第 16 卷第 6 期
2001 年 12 月

地球科学进展
ADVANCE IN EARTH SCIENCES

Vol. 16 No. 6
Dec., 2001

文章编号: 1001-8166(2001)06-0785-10

变质作用精细过程研究进展*

吴春明, 耿元生
(中国地质科学院地质研究所, 北京 100037)

摘 要: 主要总结了最近 5 年以来, 国内外在变质作用精细过程研究若干方面的进展: 人们在更细微尺度上, 对矿物成分环带、成分梯度等矿物微区成分变化情况有了更深入的研究; 发现矿物中不同化学组分抵御变质峰期后降温过程的能力不同; 利用矩阵奇异值分解等数学方法定量探讨矿物(组合)之间是否存在质量平衡关系, 进而判断矿物(组合)之间的平衡—非平衡关系; 开始尝试恢复变质峰期后发生分解反应或纯转换反应的变质高峰期矿物的原始成分; 出现了不依赖于矿物热力学数据和矿物活度模型的高精度相对温压计; 补偿规则引入了矿物速率计, 速率计计算结果更直观; 最近发展的 M 9 ssbauer 谱新技术, 可以在小至 50× 30 μm^2 的区域里实现铁镁质矿物原位(in situ) Fe^{3+} 含量的分析; 使用激光探针等离子体质谱法、激光探针 $^{40}Ar/^{39}Ar$ 法、电子探针测年法、二次离子质谱法等新方法, 实现对常见变质矿物的原位定年, 使得变质作用较完整过程的连续定年成为可能。今后的发展方向至少有四个方面: 深化并且充分利用已有的矿物微区成分分析方法和放射性微区测年方法, 洞悉变质过程中的各种微观—超微观现象, 探讨变质反应速率; 研究不同大地构造环境的变质作用特征; 实施大量的高精度矿物相平衡逆转实验, 以获取高精度矿物热力学数据, 进一步发展矿物固溶体热力学; 采用岩石学实验模拟岩石变质过程, 深入研究变质反应动力学。

关 键 词: 变质作用; 平衡—非平衡关系; 矿物中 Fe^{3+} 含量; 矿物原位定年
中图分类号: P588.3 文献标识码: A

变质岩石学研究包括地质调查、岩石变质—变形关系、岩相学、矿物学、热力学、年代学等方面的综合工作。近 5 年以来, 变质岩石学在这些方面又取得了长足进步。沈其韩等[1]、王仁民[2]曾论述过近年来变质岩石学研究的进展, 高坪仙[3]总结了变斑晶包裹体形迹研究的进展, 游振东[4]、从柏林等[5]、王清晨[6]系统论述了我国超高压变质带研究的最新进展。本文则从变质岩石学理论和研究方法的角度, 尝试总结近年来的研究进展。

1 变质矿物之间的平衡—非平衡关系

矿物之间的平衡—非平衡关系, 是变质岩石学研究的最基本科学问题之一, 也是尚未得到完善解决的问题。近年来, 人们在更细微尺度上, 对矿物之间的平衡—非平衡关系、矿物成分梯度、成分环带、矿物中不同化学组分的效应等有了更深入的研究, 对变质作用过程的洞悉更为深入。

1.1 矿物成分梯度

通过对矿物显微—超显微尺度的研究, 近年来人们发现变质矿物并非总是成分均一的, 有时可出现成分“梯度”。例如, 西班牙南部 Betie-Rif 泥质片麻岩中主变质期形成的白云母, 因白云母局部分解, 出现平行白云母(001)面的黑云母+ 堇青石+ 块云母(pinite)+ 石英的细微矿物组合, 白云母晶体的成

* 收稿日期: 2001-03-13; 修回日期: 2001-08-22.
基金项目: 国家自然科学基金项目“阿拉善地区早前寒武纪变质岩的变质作用演化”(编号: 40002017);“吕梁地区古元古代末花岗岩对吕梁运动的制约”(编号: 40072060); 中国地质调查局项目“中国北方若干重点前寒武纪区构造—岩石—地层—年代学格架”(编号: J2.1.4)联合资助.
作者简介: 吴春明(1967-), 男, 河南舞钢人, 博士后, 主要从事变质地质学研究. E-mail: wu0129@hotmail.com

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

分因此不再均匀: 白云母残余斑块 Si 含量相对较高, 靠近分解的显微区域白云母硅质含量降低。同时, 黑云母边缘分解为微晶堇青石+ 石英+ 钛铁矿组合, 沿着黑云母中心→黑云母边缘分解的方向, Fe、Ti 含量逐渐升高, Mg、Al^{VI}含量则逐渐降低。所以, 白云母、黑云母中出现了化学成分"梯度"[7]。加拿大昂加瓦(Ungava)造山带中, 遭受角闪岩相退变质的高压麻粒岩中的新生石榴石, 形成于斜长石、斜方辉石、单斜辉石、角闪石之间。斜长石核部富 Ca, 边部富 Na, 显示因形成石榴石需要从斜长石中汲取 Ca, 从而造成斜长石边部 Ca 的亏损, 斜长石因而出现成分"梯度"[8]。

1.2 矿物成分环带

变质矿物化学成分环带记录了岩石的变质过程, 因而具有一定的科学意义。其中, 以对石榴石成分环带的研究较为深入。对变泥质岩中石榴石+ 黑云母+ 绿泥石+ 白云母+ 斜长石+ 石英组合生长的模拟计算表明, 随着温度的升高和矿物的生长, 从核部到边部, 石榴石中 Fe/(Fe+ Mg) 比值、Mn 的含量逐渐降低, 斜长石中 Ca 的含量则逐渐降低[9]。这一结论得到了实际岩石的支持。例如, 加拿大地盾格伦维尔(Grenville)区变泥质岩中, 石榴石变斑晶的 Fe/(Fe+ Mg) 、Mn 含量从核部到边缘逐渐变小, 在剖面上呈"钟状"。石榴石边部因受后期降温期间的离子扩散效应的影响, 成分变化与生长环带趋势相反[10]。加拿大瓦尔哈拉(Valhalla)变质杂岩中的泥质岩石, 在变质作用高峰期后降温期间, 石榴石中的黑云母包裹体与主晶石榴石发生了 Fe-Mg 交换, 造成石榴石变斑晶的 Fe/(Fe+ Mg)从核部到边缘逐渐增加, 从而改变了变质峰期矿物成分[11]。此外, 人们也开始研究其它矿物的成分环带, 例如绿帘石成分环带[12]。

