

论矿物改造机制研究

张宏远^{1,2}

1. 地质过程与矿产资源国家重点实验室, 北京 100083;
2. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083

摘要: 矿物改造机制是容易被岩矿研究人员忽视的“成因矿物学”新领域之一, 主要涉及矿物诞生之后的变化过程。变形矿物及岩石显微构造定性研究已经发展成熟, 但造岩矿物显微构造变形与流体运动学和动力学关系的定量研究仍是地学前缘问题。从解析构造学原理出发, 将国内外定量研究问题概括出三方面: (1) 变形-变质期次与同变形变质温压计; (2) 利用同位素年代学分析某期次变形年龄; (3) 某期次矿物蠕变机制、差异应力估算及岩石流动定律。并从理论和应用两方面评述了一些实例, 认为建立“成因矿物学”实验室, 对于系统研究矿物学问题具有重要意义。

关键词: 矿物改造机制; 成因矿物学; 解析构造学; 定量研究; 实例

中图分类号: P571 文献标识码: A 文章编号: 1007-2802(2012)01-0052-05

A Review of Mineral Transformation Mechanism Research

ZHANG Hong-yuan^{1,2}

1. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, Beijing 100083;
2. School of the Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083

Abstract: Mineral transformation mechanism, a research frontier of “genetic mineralogy”, is commonly ignored by many rock researchers. Qualitative studies of microtectonics on both mineral type and deformation mechanism were extensively reported, however, the quantitative researches remain rare because of their physical, mathematical and chemical complexities. On the basis of Analytical Structural Geology theories, this review distinguished quantitative researches into three areas: 1) identification of deformation-metamorphism order and syntectonic temperature and confining pressure; 2) determination of deformation ages using isotope chronology technique; and 3) assessments of mineral deformation mechanism, differential stress and rheological properties of rocks. Some typical examples were discussed from aspects of theory and application. The author suggests that it is essential to establish a laboratory on “genetic mineralogy”.

Key words: mineral transformation mechanisms; genetic mineralogy; analytical structural geology; quantitative research; examples

“成因矿物学”是现代矿物学的一个重要分支^[1], 其科学主旨不仅包括矿物演化的产生过程即诞生机制, 而且包括其后续变化过程即改造机制。前者有益于地质找矿的宏观背景分析, 是我国矿物学研究的主要方面; 后者可促进赋矿部位的勘察, 主要由构造专业学者完成, 属于成因矿物学的一部分。在自然界, 除了自由空间内产生的自形程度很好的

矿物很少变形以外, 固体岩石内部赋存的矿物都有一定变形, 即经过了改造。研究表明, 变形剪切带是流体的通道、金属矿产重要的搬运通道和赋存部位^[2-4]。所以在找矿研究中, 认识矿化背景特征和运聚过程同等重要, 这是“成因矿物学”重要应用之一。电子探针、显微镜、电子显微镜、扫描电镜、EBSD等科学技术的发展, 使得深入研究矿物的构

收稿日期: 2010-12-24 收到, 2011-04-27 改回

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(90814006); 中国地质调查项目(1212011121188); 中央高校基本科研业务费专项资金资助
第一作者简介: 张宏远(1977—), 博士, 讲师, 构造地质学专业。E-mail: zhanghongyuan@cugb.edu.cn.

造现象类型及其形成机制、定量研究造岩矿物显微构造变形与流体运动学和动力学的关系成为可能^[5]。

近年来,许多学者在矿物的构造现象类型及其形成机制进行了定性研究^[6~9]。但在定量研究造岩矿物显微构造变形与流体运动学和动力学关系方面,由于涉及复杂的物理化学过程和数学建模问题,仍有待国内外地质学家解决。一些学者试图对构造变形纹内的流体包裹体进行物理化学研究^[10],但由于流体包裹体只能部分揭示当时的流体化学成分及温压属性,而岩石中流体基本已经消失殆尽,难以据此彻底恢复流体几何学、运动学和动力学等物理化学属性。本文结合变形构造岩演化阶段性特点,探讨其几个子问题。

