

相,这个结果和非石榴石的变质矿物对温压估算基本一致,也与石榴石的化学成分结合结构特征估计的变质相带趋向一致。阜平群顶部尤其是龙泉关组中石榴石形成于600℃和0.6Gpa条件下,部分推断达到或接近低角闪岩相,但是阜平群的中上部的石榴石,虽然属于高角闪岩相却很难划出它们与底部麻粒岩相及顶部低角闪岩相的界线,它们之间实际上是渐变关系。

在斜长角闪岩中,特别在富铁的斜长角闪岩中,石榴石常常出现在基质和变斑晶中,麻粒岩相的石榴石变斑晶更为明显。石榴石变斑晶的环带从核部到边部 X_{Mg} 和钙阳离子数逐渐降低,铝离子数明显上升,尤其是镁和钛离子数向边部越来越高。说明这种石榴石是变质等级逐渐下降的条件下结晶的。结合石榴石中的包裹体特征,说明石榴石结晶一直延续较晚,甚至可能到变质作用终止,而同一岩石中变斑晶和基质中石榴石成分对比,前者的 X_{Mg} 明显低于后者, MnO 和 TiO_2 含量明显高于后者,指示变斑晶石榴石相对基质中石榴石的变质条件也相应下降。从而,推测从基质石榴石到变斑晶石榴石,从变斑晶石榴石的核部到边部,整个代表了变质作用的过程,很可能是地壳抬升过程的缩影。因此,石榴石成分环带的深入研究,结合其它有代表性的变质矿物的成因将有助于探索和揭示阜平群变质作用和造山运动的全过程,从而确定合理的 $P-T$ 途径。

本文多数资料数据来自《阜平群变质地质》(未刊),是该专题的集体成果的一部分。

变质作用中的地质温压计

董申保

(北京大学地质科学系)

用变质矿物共生组合和矿物特征来测定变质岩石体系的温度、压力和其他强度参数的工作,通过电子探针和X光晶体分析取得了重要的进展,逐渐形成了地质温压计学。这一新学科牵涉的问题较多,应用时常会遇到困难,出现偏差和失误。本文试图从一般基本原理和应用时的注意问题出发,对各温压计作一些讨论。

近30年来,变质岩石学在化学和显微分析技术、不可逆和可逆过程热力学及矿物的测温 and 测压计的应用等方面取得了长足的进展,从而出现了两个值得注意的方向:(1)趋向定量化,数学分析法愈来愈多地应用于化学热力学上;(2)变质作用过程中,随时间而变化的进程显得重要;过去的变质作用的条件的测定只是过程中的一个阶段,现今已由 $(P, T, X^i \dots)$ 扩大为 $(P, T, X_i \dots t)$,把变质作用从静止状态的研究转向为动力状态。变质温压计的应用及其与地质环境的联合则起着把变质作用中的热力学和动力学结合的纽带作用。初步形成了地质温压计学,包括了(1)可逆实验反应的数据,(2)热力学计算,(3)化学分析、电子探针和X光晶体分析数据。

1. 应用地质温压计的几点注意事项: (1) 实验反应: 实验反应曲线具有可靠的可逆性材料和生成矿物的确切数据, 对反应不灵敏的矿物组合不能作为温压计, 而反应过于灵敏的组合, 也应考虑杂质的影响。一般最好不要用反应曲线的外延部分为测定依据。外延部分愈大, 误差就愈大。超出变质反应的高压反应曲线, 若外延至变质压力范围内, 常不能反应真正的变质压力, 有些超高压下的钠长石=硬玉+石英的反应, 应用时应注意。热力学计算时应注意数据的准确性, 一般情况下, $\Delta S < -1 \text{ Cal/mol}^\circ\text{K}$, $\Delta V < 2 \text{ cc/mol}$ 时, 不能作为温压计。(2) 矿物: 本身能反映温压条件的矿物与矿物组合, 可以用于标定者, 首先必须处于相同的岩石组分, 否则不能用作温压计。白云母的 b_0 值可作为例证。因此应对不同岩石组分中同一矿物组合进行多次测定, 以保证其重复性, 及岩石组分对其影响。在某些情况下, 人工合成的蓝闪石 I 型与 II 型, 和自然界的蓝闪石不同, 应用时应充分考虑到这一点。

矿物的有序—无序变换常可能是一种与温度或压力有关的量度, 有时有些无序的变质矿物是在变质作用降温阶段时重新改变的或是后期混合岩化作用中形成的。测定这一类矿物时必须了解矿物体系的性质和变质作用的地质环境。长石温度计应有有序度的数据, 但它用来推断中级变质作用时是个困难的问题。