当前研究者大多将石榴石边部化学成分的改变归因于后期降温期间元素的扩散作用, 却忽视了退变质性质的纯转换反应[13]。对于变泥质岩来说, 在后期降温事件中, 石榴石边部如果仅产生 Fe、Mg 的扩散, 则边部 Fe/Mg 比值会升高, 而 Mn 含量会保持不变, 相应地黑云母边部 Fe/Mg 比值则会降低。如果石榴石边部发生分解, 则边部 Fe/Mg 比值、Mn 含量都会升高, 黑云母边部 Fe/Mg 比值也会升高。这是因为, 未分解的石榴石粒径较大, 降温期间, 石榴石边部分解, 应该将 Mn 释放到岩石基质中; 但是, 变泥质岩中铁镁质矿物基本只有石榴石和黑云母, 而同石榴石相比, 黑云母中 Mn 含量低得可以忽略不计, 所以大部分 Mn 无法赋存于其它矿物中, 只能富集于石榴石边部, 并且会反向扩散于石榴石晶体, 由此造成石榴石边部 Mn 的富集[13]。

由此可见, 对边部化学成分发生变化的矿物, 需认真对待, 确定是哪种原因引起的。

1.3 不同化学组分对后期降温事件反应不同

近年来发现变质矿物中不同化学组分对后期降温事件的反应不同, 所以在判别平衡—非平衡关系和应用温压计时, 需特别小心。例如, 在降温过程中, 斜长石、碱性长石之间 Al-Si、K-Ca 交换是同时进行的(以保持电荷平衡), 而 Al-Si 在两种长石间的交换是很缓慢的。所以, 在降温早期, Al-Si、K-Ca 交换就已基本停止, 因此对于 Ca 来说两矿物实际上已经成了封闭体系。但是, 由于 Na-K 交换同 Al-Si 交换没有关系, 所以 Na-K 交换过程并未因此停止[14]。这样, 在降温事件导致的离子再交换作用最终停止时, 由于矿物中变质峰期的 K、Na、Ca、Al 成分保存程度不同, 所以实际上斜长石、碱性长石已经不再是平衡共生矿物了。此时, 要采用二长石温度计求算变质峰期温度, 就需要对斜长石、碱性长石的成分做适当的校正[14]。

其它矿物之间不同元素对降温事件的反应如何, 也值得进一步探索。如果上述现象是普遍存在的, 那么基于平衡共生矿物组合的多相平衡矿物温压计(例如 TWQ 程序)的应用将受到极大限制。

1.4 矿物平衡—非平衡关系的判别

变质矿物之间的平衡—非平衡关系并不容易判别。即使矿物之间呈"120°夹角"的结构也不代表矿物之间一定达到了化学平衡[15]。在多相平衡热力学计算中, 即使所有矿物反应曲线相交于一点, 也说明不了参与计算的矿物一定是同时形成的[16]。对于镁铁质矿物(组合), 有一条规律可以采用, 即平衡共生的镁铁质矿物的 Fe/(Fe+ Mg) 比值, 应该具备如下的顺序: 石榴石> 斜方辉石> 黑云母(单斜辉石[17]。

变质岩中存在多期次的矿物组合, 是变质作用不同演化阶段的记录, 因而矿物世代的划分是最基础也是最重要的工作。对于存在多期次矿物组合的变质岩石来说, 目前常见的划分方案, 是将变斑晶(如石榴石)中包裹的所有细晶包裹体作为变质"峰前阶段"矿物组合, 粗粒平衡共生的变斑晶矿物和基质矿物全部作为变质"峰期阶段"矿物组合, 变斑晶矿物外围的后成合晶矿物作为变质"峰后阶段"矿物组合, 后成合晶矿物、基质矿物退变质形成的各种矿

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

物则属“退变质阶段”的矿物组合。这样的划分有时并不完全正确, 因为包裹体矿物组合有时并不是平衡共生的组合, 即同一变斑晶中的各种包裹体矿物有可能是不同期次的。例如, 魏春景等[18] 注意到大别山中部超高压榴辉岩的石榴石中包裹体矿物的平衡状态可能被后期变质过程所改变, 张泽明等[19] 发现鄂北高压榴辉岩相变质岩石榴石中的包裹体并非同期矿物。

对于地理上相邻的或相近的不同岩石来说, 如果矿物(组合)之间不存在质量平衡关系, 它们有可能是平衡共生的矿物(组合), 即有可能形成于相同的环境; 如果它们之间存在质量平衡关系, 则极有可能不是平衡组合, 或者恰好是处于单变度平衡反应条件下的平衡组合。这时, 对平衡关系的判定要十分谨慎。为定量检验一个矿物组合的矿物之间或者不同矿物组合之间是否存在质量平衡关系, 可以用“矿物成分的矩阵奇值分解”方法[20] 来确定。

矩阵奇异值分解(SVD) 基于如下理论[20]: 任何一个 m × n 矩阵 M, 都可以分解为一个列正交矩阵 U、一个 n × n 对角矩阵 W、一个 n × n 正交矩阵 V 的转置矩阵 V^t 三者的乘积: M = U * W * V^t。矩阵的这种分解非常有用, 因为经过一次运算, 就可以得出对寻求矿物(组合) 之间是否存在质量平衡关系有关的直接结果: W 中非零对角元素(即矩阵 M 的奇异值) 的数量就是矩阵 M 的秩, 对应于 W 非零元素的矩阵 U 的列构成矩阵 M 的正交基底, 对应于 W 中零对角元素的矩阵 V 的列给出了 M 的零空间(即反应空间) 的正交基底。据此可判断矿物(组合) 之间是否存在质量平衡关系, 如果存在, 则可方便地给出质量平衡关系式。

此外, 确定变质高峰期间的共生矿物对也并非易事。Kohn[13] 指出: ①在降温期间往往会发生退变质反应, 因此改变变质高峰期的矿物成分, 所以变质高峰期矿物成分几乎不可能完全保留下来; ②特定矿物中某种元素扩散速率可能较慢, 元素的迁出与随后的“沉淀”, 通常会造成复杂的矿物化学成分环带。因为矿物在岩石中的分布并不总是均匀的, 所以同一矿物成分可能也不均匀: 几乎所有变质矿物都可能产生化学成分环带, 或者说同一矿物不同颗粒化学成分可能不均匀; ③目前人们对天然岩石中矿物成分变化的解释水平还有限。由于选择用来推算岩石变质条件的矿物对化学成分“匹配”不适当, 带来的温度计算误差, 要远远大于矿物成分分析误差造成的温度、压力计算误差[13]。从这一方面说, 最有意义的工作是尽量首先使用电子探针能谱扫描, 大量地扫描不同矿物以及相同矿物不同部位, 以此初步确定矿物是否经历了元素扩散及/或分解[13]。

