

橄榄石集合体中与位错蠕变相伴随的粒间滑动*

赵永红^{1,2} 王中言³ David L KOHLSTEDT²
ZHAO YongHong^{1,2}, WANG ZhongYan³ and David L KOHLSTEDT²

1. 北京大学地球物理学系, 北京 100871

2. 美国明尼苏达大学地质与地球物理系, MN55455

3. 美国明尼苏达大学化学工程与材料科学系, MN55455

1. Department of Geophysics, Peking University, Beijing 100871, China

2. Department of Geology and Geophysics, University of Minnesota, Minneapolis, MN 55455, USA

3. Department of Chemical Engineering and Materials Sciences, University of Minnesota, Minneapolis, MN 55455, USA

2008-12-09 收稿, 2009-01-15 改回.

Zhao YH, Wang ZY and Kohlstedt DL. 2009. Grain boundary sliding in compressed olivine aggregates. *Acta Petrologica Sinica*, 25(3):708–712

Abstract To investigate the role of grain boundary sliding during dislocation creep of dunite, a series of deformation experiments were carried out under anhydrous conditions on fine-grained samples synthesized from powdered San Carlos olivine. Triaxial compressive creep tests were conducted under a temperature of 1473 K and confining pressures of 200 and 400 MPa using a high-resolution gas-medium deformation apparatus. Each sample was deformed at several levels of differential stress between 100 and 250 MPa to yield strain rates of 10^{-4} to 10^{-6} s⁻¹. With increasing differential stress, a transition from diffusion creep to dislocation creep regime in which motion on the easy slip system is accommodated by grain boundary sliding (GBS) occurs at ~50 MPa for samples with a grain size of 15 μm. This grain size sensitive creep regime is characterized by a stress exponent of 3.2 ± 0.1 , and a grain size exponent of 1.8 ± 0.2 . Comparison of our flow law for dislocation creep accommodated by grain boundary sliding with those for diffusion creep and dislocation creep in which motion of dislocations on the hard slip system is accommodated by dislocation activity on the easy slip system reveals that the present flow law is important for flow of rocks with grain sizes of <100 μm at differential stresses >20 MPa. Hence, GBS-accommodated dislocation creep is likely to be the dominant deformation mechanism in deep-rooted, highly localized shear zones in the lithospheric upper mantle.

Key words Olivine; High temperature high pressure; Grain boundary sliding; Dislocation creep; Experimental study

摘要 为了研究橄榄岩位错蠕变过程中粒间滑动所起的作用,对经脱水干燥的橄榄石集合体试件进行了一系列的变形试验。三轴压缩蠕变试验在 $T=1473\text{K}$ 、 $P=200$ 和 400MPa 条件下使用一台高分辨率气体介质变形装置进行,每个试件在介于 $100\sim 250\text{MPa}$ 之间的不同应力水平下变形,得到的应变率介于 $10^{-4}\sim 10^{-6}\text{s}^{-1}$ 之间。随着差应力的增加,得到扩散蠕变到位错蠕变的过渡,在位错蠕变域,易滑动体系在 $\sim 50\text{MPa}$ 和颗粒尺寸为 $15\mu\text{m}$ 时伴随粒间滑动。这一粒径敏感蠕变域由应力指数 3.2 ± 0.1 和粒径指数 1.8 ± 0.2 来刻画。将这一流动律与其他扩散和位错蠕变结果进行对比,表明本文得出的流动律可应用于粒度小于 $100\mu\text{m}$ 和差应力大于 20MPa 时的岩石流动。因此,与粒间滑动相伴的位错蠕变可能是上地幔岩石圈剪切带变形局部化的主要变形机制。

关键词 橄榄石; 高温高压; 粒间滑动; 位错蠕变; 实验研究

中图分类号 P578.942; P589.1

* 国家自然科学基金项目(40821062,40874043,40872133)和美国 NSF(EAR-0079827, INT-0123224)共同资助。

第一作者简介: 赵永红,女,1958年生,博士,教授,从事地球动力学、实验岩石力学的教学和研究工作, E-mail: zhaoyh@pku.edu.cn

1 引言

在材料科学和地球科学领域中被广泛接受的一个观点是颗粒尺寸敏感依赖的蠕变通常发生于与颗粒边界相伴随的颗粒边界的扩散。在这个区域, 应变率对应力 σ 和颗粒尺寸 d 的依赖性可表示为幂次率关系 (Coble, 1963; Raj and Ashby, 1971; Ashby and Verrall, 1973)

