

# 大别山超高压榴辉岩流变强度——评论与答复

## 1 评论

宋鸿林

(中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083)

在阅读了《地球科学》2001年第6期中金振民等<sup>[1]</sup>的关于榴辉岩高温高压下流变实验的文章后,觉得有几个问题值得向作者请教。

(1)实验样品是否达到了晶体塑性变形的稳态蠕变状态,确定流变强度的重要标准是实验样品是否达到了稳态蠕变状态。虽然,从应力/应变曲线看,多数样品似乎达到了平坦的曲线,但从该文中所附的显微照片(原文图2)看不出反映稳态流变的构造特征。变形前后的显著变化有:①粒度明显增大,绿辉石和石榴石的粒度达100~150 μm,为原样品的2~3倍。(中、英文版的同一GB192照片所注的比例尺相差一倍)。这是一种什么变形机制,作者未做解释。一般认为作为稳态流变的位错蠕变的动态重结晶,应当使岩石细粒化,而不是反映静态重结晶的粒径变粗。②石榴石呈脆性变形,明显发育垂直其长轴的平行张裂或Y形裂隙,但石榴石两端未见有天然韧性流变变形标本中常见的拖尾构造。③照片可能为负片,石英呈黑色,虽显著伸长,但看不出细粒化(或亚晶粒和波状消光)的迹象,边界呈不规则状充填于其他颗粒之间,而不像一般糜棱岩化中的丝带构造(ribbon structure)和核幔构造,也不见反映塑性流动的运动学标志,更像是经过了局部熔融的产物。④绿辉石的粒径虽明显增大,但轴比一般小于2,与原样品无显著变化,然而,可以看到其充填于石榴石之间,但也看不到反映强烈晶体塑性变形的显微构造(如丝带构造、碎斑系、S/C构造等)。这个薄片中的整体显微构造和各个矿物的变形行为能说是达到稳态流变了吗?它与代表稳态流变的糜棱岩的显微构造有明显的差别。在这个实验样本中,什么是反映稳态流变的显微构造特征呢?

(2)关于实验应变速率与天然应变速率的差异。该文的实验应变速率采用 $4.6 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1} \sim 4.6 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ,而其应变量达到20%~25%,最大达

50%。如果以20%计算,对于应变速率为 $4.6 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ ,样品的实验所需时间仅为 $20\% / (4.6 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}) = 435 \text{ s} = 0.12 \text{ h}$ 。如应变速率为 $4.6 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 则所需时间也不过1.2 h。试问如此短暂的实验时间,能使样品有足够的时间进行应变调整(如分子扩散、位错调整、重结晶等)吗?其与天然变形的应变速率( $10^{-13} \text{ s}^{-1}$ )差别之大( $10^8$ 倍),两者的变形机制能相似吗?

(3)关于应变引起的不均匀性。该文没有附变形样品的宏观照片,在一般的岩石实验中,当应变达到25%以上时,岩石样品的横向扩张将相当可观,样品内将会出现应变局部化的剪切带或样品将成鼓形。样品GB190应变达40%以上,其应力/应变曲线在达到853 MPa以后,有明显的应力降,反映了应变的弱化,不知这一样品的宏观和显微构造的特征如何。

(4)关于岩石流变律的表达式。实验变形资料所获得的岩石或矿物的流变律是根据大量实验资料经数学回归而得出的经验公式,它与岩石的变形机制密切相关。根据Nicolas等<sup>[2]</sup>的归纳,粘性流变中应变速率和流应力之间的对数关系有2种表达式(该文中图2.23)。据Rutter等<sup>[3,4]</sup>的总结,在高温(高于材料的绝对熔融温度的一半)和低应变速率(热活化引起的恢复作用具有重要意义)下,为幂律蠕变(power-law creep),其本构流动律为:

$$de/dt = A \exp(-H/RT) (\sigma^n / d^m). \quad (1)$$

在高应力(对硅酸盐岩石约大于 $10^{-2} G$ ,  $G$ 为剪切模量)下,主要是位错滑动机制控制其流变,其本构流动律表达为指数流动(exponential flow):

$$de/dt = B \exp(-H/RT) \exp(D\sigma) / d^m. \quad (2)$$

式中: $H$ 是活化焓(相当于金振民文中的 $Q$ ), $R$ 、 $T$ 、 $\sigma$ 的含义与金文一致, $A$ 、 $B$ 、 $D$ 、 $n$ 、 $m$ 为与材料有关的经验常数, $d$ 为样品的粒径。而金振民文中只列举了幂律蠕变的方程式,且其中忽略了样品粒度对变形的影响。大量岩石力学实验表明,粒度对岩石的流变强度有重要的影响,特别是在高温下,细粒化使岩石的流变强度显著降低,认为是沿颗粒边界的扩散物质转移(diffusive mass transfer)的机制起了

重要的控制作用(Kalato 等<sup>[5]</sup>).