1.5　对变质高峰期矿物原始成分的恢复

鉴于变质高峰期矿物原始成分不同程度地发生变化, 所以人们已经在尝试恢复矿物原始成分。例如, Kohn 等[13] 研究了尼泊尔中喜马拉雅地区含有共生黑云母和石榴石的角闪岩相变泥质岩, 发现石榴石边部 Fe/Mg 比值、Mn 含量都升高, 黑云母边部 Fe/Mg 比值也升高, 认定岩石中发生了退变质性质的纯转换反应: 石榴石+ 白云母 = 黑云母+ 斜长石, 使石榴石变质峰期成分发生了改变。他们利用石榴石边部 Mn 升高的数量, 推测已分解的石榴石的体积, 从而确定退变质纯转换反应产生的黑云母数量, 以及黑云母成分变化情况。经过计算, 他们发现该地区原始石榴石体积的 40% 至少发生了分解。利用计算恢复的原始石榴石、原始黑云母的体积百分数及其化学成分计算出的变质高峰期温度, 比传统上简单利用未经恢复的 Fe/Mg 比值最低的石榴石成分和基质黑云母成分计算出的变质高峰期温度, 更接近客观实际[13]。又如, 苏鲁仰口超高压变质带内的早期石榴石变斑晶的核部分解出了细小的单斜辉石、金红石、磷灰石出溶晶体, 根据各种矿物相对体积大小和矿物成分的电子探针分析数据, 经计算得到了石榴石的原始成分, 发现这样的石榴石富含 Na、Ti、P 组分, 符合超高压成因石榴石的特征[21]。

2　矿物温度计、压力计、速率计

2.1　概述

矿物温度计、压力计是估算变质温度、压力的有力工具, 对地质学定量研究、探索地壳演化起着重要作用。自 20 世纪 30 年代以来, 矿物温压计一直是方兴未艾的研究热点。总的来说, 近年来矿物温压计在如下方面有大的进展: ①用来标度温压计的化学组分趋于复杂, 也更为接近实际岩石、矿物的化学组分。矿物活度模型也更为合理, 例如近年来对石榴石活度模型的研究[22~24]; ②发现矿物成分同稳定同位素分馏系数之间存在规律[25]; ③出现了适用于估算岩浆结晶环境的压力计, 例如单斜辉石压力计[26]; ④发现压力对矿物之间稳定同位素的分馏有影响[27]; ⑤出现了稀有元素温度计[28] 和稀土元素温度计[29,30]; ⑥出现了显微构造温压计[31]; ⑦相对

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

温压计理论更加完善[32]；⑧发现了适用于冲击变质作用的压力计[33]；⑨一些常用的温压计得到不断改进,如黑云母—石榴石温度计已经改进到第 29 个版本[23],石榴石—单斜辉石温度计则经过了 18 次修正[34],石榴石—白云母温度计也经过了 4 次修正[35]。每一次的改进,都使得温压计重现实验温度、压力的能力有所提高,对天然岩石的应用也得出更加符合客观实际的结果。

同温度计相比,压力计的研究相对薄弱,尤其是变泥质岩系压力计,精确度尚有待于提高。例如,对于常用的石榴石—铝硅酸盐—斜长石—石英(GASP)压力计的各种版本,仅仅 ±50 ℃的温度估算误差,带来的压力计算误差就高达 80~ 150 kPa。应该指出,学者们在标度 GASP 压力计时,采用的是纯钙长石的分解反应,与天然矿物固溶体相差甚远,所以该压力计存在着自身不能克服的缺点,表现为 GASP 压力计不能准确反映相应铝硅酸盐矿物的稳定域。采用天然钙长石的实验标度工作势在必行。

1995 年以来,已有 4 套矿物热力学数据库[36~ 39]问世,给岩石热力学和矿物温压计的研究带来了不少方便。随着矿物热力学数据的不断完善,得到广泛应用的“多相平衡温压计”(如 TWQ 程序[40] 等)也得到了不断改进,新版本在互连网上连续发布。

2.2 相对矿物温压计

相对矿物温压计并不是一个新概念。Spear[41] 通过对 Gibbs 方程的微分,推导了石榴石的化学成分环带与变质温度、压力的函数关系,这就是后来得到广泛应用的石榴石环带 P-T 轨迹方法,是较早的相对矿物温压计。

考虑到传统的温压计存在着大的误差,同时也考虑到弄清楚不同岩石之间的变质温度、压力的差别大小,比单纯求得岩石变质温度、压力的具体数值更为有意义,最近出现了“高精度相对矿物温压计”(high-precision relative thermobarometry)的概念(也称为“ΔPT”方法)[32]。该相对矿物温压计方法既不同于微分热力学方法[41],也不同于 Gibbs 方法[42, 43],它是通用方法,不依赖于热力学数据和矿物活度模型。该方法建立在平均 PT 方法(方法)的基础上[44]。具体计算原则是,对于矿物组合相同或者相似的两个不同的岩石标本,对同种矿物采用相同的活度模型和热力学参数,将矿物活度模型误差、矿物热力学参数误差、矿物成分分析误差综合考虑,并采用相同的误差传导方程,经矩阵运算,最终求得两岩石变质条件的差别。由于采用了相同的矿物活度模型、矿物热力学参数,所以由这两项误差带来的温度、压力计算误差在计算中相互抵消,对最终结果没有影响,而只有矿物成分分析误差对最终结果才有影响。由于采用电子探针分析矿物,所以矿物成分分析误差是很小的。对于变质条件差别小的岩石,传统的矿物温压计是区分不开的,而 ΔPT 方法却可以区分开这种差别。由此获得的岩石变质温度、压力在空间、时间上的差别,对研究造山过程、变质过程的地温梯度、压力梯度,以及由此探讨大地构造演化,具有重要科学意义[32]。

Fraser 等[45] 沿尼泊尔高喜马拉雅地区 Langtang 山谷的“倒转变质带”,系统采集了变泥质岩样品,利用高精度相对矿物温压计[32] 研究了该地带的变质温度压力条件,发现岩石变质温度基本一样(600 ℃ ±),不存在所谓的“倒转变质”现象。相对压力计算结果则反映压力存在两个明显的间断,说明变质作用之后可能有断裂作用造成了地层的叠加、重复。