$$\dot{\epsilon} \propto \frac{\sigma}{d^3} \quad (1)$$

理论模型和多晶材料的蠕变实验结果同时也证实与粒间滑动相伴随的位错蠕变是一个重要的颗粒尺寸敏感的变形机制 (Stevens, 1966; Mukherjee, 1971; Schmid *et al.*, 1977; Landon, 1994; Hofmann *et al.*, 1995; Goldsby and Kohlstedt, 2001)。对橄榄岩, Hirth and Kohlstedt (1995a) 观察到样品经过静态烘烤, 应变率由于颗粒生长而下降了, 在与粒间滑动相伴随的位错蠕变域, 流动率通常写成以下形式:

$$\dot{\epsilon} = A \frac{\sigma^n}{d^p} \quad (2)$$

其中, 材料依赖性参数 A 是温度 T , 压力 P , 氧逸度 f_{O_2} 和二氧化硅活性 SiO_2 的函数, n 和 p 分别是应力指数和颗粒尺寸指数。

为了进一步研究橄榄岩位错蠕变域对颗粒尺寸的敏感依赖性, 本文给出一组含有 2% 体积百分比的 MORB (洋中脊玄武岩) 的橄榄石集合体在无水条件下的变形结果。将实验数据代入方程 (2) 来分析, 确定了橄榄岩与粒间滑动相伴随的位错蠕变的应力指数 n 和颗粒尺寸指数 p 值, 将得出的流动律与扩散域和位错域的流动律进行比较, 确定了上地幔岩石圈橄榄石类岩石以这种蠕变机制起作用的颗粒尺寸及应力条件。

2 起始材料和实验步骤

人工合成了用于变形试验的细粒橄榄石集合体, 颗粒尺寸为 $\sim 15 \mu\text{m}$, 所有试件在变形试验前进行了彻底干燥, 详细的试验过程在相关文章中做了描述 (赵永红等, 2003, 2007, 2008)。

在本文给出的三组试验中, 将 2% 体积比平均颗粒尺寸为 $1.7 \mu\text{m}$ 的 MORB 混进了橄榄石粉末。这种橄榄石 + MORB 的粉末混合均匀后热压为密实、均匀的圆柱状试件, 直径约为 9mm, 长度约为 18mm。加少量的 MORB 是为了保证试件中如有少量水则不会进入橄榄石晶体, 因为水更容易进入熔融的 MORB (Koga *et al.*, 2002)。每个试件首先在 400MPa 围压下经不同的差应力进行变形, 然后将围压降至 200MPa, 加不同的差应力进行变形, 这个过程在 400MPa 和 200MPa 再重复一遍, 试件总的应变为 20%, 在每个应力水平下的应变量为 1.0% ~ 1.5%。在文中, 我们约定第一轮

400MPa 的变形表示为 400(I), 接下来的 200MPa 的变形表示为 200(I), 同理有 400(II), 200(II) 等。

试件变形前后的微细结构用光学显微镜和扫描电子显微镜 (SEM) 进行分析, 利用热压试件和变形试件制成的薄片确定变形前后试件的颗粒尺寸。利用 NIH 图象处理软件中的线分割方法进行统计计算, 从平面到三维的颗粒尺寸转换使用了校正因子 1.5 (Gifkins, 1970; Marchant and Gordon, 1971)。利用氧化装饰的方法将颗粒边界与位错和亚边界明确地区分开来 (Wu and Kohlstedt, 1988)。

3 实验结果

3.1 变形前后的微结构

图 1a、b 分别表示变形前后橄榄石 + 2% MORB 集合体试件的微结构图, MORB 分布在三连点和颗粒边界上。由图 1a 和 1b 的对比可说明变形后试件颗粒尺寸大于起始试件中的颗粒尺寸。经过变形后, 橄榄石晶体没有明显的拉长, 平均颗粒的长短轴相差在 10% 之内, 这个观测结果与 Hirth and Kohlstedt (1995b) 给出的类似。经过颗粒统计分析得出在所有变形试件中, 变形后颗粒尺寸都大于起始试件中的颗粒尺寸。

