

研究
综述

地壳岩石与矿物的流变性研究综述

叶发广

(北京大学地质系, 北京 100871)

主题词 流变性 粘滞性 变形样式 华北地台

提要 地壳岩石与矿物的流变性主要受温度的控制, 其次是受其成分的控制。在深部地壳高温环境下, 岩石和矿物的流变性较强, 应变相对均匀分布。在浅部地壳中, 它们的粘滞性及各自间的粘滞性比显著增强, 而流变性减弱, 应变逐渐集中于适合流变和变形的岩石与矿物。流变性的这种变化导致了露头各种构造形迹的变化, 如褶皱、布丁和剪切带等, 以及各种显微构造特征的变化(如: 变形矿物、压力影和膝折等)。岩石与矿物的这种物性概念在地质学中的运用, 实质是将构造变形样式的形成机理分析趋于定量化和综合研究。

流变性(rheology)是指一定环境因素作用下材料的应变速率, 而粘滞性(viscosity)是指材料的剪切应力与应变速率之比值, 可看作是一定应力状态下对物质流变性强弱的一种度量。当两种岩石(矿物)的粘滞性存在差别时, 粘滞性小的岩石(矿物)相对于粘滞性大的岩石(矿物)易于流动而表现出较强的应变和流变性。在影响流变性和粘滞性的各种因素中, 温度的作用是最明显的, 其次, 是岩石与矿物的成分等^[1,2]。以华北地台的某些变形形迹为例, 本文强调主要因素的变化所引起的流变性和粘滞性变化, 并将两者统一于地壳的不同层次或深部地壳抬升过程中的构造演化。

1 温度变化的影响

在不同温度下, 同种岩石或矿物的流变特征变化明显, 与相邻岩石或矿物间的粘滞性比也存在较大的变化, 从而影响到它们变形样式的变化。在地下地壳麻粒岩相温压条件下(温度通常为750—850℃, 甚至高达1100℃), 岩石的应变速率很高(10^{-14} — 10^{-12} S⁻¹)。在这样强的流变条件下, 岩石多被褶皱成非圆桶状的肠状褶皱和相似褶皱。总体特点是顶端往往加厚, 层厚极不规则, 轴面定向不稳定, 翼间角较小, 褶皱主波长较小。强硬岩层(如镁铁质岩)与软弱岩层(如中酸性岩)间的粘滞性比较小, $\eta_a/\eta_b = (W_d/2\pi t)^3/n$ 往往只有数个数量级(η_a 与 η_b 分别为强硬岩层与软弱岩层的粘滞性, W_d 为主褶皱的波长, n 为卷入褶皱的层数, t 为强硬岩层的平均厚度。公式引自Biot^[3])。在应变集中域, 强硬岩层形成的布丁构造的轴面比和伸长较大, 两端圆而尖滑, 颈缩处不易破裂。随着温度的降低, 岩石的流变性显著降低, 而粘滞性及粘滞性比显著增强。因此, 总体上, 岩石的褶皱主波长加大, 层厚渐趋规则, 轴面定向趋于稳定, 翼间角变大, 褶皱类型多为圆桶状。强硬岩层的布丁体的轴面比和

伸长减小，易在颈缩处出现破裂而形成两端钝化的透镜体或矩形块体。

上述的流变性、粘滞性、变形样式的变化特征综合于图1。

在河北宣化以北的麻粒岩相岩石中，在早期高温环境下及以后退变质降温环境下形成的褶皱，其样式明显不同。图2完全可与图1左半部相比较：图2b的褶皱为层厚不规则的肠状

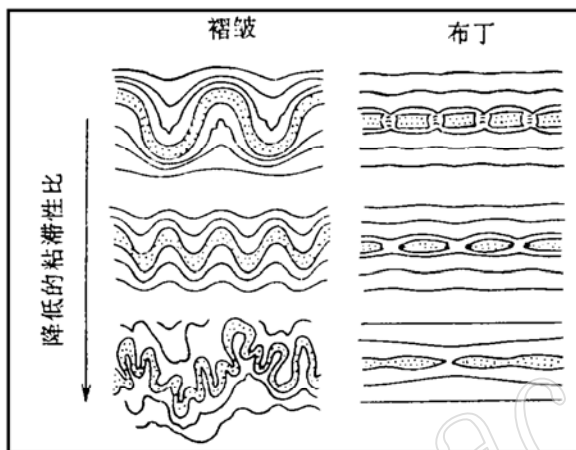


图 1 温度的升高和岩石间粘滞性比的下降所导致的褶皱和布丁样式的变化
 Fig. 1 Dependence of fold and boudinage styles on temperature and relative viscosity between layers