2.3 矿物速率计

矿物速率计(geospeedometry)也不是新概念。Lasaga[46] 指出,基于 Fe-Mg 交换或者 Ca-Mg 交换的温度计并不必然能反映“峰期”变质温度条件,这是因为受后期降温事件的影响,铁镁质矿物对之间会发生离子再交换过程,从而破坏了峰期矿物成分。影响离子再交换程度的因素有峰期温度高低、后期降温速率大小、矿物粒径大小等。根据热力学理论模拟,Lasaga 得出了铁镁质矿物对之间 Fe-Mg 再分配系数同变质峰期温度、峰期分配系数、离子扩散速率等因子之间的函数关系,即矿物速率计[46]。它主要描述了岩石冷却速率,也是铁镁质矿物保持峰期化学成分程度的直接标志。通过模拟,得出如下结论:①铁镁质矿物即便不出现成分环带,也不能证明一定保持了化学平衡;②温度计是否有效,取决于扩散速率最小的矿物;③通常与石榴石有关的温度计对于大多数变质作用有效,与橄榄石有关的温度计则只在冷却速率大于 10 ℃/a 的极高速冷却条件下才有效。石榴石—单斜辉石温度计则不好判断[43]。Ehlers 等[47] 根据冷却扩散理论,推导出了从降温开始直至结束一直处于平衡状态的石榴石—黑云母矿物对的冷却过程。

人们将这种根据矿物化学成分扩散求得的冷却速率称为“岩石学冷却速率”(petrologic cooling rates),而将根据矿物同位素年代和封闭温度得到的冷却速率称为“年代学冷却速率”(geochronologic

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

cooling rates)[11]。

矿物速率计分为离子交换速率计和单矿物速率计两种。离子交换速率计是指根据矿物对之间离子交换获得降温速率, 例如根据石榴石退变质扩散环带及与其共生的铁镁质矿物(橄榄石、黑云母、堇青石) 成分来推测岩石降温速率。单矿物速率计是指根据单矿物(例如石榴石、斜方辉石单晶体内元素的扩散规律) 推测岩石降温速率的方法。

最近“补偿规则” (compensation law) 引入了矿物速率计[48]。所谓“补偿规则” 是指描述矿物速率计的方程中扩散参数同活化能之间具有线性函数关系, 在新的速率计表达式中充分考虑了这种函数关系, 这是对速率计的大的改进。修正后的矿物速率计能直接给出冷却速率, 并且与实验结果一致。此外, 还推导出了基于石榴石成分环带的速率计[49]。现在, 人们已经开始进行与矿物速率计有关的实验。例如, 最近开始通过实验研究石榴石中 Fe、Mg、Mn、Ca 元素的扩散速率, 不过目前限于 900~ 1 400 ℃的高温条件[50,51], 对于一般变质条件下的天然岩石的应用还有一些距离。对斜方辉石晶体有序—无序的研究近年来也成为矿物速率计研究的一项重要内容。除对斜方辉石晶体内 Fe-Mg 的有序—无序经验分析外, 近年来还有直接的实验研究[52,53]。通过实验, 得出了斜方辉石晶体内 M1、M2 位置上离子分配系数同实验温度及冷却时间的关系[54]。

虽然矿物速率计研究已有近 20 年时间, 但是开展这项研究的实验室还不多, 研究成果还有限, 同时矿物速率计还没有得到广泛应用。可以预见, 随着速率计研究的深入, 人们对自然地质过程将会有更深入的理解。

3　矿物中 Fe^{3+} 含量问题

变质成因的镁铁质矿物中 Fe^{3+} 含量的测定, 不仅可以用来探讨变质过程中的氧逸度, 同时还对矿物晶体化学研究和变质作用温度、压力的合理计算有重要意义。尽管曾有学者[55,56]提出了 Fe^{3+} 含量的各种计算方法, 但是对晶体结构中存在空位的或者 H_2O 含量有变化的矿物(例如黑云母、角闪石、白云母) , 这些“校正” 方法往往得不出符合实际的结果。对 Fe^{3+} 含量的确定, 目前直接确定的方法有 M 9 ssbauer 谱分析和化学分析两种方法。最近发展的M 9 ssbauer milliprobe 谱新技术, 可以在 50 μm × 30 μm 的区域里实现矿物原位 Fe^{3+} 含量的分析[57]。此外, 基于铁的 X 光谱波峰根据化学价态的有规律变化, 人们也在尝试直接用电子探针来确定矿物中二价铁和三价铁的含量[58,59]。

近年来对单矿物的 Fe^{3+} 含量分析结果, 改变了人们以往对常见矿物中 Fe^{3+} 含量的假设或推定。利用 M 9 ssbauer milliprobe 谱技术, 对美国 George Creek 金伯利岩金刚石中石榴石、单斜辉石包裹体(~ 200μm) 的分析, 表明矿物实际的 Fe^{3+} 含量与根据电子探针数据计算“校正” 得来的 Fe^{3+} 含量之间没有规律性联系[60], 即以往根据电子探针分解结果校正 Fe^{3+} 含量的方法基本是无效的。对俄国 Yakutia 地区 Udachnaya 金伯利岩中榴辉岩俘虏体内石榴石、单斜辉石的 M 9 ssbauer milliprobe 谱分析也说明了这个问题, 发现通常电子探针数据计算“校正” 得来的 Fe^{3+} 含量较高[61]。这些工作说明, 根据电子探针数据“校正矿物 Fe^{3+} 含量” 的常规方法的确值需要再商榷。通过对变泥质岩中大量白云母的 M 9 ssbauer 谱分析[62], 发现白云母 Fe^{3+} 含量与变质程度无关, 而与岩石中的不透明矿物有关。含石墨+ 钛铁矿的变泥质岩中白云母 Fe^{3+} / Fe 比值在0. 28~ 0. 61之间, 平均为 0. 45 ±0. 11。含磁铁矿+ 钛铁矿的的变泥质岩中白云母 Fe^{3+} / Fe 比值在0. 33~ 0. 75 之间, 平均 0. 67 ±0. 06。

这些工作说明, 任何涉及变质岩的温度、压力计算, 矿物中的 Fe^{3+} 含量的精确确定是必不可少的。原位测定 Fe^{3+} 含量的技术成熟之后, 变质矿物成分分析将上一个新台阶。

4　变质矿物原位定年

自然界岩石经历的变质作用往往是多期次的, 尤其是年代久远的古老变质岩石, 可经历多期次的变质作用。如何真实客观地再现变质作用完整的过程, 是对地质年代学研究提出的极大挑战。

目前, 对变质作用的定年, 人们大多还在采用锆石、磷灰石、独居石等副矿物的 U-Pb 定年方法, 或者用同变质期次不同矿物获得矿物等时线年龄。但是, 这些方法具有如下的不足之处: ①要求分离出单矿物。这不可避免地破坏了岩石原来的结构, 也丢失了岩石结构所代表的变质作用演化的丰富历史信息; ②不能避免将不同期次的同种矿物混合在一起的情况; ③也无法区分多期次继承性生长的单矿物不同“圈层” 的年龄, 从而得出“混合年龄”。例如, 西阿尔卑斯陶恩构造窗角闪岩相变质的变花岗岩中, 独居石外围依次生长了磷灰石→褐帘石→绿帘石环带, 此时常规单矿物定年方法已经不容易定年[63]。