图 2 示变形后试件中颗粒的几何形态、粒内发育的位错结构和粒间形态。在图 2 中可以看到 Bai and Kohlstedt (1992) 曾讨论过的几种位错结构, 有些小颗粒内没有位错。局部弯曲的颗粒边界表明边界受到位错密度的驱动而有迁移。在图 2 中可以看到一个颗粒中产生的亚边界相距 1 ~ 2 μm , 有些颗粒边界上有空穴存在。同时还可观察到颗粒之间的 MORB 和一些四颗粒相邻点。

3.2 应力和应变率结果

取三组试验的应力和应变率数据绘于图 3a、b、c, 对 400MPa 和 200MPa 围压下的数据进行的非线性最小二乘拟

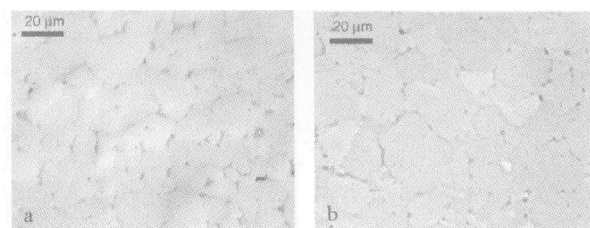


图 1 橄榄石 + 2% MORB 试件 (PI-725) 的反射光学显微照片, MORB 分布在三连点和颗粒边界上

a-起始试件, 平均颗粒尺寸为 $13 \mu\text{m}$; b-变形后试件, 平均颗粒尺寸为 $19.4 \mu\text{m}$

Fig. 1 Reflective optical micrograph of olivine + 2% MORB (PI-725), MORB is distributed in triple-junctions and grain boundaries

a-In starting sample, average grain size is about $13 \mu\text{m}$; b-In deformed sample, average grain size is about $19.4 \mu\text{m}$

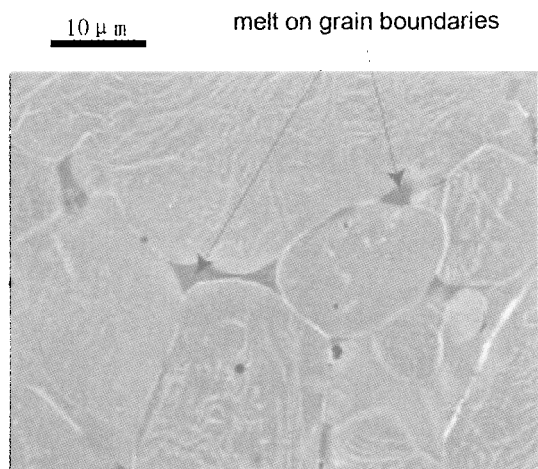


图2 橄榄石 + 2% MORB 变形后试件(PI-725)的扫描电镜显微照片, 示位错、颗粒边界的熔融、亚颗粒边界和多颗粒相邻点

Fig. 2 SEM micrograph for the deformed sample of olivine + 2 vol% MORB (PI-725). Melt on the grain boundary and multi-grain junctions are shown in the graph

合得出应力指数分别为 3.4 和 3.2。将实验所测的应力、应变率值代入方程(1)经过最小二乘拟合得出的应力指数为 $n \geq 3$ 。然而, 将同一试验中两组 400MPa 及 200MPa 围压下的数据进行比较(图 3a 和 4a), 可以得出应变率随时间的增加而有系统地降低趋势, 说明橄榄石集合体产生了系统的强化现象。

3.3 变形试验过程中的颗粒生长

对同一个试验在相同温压条件下得出了两条应力应变率曲线, 表明试件在变形过程中产生了强化。由于变形前, 材料的合成、热压的装样过程都是经过热烘烤脱水的处理, 同时, 对变形前后试件进行的富里叶变换红外分析也表明试件中几乎没有可检测到的水 ($< 10\text{H}/10^6\text{Si}$), 可以认为试件的强化并非由于变形过程中的脱水。因此, 试件的强化原因只可能是由于橄榄石颗粒的长大, 经过微结构分析表明, 在所有 6 组试验中, 变形过程都伴随着颗粒生长。由橄榄石集合体的颗粒生长律 (Karato, 1989; Mei and Kohlstedt, 2000), 我们将橄榄石晶体的颗粒在变形过程中随时间的生长写为下式:

$$d_f^2 - d_i^2 = kt \quad (3)$$

其中 d_i 为初使颗粒尺寸, d_f 为任意时刻 t 的颗粒尺寸, k 为依赖于材料的参数, 对每个试验, 材料参数由下式求出:

$$k = \frac{(d_f^2 - d_i^2)}{\Delta t} \quad (4)$$

其中 d_f 为变形试件的最终颗粒尺寸, $\Delta t = t_f - t_i$ 为试验所用时间, 一旦材料参数 k 确定了, 则试验中任意时刻的颗粒尺寸便可由初使颗粒尺寸来确定。

