

# 熔融流体与上地幔流变强度 关系的实验研究\*

金振民<sup>①②</sup> H. W. Green<sup>②</sup> Yi Zhou<sup>②</sup> 金淑燕<sup>①</sup>

(<sup>①</sup>中国地质大学, 武汉 430074; <sup>②</sup> University of California, Riverside CA92521)

**摘要** 在上地幔温度(1 300~1 500 K)、压力(1.5 GPa)和应变速率  $10^{-4} \sim 10^{-5}/\text{s}$  条件下对合成地幔岩进行了部分熔融变形实验研究. 实验结果表明 5% 左右熔体使地幔岩石力学强度产生明显弱化现象, 熔融流体强化了矿物颗粒边界滑移和动态重结晶作用. 含少量熔体液-固态双相系统上地幔岩石变形机制以高温位错蠕变为主, 应力指数  $n$  为 2.3, 蠕变活化能为 270~994 kJ/mol.

**关键词** 上地幔 熔融流体 流变学 高温高压实验

由上地幔部分熔融作用产生的熔体不仅对地幔流变强度、软流圈中地震波传播和衰减、导电性和高导低速层成因认识有重要意义<sup>[1]</sup>, 而且熔融作用本身对壳-幔物质交换(如底侵作用)和深部能量再分配有直接影响<sup>[2]</sup>, 已引起地质学家和地球物理学家密切关注<sup>[3~5]</sup>. 近年来熔融动力学研究有两个重要发现:(1) 动态部分熔融实验证明少量熔体(5% 左右)不仅赋存于上地幔矿物三联点空间, 而且还可以呈熔融薄膜(melt-film)形式存在颗粒边界<sup>[6]</sup>; (2) 蛇绿岩中熔体构造野外研究表明, 方辉橄榄岩和纯橄榄岩中韧性剪切带是熔融作用通道(pathway)<sup>[7]</sup>. 然而目前人们有关熔体与上地幔流变强度有什么关系还了解很少. 本文目的在于: 研究上地幔温度和压力条件下熔融流体对橄榄岩力学强度影响; 研究含熔体橄榄岩和无熔体橄榄岩的变形机制差异; 探索熔体导致橄榄岩力学强度弱化原因.

## 1 实验材料和条件

### 1.1 实验材料

实验原始材料采自河北省万全县大麻坪尖晶石二辉橄榄岩. 原始材料的矿物成分和化学成分见表 1. 岩石经单矿物分离, 粉碎为 25~50  $\mu\text{m}$  大小颗粒, 分别配制, 在均匀围压(0.15 GPa)和温度 1 200℃ 条件下进行热压(hot pressing) 1.5 h, 制成地幔岩、二辉橄榄岩和方辉橄榄岩. 这 3 种合成岩石的岩石平均化学成分见表 1. 选择合适矿物颗粒样品是保证实验精度的关键因素. 实验样品长 7 mm, 直径 3 mm 圆柱体. 圆柱状样品在 383 K 恒温炉中烘干 100 h, 用 Ni 薄膜包裹样品以后密封在铂合金(Pt)内, 使实验样品氧逸度( $f\text{O}_2$ )接近于 Ni/NiO

状态,以满足上地幔橄榄岩稳定场要求<sup>[8]</sup>.

表 1 实验样品化学成分(%)