1 矿物改造机制定量研究

马杏垣教授创导的“解析构造学”理论,自上世纪八十年代以来一直指导着我国的构造地质学教学工作,以构造变形场、构造层次、时空尺度、构造叠加—置换—序列—世代、构造转化与再造、岩性介质、构造得失—增减—改组—分异、构造组合等八个要素作为基本原则开展各种构造现象的研究^[11~17]。这八个要素由简到繁、从目到纲的顺序排列,其研究和讨论的步骤自后向前进行为宜。后四个要素反对抛开介质谈构造,强调了一个地质体变形环境重建需由不同介质构造改造机制组合体现。所以研究岩石的改造环境,需要综合岩石中各种造岩矿物机制才能实现。前四个要素较多应用矿物构造定量问题研究,可归纳为三个方面,即:“构造叠加—置换—序列—世代”定量问题中的变形—变质期次与同变形变质温压计;“时空尺度”中的某期次变形年龄;“构造变形场、构造层次”中的某期次矿物蠕变机制、差异应力估算及岩石流动定律(流变学)。

1.1 变形—变质期次与同变形变质温压计

变形—变质期次要求判断出构造岩经历的变形—变质演化主要阶段,指出原岩类型及当前构造岩类型,并根据叠加关系,判断其序列。对于变形温度、压力条件可以根据构造岩中各个造岩矿物变形机制组合进行定性分析;对于变形变质同期的,则可以根据变形同期变质矿物的平衡组合,利用温压计估算其变形温度和围压,开展定量研究。后者可分为成分、结构、气液包体等多种方法^[18]。玻璃包裹体、沸腾包裹体、二氧化碳包裹体、有机包裹体等是认识矿物成因的特殊标型^[19]。上述变形—变质序列只是该构造岩标本内的序列,若希望获得研究区内的变形

序列,还需要进行区域组合对比。

1.2 限定某期次变形年龄

某期次变形年龄的确定有许多方法,如利用高级变质岩内劈理域内的独居石 Th-Pb 高分辨离子质谱(如 SHRIMP)定年确定同变形年龄;根据 Ar-Ar 封闭温度确定单期次韧性剪切变形年龄;根据穿插改造关系限定,如变形前后岩浆岩体的锆石结晶 U-Pb 高分辨离子质谱年龄,等等。

值得指出的是,虽然目前微区定年测量法越来越多^[19],但是结果必须经过上述地质关系以及多学科讨论才具有可信度^[20]。

1.3 某期次矿物蠕变机制、差异应力估算及岩石流动定律(流变学)

二十世纪八十年代兴起的岩石圈流变学是研究岩石圈不同层次及其岩石在全球或局部应力(场)作用下的粘度、强度特征、流变行为、变形机制、变形物理环境及地球热和动力学过程的地质边缘学科^[21]。部分学者呼吁国家有关部门加大流变学方面的研究立项,以探索更多适应地质学要求的流变学规律^[22]。有关岩石圈流变学研究进展,杨晓志^[23]等做了比较全面的评述,该研究的基本对象是组成岩石的各种矿物。

蠕变机制主要借助构造岩内各种矿物显微构造现象组合分析得出,可以表达为“××矿物经历了××机制改造,表现为××构造现象”。根据不同矿物变形机制组合,可以判断岩石变形层次。

差异应力是利用颗粒粒度法(亚晶粒、动态重结晶等)、自由位错密度法等经验公式推算稳态蠕变状态下恒定差异应力值。国内许多研究简单套用经验公式计算,而没有讨论显微构造是否具有稳态蠕变的特征。宋鸿林^[24]曾着重谈及这个问题,并给出稳态蠕变下显微构造特征。

岩石流变学也涉及计算恒定差异应力下应变速率及其影响因素的问题。例如,流体是除蠕变外,推动矿物及岩石发生大变形的第二重要因素^[25]。岩石应变速率并不是地体剥露动力的唯一来源。地体的剥露还受到地表剥蚀的外力地质作用影响,而对剥蚀平均速率估算也是有很大误差的^[26]。

2 研究实例

早期构造定量研究常常割裂岩性介质物性而单独研究变形问题^[27],虽然能定性获得变形序列并从数学角度定量计算不同构造现象的变形场,但难以结合精确的同位素年代学解决构造演化过程等重要地质问题。随着各种显微研究手段的进步,关于不