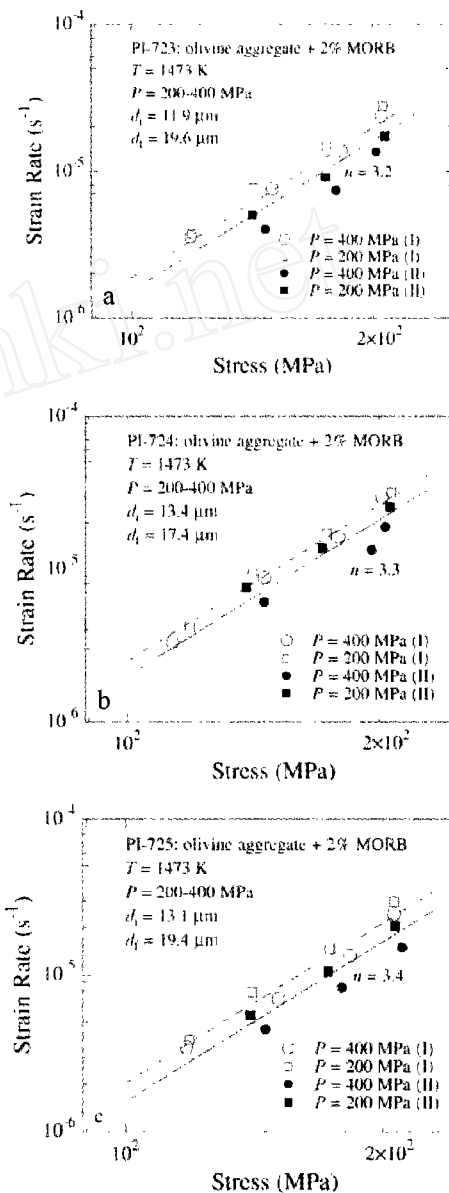


图3 在 1473K 和 400→200→400→200MPa 条件下橄榄石集合体常应力蠕变的应力-应变率关系, 由于颗粒生长而产生系统强化现象

Fig. 3 Plot of strain rate verse stress on log-log axes for an olivine aggregate (PI-725) deformed at 1473 K and 400→200→400→200 MPa. A systematic strengthening with time of the data points is attributed to grain growth during the deformation experiment

我们使用了一个非线性最小二乘法程序来拟合图 3 所给出的应变率和应力关系, 将颗粒尺寸指数从 1.0 变到 2.5, 当 $p = 1.8 \pm 0.2$ 时得到最佳拟合, 利用 $p = 1.8$ 将应变率归一化到颗粒尺寸为 $15\mu\text{m}$ 时, 实验结果重新点在图 4a、b、c 中, 这个归一化过程使同一组试验中两个不同时刻围压为 200MPa 和 400MPa 的实验点吻合起来, 最佳拟合给出以下橄

