

第 30 届国际地质大会论文集



第 14 卷

构造地质学 地质力学

郑亚东 主编



地 质 出 版 社

100
23-14
1

第 30 届国际地质大会论文集

第 14 卷

构造地质学 地质力学

郑亚东 主编

地质出版社

· 北 京 ·

内 容 提 要

本卷选载第30届国际地质大会构造地质学与地质力学组论文23篇,内容涉及地幔至地壳浅层物质性状、构造的物理及数字模拟、伸展构造、走滑构造、逆冲推覆、板内变形、构造与成矿作用,以及地下工程选址等,课题广泛。Kawamoto和Shimamoto根据石盐-方解石剪切带的物理模拟修订了Sibson断层模式。郯庐断裂与红河断裂等区域性走滑断层构造演化仍属热点之一。板内变形受到一定的关注。塔里木盆地的生长断弯褶皱分析为确立断层运动速率提供了一个生动实例。

本卷可供广大地质、地球物理和地震专业的生产、科研和教学部门的科技人员和院校师生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

构造地质学 地质力学/郑亚东主编.-北京:地质出版社,1998.12

(第30届国际地质大会论文集;第14卷)

ISBN 7-116-02692-4

1. 构… I. 郑… III. ①构造地质学-国际学术会议-文集②地质力学-国际学术会议-文集 IV. P5-53

中国版本图书馆CIP数据核字(98)第32167号

地质出版社出版发行

(100083 北京海淀区学院路29号)

责任编辑:刘淑春 周继荣

责任校对:范 义

*

北京印刷学院实习工厂印刷 新华书店总店科技发行所经销

开本:787×1092 1/16 印张:15.75 字数:371 000

1998年12月北京第一版·1998年12月北京第一次印刷

印数:1—500册 定价:38.00元

ISBN 7-116-02692-4

P·1948

(凡购买地质出版社的图书,如有缺页、倒页、脱页者,本社发行处负责调换)

第 30 届国际地质大会论文集

(中 文 版)

陈毓川 赵 逊 张之一 主编
项礼文 蔡爱莉 曹佑功

目 录

第一篇 变形机制

- 地壳地幔中网状和均匀塑性流动及流动律…………… 王绳祖(1)
- 秦岭造山带古老中下地壳流变学特征…………… 索书田,钟增球(12)
- 地震断层运动引起的断层带中的细粒破碎物的快速流动与注入…………… 林爱明(22)
- 断层在正应力变化条件下的动态运动…………… 何昌荣,马胜利(35)
- 活化的中地壳及其构造意义…………… 杨主恩,吴宗絮,白万成,卿敏(44)
- 中国东南地区的冷糜棱岩研究…………… 孙岩,万玲,郭令智(56)

第二篇 构造物理模拟与数字模型

- 几种地质构造的实验模拟…………… 曾佐勋,刘立林,李思田,付永涛,杨士恭(62)
- 石盐-方解石剪切带脆性至全塑性变形的力学行为及修订的断层模式……………
…………… Eiko Kawamoto, Toshihiko Shimamoto(72)
- 各向异性对断层弯曲褶皱形状的影响…………… 兰腊保,P. Hudleston(85)

第三篇 伸展构造

- 伸展构造机制及其对英国滨海圣·乔治海峡盆地几何形态的影响…………… M. J. Welch(95)
- 北京西山中生代古地热异常和房山变质核杂岩的成因…………… 宋鸿林,朱宁(115)
- 小秦岭拆离断层和变质核杂岩的构造及运动学特征、应变和构造演化……………
…………… 张进江,郑亚东,石铨曾,尉向东,薛良伟(121)
- 大同一怀安麻粒岩下地壳韧性伸展和抬升……………
…………… 张家声,P. H. G. M. Dirks, C. W. Passchier(133)