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

又如, 欧洲中部华力西造山带中波希米亚(Bohemian)地体的酸性麻粒岩中的锆石, 是在岩石抬升至较浅部的中压环境时才形成的, 所以此时锆石的常规 U-Pb 年龄不能代表变质峰期时代[64]。所以, 即便副矿物年龄能准确测定, 结果仍然具有多解性。无论如何, 直接对变质矿物定年来限定变质作用的时代[65], 比单纯对副矿物测年获得的成果更为直观、可信。

近年来国际上开展了针对变质矿物的显微"原位"定年技术, 取得了初步成功。目前已经有报道的有如下 4 种方法:

4.1 激光探针等离子体质谱法

目前, 矿物微区激光探针等离子体质谱法(LP-ICPMS) U-Pb 定年主要用于对锆石年龄的测定。对晶质铀矿、锆石的原位测年也取得了成功。激光束微区分析区域直径可小至 20~ 30 μm[66]。这种方法具有快速、高灵敏度、低成本的特点, 不失为一种先进的, 同时也值得尝试和改进的方法[67]。关鸿等[67]用该方法在阜平片麻岩一颗锆石的连续 U-Pb 剖面中, 获得了 2 528~ 1 888 Ma 的年龄谱, 具有很大的时间跨度, 反映锆石可能有复杂的生长历史。对锆石种类单一的样品, 可以获得理想的年龄[68]。不足的是该方法较单颗粒锆石 U-Pb、SHRIMP 法稍低。

4.2 激光探针$^{40}Ar/^{39}Ar$ 法

目前矿物微区激光探针$^{40}Ar/^{39}Ar$ 法获得了不断的改进。该方法的优点是可以在显微镜监视下直接测定岩石和矿物样品的同位素年龄, 可以在很大程度上排除空气 Ar 的干扰, 实现常规 Ar-Ar 法所不能达到的低本底分析。分辨能力可以达到 10 μm。例如, 利用矿物微区激光探针$^{40}Ar/^{39}Ar$ 定年方法, 获得了西伯利亚 Udachnaya 地区金伯利岩中榴辉岩捕虏体中金刚石包裹的单斜辉石包裹体(粒径 10~ 100 μm)的年龄 1149±37 Ma, 这一年龄远较金伯利岩的年龄(340~ 400 Ma)为老, 说明单斜辉石包裹体可能是早期的地幔矿物[69]。利用激光探针$^{40}Ar/^{39}Ar$ 方法测定桑干地区高压麻粒岩中石榴石变斑晶和后成合晶斜长石[70], 获得了石榴石变斑晶的年龄为 2 510 Ma, 后成合晶斜长石的年龄为 1 968 Ma, 说明两期变质作用的时代相差达 500 Ma。

4.3 电子探针测年法

应用电子探针定年方法对十字石[71]、独居石[72~74]的测年已经取得初步成功。例如, 可以使用 CAMECA SX-50 电子探针仪, 用波长色散 X 光谱(Wavelengh Dispersive X-ray)技术在岩石薄片上同时测定 Th-U-total Pb 浓度, 通过计算获得所测矿物的年龄圈层。X 光扫描步长可小至 0.5 μm, 分析的矿物颗粒可小至 10 μm。对于 Th 含量高(Th 质量百分含量大于 3)的前寒武纪独居石, 年龄分析误差< 10 Ma, 对于 Th 含量低的年轻独居石, 年龄分析误差为 10~ 20 Ma。虽然这种方法分析误差较传统方法大, 但是由于其原位、微区、快速、低成本的优点, 开始得到地质学家的重视, 并取得了良好效果[71]。使用该方法获得了加拿大 Neil Bay 地区石榴石中独居石包裹体的两期年龄, 以及挪威西片麻岩区两期独居石包裹体的年龄[74]。该方法的局限是对电子探针仪的精度要求极高, 一般的电子探针仪达不到测年所需精度要求。

4.4 二次离子质谱测年法

二次离子质谱(Secondary ion mass spectrometry, SIMS)测年法早在 70 年代就已出现, 较成熟应用却是近年来的事情[75, 76]。通过对苏格兰西北部刘易斯(Lewisian)麻粒岩两期石榴石变斑晶中包裹的独居石的$^{207}Pb/^{206}Pb$ 定年, 证实了该地区存在两期麻粒岩相变质作用[76]。该方法分析区域可小至 10 μm。

目前这些原位定年方法虽然取得了初步成功, 但是其精确度仍需提高。

5 展 望

人们在不断拓宽变质岩石学的研究范围, 例如近年来发现变质矿物颗粒边缘具有自相似特征, 对于矿物结晶行为的研究提供了新思路[77]。动态重结晶石英颗粒的分形特征, 可以用来确定岩石变形温度及应变速率[78]。

近年内需要深入开展的工作至少有如下几个方面: ①深化并且充分利用已有的矿物微区成分分析和放射性原位微区测年方法, 研究变质过程中的各种显微—超显微现象, 探讨变质反应速率。合适的研究对象是保留有多期变质矿物组合的变泥质岩石、变基性岩石; ②研究不同大地构造环境的变质作用特征。例如, 对能准确确定大地构造归属的中、新生带造山带开展深入的变质作用研究, 就能在更细微、精确的程度上揭示地壳演化过程; ③实施大量的高精度矿物相平衡逆转实验, 包括能直接标度矿物温压计的实验, 以获取高精度矿物热力学数据, 进一步发展矿物固溶体热力学; ④采用岩石学实验模拟岩石变质过程, 深入研究变质反应动力学。当然, 这对实验的设计和实验仪器的开发提出了更高的要求。

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

致谢: 沈其韩院士阅读了全文, 指出了初稿的许多不足之处; 审稿人提出了宝贵的修改意见, 作者谨向他们表示真挚的谢意。

参考文献(References):

[1] Shen Qihan, Zhuang Yuxun, Geng, Yuansheng. Some research progresses of metamorphic petrology and geology of China in the 1990s[A]. In: Ouyang Ziyuan ed. Summaries and Perspectives of Mineralogy, Petrology and Geochemistry between the Two Centuries[C]. Beijing: Nuclear Energy Press, 1998. 86-93. [沈其韩, 庄育勋, 耿元生. 90 年代以来我国变质岩石学和变质地质学研究的若干进展[A]. 见: 欧阳自远主编. 世纪之交矿物学岩石学地球化学的回顾与展望[C]. 北京: 原子能出版社, 1998. 86-93.]