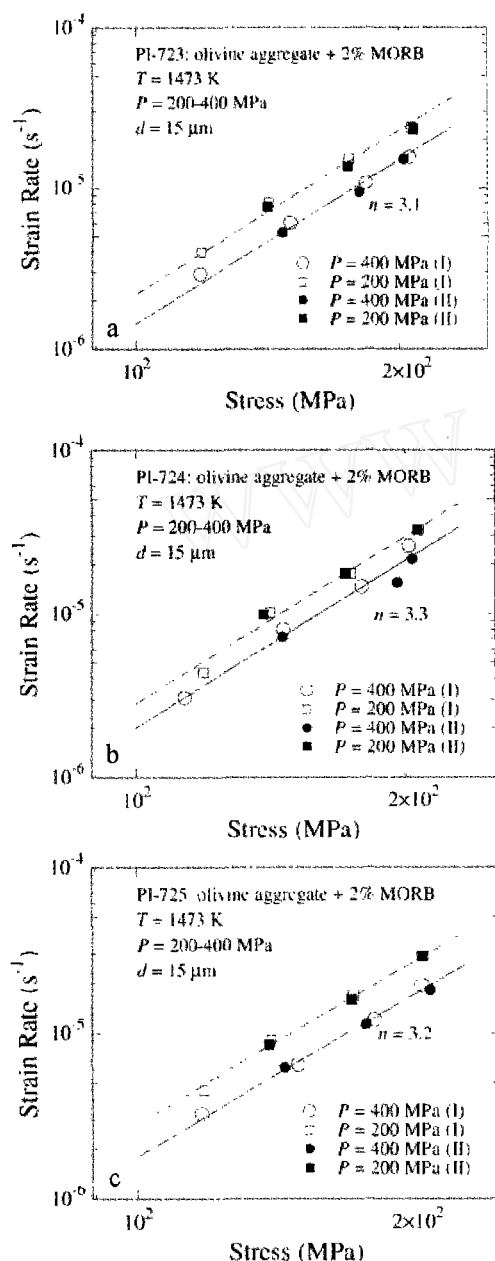


图4 经应变率校正后, 1473K 和 400→200→400→200MPa 条件下橄榄石集合体常应力蠕变的应力-应变率关系, 同一围压下的两组数据互相吻合

Fig. 4 Plot of strain rate verse stress on log-log axes for an aggregate of olivine aggregate deformed at 1473 K and 400→200→400→200 MPa after strain rate is corrected to and grain size normalized to 15μm

榄石位错域与粒间滑动相伴随的流动律:

$$\dot{\epsilon} = A \frac{\sigma^{3.2 \pm 0.1}}{d^{1.8 \pm 0.2}} \quad (5)$$

其中 $A = (1.2 \pm 0.4) 10^{-12} \text{ MPa}^{-3.2} \mu\text{m}^{1.8} \text{ s}^{-1}$, 实验条件为 $P = 200 \text{ MPa}, 400 \text{ MPa}, T = 1473 \text{ K}$, f_{o_2} 由 Ni-NiO 限定。

4 讨论

4.1 关于与粒间滑动相伴随的位错蠕变

在数据分析中, 将试验过程中的颗粒生长作为应变强化的原因, 将应变率归一化到颗粒尺寸为 15 微米时 (使用颗粒尺寸指数 $p = 1.8$; Kohlstedt and Wang, 2001; 赵永红等, 2003), 将图 3 的实验结果重新表示于图 4 中, 这个归一化过程使得两组 200MPa 和 400MPa 围压下的试验结果吻合起来。

Langdon (1994) 讨论了两种与粒间滑动相伴随的位错蠕变, 对于试件的颗粒尺寸比亚颗粒尺寸 λ 大时, 他的分析给出 $\dot{\epsilon} \propto \frac{\sigma^3}{d}$, 对于 $d < \lambda$ 时, 结果是 $\dot{\epsilon} \propto \frac{\sigma^2}{d^2}$ 。我们的试验结果适合前一种情况, $d \approx 15 \mu\text{m}$, $\lambda \approx 1 \sim 2 \mu\text{m}$ 。在我们的变形试件中位错和亚颗粒边界得到充分发育 (图 2)。与颗粒边界滑移相伴随的位错蠕变同时也在方解石 (Schmid *et al.*, 1977) 和冰 (Goldsby and Kohlstedt, 2001) 中发现。方解石和冰的应力指数类似 ($n = 1.7, n = 1.8$), 橄榄石的应力指数 ($n = 3.2$), 接近位错蠕变的应力指数 ($n = 3.5$; Chopra and Paterson, 1984)。

4.2 实验结果对地球物理的启示

我们将本文的实验结果与橄榄石扩散域蠕变的流动律 (Hirth and Kohlstedt, 2002) 以及粗粒橄榄岩位错域的流动律进行对比 (Chopra and Paterson, 1981, 1984), 图 5 示 $P = 300 \text{ MPa}, T = 1473 \text{ K}$ 时, 三种变形机制的 $\dot{\epsilon}-\sigma-d$ 区域。在低应力 ($\leq 2 \text{ MPa}$) 和大的颗粒尺寸 ($\geq 1 \text{ mm}$) 区域, 随着应力的增加, 从扩散域到位错域有一个直接转变, 对较小的颗粒尺寸 ($d \leq 100 \mu\text{m}$), 在超过转化应力时, 对于小于 $100 \mu\text{m}$ 的颗粒, 粒间滑动伴随的位错蠕变为主要变形机制, 与颗粒边界滑移相伴随的位错蠕变和扩散蠕变转换点的应力水平随颗粒尺寸的减小而增加, $d = 100 \mu\text{m}$ 时, $\sigma = 20 \text{ MPa}$, $d = 10 \mu\text{m}$ 时, $\sigma = 70 \text{ MPa}$ 。