| 名称                             | 天然二辉橄榄岩 <sup>a)</sup> |       |       |       | 合成岩石 <sup>b)</sup> |               |               |
|--------------------------------|-----------------------|-------|-------|-------|--------------------|---------------|---------------|
|                                | OL                    | OPX   | CPX   | SP    | 地幔岩<br>(#1)        | 二辉橄榄岩<br>(#2) | 方辉橄榄岩<br>(#3) |
| SiO <sub>2</sub>               | 41.39                 | 56.30 | 53.32 | 0.18  | 46.92              | 45.71         | 43.56         |
| TiO <sub>2</sub>               | 0.03                  | 0.11  | 0.35  | 0.07  | 0.09               | 0.07          | 0.04          |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0.00                  | 3.21  | 4.9   | 50.85 | 3.90               | 2.60          | 1.99          |
| Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0.00                  | 0.40  | 1.05  | 17.58 | 0.50               | 0.30          | 0.28          |
| MgO                            | 49.03                 | 33.18 | 14.81 | 19.96 | 39.20              | 40.98         | 45.24         |
| CaO                            | 0.01                  | 0.50  | 21.27 | 0.01  | 3.13               | 2.33          | 1.26          |
| MnO                            | 0.14                  | 0.24  | 0.08  | 0.20  | 0.12               | 0.11          | 0.11          |
| FeO                            | 8.78                  | 5.74  | 2.18  | 10.80 | 7.27               | 7.32          | 8.21          |
| Na <sub>2</sub> O              | 0.00                  | 0.02  | 1.45  | 0.02  | 0.18               | 0.14          | 0.07          |
| K <sub>2</sub> O               | 0.00                  | 0.00  | 0.02  | 0.06  | 0.01               | 0.01          | 0.01          |
| 合计                             | 99.38                 | 99.70 | 99.43 | 99.63 | 101.34             | 99.59         | 100.77        |
| OL                             | 15                    |       |       |       | 52.0               | 61.0          | 81.0          |
| OPX                            |                       | 20    |       |       | 31.0               | 26.0          | 12.0          |
| CPX                            |                       |       | 10    |       | 13.9               | 10.3          | 4.6           |
| SP                             |                       |       |       | 5     | 3.1                | 2.7           | 2.4           |

a) 分析者:中国地质大学(北京)电子探针室  
b) 分析者:加利福尼亚大学(Davis 分校)电子探针室

1.2 实验条件

全部实验是在高温高压改正型 Griggs 仪器上完成的. 样品装置如图 1. 利用 NaCl + KCl 做传压介质, 不仅使传压均匀, 保护高温石墨炉免受损坏, 同时提高差异应力测量精度. 利用两个热电偶(Pt/Pt-Rh)测量样品温度变化, 误差为 ± 5°. 变形实验之前要进行样品预处理(pre-annealing) 12 h, 使样品内各矿物或熔体之间达到平衡显微结构. 每次实验要求应变(ε)达到 > 5% 以上, 变形曲线要符合稳态蠕变要求. 实验完成之后, 在 5 s 之内将炉内温度下降到 900 K, 使熔体淬火形成均匀非晶质玻璃, 然后缓慢降低温度和压力. 通过熔融对比实验, 使熔体比例控制在 5% 左右. 实验变形样品用光学显微镜、背散射扫描电子显微镜研究熔体分布结构特征, 用图象处理程序准确测定熔体比例.

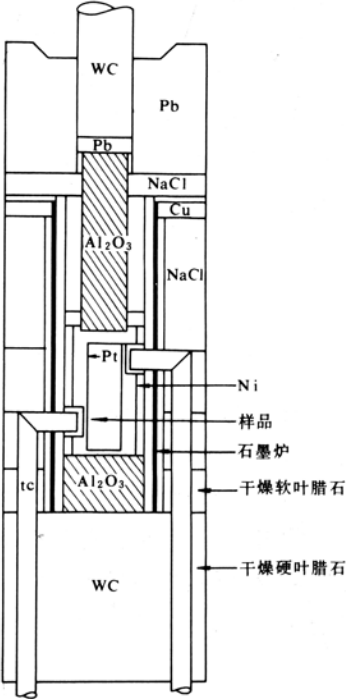


图 1 样品装置图

2 实验结果

2.1 力学实验结果

本次实验重点是对合成地幔岩(#3)进行: (1) 亚固相变形实验(subsolidus), 即低于该岩石熔点(1 475 K)无熔体固态流变实验; (2) 超固相变形实验(supersolidus), 即接近熔点或略高于熔点(25 K)含熔体的液-固态双相流变实验. 流变状态方程和主要流变参数计算公式如下:

$$\dot{\epsilon} = A \exp(-Q/RT) \sigma^n, \tag{1}$$

$$n = \frac{\partial \ln \dot{\epsilon}}{\partial \ln \sigma}, \tag{2}$$

$$Q = - R \cdot \frac{\partial \ln \dot{\epsilon}}{\partial (1/T)}$$

(3)

