

变质作用中成分和体积关系方程及其应用

朱余德 何绍勋

(中南工业大学地质系·长沙)

该文介绍了研究变质作用时成分和体积关系的 Gresens 方程:
 $100f_v (g_B / g_A) C_i^B - C_i^A = X_i$, 以及该方程的计算, 分析方法。文中
还列出了 3 个应用实例。

关键词 变质作用 关系方程



岩石工作

在变质作用中, 尤其在交代作用过程中, 岩石的成分和体积常发生变化, 当前国内研究岩石的化学成分和体积变化情况仍主要采用固定体积的巴尔特(Barth)法(1952)^[1]和固定成分法^[2]。由于前者通常只能研究体积不变时成分的变化情况, 而且这种固定体积法是人为的假设以含 160 个氧原子的体积作为比较岩石化学成分的单位(即岩石的标准晶胞), 因此它与岩石实际的体积是不完全符合的。而固定成分法是固定某一化学成分(把某一成分视作不变), 然后计算其他成分相对变化情况, 它不能计算岩石体积的变化, 对判定岩石的稳定组分也有一定困难。

格里申斯(Gresens, 1967)^[3, 4]提出的算法, 是现有文献中既考虑到岩石化学成分变化, 又考虑到体积变化的好方法, 因而有必要推广使用。

格里申斯方程

格里申斯方程推导如下(与原文略有不同)。

在有成分改变的变质作用中, 可以用下面的质量作用方程表示由原岩 A 变化成变

成岩石 B:

$$aA \pm X \rightarrow bB \quad (1)$$

a 和 b 分别为原岩 A 和变成岩石 B 的重量(用克表示), X 为迁入或移出量(也用克表示)。

而 A 和 B 各由 n 个成分组成, 因而

$$A = C_1^A + C_2^A + \cdots + C_n^A = 1 \quad (2)$$

$$B = C_1^B + C_2^B + \cdots + C_n^B = 1 \quad (3)$$

C_i^A 和 C_i^B 分别为原岩 A 和变成岩石 B 中成分 i 的重量百分数。

对某一成分 i 由岩石 A 转变成岩石 B 时其迁入或移出量为:

$$X_i = b(C_i^B) - a(C_i^A) \quad (4)$$

$$= a \left(\frac{b}{a} C_i^B - C_i^A \right)$$

$$= a \left[\left(\frac{g_B \cdot V_B}{g_A \cdot V_A} \right) C_i^B - C_i^A \right]$$

$$= a \left[f_v \left(\frac{g_B}{g_A} \right) C_i^B - C_i^A \right] \quad (5)$$

式中 V_A 为原岩体积, V_B 为变成岩石体积。 f_v 为体积参数, 且 $f_v = V_B / V_A$ 。因而当 $f_v = 1$ 时, 为等体积变质过程; $f_v > 1$ 时, 为体积增大过程; $f_v < 1$ 时, 为体积缩小过程。 g_A 和 g_B 分别为原岩和变成岩石的密度。

设 a 为 100g, 则方程 (5) 变为:

$$100[f_V (g_B / g_A) C_i^B - C_i^A] = X_i \quad (6)$$

X_i 表示 100g 原岩变化成变成岩石时, 成分 i 的迁入或移出量。而 $X_i\%$ 表示成分 i 从原岩中迁入或移出量相对原岩的百分含量。

从公式 (6) 可知, 当岩石有 n 项成分时, 就有 n 个这样的方程式, 这 n 个方程组成的方程组中共有 $n+1$ 个未知数, 即 n 个 X_i 和 f_V , 因而解该方程组必须首先确定或假设某一未知数。当岩石变质过程是等容过程, 则可设 $f_V=1$, 此时可根据公式 (6) 计算各成分的迁入或移出量。从式 (6) 中可以看出, 如果此时 $C_i^A = C_i^B$, 那么 X_i 并不一定等于零, 因为 g_B 一般不等于 g_A 。如岩石变质过程有体积变化, 则可以根据地质现象(如应变测量等), 确定体积改变量, 然后计算成分迁入或移出量; 或确定某一成分或某些成分改变量(如有些文章中设 $X_{Al_2O_3}=0$, 或 $X_{TiO_2}=0$), 再计算体积变化和其他成分的迁入或移出量。