由坚硬岩层（打点区）的变形可看出流变性的变化（引自Hiandy等，1991）

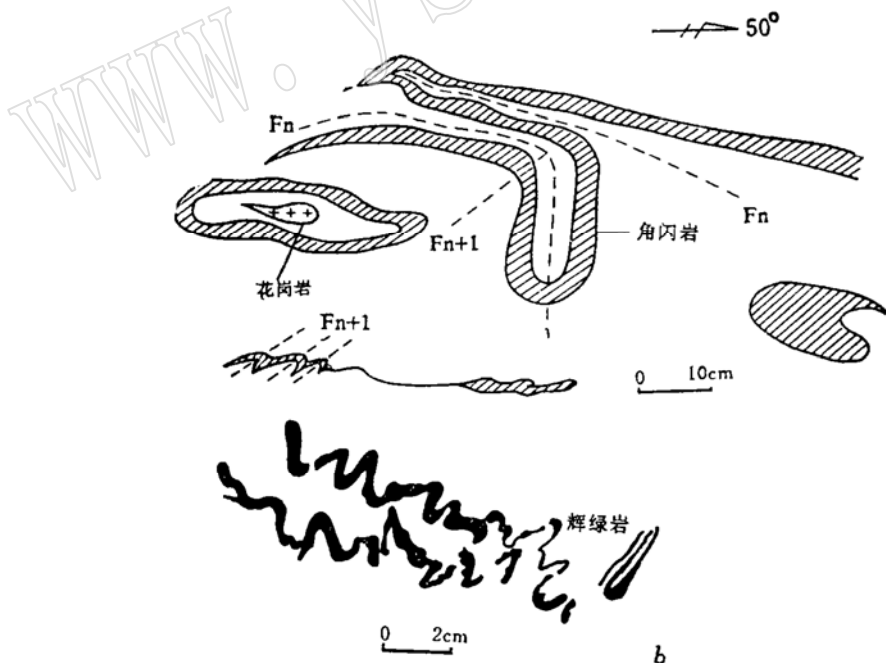


图 2 河北宣化麻粒岩中褶皱样式的变化
 Fig. 2 Changes in fold styles of granulites from Xuanhua, Hebei Province
 上图的打斜线部分和下图的涂黑部分示意坚硬岩层（据照片）

褶曲，褶曲的主波长较小；图2a中 F_n 期褶皱明显比 F_{n+1} 期褶皱的波长小，翼间角也小。表明 F_n 形成早，温度较高。这点也可从 F_{n+1} 期褶皱弯曲 F_n 的轴面表明 F_{n+1} 必晚于 F_n 中得到证实；但 F_n 轴面的良好定向性（排除 F_{n+1} 的影响）、主波长的明显增加、层厚的规则性表明 F_n 晚于图2b中褶皱形成的时间，而且有明显的温度降低，暗示粘滞性比的增大和强硬岩层流变性的减弱。因此，图2b的褶皱、图2a的 F_n 和 F_{n+1} 期褶皱是麻粒岩相岩石冷却过程中的褶皱系列，反映了温度降低过程中岩石的粘滞性（比）和流变性的变化。

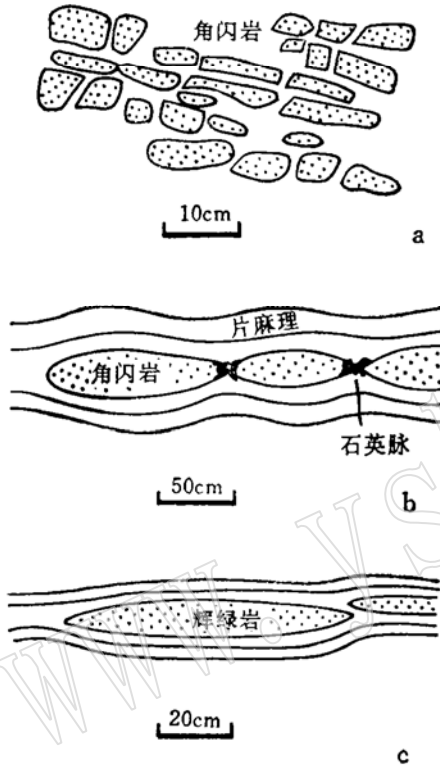


图3 宣化以北的麻粒岩相(c)及退变质(b、a)岩石的布丁样式变化

Fig. 3 Boudinages of amphibolite and meta-diorite in granulitic terrain of northern Xuanhua, Hebei Province