同矿物介质如石英^[28~32]、长石^[33~35]、橄榄石^[36~37]等开展了大量显微构造变形规律理论研究。近来,矿物改造机制定量应用研究程度也已经起步^[38~42]。下面从理论和应用两方面举例。

2.1 理论研究方面

纯理论研究往往在深部流变学研究方面比较成熟。在矿物级-纳米级变形纯理论研究中,高温高压实验岩石学研究常设计一些实验,控制边界条件,研究变量的相关性,推论其适用范围。

例如,针对板内地幔的流变学、地震学、运动学参数影响因素, Holtzman and Kohlstedt^[37] 针对糜棱岩化橄榄岩设计了相同应力水平下剪切蠕变及不同应力水平下相同剪应变的两个实验,通过对实验过程中劈理域内熔体含量差异分析,得到了粘度随应力增加而降低的规律,并推论该结论适用于软流圈层次、并强烈影响地幔层次。 Wheeler J^[26] 通过建立纯橄榄岩和辉石橄榄岩单轴应力状态下一维物理化学动力学模型,提出高压流体的压溶作用对多矿物岩石的变形有重要贡献。

2.2 应用研究方面

改造机制定量研究多以理论结合实际为主,针对区域剪切带内不同变形程度构造岩,涉及上述若干“成因矿物学”问题,结合变形期次对结果可靠性作出评价。

(1) 涉及期次、同变形温度、变形机制、差异应力、层次及流变学。 Oliot 等^[42] 对中阿尔卑斯 Gott-hard 杂岩 Fibbia 变质花岗岩低角闪岩相剪切带开展了应变研究,结合同构造矿物地球化学组分研究,认为占三分之一的斜长石对花岗岩糜棱岩岩石流变起到控制作用。 Mehl and Hirth^[40] 在对印度西南部一个辉长质剪切带改造机制研究中,选取边部弱变形辉长岩和内部辉长质糜棱岩做对比,通过糜棱岩内二辉石温度计确定了同变形温度,并通过单斜长石定向性较长石、辉石组合方位优选性强的特点推断其变形机制为由位错蠕变向扩散蠕变转变的阶段,通过颗粒大小估计了差异应力,从而进一步估算了变形和弱变形岩石应变速率,根据粘度判断剪切带和围岩分别相当于下地壳和地幔层次。

(2) 涉及期次、某期变形同构造年龄、流变学。 Sassier 等^[41] 利用云南哀牢山—红河剪切带内同构造岩墙计算了剪应变变量,再根据同构造新生矿物独居石 Th-Pb 高分辨离子质谱(SHRIMP)定年确定同剪切变形年龄的区间,从而进一步计算出应变速率。

(3) 涉及期次、变形机制和及差异应力估算定量

问题。例如,在对美国田纳西州山城构造窗内切过白云岩区的一条逆冲断层带改造机制研究中,首先分析了带内糜棱岩变形期次,主要反映了一期同断层作用的一期变形,尔后将采用两种方法估算白云质糜棱岩差异应力结果的不一致问题归结为白云石结晶粒度大小与双晶发育的相关性^[38]。

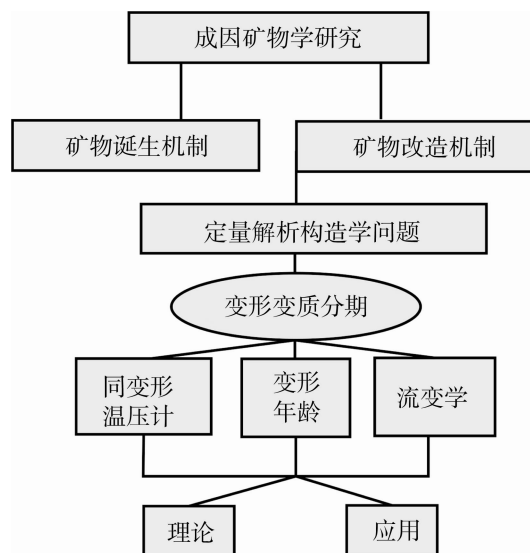


图1 本文探讨的成因矿物学研究流程

Fig. 1 A flowchart for genetic mineralogy researches

3 结 论

“成因矿物学”作为一门边缘学科具有很好的理论研究和应用前景,其研究包括矿物改造机制研究。其研究流程如图1所示。结合区域地质背景,系统开展包括矿物改造机制在内的“成因矿物学”工作是地质工作者的重要任务。