地质温压计的一个重要问题是当它受后一变质事件的降温作用或退化变质时的影响而引起的变化。这时矿物组合不能用平衡反应来解释。有些情况, 如异常的低温和压力的数值出现于韧性剪切带中, 或不同的矿物组合穿切前期中型劈理, 或混合岩化作用的产物, 这些是可以区分的, 而另一些情况, 仅由于扩散而没有矿物学方位变化的重结晶出现时, 这种化学反应的重调整则不易区分。

2. 几类主要的地质温压计 地质温压计基本可按照变质反应类型来划分。变质反应中的固体溶液反应是地质温压计的重要类型, 由于相似的元素出现了相互置换, 有关组分的变化相应出现了组分的活度 (a_i) 与分配系数 (K_D) 的变化。它们在很多情况下都直接和温度、压力及其他因素有关, 并可分为若干类型。固定组分反应则由于矿物组分固定, 无固体溶液存在, 因而单变量反应曲线不易确定, 作为地质温压计, 其应用不如前者广泛。另外从反应中矿物的物态看, 去水反应或挥发组分反应由于有流体相的参与, 使温压计的应用复杂化。去水反应中一般 $P_f = P_s$, H_2O 处于流通状况, 在有多组分的流体相中, 必须考虑它们在变质作用时的逸度。有些地区变质作用时 $P_f \neq P_s$, H_2O 的活度减少时, 也应考虑 $\mu\text{H}_2\text{O}$ 。因此应注意地质环境。若同一岩石中有较多的独立的矿物反应, 它们间的比较也可找出液相的组分和每一组分的逸度。一般说来, 它们较多地用于温度计, 低温时亦可用于压力计。固体—液体反应可用于温压计, 但主要用于测压。

从地质温压计考虑, 拟应以组分变化的反应为主, 物态变化的反应次之。它们可分为:

I 固溶体反应: (1) 交换反应; (2) 非交换反应。

II 固定组分反应: (1) 固溶分解反应; (2) 固体-固体反应。

上述 I 型中可包括去水 (挥发组分) 反应和固体-固体反应。分述如下:

I 固溶体反应型: 常见的元素置换有 Na-K , Mg-Fe^{2+} - (Mn), Al-Fe^{3+} - (Cr) 等。

(1) 交换反应温度计: 是指在固溶体反应中, 出现有相似元素在生成矿物内部或矿物

之间进行交换,而不失去原有反应矿物的面貌。交换反应的特点是体积变化 ΔV 小,而熵的变化 ΔS 大,因而它们主要依赖于温度的变化,可用作温度计,又可分为:a.晶体内交换反应温度计;b.晶体间的交换反应温度计。

(2)非交换反应温度计:是指在固体反应中固溶体矿物出现于反应的两侧,分别代表不同的矿物相,不具有相同晶体结构的矿物,如:堇青石=铁铝榴石+矽线石+石英,其平衡反应有时可表示为:

$$\Delta H^0 - T\Delta S^0 + (P-1)\Delta V + RT\ln\bar{K} + RT\ln K_r = 0, \bar{K} \text{ 为配分系数: } \bar{K} = X_{C1}^B X_{C1}^A,$$
 ΔV 有变化,平衡组分与温度、压力有关,视反应而定。

a.石榴石-堇青石-矽线石-石英温压计:应用较普遍,用于中-高级变质作用,特别是堇青石麻粒岩中,实验反应为:铁堇青石=铁铝榴石+矽线石+石英,其中Fe、Mg可互换。所得的实验数据不完全一致,与 P_{H_2O} 及堇青石在无水的含水的堇青石中的活度等问题有关;此外,人工合成的堇青石与自然界的堇青石亦有区别。Newton等(1979)的工作测得较好的压力校正数据。

b.白云母-黑云母-石榴石/十字石温度计:常用于低-中级变质作用,反应为:镁绿泥石+白云母=石榴石+黑云母+富钠白云母+ H_2O ,或镁绿泥石+白云母=十字石+黑云母+富镁绿泥石+富钠白云母+ H_2O 。它们是一种复杂的滑移反应,绿泥石与白云母反应出现的黑云母影响了白云母中K与Na的置换。Na/Na+K可作为温度升高的标定。在含Al多的岩石中,有斜长石伴生而尚无 Al_2SiO_5 时,可作为温度计。

c.钠质角闪石-钙质角闪石温压计:用于中-低级变质作用,反应为:青铝闪石+绿帘石+ H_2O =钙质角闪石+钠长石+绿泥石+氧化铁。这一反应属于玄武岩体系内的缓冲反应。