[2] Wang Renmin. Some research progresses and perspectives[A]. In: Ouyang Ziyuan ed. Summaries and Perspectives of Mineralogy, Petrology and Geochemistry between the Two Centuries[C]. 1998. 105- 107. [王仁民. 变质岩石学的若干进展和发展趋势[A]. 见: 欧阳自远主编. 世纪之交矿物学岩石学地球化学的回顾与展望[C]. 北京: 原子能出版社, 1998. 105-107.]

[3] Gao Pingxian. Some problems in the studies of porphyroblast inclusion trails[J]. Progress in Precambrian Research, 1997, 20: 55-63. [高坪仙. 变斑晶包裹体形迹研究的几个问题[J]. 前寒武纪研究进展, 1997, 20(4): 55-63.]

[4] You Zhendong. The global distribution of ultrahigh- pressure metamorphic rocks and its rhythms of the Earth's evolution[J]. Earth Science Frontiers, 1997, 4: 271-280. [游振东. 超高压变质岩的全球分布与地球演化节律[J]. 地学前缘, 1997, 4: 271-280.]

[5] Cong Bolin, Wang Qingchen. Recent research progress of the Dabieshan-Sulu ultra-high pressure metamorphic belt[J]. Chinese Science Bulletin, 1999, 44: 1 127-1 141. [从柏林, 王清晨. 大别山—苏鲁超高压变质带研究的最新进展[J]. 科学通报, 1999, 44: 1 127-1 141.]

[6] Wang Qingchen. Development of studying Ultrahigh-Pressure Metamorphic rocks from China during the past 15 years[J]. Acat Geoscientia Sinica, 2001, 22: 11-16. [王清晨. 中国超高压变质岩十五年研究进展[J]. 地球学报, 2001, 22: 11-16.]

[7] Gaca-Casco A, Torres-Rold n R L. Natural metastable reactions involving garnet, staurolite and cordierite: implications for petrogenetic grids and the extensional collapse of the beltic- rif belt[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1999, 136: 131-153.

[8] St-Onge M R, Ijewliw O J. Mineral corona formation during high-P retrogression of granulitic rocks, Ungava orogen, Canada[J]. Journal of Petrology, 1996, 37: 553-582.

[9] Spear F S, Florence F P. Thermobarometry in granulites: pitfalls and new approaches[J]. Precambrian Research, 1992, 55: 209-241.

[10] Indares A. Metamorphic interpretation of high-pressure-temperature metapelites with preserved growth zoning in garnet, eastern Grenville Province, Canadian Shield[J]. Journal of Metamorphic Geology, 1995, 13: 475-486.

[11] Spear F S, Parrish R R. Petrology and cooling rates of the Valhalla Complex, British Columbia, Canada[J]. Journal of Petrology, 1996, 37: 733-765.

[12] Liu Shuwen, Zhang Jinjiang, Zheng Yadong. P-T path of the metamorphism coeval to deformation, Xiaoqinling metamorphic complex[J]. Chinese Science Bulltin, 1997, 42: 312-318. [刘树文, 张进江, 郑亚东. 小秦岭变质核杂岩同变形期的 P- T 路径[J]. 科学通报, 1997, 42: 312-318.]

[13] Kohn M J, Spear F S. Retrograde net transfer reaction insurance for pressure-temperature estimates[J]. Geology, 2000, 28: 1 127-1 130.

[14] Raase P. Feldspar thermometry: a valuable tool for deciphering the thermal history of granulite-facies rocks, as illustrated with metapelites from Sri Lanka[J]. Canadian Mineralogist, 1998, 36: 67-86.

[15] Fitzsimons I C W, Harley S L. The influence of retrograde cation exchange on granulite P-T estamates and a convergence technique for the recovery of peak metamorphic conditions[J]. Journal of Petrology, 1994, 35: 543-576.

[16] Scott D J, St-Onge M R. Constraints on Pb closure temperature intitanite based on rocks from the Ungava Orogen, Canada: implications for U-Pb geochronology and p-T-t path determinations[J]. Geology, 1995, 23: 1 123-1 126.

[17] Spear F S, Markussen J C. Mineral zoning, P-T-X-M phase relations, and metamorphic evolution of some Adirondeck granulites, New York[J]. Journal of Petrology, 1997, 38: 757-783.

[18] Wei Chunjing, Wang Shiguang, Zhang Lifei, *et al*. Some insights on the P-T path and exhumation of the ultrahigh- pressure eclogites in central China[J]. Acta Petrologica Sinica, 1996, 12: 70-78. [魏春景, 王式光, 张立飞, 等. 对中国东部超高压榴辉岩的 P- T 轨迹及回返机制的新认识[J]. 岩石学报, 1996, 12: 70-78.]

[19] Zhang Zeming, Wei Bize, Han Yujing, *et al*. Metamorphism, deformation and fluid evolution of the high-pressure eclogite facies metamorphic belts in the northern Hubei Province[J]. Acta Petrologica Sinica, 1999, 15: 48-56. [张泽明, 韦必则, 韩郁菁, 等. 鄂北高压榴辉岩相变质带的变质、变形和流体演化[J]. 岩石学报, 1999, 15: 48-56.]

[20] Whitney D L, Lang H M, Ghent E D. Quantitative determination of metamorphic reaction history: mass balance relations between groundmass and mineral inclusion assemblages in metamorphic rocks[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1995, 120: 404-411.

[21] Ye Kai, Cong Bolin, Ye Danian. The possible subduction of continental material to depths greater than 200 km[J]. Nature, 2000, 407: 734-736.

[22] Mukhopadhyay B, Holdaway M J, Koziol A M. A statistical model of thermodynamic mixing properties of Ca-Mg-Fe^{2+} gar-

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

nets [J]. American Mineralogist, 1997, 82: 165-181.

[23] Holdaway M J. Application of new experimental and garnet margules data to the garnet-biotite geothermometer [J]. American Mineralogist, 2000, 85: 881-892.

[24] Geiger C A. Volumes of mixing in aluminosilicate garnets: solid solution and strain behavior [J]. American Mineralogist, 2000, 85: 893-897.

[25] Mattews A. Oxygen isotope geothermometers for metamorphic rocks [J]. Journal of Metamorphic Geology, 1994, 12: 211-219.

[26] Nimis P. Clinopyroxene geobarometry of magmatic rocks. Part 2. Structural geobarometers for basic to acid, tholeiitic and mildly alkaline magmatic systems [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1999, 135: 62-74.

[27] Polyakov V B, Kharlashina N N. Effect of pressure on equilibrium isotopic fractionation [J]. Geochimica et Cosmochimica Aeta, 1994, 58: 4 739-4 750.

[28] Canil D. The Ni-in-garnet geothermometer: calibration at natural abundances [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1999, 136: 240-246.