为实现时空四维动态演化研究,建立专门“成因矿物学”实验室是必要的。除需要矿物学传统实验室外,还需要整合许多其他实验室如岩组学、年代学、高温高压实验等实验室、数字及物理模拟^[32,43~45]等。

致 谢:感谢李胜荣教授对本文提出的意见。

参考文献 (References):

- [1] 李胜荣, 陈光远. 现代矿物学的学科体系刍议[J]. 现代地质, 2001, 15(2): 157—160.
Li Shengrong, Chen Guangyuan. On the discipline system of modern mineralogy[J]. Geoscience, 2001, 15(2): 157—160. (in Chinese with English abstract)
- [2] McCaig A M. Fluid flow through fault zone [J]. Nature, 1989, 340, 600—602.
- [3] Hou Z, Zaw K, Pan G, Mo X X, Xu Q, Hu Y Z, Li X Z.

- Sanjiang Tethyan metallogenesis in S W China: Tectonic setting, metallogenic epochs and deposit types[J]. *Ore Geology Reviews*, 2007, 31:48—87.
- [4] 王义天, 毛景文, 李晓峰, 杨富全. 与剪切带相关的金成矿作用[J]. *地学前缘*, 2004, 11(2): 393—400.
Wang Yitian, Mao Jingwen, Li Xiaofeng, Yang Fuquan. Gold mineralization related to the shear zone[J]. *Earth Science Frontiers*, 2004, 11(2): 393—400. (in Chinese with English abstract)
- [5] Hamers M F, Drury M R. SEM-CL imaging of planar deformation features and tectonic deformation lamellae in quartz[J]. *Meteoritics and Planetary Science*, 2009, 44:85—85.
- [6] Passchier C, Trouw R. *Microtectonics*[J]. Springer Verlag, 2005: 1—366.
- [7] 常丽华, 陈曼云, 金巍, 李世超, 于介江. 透明矿物薄片鉴定手册[M]. 北京:地质出版社, 2006: 1—236.
Chang Lihua, Chen Manyun, Jin Wei, Li Shichao, Yu Jiejiang. *Thin section identification handbook of transparent minerals*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2006: 1—236. (in Chinese)
- [8] 胡玲, 刘俊来, 纪沫, 曹淑云, 张宏远, 赵中岩. 变形显微构造识别手册[M]. 北京:地质出版社, 2009: 1—96.
Hu Ling, Liu Junlai, Ji Mo, Cao Shuyun, Zhang Hongyuan, Zhao Zhongyan. *Identification manual of deformation microstructures*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2009: 1—96. (in Chinese)
- [9] Trouw R A J, Passchier C W, Wiersma D J. *Atlas of Mylonites- and related microstructures* [J]. Berlin, Heidelberg, Springer, 2010: 1—322.
- [10] 卢焕章, 范宏瑞, 倪培, 欧光习, 沈昆, 张文淮. 流体包裹体[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 1—487.
Lu Huanzhang, Fan Hongrui, Ni Pei, Ou Guangxi, Shen Kun, Zhang Wenhui. *Fluid inclusions*[M]. Beijing: Science Press, 2004: 1—487. (in Chinese)
- [11] 马杏垣, 索书田, 游振东, 刘如琦. 嵩山构造变形-重力构造、构造解析[M]. 北京:地质出版社, 1981: 1—256.
Ma Xingyuan, Suo Shutian, You Zhendong, Liu Ruqi. *Tectonic deformation of the Songshan area, Hunan Province, China*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1981: 1—256. (in Chinese)
- [12] 马杏垣. 解析构造学刍议[J]. *地球科学-武汉地质学院学报*, 1983, 8(3):1—9.
Ma Xingyuan. On analytical tectonics [J]. *Earth science-Journal of Wuhan Institute of Geosciences*, 1983, 8(3):1—9. (in Chinese with English abstract)