第四篇 走滑与走滑挤压构造

- 哀牢山—红河左行走滑剪切带中新世的顺时抬升及其构造含义……………
…………… 陈文奇,李齐,汪一鹏,万京林,孙敏(143)
- 柯坪剪切挤压构造新模式及其对塔里木盆地的意义……………
卢华复,贾东,陈楚铭,蔡东升,吴世敏,王国强,郭令智,施央中,D. G. Howell(150)
- 压剪性构造的三维构造样式……………
…………… 王桂梁,谭海樵,姜波,余志伟,王大庆,D. C. P. Peacock,徐凤银(156)
- 郯庐断裂带的平移幅度、平移时代及其构造模式…………… 朱光,徐嘉炜(167)
- 郯庐走滑断裂系的形成演化及其地质意义……………
王小凤,李中坚,陈柏林,张青,陈宣华,邢历生,陈正乐,董树文,郭华梅,霍光辉(176)

第五篇 收缩构造

- 塔里木盆地的生长断层转折褶皱及其对中生代断层滑动速率的意义……………
…………… 卢华复,陈楚铭,贾东,蔡东升,吴世敏,王国强,郭令智,施央中(197)
- 多源地学数据处理在确定鄂尔多斯盆地南缘逆冲挤压构造系中的应用……………
…………… 谭永杰,J. L. van Genderen(206)

第六篇 大陆变形与地质力学

- 论燕山地区中生代陆内造山作用 崔盛芹, 吴珍汉 (216)
- 构造对成矿元素聚散的控制作用 吴淦国, 张达 (229)
- 日本地下工程的地质力学和现场调查 Kazuo Hoshino (237)

第一篇 变形机制

地壳地幔中网状和均匀塑性流动及流动律

王 绳 祖

(国家地震局地质研究所,北京 100029)

摘 要 固体塑性流动有网络状流动和均匀流动两种基本类型。网络状流动是一种粘塑性流动,即在粘性流动的同时伴随着局部化延性剪切变形,后者形成塑性流动带及由其构成的共轭网络,即塑性流动网络。下地壳和岩石圈地幔中的塑性流动网络对于控制大陆内部构造变形、构造应力场、地震活动和其它地质-地球物理过程起着重要作用。均匀流动,或称对流流动,存在于软流圈及更深层地幔,是一种不伴有固体变形局部化的粘性流动。它类似于液体流动,可具有非均一的热结构、密度结构和速度结构。基于网络状流动和均匀流动并存的粘塑性流变模型,本文提出一种“幂次/线性二项式”组合流动律,用于描述稳态蠕变的流变行为。该流动律以网络状流动系数 β 定量表示试件中塑性流动网络的发育程度,而传统的幂次流动律只是 β 等于零的条件下组合流动律的一种特殊情况。组合流动律为认识地球内部的流变行为和进一步证实壳幔某些深度范围内形成塑性流动网络的必然性提供了理论基础。

关键词 地壳 地幔 网络状流动 均匀流动 组合流动律

1 引言

作者以往的研究^[1~4]表明,岩石的力学行为不仅取决于微观机制,而且与变形的宏观结构有关。后者涉及诸如脆性破裂、延性剪切带及其共轭网络等局部化“弱面”的发育。根据塑性流动是否具有剪切网络(即塑性流动网络),可将其区分为两种类型,即网络状流动和均匀流动。

自从上世纪中叶观察到锻件表面的滑移线(即所谓的吕德斯线)以来^[5],对于共轭的剪切带或滑移线这类延性变形局部化现象的认识,已经历了很长的时间。以后的一些研究者还指出,在 NaCl 和 KCl 单晶^[6~8]以及大理岩、石灰岩和砂岩^[9~11]的变形试件中,也可见到类似于吕德斯线的局部化变形迹线。然而,所有这些现象所涉及的只是变形的结果,而没有考虑到它们对岩石变形行为的影响。

实际上,塑性流动网络不仅是延性剪切变形的结果,而且在对岩石流变行为的控制中起着重要作用。根据壳幔各层的温度和围压条件,可以推断,网络状流动存在于岩石圈下层(包括下地壳和岩石圈地幔)^[9,12,13]。本文将在论述塑性流动类型及网络状流动证据的基础上,提出一种新的组合流动律,以替代传统的幂次流动律,用于综合表达网络状流动和均匀流动

的流变行为。

2 塑性流动的两种类型

固体塑性流动可分为网络状流动和均匀流动两种基本类型。网络状流动是一种粘塑性流动,即伴随着局部化延性剪切变形的粘性流动,局部化剪切变形导致塑性流动带及网络结构的发育。均匀流动以相对均匀变形为特点,不具有塑性流动网络结构。岩石的均匀流动存在于对流的地幔中,也可称为对流流动。应指出的是,作为地幔中的大尺度对流,对流流动可具有类似于流动液体中的那种非均一的热结构、密度结构和速度结构。