[29] Heinrich W, Andrehs G, Franz G. Monazite-xenotime miscibility gap thermometry I. An empirical calibration [J]. Journal of Metamorphic Geology, 1997, 15: 3-16.

[30] Pyle J M, Spear F S. An empirical garnet (YAG)-xenotime thermometer [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 2000, 138: 51-58.

[31] Kruhl J H. Prism and basal-plane parallel subgrain boundaries in quartz: a microstructural geothermobarometers [J]. Journal of Metamorphic Geology, 1996, 14: 581-589.

[32] Worley B, Powell R. High-precision relative thermobarometry: theory and a worked example [J]. Journal of Metamorphic Geology, 2000, 18: 91-101.

[33] Feldman V I, Sazonova L V, Kotelnikov S I. Geobarometers for shock metamorphism-experimental justification [A]. 31th International Geological Congress Abstracts[C]. 2000.

[34] Ravna E K. The garnet-clinopyroxene Fe^{2+}-Mg geothermometer: an updated calibration [J]. Journal of Metamorphic Geology, 2000, 18: 211-219.

[35] Wu Chunming, Zhao Yingjun. Precise re-calibration of the garnet-muscovite geothermometer [J]. Science in China (series D), 2001, 31: 162-170. [吴春明、赵英俊. 石榴石—白云母温度计的合理修正 [J]. 中国科学(D 辑), 2001, 31: 162-170.]

[36] Robie R A, Hemingway B S. Thermodynamic properties of minerals and related substances at 298.15 K and 1 bar(105 Pascals) and at higher temperatures [J]. US Geological Survey Bulletin, 1995, No. 2131.

[37] Berman R G, Aranovich L Ya. Optimized standard state and solution properties of minerals I. Calibration for olivine, orthopyroxene, cordierite, garnet, and ilmenite in the system FeO-MgO-CaO-Al_2O_3-TiO_2-SiO_2 [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1996, 126: 1-24.

[38] Gottschalk M. Internally consistent thermodynamic data for rock-forming minerals [J]. European Journal of Mineralogy, 1997, 9: 175-223.

[39] Holland T J B, Powell R. An internally consistent thermodynamic data for phases of geological interests [J]. Journal of Metamorphic Geology, 1998, 16: 309-343.

[40] Berman R G. Thermobarometry using multi-equilibrium calculations: a new technique, with petrological applications [J]. Canadian Mineralogist, 1991, 29: 833-855.

[41] Spear F S. Relative thermobarometry and metamorphic P-T paths [A]. In: Daly J S, Cliff R A, Yardley B W D, eds. Evolution of Metamorphic Belts [C]. London: Geological Society Special Publication, 1989, 43: 63-81.

[42] Spear F S, Ferry J M, Rumble D. Analytical formulation of phase Equilibria: the Gibbs' method [J]. Reviews in Mineralogy, 1982, 10: 105-152.

[43] Spear F S, Selverstone J. Quantitative P-T paths from zoned minerals: theory and tectonic applications [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1983, 83: 348-357.

[44] Powell R, Holland T J B. Optimal geothermometry and geobarometry [J]. American Mineralogist, 1994, 79: 120-133.

[45] Fraser G, Worley B, Sandiford M. High-precision geothermobarometry across the high Himalayan metamorphic sequence, Langtang Valley, Nepal [J]. Journal of Metamorphic Geology, 2000, 18: 665~ 681.

[46] Lasage A C. Geospeedometry: an extension of geothermometry [A]. In: Saxena S K, ed. Kinetics and Equilibrium in Mineral Reactions[C]. Advances in Physical Geochemistry. New York: Springer, 1983, 3: 81-114.

[47] Ehlers K, Powell R. Cooling rate histories from garnet+ biotite equilibrium [J]. American Mineralogist, 1994, 79: 737-744.

[48] Jaoul O, Sautter V. A new approach to geospeedometry based on the "compensation law" [J]. Physics of the Earth and Planteary Interiors, 1999, 110: 95-114.

[49] Perchuk A L. Geospeedometry and time scales of high-pressure metamorphism [J]. International Geology Review, 2000, 42: 207-223.

[50] Ganguly J, Cheng W, Chakraborty S. Cation diffusion in aluminosilicate garnets: experimental in pyrope-almandine diffusion couples [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1998, 131: 171-180.

[51] Freer R, Edwards A. An experimental study of CA-(Fe, Mg) interdiffusion in silicate garnets [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1999, 134: 370-379.

[52] Zema M, Domeneghetti M C, Tazzoli V. Order-disorder kinetics in orthopyroxene with exsolution products [J]. American Mineralogist, 1999, 84: 1 895-1 901.

[53] Stimpfl M, Ganguly J, Molin G. Fe^{2+} - Mg order-disorder in orthopyroxene: equilibrium fractionation between the octahedral sites and thermodynamic analysis [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1999, 136: 297-309.

[54] Heinemann R, Kroll H, Langenhorst F, *et al*. Time and tem-

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

perature variation of the intracrystalline Fe^{2+}, Mg fractionation in Johnstown meteoritic orthopyroxene [J]. European Journal of Mineralogy, 2000, 12: 163-176.

[55] Droop G T R. A general equation for estimating Fe^{3+} concentrations in ferromanesian silicates and oxides from microprobe analyses, using stoichiometric criteria [J]. Mineralogical Magazine, 1987, 51: 431-435.

[56] Leake B E, *et al*. Nomenclature of amphiboles: report of the Subcommittee on Ampjiboles of the International Mineralogical Association, Commission on New Minerals and Mineral Names [J]. American Mineralogist, 1997, 82: 1 019-1 037.

[57] Delaney J S, Bajt S R, Sutton S R, *et al*. In situ microanalysis of $Fe^{3+}/\Sigma Fe$ in amphibole by X-ray absorption near edge-structure (XANES) spectroscopy in mineral spectroscopy: A Tribute to Roger G Burns [J]. The Geochemical Society Specil Publication, 1996, 5: 165-171.

[58] Kato T. Fe^{2+}/Fe^{3+} mapping with the electron probe micro analyzer (EMPA) [A]. 31th International Geological Congress Abstracts[C]. 2000.

[59] Enders M, Speer D, Maresch W V. The determination of the iron oxidation ratio in minerals with the electron microprobe—is it worth the effort? [A]. 31th International Geological Congress Abstracts[C]. 2000.

[60] McCammon C A, Chinn I L, Gurney J J, *et al*. Ferric iron content of mineral inclusions in diamonds from George Creek, USA determined using Mössbauer spectroscopy: implications for oxygen fugacity [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1998, 133: 30-37.

[61] Sobolev V N, McCammon C A, Taylor L A, *et al*. Precise Mössbauer milliprobe determination of ferric iron in rock-forming minerals and limitations of electron microprobe analysis [J]. American Mineralogist, 1999, 84: 78-85.