- [13] 马杏垣. 解析构造学[M]. 北京:地质出版社, 2004: 1—463.
Ma Xingyuan. *Analytical tectonics*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2004:1—463. (in Chinese)
- [14] 朱志澄, 宋鸿林. 构造地质学(第一版)[M]. 武汉:中国地质大学出版社, 1990: 1—331.
Zhu Zhichen, Song Hongling. *Structural geology* (edition No. 1)[M]. Wuhan: China University of Geoscience Press, 1999: 1—331. (in Chinese)
- [15] 朱志澄. 构造地质学(第二版)[M]. 武汉:中国地质大学出版社, 1999: 1—262.
Zhu Zhichen. *Structural geology* (2nd ed.) [M]. Wuhan: China University of Geoscience Press, 1999: 1—262. (in Chinese)
- [16] 傅昭仁, 蔡学林. 变质岩区构造地质学[M]. 北京:地质出版社, 1996: 1—243.
Fu Zhaoren, Cai Xuelin. *Structural geology of metamorphic terrain*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1996: 1—243. (in Chinese)
- [17] 曾佐勋, 朱志澄. 构造地质学(第三版)[M]. 武汉:中国地质大学出版社, 2008:1—226.
Zeng Zuoxun, Zhu Zhichen. *Structural Geology* (3rd ed.) [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2008: 1—226. (in Chinese)
- [18] 陈光远. 成因矿物学与找矿矿物学[M]. 重庆:重庆出版社, 1987: 1—880.
Chen Guangyuan. *Genetic and prospecting mineralogy*[M]. Chongqing: Chongqing Press, 1987: 1—880. (in Chinese)
- [19] 谢奕汉, 范宏瑞. 矿物包裹体的成因矿物学标型意义[J]. *现代地质*, 2001, 15(2): 202—204.
Xie Yihan, Fan Hongrui. Mineralgeny typomorphic characteristic of fluid inclusions[J]. *Geoscience*, 2001, 15(2):202—204. (in Chinese with English abstract)
- [20] 穆治国. 激光显微探针.⁴⁰Ar/³⁹Ar 同位素定年[J]. *地学前缘*, 2003, 10(2): 301—307.
Mu Zhiguo. The laser microprobe ⁴⁰Ar/³⁹Ar dating methods [J]. *Earth Science Frontiers*, 2003, 10(2): 301—307. (in Chinese with English abstract)
- [21] Joly A, Chen Y, Faure M, Martelet G. A multidisciplinary study of a syntectonic pluton close to a major lithospheric-scale fault-Relationships between the Montmarault granitic massif and the Sillon Houiller Fault in the Variscan French Massif Central: 1. Geochronology, mineral fabrics, and tectonic implications[M]. *Journal of Geophysical Research—Solid Earth*, 2007, 112: 1—18.
- [22] 索书田, 钟增球, 周汉文, 游振东. 大别-苏鲁区 UHP 变质岩构造学及流变学演化[J]. *地学前缘*, 2008, 15(3): 150—167.
Suo Shutian, Zhong Zengqiu, Zhou Hanwen, You Zhendong. Tectonic and rheological evolution of UHP metamorphic rocks in the Dabie-Sulu region, Eastern China[J]. *Earth Science Frontiers*, 2008, 15(3): 150—167. (in Chinese with English abstract)
- [23] 万天丰. 关于中国构造地质学研究中几个问题的探讨[J]. *地质通报*, 2008, 27(9): 1441—1450.
Wan Tianfeng. Some problems in the study of structural geology and tectonics in China[J]. *Geological Bulletin of China*, 2008, 27(9): 1441—1450. (in Chinese with English abstract)
- [24] 杨晓志, 夏群科, 樊祺诚, Delouie E. 大陆岩石圈的流变学性质和矿物中的水[J]. *地学前缘*, 2008, 15(3): 96—112.