图3是强应变带强硬岩层的布丁样式变化，试将其与图1的右半部相比较。

就单矿物而言，辉石类、长石类、角闪石和橄榄石在中上部地壳往往以刚性矿物形式存在，仅发生破裂变形。但在下部地壳高温条件下，它们都具有一定的流变性，能发生韧性变形，表现出波状消光、机械双晶、亚颗粒、动态重结晶新晶粒、晶核与晶幔构造及伸长定向等。实验研究表明，斜长石由于位移滑动而产生的晶内弹性变形的温度在静岩压力 $>0.6\text{GPa}$ 下至少为 700°C ^[4]，而动态重结晶和机械双晶出现的温度则高达 $800\text{—}900^\circ\text{C}$ 。这一温度大大高于石英的韧性变形温度，但低于镁铁质矿物的变形温度。辉石类，尤其是单斜辉石，其韧性变形温度极高（ $>900^\circ\text{C}$ ，无偏差应力）^[5]，橄榄石亦是如此。角闪石是最强硬的矿物之一，实验条件下及天然岩石中很少观察到它的变形，但有一份资料表明它的滑移系主要是 $(100)[001]$ ，在 $600\text{—}750^\circ\text{C}$ 条件下可沿 $[001]$ 方向产生膝折而沿 (100) 面各向产生膝折必须大于 800°C 。马宝林等^[6]总结了华北地台上这些矿物的变形特征及其组合，并将其与地壳的层次对应起来。

2 岩石成分的变化引起的流变性变化

地壳岩石的流变性除了受温度的明显控制外，岩石的成分也相当重要。相同温度下，不同的岩石其流变性强弱不一，粘滞性大小也不同。在上部地壳（ $<15\text{km}$ ）的一定温压环境下，按流变性增强顺序排列的长英质岩、碳酸盐岩和泥质岩，乃至煤层都可能表现出一定的流变性，而镁铁质岩很难发生韧性变形。在下部地壳，由于高温的控制，各类岩石的流变性显著增强。但由于成分的不同，各类岩石仍然存在流变性的差异。通过研究意大利北部 Ivrea 带，Handy^[2]指出了岩石从软弱到强硬的排列顺序：片岩 $<$ （副）片麻岩 $<$ 变质玄

武岩≈橄榄岩<辉石岩。这个排列顺序实际上就是流变性不断减弱、抗流变强度不断增强、粘滞性不断增强的顺序。因此，在强应变带中，片岩和副片麻岩易形成流动状态下片理和片麻理发育的基质，而变质玄武岩或辉石岩和角闪岩则形成强硬岩层，并往往构成顺片麻理或片理的透镜体或布丁体；在被褶皱时，前者往往顶端加厚，而后者层厚较规则，从而形成褶皱的不协调现象。图 4 是见于麻粒岩相区的一个透镜状流变组构。角闪岩构成面理不发育的透

