有可能产生类似的现象。

因条件所限，实验工作是初步的，仅指出了压力的作用，许多工作有待进一步充实、完善。

致谢：侯渭、徐惠刚、张月明和廖结楼等在实验过程中提供的帮助，作者表示衷心感谢。

参　考　文　献

[1] Foland, K. A., *Geochim. Cosmochim. Acta*, 38(1974), 151—166.

[2] Giletti, B. J. and Tullis, J., *Earth Planet. Sci. Lett.*, 35(1977), 180—183.

[3] 王松山，地质科学，1983，4：315—323.