- Yang Xiaozhi, Xia Qunke, Fan Qichen, Deloué E. Rheology of the continental lithosphere and the effects of water[J]. *Earth Science Frontiers*, 2008, 15(3): 96—112. (in Chinese with English abstract)
- [25] 宋鸿林. 大别山超高压榴辉岩流变强度评论[J]. *地球科学*, 2003, 28(2): 232—233.
- Song Honglin. Comment: Rheological strength of UHP eclogite from Dabie Shan[J]. *Earth Science*, 2003, 28(2): 232—233. (in Chinese with English abstract)
- [26] Wheeler J. Importance of pressure solution and coble creep in the deformation of polymineralic rocks[J]. *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, 1992, 97: 4579—4586.
- [27] Molnar P. Nature, nurture and landscape[J]. *Nature*, 2003, 426(6967): 612—614.
- [28] Ramsay J G. Folding and fracturing of rocks[M]. New York: McGraw-Hill Book Company, 1967: 1—560.
- [29] Griggs D, Blacic J. Quartz: Anomalous weakness of synthetic crystals[J]. *Science*, 1965: 147—292.
- [30] Luan F C, Paterson M S. Preparation and deformation of synthetic aggregates of quartz[J]. *J. Geophys. Res.*, 1992, 97(B1): 301—320.
- [31] Hirth G, Teyssier C, Dunlap J W. An evaluation of quartzite flow laws based on comparisons between experimentally and naturally deformed rocks[J]. *International Journal of Earth Sciences*, 2001, 90: 77—87.
- [32] Chester J S, Kronenberg A K, Karner S L, Chester F M, Hajash A. Hydrothermal deformation of granular quartz sand [J]. *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, 2008, 113 (B5): B05404.
- [33] Tullis J, Yund R A. Diffusion creep in feldspar aggregates: experimental evidence [J]. *Journal of Structural Geology*, 1991, 13: 987—1000.
- [34] Kruse R, Stünitz H, Kunze K. Dynamic recrystallization processes in plagioclase porphyroclasts[J]. *Journal of Structural Geology*, 2001, 23: 1781—1802.
- [35] Stünitz H, Gerald B J D F, Tullis J. Dislocation generation, slip systems, and dynamic recrystallization in experimentally deformed plagioclase single crystals [J]. *Tectonophysics*, 2003, 372: 215—233.
- [36] AveLallemant H G, Carter N L. Syntectonic recrystallization of olivine and modes of flow in the upper mantle[J]. *Bulletin of the Geological Society of America*, 1970, 81: 2203—2220.
- [37] Holtzman B K, Kohlstedt D L. Stress-driven melt segregation and strain partitioning in partially molten rocks: Effects of stress and strain [J]. *Journal of Petrology*, 2007, 48: 2379—2406.
- [38] Newman J. The influence of grain size and grain size distribution on methods for estimating paleostresses from twinning in carbonates [J]. *Journal of Structural Geology*, 1994, 16: 1589—1601.
- [39] Chernyshov A I. Petrostructural signature of olivines in ultramafic rocks of the Paramsky and Shamansky massifs (Baikal-Muya ophiolite belt)[J]. *Russian Geology and Geophysics*, 2005, 46: 1103—1114. (in Russian with English abstract)
- [40] Mehl L, Hirth G. Plagioclase preferred orientation in layered mylonites: evaluation of flow laws for the lower crust [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2008, 113(B5): B05202.
- [41] Sassié C, Leloup P H, Rubatto D, Galland O, Yue Y, Lin D. Direct measurement of strain rates in ductile shear zones: A new method based on syntectonic dikes [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2009, 114(B1): B01406.
- [42] Oliot E, Goncalves P, Marquer D. Role of plagioclase and reaction softening in a metagranite shear zone at mid-crustal conditions (Gotthard Massif, Swiss Central Alps) [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 2010, 28: 849.
- [43] Rutter E H. The kinetics of rock deformation by pressure solution [J]. *Phil Trans R Soc Lond*, 1976, A283: 203—219.
- [44] Zhang S, Karato S I. Lattice preferred orientation of olivine aggregates deformed in simple shear [J]. *Nature*, 1995, 375: 774—777.
- [45] Taron J, Elsworth D. Constraints on compaction rate and equilibrium in the pressure solution creep of quartz aggregates and fractures: Controls of aqueous concentration: *Journal of Geophysical Research* [J]. *Solid Earth*, 2010, 115 (B7): B07211.