用公式 (6) 还能作出各成分的 f_V 与 X_i 之间的关系图(图 1), 在同一图中 n 个成分有 n 条直线。此时可根据 $X_i=0$ 直线与这些直线的交点的分布来大致确定哪些成分是迁入, 哪些成分是移出, 哪些成分可能是稳定的。因为在变质作用中如果岩石有成分的迁入和移出, 那么 $X_i=0$ 时, f_V 值大的成分可能在原岩变质成变成岩石时是移出成分, f_V 值小的成分可能是迁入成分, 而稳定成分应位于 f_V 最大值和最小值之间。如果有 m 个稳定成分, 则当 $X_i=0$ 时, 这 m 个成分应具有近似的 f_V 值。也可以根据公式 (6), 设 $X_i=0$, 求出各成分的 f_V 值, 然后再根据 f_V 值的大小按上述分析进行判别。

实 例

1. 挪威 Stavanger 地区两样品

格里申斯 (1967) 根据提出的方程对

Stavanger 地区两个样品 (表 1) 进行了分析⁽³⁾。其中 No.3 是石英—白云母—黑云母—石榴石千枚岩, No.6 是具钠长石变斑晶的千枚岩。经研究, 后者是前者交代变质的结果。根据表 1 作出两样品成分和体积变化的 f_V-X_i 关系图解 (图 1), 从图 1 可以

表 1 挪威 Stavanger 地区样品分析数据表

成分	No.3	No.6
SiO ₂	60.62	64.70
TiO ₂	0.80	0.59
Al ₂ O ₃	18.50	15.45
Fe ₂ O ₃	7.60	6.01
MgO	2.42	1.48
CaO	1.66	2.92
Na ₂ O	1.81	3.09
K ₂ O	4.02	3.46
比重	2.838	2.777

FeO 已全部换算成 Fe₂O₃。

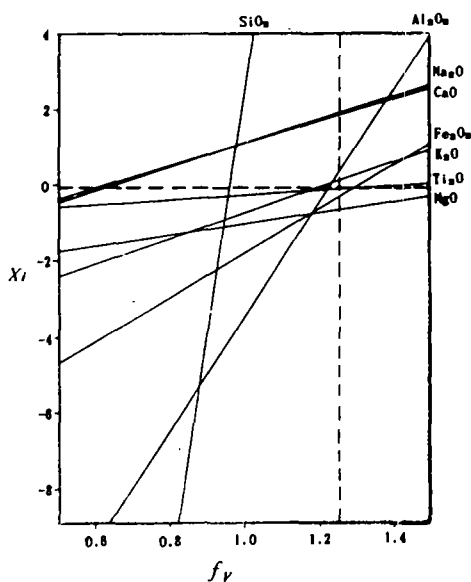


图 1 挪威 Stavanger 地区的 f_V-X_i 图解

粗虚线为 $X_i=0$; 细虚线为 $f_V=1.25$

看出, K_2O 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 和 TiO_2 的 f_V-X_i 线与 $X_i=0$ 线相交在 f_V 值的 1.2 和 1.4 之间。如果不考虑 TiO_2 值, 则其他 3 种成分的交点都在 1.2 和 1.3 之间。因此, 如果取

$f_v=1.25$, 这 4 种成分的迁入移出量是很小的, 经计算可知, SiO_2 、 Na_2O 和 CaO 迁入, MgO 则移出, 这与地质实际情况相符合。根据 $f_v=1.25$ 计算可得出:

$$100\text{gNo.3}+1.85\text{gSiO}_2+1.97\text{gNa}_2\text{O}+1.91\text{gCaO}+0.44\text{gAl}_2\text{O}_3+0.22\text{gK}_2\text{O}\rightarrow 122\text{gNo.6}+0.61\text{gMgO}+0.25\text{gFe}_2\text{O}_3+0.077\text{gTiO}_2 \quad (7)$$