本文的流动律对于理解岩石圈地幔深部剪切带的强度提供一定背景。一个例子是北意大利的 Ivrea 带, 有证据表明发生过局部塑性变形 (Brodie and Rutter, 1987; Rutter and Brodie, 1990; Jin *et al.*, 1998)。Jin *et al.* (1998) 估计在局部塑性变形阶段, 应力水平为 $\sim 60 \text{ MPa}$, 依据是这个剪切带的样品的动态重结晶颗粒尺寸为 $30 \sim 60 \mu\text{m}$, 根据本文的流动律可推出与颗粒边界滑移相伴随的位错蠕变大概就是这个剪切带的主要变形机制。

本文的蠕变数据揭示了一个重要的变形机制: 与颗粒边界滑移相伴随的位错蠕变, 该变形由应力指数 ~ 3.2 和颗粒尺寸指数 ~ 1.8 来刻画, 将该流动机制与扩散和位错蠕变机制相比较, 可以看出流动律对于颗粒尺寸小于 $100 \mu\text{m}$ 和应力水平大于 20 MPa 的过程是很重要的, 我们的实验结果对

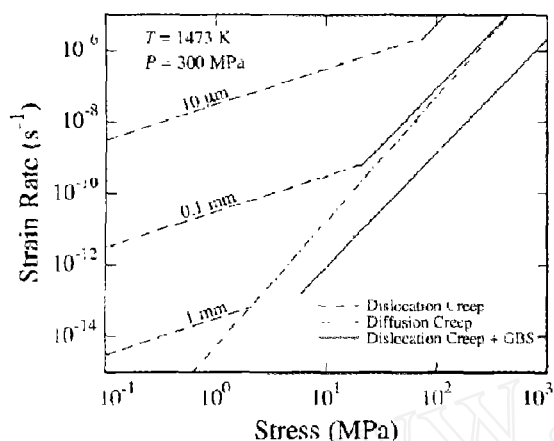


图5 橄榄石不同流动律的相互比较

实线示本文的与粒间滑动相伴随的位错蠕变,虚线示 Hirth and Kohlstedt(2002)给出的扩散蠕变流动律,点划线示粗粒橄榄岩位错域流动律,由 Chopra and Paterson 首先在 1984 年给出, Hirth and Kohlstedt 于 1996 年作了修正

Fig. 5 A plot for the comparison of different flow laws of olivine

The solid lines were based on the present flow law for GBS-accommodated dislocation creep in olivine. The dashed line corresponds to a diffusion flow law by Hirth and Kohlstedt (2002), and the dotted broken line is based on a flow law determined by Chopra and Paterson (1984) and modified by Hirth and Kohlstedt (1996) for dislocation creep in coarse grained olivine

于刻划上地幔岩石圈中深部剪切带变形局部化区域的强度提供一个物理基础,在深部,由于高的应力集中而产生的颗粒尺寸下降,使与颗粒边界滑移相伴随的位错蠕变有可能成为一个主要的变形机制。