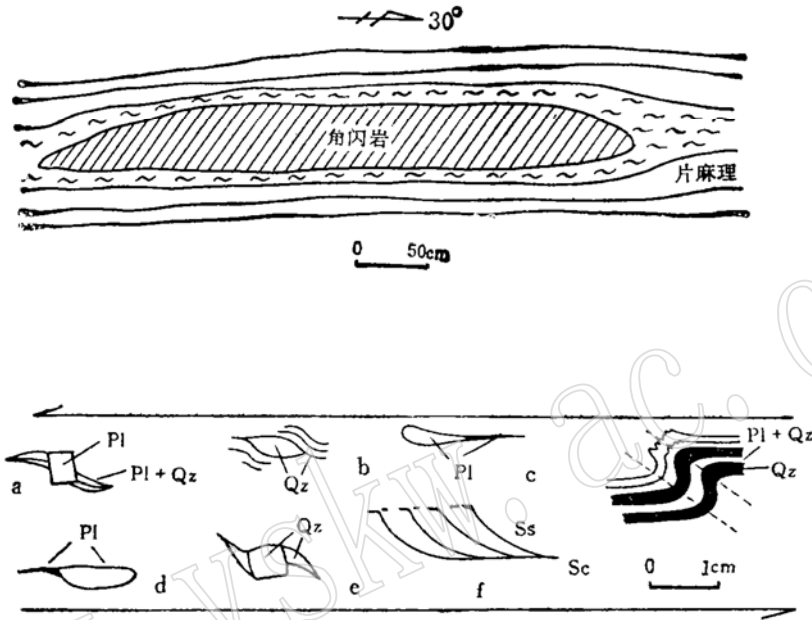


图 4 大同孤山麻粒岩相长英质片麻岩中的角闪岩相高温韧性剪切带及其中主要矿物的韧性特征

Fig. 4 High temperature shear zone of felsic rocks around amphibolite (upper) and shear markers (lower) in granulitic terrain of Gushan, Datong

上图：角闪岩周围带花纹的区域为高温韧性剪切带；下图：表示其中主要矿物的韧性特征，图中 c、d 表示长石的拉伸和延长

镜状强硬岩层，长英质片麻岩形成面理发育的韧性剪切带而环绕前者。成分的不同导致了差异性流变，从而形成这类小规模透镜状强弱应变域，它可能反映了近十年来在世界各地广泛开展的高精度陆壳近垂直地震反射剖面所共同揭示的下部陆壳网络状反射组构^[7]（图5）的

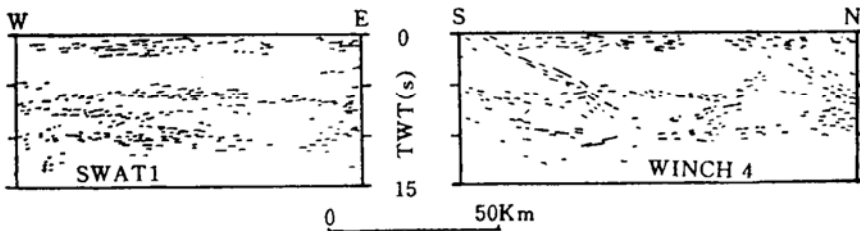


图 5 英伦三岛及其附近海域的BIRPS反射剖面的部分资料

Fig. 5 Some data from BIRPS reflection profiles of England, Wales and Scotland as well as their neighboring sea areas

TWT (S)：双向走程时间单位，换算成深度 (km) 时乘以3(引自Reston, 1990)

真正意义。

3 矿物成分、颗粒度与形态及分布

前已述及不同温度下不同成分的矿物的流变性及粘滞性。然而，这种探讨多集中于单矿物岩石。但实际情况是，岩石往往是多种矿物成分的。因此，含多种矿物的岩石的流变性及对矿物成分的依赖如何？矿物颗粒体积、形态及分布与流变性的关系怎样？

在多矿物岩石中，必然有一种矿物相在同一温度下比其它矿物弱，在变形中表现出较强的流动性。也就是，与周围矿物相比，它的流变性较强，粘滞性要小。如果这种足够弱的矿物相在岩石中的体积含量达到20%左右，那么，多矿物岩石的流变性主要由该矿物控制。如果将足够弱的矿物相比作熔体相，强硬矿物相比作固体相，则熔体体积含量达到26%时，固体/熔体或强硬矿物/软弱矿物的粘滞性比急剧下降，从而使悬浮固体或强硬矿物表现出流动性，即含量一定的软弱矿物相控制了岩石的流变性。牛顿粘滞性熔体及体积一致的刚性悬浮球体的RCMP点（临界流变的熔体百分比点）为26%，其意义在于：①是紧密堆积球体中最小的空隙百分比；②此值附近（图6中斜线部分），悬浮球体相对地突然增强刚性；③大于此值，悬浮球体和熔体均处于强流变状态。