从金振民文中的图3和表2的资料看,石榴石岩GB207、榴辉岩GB194和GB190流变强度分别达1746, 1175和853 MPa,这已可能不适用幂流定律,而应当进入适用指数流动律的范畴,因而,不当与低流应力下的样本一起来分析.

从金振民文中的图3和图4的曲线看,样品GB190和GB207的曲线在达到高峰以后有向右的明显下降,这是一种应变软化的曲线,金文中没有说明其显微构造特征.一般在这种情况下,应当有应变局部化的剪切带出现,说明这不是一条达到了稳态蠕变的曲线,不应与其他样本一起回归和对比.

在金振民文的图3b中,1500 K的曲线上,中间的一点(相当应变速率为 $1.3 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ ),在表2的资料中没有,表中GB209的流变强度为557 MPa,但应变速率为 $4.6 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ .如果GB190又不宜应用,则只剩下一点(GB200),如何能回归出此曲线?另外,表2中的1600 K的应变速率为 $4.6 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ ,而图3a中标的为 $4.5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ ,两者应当一致.

提出以上问题希望与作者加以讨论,以获得更好的认识.

## 参考文献:

- [1] 金振民,章军锋,Green H W,等.大别山超高压榴辉岩流变强度——来自高温高压实验的证据[J].地球科学——中国地质大学学报,2001,26(6):574—580.
- [2] Nicolas A, Poirier J P. 变质岩的晶质塑性和固态流变[M].林传勇,史兰斌,译.北京:科学出版社,1985.
- [3] Rutter E H, Brodie K H. Rheology of the lower crust [A]. In: Fountain D M, Arculus R, Kay R W, eds. Continental lower crust [C]. Elsevier, 1992. 201—267.
- [4] Rutter E H, Brodie K H. The role of tectonic grain-size reduction in the rheological stratification of the lithosphere [J]. Geol Rundsch, 1988, 77: 295—308.
- [5] Kalato S, Paterson M S, Fitzgerald J D. Rheology of synthetic olivine aggregates: influence of grain size and water [J]. J Geophys Res, 1986, 91: 8151—8176.

## 2 答复

金振民<sup>1</sup>,章军锋<sup>1,2</sup>,Green H. W.<sup>2</sup>

(1.中国地质大学地球科学学院,湖北武汉430074;2.加利福尼亚大学(Riverside分校)地球物理和行星物理研究所,CA 92521,USA)

首先作者感谢宋教授对榴辉岩高温高压流变学实验研究的兴趣.针对所提到的4个问题,作如下答复:

(1)实验样品是否达到稳态.诚如宋教授所言,实验流变学确定岩石流变强度的最重要标准有2个:①应力/应变曲线达到平坦的稳态蠕变曲线;②显微构造特征(样品应变均匀,无明显歪斜,无剪切带、相变及围压介质介入等).但两者又是相辅相成的,没有稳态流变的显微构造特征,应力/应变曲线就不可能是稳态曲线;反之亦然.至于宋教授所提到的几个疑点,我们重新检查实验样品薄片后的答复如下:①我们在显微镜下仔细对比并测量了实验前后的样品薄片中的颗粒,虽然绿辉石和石英颗粒被显著拉长,但基本可以排除样品颗粒出现明显增大的可能.图2中某些矿物颗粒看似很大,实际上很可能是由若干大小不等的颗粒组成的,只是经历高温高压变形之后,颗粒边界并没有在反光镜照片中被清晰地解析出来.②石榴石在减压过程中很容易发生脆性破裂(虽然它的挤压变形强度非常大)是为人熟知的事实.本文图中石榴石的张裂是在高温蠕变实验结束后低温减压卸载过程中形成的,这是高压实验中最常见的现象之一,并不代表石榴石在高温高压变形过程中发生了脆性破裂.如果在蠕变实验过程中出现任何裂隙的话,稳态曲线是永远无法实现的.另外,除非出现相变或流体,由于高压( $p > 10^6 \text{ kPa}$ )的禁制作用,任何材料的脆性破裂在如此之高的本次实验压力条件下,在理论意义上已成为一种不可能(参见文献[1,2]).③本文照片是在反射光条件下用显微镜数码相机拍摄的(在某种程度上相当于SEM照片),这与透射光条件下解析的细节有很大差别.反射光强于解析颗粒边界的显微构造,而透射光强于解析颗粒内部变形的显微构造.④宋教授反复强调实验变形一定要有反映塑性变形的显微构造(如丝带构造、碎斑系、S/C构造)来证明达到