根据公式 (6) 求出 $X_i=0$ 时各成分的 f_v 值, 对于 Stavanger 两样品来说就是使下列各方程:

$$f_v = 0.0158X_{\text{SiO}_2} + 0.957 \quad (8a)$$

$$f_v = 1.74X_{\text{TiO}_2} + 1.384 \quad (8b)$$

$$f_v = 0.0661X_{\text{Al}_2\text{O}_3} + 1.221 \quad (8c)$$

$$f_v = 0.17X_{\text{Fe}_2\text{O}_3} + 1.292 \quad (8d)$$

$$f_v = 0.689X_{\text{MgO}} + 1.668 \quad (8e)$$

$$f_v = 0.349X_{\text{CaO}} + 0.582 \quad (8f)$$

$$f_v = 0.33X_{\text{Na}_2\text{O}} + 0.6 \quad (8g)$$

$$f_v = 0.294X_{\text{K}_2\text{O}} + 1.184 \quad (8h)$$

式中 $X_i=0$ 时, 求出各自的 f_v 值, 即求出各成分变化前各自的体积参数。也可将

求得的各成分的 f_v 值作在一条直线上, 对成分的迁入移出情况进行判别 (图 2)。

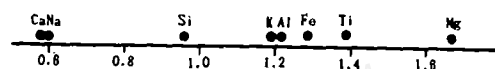


图 2 $X_i=0$ 时, 各成分的 f_v 值

2. 塔吉尔蛇纹岩

在一些文献中, 常用巴尔特法讨论交代作用过程中岩石化学成分的变化情况, 常以苏联乌拉尔塔吉尔纯橄榄岩转变成蛇纹岩作为典型例子^(5, 6)。

根据化学分析数据 (表 2), 巴尔特法的计算结果 (表 3) 表明, 塔吉尔纯橄榄岩转变成蛇纹岩过程中有大量的镁 (占原岩的近 1/2) 和硅 (占原岩的近 1/3) 移出。

我们根据格里申斯方程, 计算了塔吉尔蛇纹岩形成过程中化学成分和体积的变化 (设纯橄榄岩的比重为 $3.25\text{g}/\text{cm}^3$, 蛇纹岩为 $2.45\text{g}/\text{cm}^3$ ^(8, 9)), 提供一些有意义的信息。从图 3 可以看出, 在等体积($f_v=1$)交代作用中, 有类似巴尔特法的结果。由蛇纹石形成的主要化学反应:

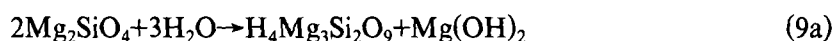
表 2 塔吉尔纯橄榄岩和蛇纹岩岩石分析结果(%)

	SiO_2	Al_2O_3	Cr_2O_3	Fe_2O_3	FeO	MnO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	H_2O	总和
纯橄榄岩	40.03	0.57	0.50	无	8.25	0.06	48.80	无	无	无	1.28	99.53
蛇纹岩	38.26	0.48	0.60	5.37	1.47	0.14	37.08	微量	0.06	0.14	16.13	99.73

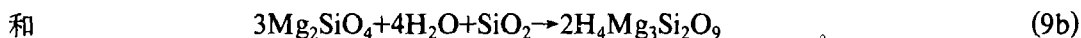
据 E·A·库茨涅佐夫^(5, 6)。

表 3 巴尔特法计算结果

	Si	Al	Cr	Fe^{3+}	Fe^{2+}	Mn	Mg	Ca	Na	K	OH
纯橄榄岩	377	7	3	0	65	0.60	685	0	0	0	80
蛇纹岩	245	4	3	26	8	0.80	356	0	0.80	0.80	691