Ⅱ.固定组份反应型:指在实验中出现的矿物相具固定成份,且相互间无交换。从原则上讲,这一类温压计简单易行,只须确定其矿物组合,再参考其反应曲线,即可得出温压轨迹,但应用上有较多困难,主要是由于缺少固溶体反应,单变量曲线很难确定。矿物中杂质的加入影响其鉴定,还有反向反应(如高压的文石变为方解石)等问题。因此这一类型的重要程度较差,应用时最好有有序-无序资料。

(1)固溶体分解反应温度计:是某些固溶体矿物在某一温度变质时出现组分间断,测定其不混溶组份即可推定其温度。一般来说,低温时不适用,反应不够理想。

a.长石的三元体系:Barth(1957)开始用钠长石分子在钾长石与斜长石中的比例测定温度。Stormer曾将其用于高温,并讨论了硷性长石的非理想性和压力。但高温时常遇到长石中的条纹和各种后期的混合岩化钾交代,用时不够理想。应用于低温(450—550℃)时与方解石-白云母温度计相比约低50℃左右。

b.方解石-白云石温度计:它是在方解石-白云石体系中用方解石中镁的含量来测定温度,实验本身有较好的可逆性。一般多用于低级变质作用。用于高级变质时温度偏低,仅达400℃左右,可能与化学反应的重新调整有关。

c.白云母-钠长石温度计:有关的计算见Thompson(1974)、Guidotti和Sassi(1976)的有关文献。该温度计用于钠质白云母+石英=富钾白云母+钠长石+ Al_2SiO_5 + H_2O ,在白云母-斜长石- Al_2SiO_5 组合中,测定白云母中的Na/Na+K值。这是一个较好的温度计,但应注意压力对温度的影响,白云母-钠长石的固溶分解曲线可能为: $T_c = 768.8 +$

31.00 (± 5) P (Kbar)。此外 H_2O 的活度 a_{H_2O} 亦应有所考虑。

(2) 固体-固体反应温压计：用于压力计。矿物中出现外加的固体溶液组份时，对于温压计更有利，特别是扩大其压力测定范围，常用的平衡反应是： $\Delta H^\circ - T\Delta S^\circ + (P-1)\Delta V + RT\ln K = 0$ ， $\ln K = \sum u_i \ln a_i$ ， u_i 是化学反应中相的组份 i 的化学量系数(形成计矿物为“+”号，反应矿物为“-”号)，其他符号见前。有外加的固溶体矿物参与时，应考虑固溶体组份的影响。

a. 硬玉-石英压力计：用于高压范围，反应为：钠长石=硬玉+石英。钠长石为高温长石，实验范围为1200—600℃，P、T关系为： $P = 0.35 + 0.0265T (^\circ\text{C}) \pm 0.50$ (Kbar)。用于低温时应注意其外延部份的可靠性。钠长石在低级变质作用中($T < 500^\circ\text{C}$)应注意其有序-无序变换的影响。

自然界中常见的是硬玉质辉石和石英的反应。硬玉质辉石常为霓辉石-硬玉-透辉石的有限固溶系列。硬玉与透辉石的二元系比较复杂，一般测定压力时应考虑组份、活度、有序度及钠长石的有序度。

b. 石榴石-斜长石- Al_2SiO_5 -石英温度计：较广泛用于中-高级变质作用的泥质岩石中的石榴石-斜长石- Al_2SiO_5 -石英组合。端员反应为：钙长石=钙铝榴石+矽线石+石英。用于石榴石及斜长石的各种模式。当 $T > 600^\circ\text{C}$ 时，所测得的数据与其他温压较相近。应注意 ΔV 的测定，石榴石中钙铝榴石分子少时的偏差及石榴石分子的活度的不准确性。

地质温压计已成为近代温压测定不可缺少的工具，应用时应注意：(1)地质背景及其控制作用；(2)原岩组份的影响，包括相同组份的再现性和不同组份的差异性；(3)挥发组份的影响；(4)固溶体矿物中组份和活度的关系；(5)实验数据、热力学计算的结果和误差校正；(6)根据等变质带和综合性温压计的应用得出较为可靠的数据。

目前变质温压计的工作虽已有一定的基础，但由于变质作用的控制因素较多，研究工作仍处于初步阶段，切忌简单对比与照搬。

区域变质作用 $P-T-t$ 轨迹 及变质地体热模拟研究现状

石宏仁

(地质矿产部情报研究所)

大量事实表明，区域变质作用是一种动态过程，其温压条件随时间而变，在很大程度上反映了变质作用期间的构造过程。过去的十余年间，国外在造山作用热演化的探索中取得了引人注目的成就。其成就的基础之一是变质岩石学在定量化方面的发展和同位素地质年代