稳态蠕变。以上显微构造(如丝带构造、碎斑系、S/C构造)是天然强变形岩石(糜棱岩)中常见的显微构造,其中应该包含至少 2 层重要的地质信息:(a)岩石经历了“多期”“多方向”差异应力的作用而变形;(b)岩石的应变很大(对糜棱岩来说通常要远大于 100%)。而实验变形一般都只是“单期”“单方向”差异应力作用下的变形,达到稳态变形时的应变量一般不超过 10%~15%,最终岩石的变形总量也一般不会超过 50%。这两者之间应该不具有什么对比性才对。

(2)实验应变速率与天然应变速率之间的差异。这大概是搞实验地质学研究的人被地质学同行最经常问到的问题之一了。现实中,为了在人们极其有限的生命过程完成漫长地质变形过程的模拟研究,通常不得不在比天然变形速率( $10^{-13} \sim 10^{-15}$ )高得多的实验应变速率( $10^{-3} \sim 10^{-7}$ )内进行实验。由于实验变形的温度一般也要高于天然岩石变形的温度,高温会加速很多导致变形的物理过程(如位错迁移、元素扩散等),因此变形实验往往能产生与天然岩石变形极其相似的显微构造,并成功地将结果由实验应变速率条件下外推到天然应变速率下。这已经有无数的前人实验成果为证。如果有兴趣的话,可以参阅 Paterson 等的实验成果综述文献。

(3)应变不均匀性。GB190 样品应变量达到了 40%左右,样品除发生较大的横向扩张外,并没有剪切带出现,样品整体表现为稳态流动变形。该实验应力曲线表现了相对明显的应力随应变的缓慢下降,这应该主要与我们实验数据处理过程中假定的零摩擦力斜率有关,有时实验中的摩擦力可能是缓慢增加的,这将导致流动应力在屈服之后表现出逐步下降的假象。因此,对岩石流动应力的最佳估计应该是屈服的应力而不是大应变时的应力。另外,值得提到的是,如果实验过程中样品中心发生少量偏移也会造成十分类似的结果。而对样品 GB190 的观察表明第一种可能性最大。

(4)岩石流变律和流变机制。作者认为,应变速率和应力之间关系的表达式本来就只有经验公式而无理论公式。我们对流变律的选择更多的是基于我们实验的条件和经验判断,最终该如何确切表达更多地应该取决于数据本身而不是外在条件。宋教授强调了榴辉岩的高强度,但忽略了本榴辉岩实验正是在近于榴辉岩熔融温度的低应变速率下完成的。

既然我们的实验数据已经表明它能够用幂律蠕变流动律而不是指数流动律来很好地表达,实验条件也与幂律蠕变相符,数据本身应该比我们的想象更能说明问题。Rutter 等尽管对流变律进行了一般的经验概括,并不能代表所有岩石的流变规律。我们只是根据自己的实验资料得出的流变律。

大量的前人研究表明,只有在颗粒粒度小于 10  $\mu\text{m}$  时扩散蠕变才可能取代位错蠕变在岩石变形中占主导地位。而本文研究中颗粒粒度远大于 10  $\mu\text{m}$ ,榴辉岩变形在实验条件下应该以位错蠕变为主,这也由高达 3.4 的应力指数所证实(扩散蠕变的应力指数应为 1 左右),因此本文中并没有讨论样品粒度对变形机制的影响。有关颗粒度对榴辉岩流变强度影响的问题,我们在以后的实验中进行研究。

正如宋教授所指的,样品 GB190 和 GB207 曲线在达到高峰之后有明显下降趋势,这的确是一种应变软化现象,它与部分矿物重结晶作用有关。我们在文中未说明其显微构造特征,一方面是由于这种软化不是本次研究重点;另一方面我们将有专门文章讨论与应变软化有关的显微构造。值得强调指出的是,大量金属物理高温实验都已证明,在达到标准稳态蠕变时,有时会出现局部软化现象。由于我们的实验可以有效控制,不希望出现更大软化。一旦在稳态曲线上出现软化的趋势我们将立即停止实验的进行,所以样品不会出现变形局部化剪切带。因此,我们的实验曲线是符合稳态蠕变标准的。大量高温高压实验都已证实,当达到稳态曲线时,如果出现局部软化(即曲线下降现象),实验人员可以有效停止实验进行,不使软化进一步加强。因此,样品中是不会出现变形局部化的剪切带的。

经查对原始记录,表 2 中 GB209 样品的应变速率是  $1.3 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ ,相应差异应力是 557 MPa。GB190 应变速率是对的( $4.6 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ ),图 3a 中 1 600 K 的应变速率应为  $4.6 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ ;1 500 K 其中一个应变速率也应为  $4.6 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ,与表 2 中相对应。感谢宋教授对这 2 个数据的指正。

## 参考文献:

- [1] Scholz C H. The mechanics of earthquakes and faulting [M]. Cambridge, UK: Cambridge Univ Press, 1990.
- [2] Green H W, Houston H. Mechanics of deep earthquakes [J]. Annu Rev Earth Planet Sci, 1995, 23: 169—213.