长英质糜棱岩在野外露头中屡见不鲜，究其原因是由于极易变形的弱矿物相石英的含量很容易达到乃至超过RCMP域，尽管将部分矿物比作牛顿粘滞性流体尚欠具体。

如果矿物粒度较小，其相应的总表面积增大，因而容易吸收能量，集中应力和应变。故

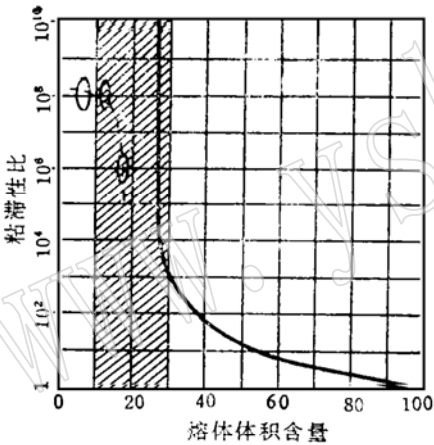


图 6 固熔体的粘滞性比与熔体体积含量关系图解（固熔体为体积一致的刚性悬浮球体，熔体为牛顿粘滞性熔体）

Fig. 6 Relative viscosity versus melt volume percentage for suspension of identical rigid spheres in a Newton melt (the solid curve), according to Roscoe's formation

粗实线据Roscoe(1952)公式 $\eta_r = (1.35c - 0.35) - 2.5$ 绘出（其中， η_r 为粘滞性比， c 为熔体体积百分含量）；细虚线示意Westerly花岗岩的实验结果；斜线示意RCMP点的可变范围（引自Arzi, 1978）

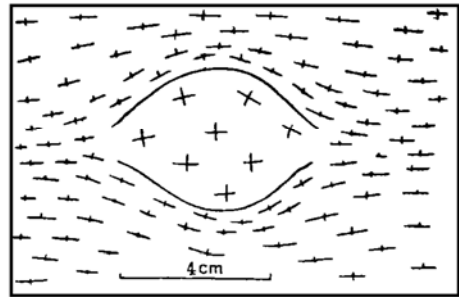


图 7 意大利 Ivrea 带中麻粒岩相橄辉岩的变形特征

Fig. 7 Deformation features of granulite facies peridotite in Ivrea zone, Italy
粗粒橄辉石呈眼球状赋存于面理发育的细粒橄辉石基质中（引自 Handy和Zingg, 1991）

此，矿物的粒度在流变性探讨中也显得重要。一方面，应变容易集中于粒度较小的矿物；另一方面，变形中粒度不断减小的矿物又反过来促进了应变和应力的进一步集中。韧性剪切带就是应变和应力的进一步集中及矿物颗粒粒度不断减小并不断相互促进而形成的狭长强流变

和变形带。图 7 是橄榄岩中橄榄石的变形特点。大的残斑相对未变形，流变性很弱，而小颗粒橄榄石流变性较强，形成定向的变形面理。

在五台山津沱群的一处露头中，互层的细粒泥质岩和颗粒较粗的石英岩在变形时，前者形成密集的Sc面理，而流变性较弱的后者形成Ss面理（图8a）。在另一处糜棱岩的XZ面切片中，大颗粒黑云母成为强硬的残斑，而小颗粒的黑云母流动性较强并形成糜棱面理Sc（图8b）。这两者都说明矿物的粒度变化所表现出的流变性变化。

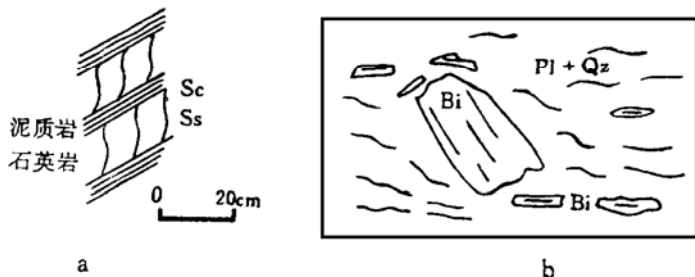


图 8 五台山津沱群中泥质岩和石英岩的变形特征差异 (a) 及黑云母片岩的韧性变形 (b)

Fig. 8 Controls of mineral size over competence and rheology of minerals
Examples are from the greenschist facies mylonite of the Hutuo Group, Wutai mountain
Bi—黑云母; Pl—长石; Qz—石英 放大倍数 ×10

