

文章编号: 1006-6616(2000)03-0078-05

石榴石的塑性变形及差异应力计算

陈 晶

(北京大学电子显微镜实验室, 北京 100871)

摘要: 岩石在形成时和形成后所经历的任何热力学事件都应在其内部留下痕迹, 如何寻找和发现这些遗迹是地质学界长期关注和亟待解决的问题。笔者认为, 电子显微技术(TEM)是解决这一问题的最有效、最直观的方法之一。最近几年, 大量的TEM研究结果证实, 各类变质岩中的石榴石均发生不同程度的塑性变形。深入研究其变形程度和变形特征, 对于揭示岩石所经历的变质变形历史具有重要的意义, 特别是通过观测位错密度, 可定性推算岩石曾经历的古差异应力, 为拟定区域构造演化模式提供佐证。

关键词: 石榴石; 位错; 变形; 差异应力

中图分类号: P574.1⁺2

文献标识码: A

0 引言

石榴子石是主要的造岩矿物之一, 特别是在基性-超基性岩、榴辉岩和金伯利岩中, 主要化学成分及特征元素的分配关系对揭示岩石经历的变质历史(确定 $P-T$ 轨迹)及构造运动有重要指示意义, 同时它也是寻找相关矿床的重要依据。如含铬高的石榴子石是找铬铁矿的标志矿物; 在金伯利岩中, 含铬高的镁铝榴石常与金刚石共生, 因而它是寻找金刚石的标志矿物。镁铝榴石的端员组分广泛用于推测岩石的变质或退变质作用的温压条件。此外, 石榴子石还是很好的压力釜, 即使岩石后期又经历了变质或退变质作用, 它仍然可以保留变质峰期甚至变质前期的大量信息。

以往的地质学研究中, 科学家们几乎把所有力量都投入到对石榴子石的成分分析上, 因而大量的、精细的分析测试数据, 使石榴子石的研究在岩石地球化学研究领域占据了举足轻重的位置, 相比之下, 对石榴子石变形结构的研究则显得微不足道了。主要原因在于, 石榴子石为等轴晶系, 在正交偏光下常为全消光, 在光学显微镜下很难观察和研究其塑性变形特征。石榴子石广泛存在于各类变质岩中, 它给人们最直观的印象是作为刚体在细粒的基质中发生旋转, 同时自身也常发育大量的微裂隙。因而, 石榴子石长期以来一直被认为是易于脆

收稿日期: 2000-05-15

基金项目: 自然科学基金(编号: 49572157)

作者简介: 陈 晶(1957—), 女, 博士, 副教授, 主要从事显微构造学、矿物物理学和电子显微学研究。

性变形而难于塑性变形的矿物，最近几年 TEM 研究改变了这一认识。自 90 年代以来，石榴石变形研究已引起地质学家的广泛重视。1993 年 Ando 等人详细研究了石榴橄榄岩及其榴辉岩透镜体和金伯利岩的榴辉岩捕虏体中的石榴子石，结果表明，石榴橄榄岩中的石榴子石和橄榄石均发生了相同的塑性变形^{1]}。1994 年 Doukhan 等人对金伯利岩中的石榴子石进行研究，发现其自由位错密度极高，可达到 $10^{11}/\text{cm}^2$ ^{2]}。1995 年陈晶等人，对大别地区的柯石英榴辉岩、退变榴辉岩和角闪岩围岩进行了系统研究，证实经榴辉岩相、角闪岩相变质的石榴子石均发生了强烈的塑性变形^{3]}。1994 年稽少丞综合整理了大量前人的实验数据，提出在 $T < 700^\circ\text{C}$ 时，石榴子石比石英和斜长石还难于发生塑性变形；而在 $T = 900^\circ\text{C}$ 时，石榴子石比石英和斜长石更易发生塑性变形^{4]}。金伯利岩、榴辉橄榄岩、榴辉岩、片麻岩和麻粒岩等变质岩中的石榴石，随着研究工作的不断深入，均发现有不同程度的塑性变形，这一事实已得到地质学家的认同。