References

- Asby MF and Verrall RA. 1973. Diffusion-accommodated flow and superplasticity. *Acta Metallurgica*, 24: 149–161
- Bai Q and Kohlstedt DL. 1992. High-temperature creep of olivine single crystals. 3. Mechanical results for unbuffered samples and creep mechanisms. *Phil. Mag.*, 66: 1149–1181
- Brodie KH and Rutter EH. 1987. Deep crustal extensional faulting in the Ivrea zone of northern Italy. *Tectonophysics*, 140: 193–212
- Chopra PN and Paterson MS. 1984. The role of water in the deformation of dunite. *J. Geophys. Res.*, 89: 7861–7876
- Chopra PN and Paterson MS. 1981. The experimental deformation of dunite. *Tectonophysics*, 78: 453–473
- Coble RL. 1963. A model for boundary-diffusion controlled creep in polycrystalline materials. *J. Appl. Phys.*, 34: 1679–82
- Gifkins RC. 1970. *Optical Microscopy of Metals*. New York: Elsevier Sci.
- Goldsbey DL and Kohlstedt DL. 2001. Superplastic deformation of ice: Experimental observations. *J. Geophys. Res.*, 106: 11017–11030
- Hirth G and Kohlstedt DL. 2002. Laboratory constraints on the rheology of the upper mantle. *Reviews in Mineralogy & Geochemistry*, 51: 97–120
- Hirth G and Kohlstedt DL. 1996. Water in the oceanic upper mantle: Implications for rheology melt extraction and evolution of the lithosphere. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 144: 93–108
- Hirth G and Kohlstedt DL. 1995a. Experimental constraints on the dynamics of the partially molten upper mantle 1: Deformation in the diffusion creep regime. *J. Geophys. Res.*, 100: 1981–2001
- Hirth G and Kohlstedt DL. 1995b. Experimental constraints on the dynamics of the partially molten upper mantle 2: Deformation in the dislocation creep regime. *J. Geophys. Res.*, 100: 15441–15449
- Hofmann HC, Frommeyer and Herzog W. 1995. Dislocation-creep-controlled superplasticity at high strain rates in the ultrafine-grained quasi-eutectoid Ti-10Co-4Al alloy. *Materials Science and Engineering*, A203: 128–133
- Jin DS, Karato and Obata M. 1998. Mechanisms of shear localization in the continental lithosphere: Inference from the deformation microstructures of peridotites from the Ivrea zone, northwestern Italy. *Journal of Structural Geology*, 20: 195–209
- Karato S. 1989. Grain growth kinetics in olivine aggregates. *Tectonophysics*, 168: 255–273
- Kohlstedt DL and Wang Z. 2001. Grain-boundary sliding accommodated dislocation creep in dunite. *EOS Trans. AGU*, 82(47): T21c-01
- Koga KE, Hauri M, Hirschmann and David Bell. 2002. Hydrogen concentration analyses using SIMS and FTIR: Comparison and calibration for nominally anhydrous minerals. submitted for *G-cubed*
- Langdon TC. 1994. A united approach to grain boundary sliding in creep and superplasticity. *Acta Metall.*, 42: 2437–2443
- Marchant DD and Gordon RS. 1971. Grain size distribution and grain growth in MgO and MgO-Fe₂O₃ solid solutions. *J. Am. Ceram. Soc.*, 55: 19–24
- Mei S and Kohlstedt DL. 2000. Influence of water on plastic deformation of olivine aggregates. 1. Diffusion creep regime. *J. Geophys. Res.*, 105: 21457–21469
- Mukherjee AK. 1971. The rate controlling mechanism in superplasticity. *Mater. Sci. Eng.*, 8: 83–89
- Raj R and Ashby MF. 1971. On grain boundary sliding and diffusion creep. *Trans. Metall. Soc., AIME* 2: 1113–1127
- Rutter RH and Brodie KH. 1990. Some geophysical implications of the deformation and metamorphism of the Ivrea zone, northern Italy. *Tectonophysics*, 182: 147–160
- Schmid SM, Boland JN and Paterson MS. 1977. Superplastic flow in fine-grained limestone. *Tectonophysics*, 43: 257–291
- Stevens RN. 1966. Grain boundary sliding in metals. *Metallurgical Reviews*, 11: 129–142
- Wu T and Kohlstedt DL. 1988. Rutherford backscattering spectroscopy study of kinetics of oxidation of (Mg, Fe)₂SiO₄. *J. Am. Ceram. Soc.*, 71(7): 540–545
- Zhao YH, Wang ZY, Bruhn DF and Kohlstedt DL. 2003. The effect of pressure on the rheology of olivine. *Acta Petrologica Sinica*, 19(3): 577–582 (in Chinese with English abstract)
- Zhao YH, Li XF, Li Y, Zimmerman M and Kohlstedt DL. 2007. Experimental study of high temperature and high pressure rheology of fayalite. *Acta Petrologica Sinica*, 23(11): 2927–2932
- Zhao YH, Qi C, Li Y, Zimmerman M and Kohlstedt DL. 2008. High strain torsion experiment on olivine aggregates. *Acta Petrologica Sinica*, 24(6): 1411–1416

附中文参考文献

- 赵永红, 王中言, Bruhn D, Kohlstedt DL. 2003. 压力对橄榄石流变性的影响. *岩石学报*, 19(3): 577–582
- 赵永红, 李小凡, 李扬, Zimmerman M and Kohlstedt DL. 2007. 铁橄榄石的高温变形实验研究. *岩石学报*, 23(11): 2927–2932
- 赵永红, 基超, 李杨, Zimmerman M, Kohlstedt DL. 2008. 橄榄石集合体扭转大变形实验研究. *岩石学报*, 24(6): 1411–1416