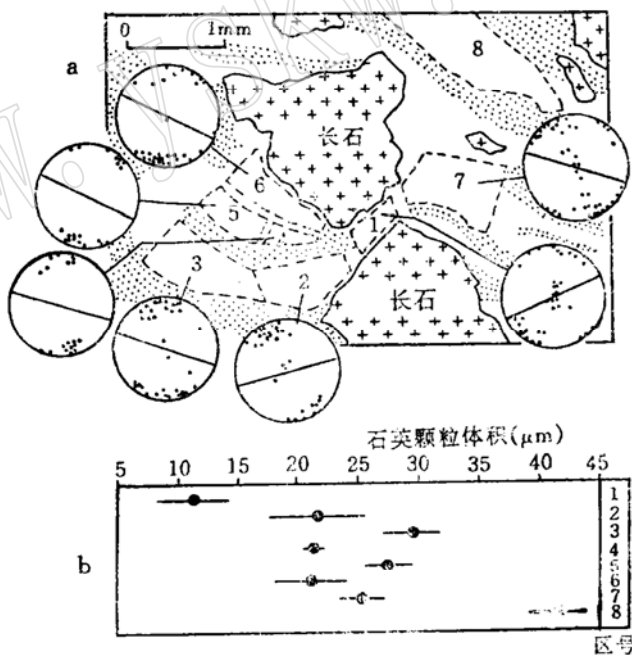


图 9 意大利北部南阿尔卑斯Pogallo带中绿片岩相花岗闪长质糜棱岩的XZ面切片
Fig. 9 Feldspar and quartz microstructures in a granodiorite mylonitized under greenschist facies conditions (Pogallo line, Southern Alps, Northern Italy)

a: 据薄片素描。虚线域为动态重结晶石英基质的微构造域; 圆示意构造域中石英光轴下半球等积投影和该域的面理走向; 打点域含微细颗粒长石和重结晶白云母; b: 上图 8 个显微构造域的动态重结晶石英的平均粒度 (黑点) 及总体标准偏差 (实线) (引自 Handy, 1990, 略有改动)

另外,岩石的流变性还与矿物的形态及分布有关系。如果矿物呈等轴状或等粒状形成“负荷结构”(loading framework),而且没有足够弱的矿物相出现或即使出现而其体积含量又未达到RCMP域,则应变相对均匀分布;而一旦矿物颗粒大小参差不齐,则应变容易集中,使岩石表现出流变性。图9示出意大利Pogallo带的绿片岩相长英质糜棱岩。研究表明,邻近长石残斑的基质中,动态重结晶石英的粒度较小,远离残斑时粒度较大。因此,粒度大小变化代表的软弱矿物相的流变性与软弱矿物和强硬矿物的距离存在一定关系。

此外,变质反应的作用、各种形式水的软化作用及所处的应力场等都对流变性有一定影响。本文不再就这些方面作探讨。

4 地壳剖面的或深层次岩石在抬升过程中的流变演化与构造演化

总体上如前所述,岩石与矿物的流变性受温度影响最大,因此,正常地壳从下到上的温度递减^[8]决定了其流变性的分层变化^[9]。近十年来,构造地质学家在利用早期划分的变形层次概念时十分强调这种变化的综合机理,将变形研究与流变性研究紧密结合。

由于下部地壳的高温作用,强、弱岩石间和矿物间的粘滞性比下降,岩石与矿物的流变性增强,因而整个下地壳表现出总体上较强而且是比较均匀的透入性变形。当然,成分的变化不可忽略。所以,以镁铁质成分岩石为主的下地壳可能形成网络状变形组构,而以中酸性片麻岩为主的下地壳可能形成近水平的层纹状变形组构。其面理由大规模剪切作用造成。但往往由于高温下矿物的静态重结晶速率大于应变速率,或者是应力下降速率小于岩石和矿物的动态重结晶速率,或者是造山作用中区域退变质作用的叠加,显微构造难以保存,而是经常表现出平直的颗粒边界或稳定的三联点边界。局部保存的这种变形特征应代表当时整个下地壳的变形行为。从这个意义上看,现今保存下来的麻粒岩相片麻理可以理解为曾经形成过的或当时正在形成的糜棱面理,片麻岩可以理解为曾经或当时正在形成的糜棱岩。

进入中上地壳,由于温度的下降,岩石和矿物的粘滞性增强,粘滞性比也增强,因而总体上是流变性减弱。应变不再均匀,变形不再具有透入性,而是集中在较软弱、粒度较小的矿物和软弱岩石中。因此,随着地壳层次越来越浅或下部地壳被抬升,应变和应力越来越集中在狭窄的带内。应变集中带内岩石与矿物的流变性不断增强(其强度可达 $10^{-12}S^{-1}$),与围岩的粘滞性比越来越大。就韧性剪切带而言,从下部地壳到上部地壳,其间距增大,规模减小,面理、线理产状和延伸的稳定性降低,剪切边界与周围的早期面理尽量趋于一致;变形的显微构造也得到保存。从角闪岩相至绿片岩相,云母膝折带数量增大、带宽变小,带间变形减少;高温时发育斜长石压力影构造,低温时发育石英、黄铁矿和方铅矿的压力影构造;麻粒岩相条件下韧性变形的长石、辉石和角闪石多以刚性矿物形式出现而发生破裂。进入4km以上的地壳层次仍有可能出现高流变的韧性变形带,但因总体的低流变性和强粘滞性,变形以破裂为主。