石榴石塑性变形研究可以在两种不同尺度下进行：其一在光学显微镜下，可研究石榴子石的形态变化。以往的研究我们发现，原本是等轴晶系的石榴石被拉长变形，长短轴比可达几倍甚至十几倍。其二是在电子显微镜下，可以进行超微构造的研究，主要包括塑性裂隙、位错特征和变形双晶的研究。

1 石榴子石的塑性裂隙

早在 60 年代，在金属学和材料学研究中就已提出塑性断裂的概念^[5,6]。金属或矿物的脆性断裂与塑性断裂的区别在于：脆性断裂是指金属或矿物在经历很短或几乎没有经历塑性变形阶段就发生的断裂；而塑性断裂是金属或矿物经历了足够长的塑性变形阶段以后才发生的断裂。在金属和矿物中，导致塑性微裂隙形成的机制有以下几种：①在变形时，由位错源产生的位错在阻挡层或障碍物（晶界、双晶面、夹杂物、包体）处被塞积产生微裂隙；②位错在两个滑移面相交处产生固定位错，然后形成微裂纹；③几个塞积位错在晶体内形成微裂纹（A. N. Stroth）。在变质岩中石榴子石常发育大量微裂隙，以前无可争议地被认定是脆性变形的产物，但大量的 TEM 研究使我们有理由认为它们是塑性变形的产物，而且是由位错构造发育而成的^{7]}。

2 石榴子石的变形双晶

最近，我们对麻粒岩中的石榴石进行 TEM 观测，发现麻粒岩与榴辉岩相比塑性变形特征有着明显的差别。首先，发育在麻粒岩中的石榴石的自由位错密度比榴辉岩中的低；其次，麻粒岩中的石榴石发育变形双晶，而榴辉岩中的石榴石则没有发现。这表明麻粒岩曾经历了高温变质作用，而且它所遭受的差异应力要比榴辉岩和角闪岩小。这一结果与该类岩石可能经历的地质作用是相符的。

3 石榴子石的位错构造

借助 TEM 研究岩石矿物内部的超微构造特征，特别是用统计矿物内部自由位错密度值来推算岩石曾经历的古应力值，以获取岩石曾经历的热力学信息，是目前最直接、最有效的

研究方法和研究手段之一，并已引起地质学家的广泛重视。

为了能较系统的了解不同温压条件下石榴子石塑性流变特性，1995年我们在 TEM 下，对采自湖北省英山县的含柯石英榴辉岩、退变榴辉岩和角闪岩中的石榴子石进行了详细的微观观测。我们选取了一个柯石英榴辉岩、退变榴辉岩和角闪岩的连续剖面，对各类岩石中的石榴子石的超微构造进行了 TEM 研究。研究证实，它们具有不同的位错构造特征（表 1），反映它们曾经历了不同的地质构造作用。

表 1 石榴子石的位错密度及构造特征

Table 1 Dislocation density and microstructure in garnet

岩 性	含柯石英榴辉岩	退变榴辉岩	角闪岩
平均位错密度 (ρ)	$1 \times 10^8 / \text{cm}^2$	$6.2 \times 10^7 / \text{cm}^2$	$2.2 \times 10^8 / \text{cm}^2$
石榴子石中裂隙	较发育	发育较弱	极发育
位错构造特征	位错网	位错排、位错网、亚晶	位错缠结
特征矿物	含柯石英及假象	含柯石英假象	

4 差异应力的计算及材料系数 (α) 的修正

金属学和固体物理学期长期大量的实验证实，大多数金属和矿物中的自由位错密度与所施加的外应力有如下关系： $\sigma/2\mu = \alpha(\rho b^2)/k$ 。式中 k 是常数， σ 是差异应力， μ 是剪切模量， ρ 是位错密度， b 是柏氏矢量， α 为材料系数。