橄榄石 蛇纹石 水镁石



橄榄石 蛇纹石

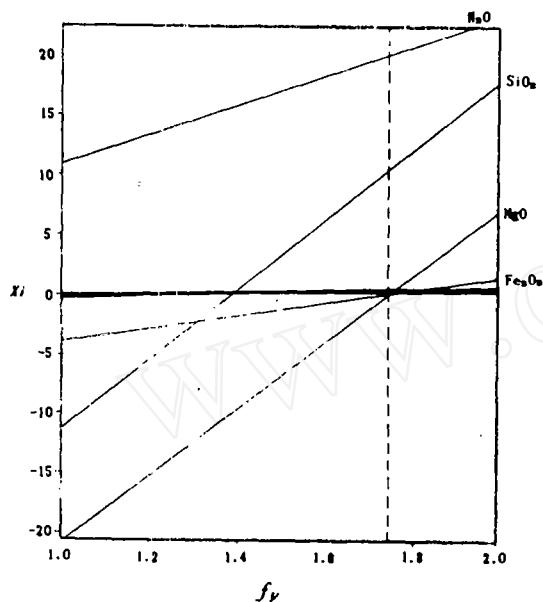


图3 塔吉尔蛇纹岩形成的 f_v-X_i 图解

虚线为 $f_v=1.74$; $X_i=0$ 线附近为表2中的其他氧化物

可知蛇纹石形成过程主要是水化和硅化作用。如果蛇纹岩是纯橄榄岩等体积交代的结果,那么大量移出的Mg和Si在有水存在时(实际上,Mg和Si的移出必然需水溶液存在),必然形成蛇纹岩的主要组分蛇纹石和水镁石,因此它们不可能全是真正的移出成分。很不意义的是,如果取 $f_v=1.74$,那么蛇纹岩形成过程中只有Si和

水的迁入,原岩中Mg、Fe和其他成分几乎没有很大变化。因此在有足够的体积膨胀条件时,Si和水的带入就可以使原岩变为蛇纹岩。当 $f_v=1.40$ 时,则原岩转变成蛇纹岩时,Si的含量几乎不变,只有水的迁入和镁铁的移出,而带出的镁铁则以水镁石等形式沉淀在其他空间;当 $f_v>1.74$ 时,则形成蛇纹岩,除需更大的膨胀空间以及水和Si的带入外,还需Mg和Fe的带入,这是与地质现象相违背的,因为蛇纹岩周围一般并没有镁铁质带来源。

蛇纹岩通常只发育在地表或深部沿着断裂的地方,而且蛇纹岩体周围并没有大规模镁铁质移出或以蛇纹岩外的其他形式存在,因为我们认为蛇纹岩形成过程主要是水化和硅化作用是有道理的,而且蛇纹岩化过程中确有体积膨胀。

3. 永宁糜棱片麻岩^①

经研究,永宁糜棱片麻岩是大王山花岗岩经动力变质作用改造形成的。在研究中首先对岩石中变形标志矿物长石进行应变测量,确定体积参数(f_v),然后再根据岩石化学分析数据(表4)和比重,用格里申斯方程计算岩石在动力变质作用过程中组分迁入移出量(表5)。

表4 花岗岩和糜棱片麻岩的化学成分(%)表

样号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	CO ₂	H ₂ O ⁺
HS45	69.31	0.50	14.51	4.05	0.07	1.10	2.96	2.65	3.75	0.18	0.11	1.05
HS01	69.32	0.45	14.03	4.50	0.13	0.84	2.46	2.79	3.93	0.18	0.09	1.23
HS08	75.16	0.11	12.89	1.63	0.07	0.18	0.31	2.50	5.43	0.12	0.05	1.28