式中： $\dot{\epsilon}$ ——应变速率， $A$ ——物质结构常数， $Q$ ——蠕变活化能， $T$ ——绝对温度， $\sigma$ ——流动差异应力， $n$ ——应力指数， $R$ ——气体常数。15 个样品 22 次实验的力学资料见表 2，图 2(a) 表示固定围压(1.5 GPa)和应变速率( $3 \times 10^{-5}$ /s)条件下不同温度达到稳态的应力-应变曲线特征：(1) 1 300 K 时，流变强度为 1 310 MPa，未见熔体出现(即亚固相)；(2) 1 400 K，流变强度为 581 MPa，含有<1%熔体，(3) 1 500 K，高于固相线，流动应力为 28.8 MPa。图 2(b)表

表 2 合成地幔岩力学实验资料(1.5 GPa 围压)

| 样品号     | 温度/K  | 应变速率/ $s^{-1}$       | 差异应力/MPa | 熔融比例/% |
|---------|-------|----------------------|----------|--------|
| GL502   | 1 475 | $3 \times 10^{-5}$   | 55       | 5.5    |
| GL506   | 1 475 | $3 \times 10^{-5}$   | 30       | 7.0    |
| GL548   | 1 475 | $1 \times 10^{-5}$   | 8        | 7.0    |
| GL546   | 1 475 | $6.7 \times 10^{-4}$ | 190      |        |
|         | 1 475 | $3.5 \times 10^{-5}$ | 30       | 7.0    |
| GL569   | 1 475 | $3 \times 10^{-4}$   | 130      |        |
|         | 1 475 | $1 \times 10^{-4}$   | 90       |        |
|         | 1 475 | $3 \times 10^{-5}$   | 50       | 6.5    |
| GL581-1 | 1 400 | $3 \times 10^{-5}$   | 760      | —      |
| GL582-2 | 1 450 | $3 \times 10^{-5}$   | 200      | 3.0    |
| GL590   | 1 400 | $3 \times 10^{-5}$   | 808      | —      |
| GL594   | 1 300 | $3 \times 10^{-5}$   | 1 310    | —      |
| GL595   | 1 500 | $3 \times 10^{-5}$   | 29       |        |
| GL599   | 1 400 | $3 \times 10^{-5}$   | 720      | —      |
| GL600   | 1 400 | $3 \times 10^{-5}$   | 581      | —      |
| GL605   | 1 475 | $3 \times 10^{-5}$   | 68       | 7.0    |
| GB40    | 1 500 | $1.4 \times 10^{-5}$ | 8        |        |
| GB40    | 1 500 | $1.4 \times 10^{-5}$ | 8        |        |
| GL607-1 | 1 450 | $3.0 \times 10^{-5}$ | 241      |        |
|         |       | $8.3 \times 10^{-5}$ | 316      |        |
| GL607-2 | 1 435 | $1.0 \times 10^{-5}$ | 264      |        |
|         |       | $6.6 \times 10^{-6}$ | 216      |        |
|         |       | $3.4 \times 10^{-5}$ | 434      |        |
|         |       | $9.3 \times 10^{-5}$ | 545      |        |