由于对石榴子石的实验岩石学工作尚未进行，目前还没有一个确切的、具有实验依据的材料系数供使用。Ando (1993) 在利用上式对石榴子石和橄榄石进行差异应力计算时，沿用 Bresser (1991)^[8] 计算橄榄石差异应力时所使用的有关系数，即 $K=2$ ， $\alpha=1.172(\log(2\alpha)=\text{ca. } 0.37)$ ，对石榴橄榄岩中共生的石榴子石和橄榄石使用相同的 k 值，分别获得各自的差异应力值（表 2），表 2 可见石榴子石计算的差异应力值均比橄榄石的小，且具有规律性。很明显，上式中的材料系数 α 数值应根据不同材料而定，用橄榄石的 α 值对石榴子石进行差异应力计算显然不够合理。针对这一问题，我们以 Ando (1993) 所获得的石榴石和橄榄石的差异应力值为基础，对石榴子石的材料系数作了修正（表 2）。计算石榴子石差异应力时，取 $\alpha=2.5$ ，获得的差异应力值与计算橄榄石获得的差异应力值相近似，因此，对于石榴子石来说，材料系数取 $\alpha=2.5$ 应更为合理（表 2）^[8]。

值得一提的是，应用自由位错密度推算变形矿物曾经历的差异应力虽然已引起构造地质学家的极大兴趣，但这种方法也存在一些异议：(1) 矿物中位错的分布是否均匀，如此小的微区中进行的测试是否具有代表性；(2) 不同晶面观测到的位错是否有差异；(3) 实验求得的 k 值和 α 值应用于自然界的变形矿物是否合理，求得的差异应力数值可信度如何等等。

笔者根据多年的 TEM 工作经验认为，矿物在经受应力作用后，在其内部产生的位错构造是均匀的，以足够的统计数据为基础是具有代表性的，因为 TEM 的双倾台具有三维旋转功能，因而观测矿物的位错构造是在立体空间中进行的，不同晶面上所观测的位错密度应没有大的差异。至于有些主要造岩矿物的 k 值和 α 值，还需要作大量的实验岩石学工作，同时还需用变形矿物进行反复验证。

表 2 石榴子石的材料系数及修正

Table 2 Revision of material coefficient for garnet

样 品	橄榄石 (Olivine) /MPa	石榴石 (Garnet) /MPa	
Alpe Armi	0.25×10^2	0.13×10^2	0.28×10^2
Almklovdolen	1.07×10^2	0.49×10^2	1.05×10^2
Benfenfortei	0.76×10^2	0.28×10^2	0.6×10^2
	据文献 [1]	据文献 [1]	修正后
	$K=2, \alpha=1.172$	$K=2, \alpha=1.172$	$K=2, \alpha=2.5$
	$\mu=790.8 \times 10^2$ MPa	$\mu=920.8 \times 10^2$ MPa	$\mu=920.8 \times 10^2$ MPa

5 差异应力计算实例及其地质含义

我们根据上述公式，使用修正后的材料系数值，分别测定了含柯石英榴辉岩、退变榴辉岩和角闪岩的差异应力（表 3）。结果表明，在榴辉岩相变质及退变质的不同阶段，石榴子石经受了不同的差异应力的作用。

表 3 用石榴子石的位错密度计算的差异应力值

Table 3 A verage free dislocation density in garnet and differential stress

	含柯石英榴辉岩 (4A)	退变榴辉岩 (3F)	角闪岩 (3C)
平均位错密度 ρ/cm^{-2}	1×10^8	6.2×10^7	2.2×10^8
差异应力 σ/GPa	0.53	0.42	0.77