随着地壳层次的上升,流变性不断减弱和应变越来越集中,导致受韧性变形影响的岩石和矿物不断减少,而脆性变形不断增强,此情况可在宣化小营盘金矿的控矿构造中得到证实。该区的麻粒岩在中生代发生角闪岩相-绿片岩相的近水平韧性剪切作用;稍晚的低绿片岩相条件下的脆性冲断作用沿着矿物粒度减小程度最大的应变不断集中的剪切带中心部位发育。

总而言之，流变性这个概念在地质学中的运用涉及到构造—变质—热事件的综合，也必须考虑自身的和环境的各种因素在变形岩石和矿物中的作用，有利于接近自然的真谛。

参 考 文 献

- 1 Arzi A A. Critical phenomena in the rheology of partially melted rocks. *Tectonophysics*, 1978, 44: 173—184.
- 2 Handy M R. The solid—state flow of polymineralic rocks. *J. Geophys. Res.*, 1990, 95(B6): 8647—8661.
- 3 Biot M A. Theory of internal buckling of a confined multilayered structure. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 1964, 75: 563—568.
- 4 Tullis J. Deformation of feldspar. In: Ribble P H, ed. *Feldspar Mineralogy*. Mineral. Soc. America, 1983. 297—323.
- 5 Rutter E H, Brodie K H. Rheology of the lower crust. In: Fountain D M, Arculus R. kay R W, eds. *Continental Lower crust*. Amsterdam/London/New York/Tokyo: Elsevier Science Publisher, 1992. 201—267.
- 6 马宝林, 刘若新, 张兆忠. 中国华北地区深层次构造岩的基本特征和层次划分. *南京大学学报*, 1990, 2: 32—41.
- 7 Reston T J. Shear in the lower crust during extension; not so pure and simple. *Tectonophysics*, 1990, 173: 175—183.
- 8 Fountain D M, Salisbury M H. Exposed cross sections through the continental crust: implications for crustal structure, petrology, and evolution. *Earth planet. Sci. letters*, 1981, 56: 263—277.
- 9 Wever T h. The Conrad discontinuity and the top of the reflective lower crust—do they coincide? *Tectonophysics*, 1989, 157: 39—58.

A Review on Rheology of Crustal Rocks and Minerals

Ye Faguang

(Department of Geology, Peking University, Beijing 100871)

Key words: rheology; viscosity; deformation style; North China platform of China

Abstract

Rheologies of crustal rocks and minerals are mainly controlled by temperature and their composition. Since rheology reflects strain velocity of an object, the study is closely related to deformation. Under the high temperature condition of lower crust, rheologies of different rocks and minerals obviously increase in contrast to their viscosities and relative viscosities. So, the lower crust as a whole flows easily, distributes strain homogeneously, and is deformed penetratively. Nevertheless, rheology increases in order of schist < gneiss < metabasalt ≈ dunite < pyroxenite.

In middle-upper crust, however, lower temperature makes rheologies of rocks and minerals markedly decrease, and their viscosities and relative viscosities increase greatly. Thus, pyroxenite, dunite and meta-basalt mostly experience brittle deformation; pelite, carbonate rocks, and felsic rocks have relatively strong rheologies; minerals prone to be deformed ductily are quartz and mica group instead of feldspar, amphibole, pyroxene and olivine in the lower crust. All these changes result in changes in characteristics of outcrop structures, such as fold, boudinage and shear zone, and also features of microstructures, like kink, pressure shadow and deformation fabric. As for a poly-mineralic rock, its rheology is controlled mainly by the sufficiently weak mineral whose volume has attained RCMP region. In middle-upper crustal rocks, for example, quartz is such a mineral. However, rheologies of rocks and minerals are also affected to some extent by grain sizes, distribution and shapes of minerals, metamorphic reaction, the presence of various kinds of water and stress fields. The discussion in this paper is exemplified by some deformation characteristics of the North China platform.

www.yskw.ac.cn