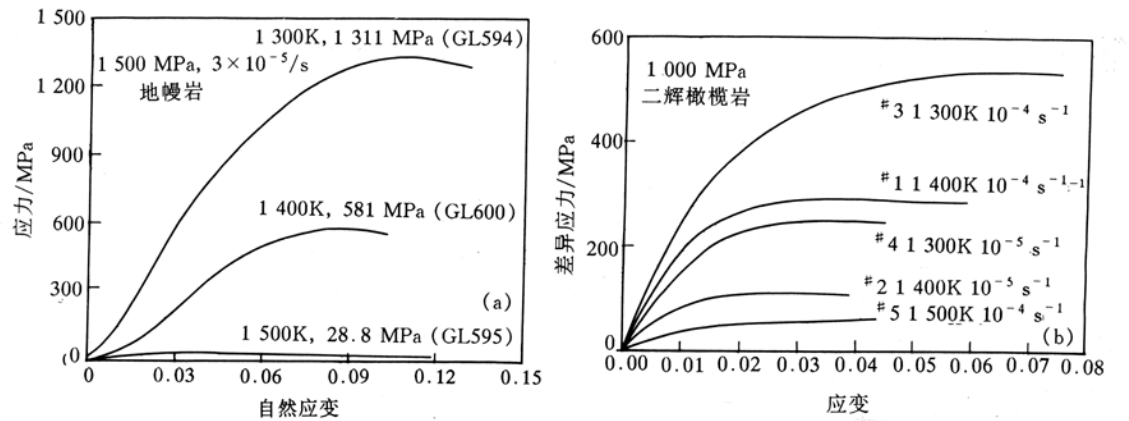


图 2 地幔岩应力~应变曲线(a)与二辉橄榄岩应力~应变曲线(b)

示二辉橄榄岩应力~应变曲线与图 2(a)一样也有类似变化趋势. 根据 1.5 GPa 围压, 1 500 K(即含有 5% 熔体)的变形实验求得应力指数( $n$ )为 2.3(图 3(a)). 在固定围压和固定应变速率( $3 \times 10^{-5}$ /s)的增温实验中, 在 1 300~1 400 K 温度域, 因未产生熔体, 差异应力递减缓慢, 活化能( $Q$ )为 270 kJ/mol; 在 1 400~1 500 K 温度域, 开始出现熔体(从 1% 增至 6%), 差异应力急剧下降, 活化能( $Q$ )为 944 kJ/mol(图 3(b)), 横坐标 7.15 值对应温度为 1 400 K).

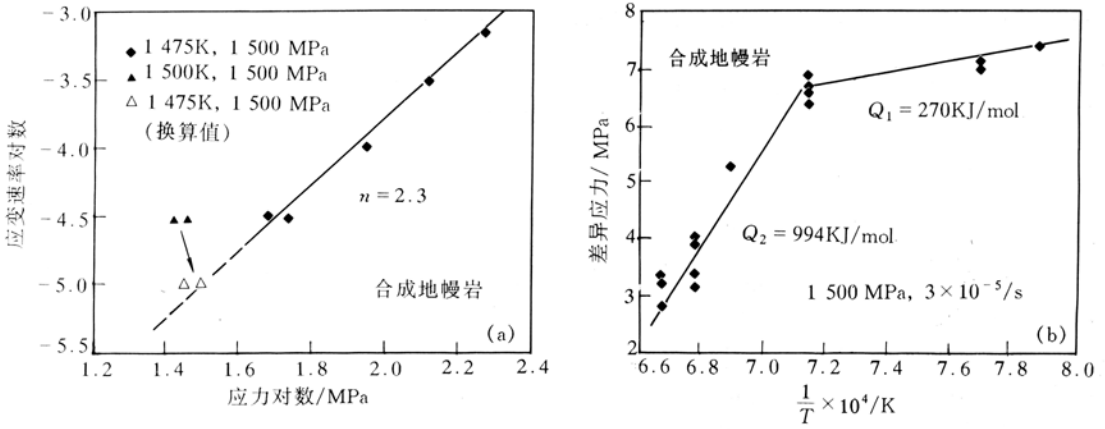


图 3 应力与应变速率关系(a)和应力与温度关系(b)

2.2 熔体结构和成分

动态部分熔融实验中产生的熔体, 一部分赋存于矿物颗粒三联点空间, 大部分熔体沿矿物颗粒边界呈熔融薄膜形式出现(图 4(a)). 三联点熔体与颗粒边界熔体有良好连通性, 这种结构特征与以往静态部分熔融实验结构有明显区别<sup>[6]</sup>. 在含有熔体变形样品中, 颗粒边界有明

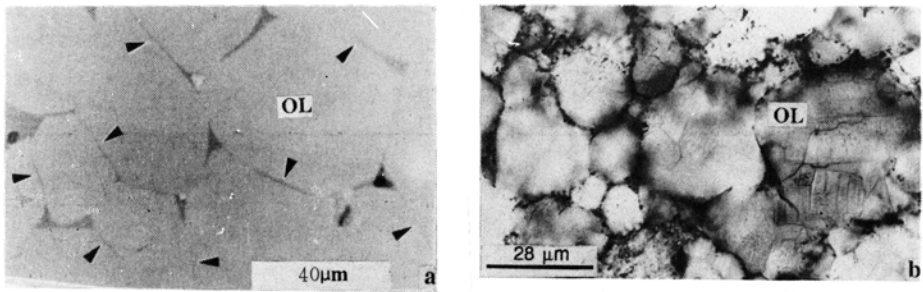


图 4 熔体结构(三连点熔体和熔融薄膜, 箭头处)(a)与橄榄石位错构造(b)