HS45为花岗岩;HS01为粗眼球状糜棱片麻岩;HS08为条带状糜棱片麻岩;FeO已换算成Fe₂O₃。

由表5可以看出,随着动力变质作用增强,由花岗岩→粗眼球状糜棱片麻岩→条带状糜棱片麻岩,岩石的体积减小,原岩中成分多呈带出,只是带出量多少不同而已。带

出量较大的有SiO₂、Al₂O₃、Fe₂O₃、MgO和CaO。将表4和表5对照可知,虽然变成岩石的SiO₂含量明显高于原岩含量,但在动力变质作用过程中仍是主要带出组分。

①中南工业大学朱余德博士论文。

经研究, 变成岩石的化学成分主要取决于原岩在动力变质过程中体积减小时各成分的相对带出量, 而这又与岩石中含这些成分的矿物在动力变质作用过程中的稳定性有关。

表 5 永宁糜棱片麻岩形成过程中成分和体积变化表

		HS45→HS01→HS08			HS45→HS08	
比重 (g)		2.71	2.71	2.61	2.71	2.61
f_v		0.9717		0.8842	0.8593	
X_i	SiO ₂	-1.96		-5.32	-7.12	
	TiO ₂	-0.06		-0.36	-0.41	
	Al ₂ O ₃	-0.88		-3.05	-3.84	
	Fe ₂ O ₃	0.32		-3.11	-2.70	
	MnO	0.06		-0.08	-0.01	
	MgO	-0.28		-0.69	-0.95	
	CaO	-0.57		-2.20	-2.70	
	Na ₂ O	0.06		-0.66	-0.58	
	K ₂ O	0.07		0.71	0.76	
	P ₂ O ₅	-0.01		-0.08	-0.08	
	CO ₂	-0.02		-0.05	-0.07	
	H ₂ O ⁺	0.15		-0.14	0.01	

结 语

在变质作用过程中, 岩石的化学成分变化多伴随有体积变化, 格里申斯提出的计算方程将这两者有机地联系在一起, 并考虑到岩石比重变化的影响, 因而它明显优于巴尔特法和固定成分法。利用格里申斯的 f_v — X_i 图解可判断岩石成分和体积的变化情况。

格里申斯法计算需确定方程组中 $n+1$ 个未知数中的一个, 通常需借助其他方法进行确定。如根据应变测量确定体积参数, 根据元素地球化学性质确定某一成分的变化量, 分析 f_v — X_i 图解判断 f_v 值或某一成分的变化量等。而准确地确定方程组中这个未知数又是准确地测定岩石成分变化和体积变化的关键。

格里申斯方程适用于由于物质迁入移出或 / 和体积变化而造成岩石成分变化或 / 和体积变化的地质作用, 因而适用于广泛的变质作用, 尤其是交代作用。

在研究中得到阮道源教授等热情帮助。

参考文献

- [1] Barth, T. F. W., Theoretical Petrology. Wiley, New York, 1952.
- [2] 武汉地质学院岩石教研室, 《岩浆岩岩石学》, 地质出版社, 1980 年。
- [3] Gresens, R.L., Chemical Geology, 1967, 2, 47~65.
- [4] Babcock, R. S., Computational models of metasomatic processes. Lithos, 1973, 6, 279~290.
- [5] 库茨涅佐夫, E.A., 《变质岩》, 地质出版社, 1958 年。
- [6] 贺同兴等, 《变质岩岩石学》, 地质出版社, 1980 年。
- [7] 契特维里科夫, C.Д. (刘智星等译), 《岩石化学换算指南》, 中国工业出版社, 1963 年。
- [8] 多尔特曼, H.B. (蒋宏耀等译), 《岩石和矿物的物理性质》, 科学出版社, 1985 年。
- [9] Carmichael, R.S., Handbook of physical properties of rocks, Vol. III. by CRC Press. Inc. Boca Raton, Florida. 1984.

On the Composition-Volume Relationship of Rocks during Metamorphism

Zhu Yude He Shaoxun

The equation given by Gresens showing the composition-volume relationship during metamorphism, $100f_v(g_B/g_A)C_i^B-C_i^A=X_i$, is discussed in this paper. Calculation method and practical examples in application of the formula are also given.