[62] Guidotti C V, Yates M G, Dyar M D, *et al*. Petrogenetic implications of the Fe^{3+} content of muscovite in pelitic schists [J]. American Mineralogist, 1994, 79: 793-795.

[63] Finger F, Broska I, Roberts M P, *et al*. Replacement of primary monazite by apatite-allanite-epidote coronas in an amphibolite facies granite gneiss from the eastern Alps [J]. American Mineralogist, 1998, 83: 248-258.

[64] Roberts M P, Finger F. Do U-Pb zircon ages from granulites reflect peak metamorphic conditions? [J]. Geology, 1997, 25: 319-322.

[65] Li S G, Jagoutz E, Li Q L. 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 [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2000, 64: 1 077-1 093.

[66] Fryer B J, Jackson S E, Longerich H P. The application of laser ablation microprobe-inductively couple plasma- mass spectrometry (LAM-ICP-MS) to in situ (U)-Pb geochronology [J]. Chemical Geology, 1993, 109: 1-8.

[67] Guan Hong, Sun Min, Xu Ping. Geochronological study of zircons from high-grade gneisses of Fuping Complex by LP-ICPMS technique [J]. Acta Petrologica Sinica, 1998, 14: 460-470. [关鸿, 孙敏, 徐平. 阜平杂岩中几种不同类型片麻岩的锆石激光等离子体质谱年代学研究 [J]. 岩石学报, 1998, 14: 460-470.]

[68] Sun Min, Guan Hong. Zircon U-Pb ages of the Fuping Complex and their implications: some comments on the geochronological study of the Precambrian high-grade metamorphic terranes [J]. Acta Petrologica Sinica, 2001, 17: 145-156 [孙敏, 关鸿. 阜平杂岩年龄及其地质意义: 兼论前寒武高级变质地体的定年问题 [J]. 岩石学报, 2001, 17: 145-156.]

[69] Burgess R, Turner G, Harris J W. $^{40}Ar/^{39}Ar$ laser probe studies of clinopyroxene inclusions in eclogitic diamonds [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1992, 56: 389-402.

[70] Hu Shiling, Guo Jinghui, Dan Tongmo, *et al*. Continuous laser-probe $^{40}Ar/^{39}Ar$ dating on garnet and plagioclase: constraint on metamorphism of high-pressure basic granulite from Sanggan area, northern China Craton [J]. Acta Petrologica Sinica, 1999, 15: 518-523. [胡世玲, 郭敬辉, 戴潼谟, 等. 桑干地区高压麻粒岩中石榴石和斜长石的连续激光探针 $^{40}Ar/^{39}Ar$ 等时年龄及其地质意义 [J]. 岩石学报, 1999, 15: 518-523.]

[71] Lanzirotti A, Hanson G N. An assessment of the utility of staurolite in U-Pb dating of metamorphism [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1997, 129: 352-365.

[72] Montel J, Foret S, Veschambre M, *et al*. Electron microprobe dating of monazite [J]. Chemical Geology, 1996, 131: 37-53.

[73] Cocherie A, Lengendre O, Peucat J J, *et al*. Geochronology of polygenic monazites constrainted by in situ electron microprobe Th-U-total Pb determinations: implications for Pb behavior in monazite [J]. Geochimica et Cosmochimca Acta, 1998, 62: 2 475-2 497.

[74] Williams M L, Jercinovic M J, Terry M P. Age mapping and dating of monazite on the electron microprobe: deconvoluting multistage tectonic histories [J]. Geology, 1999, 27: 1 023-1 026.

[75] De Wolf C P, Belshaw N S, O'Nions R K. A metamorphic history from micron-scale $^{207}Pb/^{206}Pb$ chronometry of Archean monazite [J]. Earth and Planetary Science Letters, 1993, 120: 207-220.

[76] Zhu X K, O'Nions R K, Belshaw N S, *et al*. Lewisian crustal history from in situ SIMS mineral chronology and related metamorphic textures [J]. Chemical Geology, 1997, 136: 205-218.

[77] Kruhl J H. Grain boundary patterns: fractal nature and crystallographic control—new aspects of analyzing metamorphic rocks [A]. 31th International Geological Congress Abstracts [C]. 2000.

[78] Wang Xinshe, Zheng Yadong, Yang Chonghui, *et al*. Determination of the deformation temperatute and strain rate by the fraetal shape of dynamically recrystallized quartz grains [J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 2001, 20: 1-6. [王新社, 郑亚东, 杨崇辉, 等. 用动态重结晶石英颗粒的分形确定变形温度及应变速率 [J]. 矿物岩石学杂志, 2001, 20: 1-6.]

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

SOME RESEARCH ADVANCES ON DETAILED METAMORPHIC PROCESS IN THE LAST FIVE YEARS

WU Chun-ming, GENG Yuan-sheng

(Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

Abstract: In the past five years, some research advances of detailed metamorphic process is reviewed, in the following aspects: (1) chemical zoning and chemical gradient of metamorphic minerals on mm- μm scales were carefully investigated; (2) it was discovered that different elements of minerals have different abilities in resisting post-peak cooling; (3) singular value decomposition (SVD) was adopted to quantitatively judge mass equilibrium relationships, and later, to decipher the equilibrium-disequilibrium thermodynamic relationships, between assemblages of minerals; (4) the original chemical composition of minerals involved in post-peak decomposition or net transfer reaction was tried to regain; (5) the concept and method of high precision relative geothermobarometry, which is not dependent on thermochemical data or activity-composition relations of minerals involved, was developed; (6) compensation law was introduced to geospeedometry, and thus the cooling rate- time relation may be directly displayed; (7) the newly developed technique of Mössbauer milliprobe was used to determine in situ Fe^{3+} contents of minerals in an area as small as 50× 30 μm^2; (8) LP-ICPMS, $^{40}Ar/^{39}Ar$ laser-probe, electron microbe, and secondary ion mass spectrometry (SIMS) were developed to determiner in situ radioactive ages of minerals, thus continuous dating of a complete metamorphic process is possible. In the near future, the following work should be done: (a) to refine and adopt the advanced methods and instruments mentioned above, in order to investigate the various aspects and determine the speed of metamorphism; (b) to study on and summarize the characteristics of metamorphism of rocks from different tectonic terranes; (c) to do a great number of reversed equilibrium experiments on minerals, and derive high-precision thermochemical data, and to have better understanding of mixing properties of the relevant minerals; (d) to model the metamorphic process via petrological experiments, and to provide insights into metamorphic dynamics.

Key words: Metamorphic process; Equilibrium-disequilibrium; Fe^{3+} content; In situ dating.

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