显迁移现象: 矿物颗粒边界弯曲、嵌入、粒度增大而无明显压扁现象. 熔体发育的颗粒边界和三联点中发育有动态重结晶颗粒. 矿物熔融次序为: 尖晶石→透辉石→顽火辉石, 橄榄石未见熔融现象. 经电子探针分析, 熔体化学组分为玄武质成分:  $\text{SiO}_2$  53.64%~55.88%,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  18.30%~20.60%,  $\text{CaO}$  6.27%~9.54%,  $\text{MgO}$  1.08%~5.19%,  $\text{FeO}$  1.42%~2.75%,  $\text{NaO}$  0.4%~1.16%. 熔体与原始样品化学成分(表 1)比较, 前者在  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$  和  $\text{NaO}$  组分有显著增加.

### 2.3 变形机制鉴别

利用氧化缀饰法对含熔体变形样品显微构造研究表明, 橄榄石具有均匀自由位错和[100]和[001]位错壁构成的亚晶粒(图4(b)), 这种特征与幔源包体橄榄石中常见高温低应力位错构造是类似的<sup>[9]</sup>。根据 GL506 和 GK502 样品自由位错密度计算结果:  $\rho = 10^7 \sim 10^8 \text{ cm}^{-2}$ , 相应差异流动应力( $\sigma$ )为 10~30 MPa, 它与该样品力学资料的差异流动应力是接近的。

## 3 讨论和结论

(1) 5%左右熔体使上地幔岩石力学强度产生明显弱化现象(weakening), 流动应力 8~50 MPa, 这与单一固相橄榄岩流变强度有明显差别。熔体导致岩石强度弱化原因主要有两方面。一是颗粒边界滑移(sliding of grain boundary)强化作用: 一旦岩石中含有 5%左右熔体, 使原来单相固态岩石变为液-固相共存的双相系统, 颗粒边界上熔体促使系统粘度减低, 导致韧性流动阻力降低, 促进颗粒边界滑移作用。另一方面是动态重结晶软化作用(softening), 由于颗粒边界熔体薄膜存在, 缩短了物质扩散路径, 加速颗粒边界迁移速度, 同时动态重结晶颗粒生长本身消耗了应变能, 使岩石强度明显减弱。我们的实验与 Urai 的石盐+水和光卤石+水实验结果是完全类似的<sup>[10,11]</sup>。Drury 等<sup>[12]</sup>对南非(Thaba Putsoa)金伯利岩橄榄岩包体研究表明, 橄榄石和辉石中 C—H—O 流体强化重结晶作用。由此可见, 从实验研究和天然岩石研究都说明岩石中熔体或流体存在是影响岩石流变强度和重结晶作用的重要因素。我们不同意 Karato 的上地幔部分熔融作用会引起岩石强度硬化观点<sup>[13]</sup>。

(2) 相互连通的熔体使上地幔岩石有效粘度明显降低。从我们的部分熔融变形实验结果(表2)求出的有效度  $\eta$  是很低的( $\eta = \sigma/\dot{\epsilon}$ :  $\sigma$  为差异应力,  $\dot{\epsilon}$  是应变速率), 它说明了在同样温度条件下熔体萃取过程中残余物流动比橄榄石流变学推断的流动容易得多, 这种效应与低熔比例条件下熔体和残余物分离作用有关。这种见解与洋中脊玄武岩微量元素成分推断结果是一致的(Johnson 等, 1990)。