注： $K=2, \mu=920.8 \times 10^2$ MPa, $\alpha=2.5$

我们认为石榴子石不仅是很好的压力釜，也能很好的保留温度特征。在表 3 中的 3 种不同岩石中的石榴子石，具有不同的塑性变形特征和自由位错密度，说明它们曾经历了不同的热力学作用。（1）在含柯石英榴辉岩中，石榴子石的位错密度较高（ $1 \times 10^8/\text{cm}^2$ ），经计算获得的差异应力值（0.53GPa）也较大，推测它可能代表两个板块碰撞时，遭受了因板块俯冲角度的不同而产生的差异应力。（2）由退变榴辉岩计算的差异应力，代表从超高压变质峰期到退变榴辉岩阶段，因当时榴辉岩团块主要呈整体上升，因而其差异应力相对较小（0.42 GPa）。（3）角闪岩中差异应力值高达 0.77 GPa（表 3），代表了由退变榴辉岩至角闪岩阶段，由于岩石进一步折返进入岩石圈叠瓦状构造带，遭受叠瓦状构造带之间的剪切应力作用，因而差异应力值最高。

上述推论与用构造地质学观点推论的超高压榴辉岩的形成和拆返过程是吻合的。

TEM 研究证明，在各类变质岩中石榴石均会发生塑性变形。宏观上主要表现为石榴石被拉长，发育大量的塑性微裂隙；微观上主要发育位错网、位错排、位错缠结、变形双晶和不同的位错密度。矿物内部发育的不同的塑性变形特征具有不同的形成机制，并能反映其形成时特定的热力学条件，特别是依据矿物位错密度推算的古差异应力值，对解释和追溯岩石所经历的地质环境具有重要的意义。

笔者认为，岩石在形成时和形成后经历的任何热力学事件，都应在其内部留下痕迹。如

何寻找和发现这些遗迹是地质学界长期关注和亟待解决的问题。其中,电子显微镜是解决这一问题的最有效、最直观的方法和手段之一。

参 考 文 献

- [1] Jun-ichi Ando, kiyoshi Fujino, Toru Takeshita. Dislocation microstructures in naturally deformed silicate garnets [J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 1993, 80 : 105~116.
- [2] Doukhan N, Sautter V, Doukhan J C. Ultradeep, ultramafic mantle xenoliths : transmission electron microscopy preliminary results [J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 1994, 82 : 195~207.
- [3] 陈 晶, 王清晨, 翟明国, 等. 榴辉岩中石榴石的塑性变形特征 [J]. *中国科学 (B)*, 1995, 25 (10): 1116~1120.
- [4] Ji Shaocheng, Jacques Martignole. Ductility of garnet as an indicator of extremely high temperature [J]. *Journal of Structural Geology*. 1994, 16 (7): 985~986.
- [5] Cottrell A H. *The Mechanical properties of Matter* [M]. New York, John Wiley, 1964. Chapter 10.
- [6] Smallman R E. *Modern physical metallurgy* [M]. Butterworths and (publishers) Ltd, 1977, Chapter 14 : 477~481.
- [7] 陈 晶. 榴辉岩相变质岩中石榴石的塑性微裂隙 [J]. *岩石学报*, 1996, 12 (4): 589~593.
- [8] De Bresser J H P. Intracrystalline deformation of calcite [M]. Ph. D. Thesis, Instituut voor Aardwetenschappen der Rijksuniversiteit Utrecht, 1991. 191.

STUDY OF PLASTIC DEFORMATION OF GARNET AND CALCULATION OF FOSSIL DIFFERENTIAL STRESS

CHEN Jing

(*Electron Microscopy Laboratory, Peking University, Beijing 100871, China*)

Abstract : Any thermal event that has occurred during and after the formation of rocks can be traced in the rocks themselves. How to search these traces has been the focus of geological research in our country for a long time, and it is also a problem that needs to be solved as soon as possible. In recent years, results of studies by transmission electron microscopy (TEM), have shown that garnets occurring in different types of metamorphic rocks have undergone different degrees of plastic deformation. An intensive study on the extent and the characteristics of the deformation will be very useful in disclosing the history of metamorphism and deformation that the rocks have suffered. By determining the dislocation density of garnets one can roughly calculate the ancient differential stress that the rocks have experienced to provide data for a model of tectonic evolution of the area concerned.

Key words : garnet ; dislocation ; deformation ; differential stress