(3) 含少量熔体液-固态双相系统上地幔岩石变形机制仍然是以位错蠕变为主。以往大量固相橄榄岩高温流变学实验证明, 高温蠕变应力指数  $n = 3.5$  左右; 扩散蠕变应力指数  $n = 1$ 。然而我们实验结果表明, 含有 5%左右熔体地幔岩高温蠕变应力指数  $n = 2.3$ , 即应力指数为  $1 < n < 3.5$ , 这有可能暗示含有少量熔体上地幔岩石变形机制似乎介于位错蠕变和扩散蠕变之间, 属过渡类型。有关这个问题我们还将进一步继续研究。

(4) 我们的力学资料还表明, 低于固相线的地幔岩力学强度(1 000 MPa)比二辉橄榄岩或方辉橄榄岩的力学强度(550 MPa)大。

(5) 上地幔部分熔融研究对开展深部构造和深部地球物理研究有深远意义, 尤其是对深地震反射成果合理解释有重要的约束价值。Sato 等通过对夏威夷尖晶石二辉橄榄岩部分熔融与  $V_P$ ,  $V_S$  波速关系实验研究表明<sup>[5]</sup>, 2%~3%熔体可以使地震纵波( $V_P$ )和剪切波( $V_S$ )速度分别减少 5%和 10%, 尤其是剪切波衰减对熔体尤为敏感。含有 3%相互连通熔体的导电率可达到 0.2 s/m, 接近于软流圈高导电值。洋中脊和裂谷中心熔体定向流动也会引起地震波各向异性。上地幔和下地壳熔体不仅会强化韧性剪切作用, 导致反射振幅系数增强, 同时对中下地壳加厚也有不可估量的影响。因此加强部分熔融野外研究和实验研究, 对于建立和完善大陆动力学模式是十分必要的。

**致谢** 全部实验是在加利福尼亚大学(Riverside 分校)高温高压实验室完成的. 技师 F. Forgit 在实验样品装置加工方面所做的工作, 在实验过程中与 Quan Bai 和 Y. J. Gu 博士进行多次有益讨论, 在此表示诚挚谢意.

## 参 考 文 献

- 1 Schilling H. Numerical models on the influence of partial melt on elastic, anelastic and electric properties of rocks, Part I. Elasticity and anelasticity. *Phys Earth Planet Int*, 1985, 41: 34~57
- 2 金振民, 高山. 底侵作用(underplating)及其壳幔演化动力学意义. *地质科技情报*, 1996, 15(2): 1~7
- 3 Kohlstedt D L, Zimmerman M E. Rheology of partial molten mantle rocks. *Annual Reviews*, 1995, 21: 22~49
- 4 Cooper R F, Kohlstedt D L. Rheology and structure of olivine-basalt partial melts. *J Geophy Res*, 1986, 91: 9 315~9 323
- 5 Sato H, Sacks I S. The use of laboratory velocity data for estimating temperature and partial melt fraction in the low-velocity zone. *J Geophy Res*, 1989, 94(B5): 5 689~5 704
- 6 Jin Zhenming, Green H W, Yi Zhou. Melt topology in partial molten mantle peridotite during ductile deformation. *Nature*, 1994, 372: 164~166
- 7 Kelemen P B, Dick H J B. Focused melt flow and localized deformation in the upper mantle: Juxtaposition of replacive dunite and ductile shear zone in the Josephine peridotite. *SW Oregon J Geophy Res*, 1995, 100: 423~438
- 8 Nitsan U. Stability field of olivine with respect to oxidation and reduction. *J Geophy Res*, 1984, 29: 706~711
- 9 Jin Zhen-min, Green H W, Borch R S. Microstructures of olivine in the upper mantle beneath Eastern China. *Tectonophysics*, 1989, 169: 23~50
- 10 Urai J L. Weakening of rock salt by water during long-term creep. *Nature*, 1986, 324: 554~557
- 11 Urai J L. Water-enhanced dynamic recrystallization and solution transfer in experimentally deformed carnallite. *Tectonophysics*, 1985, 120: 285~317
- 12 Drury M R, Van Roermund H L M. fluid assisted recrystallization in the upper mantle peridotite xenoliths from kimberlites. *J Petrol*, 1989, 30: 133~152
- 13 Karato S. Does partial melting reduce the creep strength of the upper mantle? *Nature*, 1986, 319: 309~310