考虑到壳幔变形从脆性到延性的转变,可以推断,岩石圈下层以网络状流动为主,软流圈及更深层地幔则以均匀流动为主^[3,4]。如图 1 所示,亚洲大陆中东部存在着由地震的网络状分布图像所显示的塑性流动网络^[3]。已知,大陆内部的地震主要发生于上部地壳,形成所谓的多震层。然而,由于地震所需的能量主要来自下卧层的网络状流动,因此地震的分布受控于岩石圈下层的塑性流动网络,以至形成了“塑性流动—地震”双层网络系统。这一网络系统沿喜马拉雅弧受印度板块的挤压驱动,展布于中东部亚洲大陆的广阔地域。图 1 中用箭头表示的下地壳内最大压应力的方向,是采用等分塑性流动网络共轭角的方法加以确定的。

岩石圈下层中的网络状流动还造成岩浆和火山活动以及速度结构等的网络状分布,这

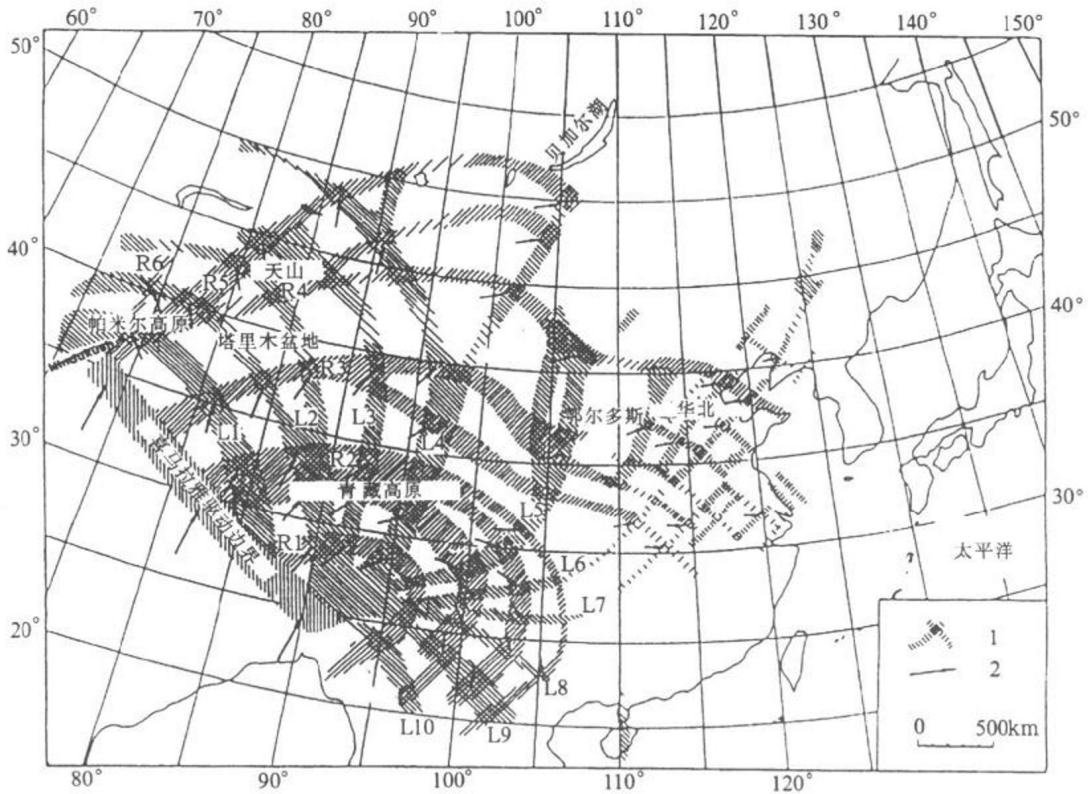


图 1 亚洲中东部“塑性流动—地震”网络系统^[3]

1—“塑性流动—地震”带; 2—最大压应力方向; L1, L2 等为左向带编号; R1, R2 等为右向带编号

是由于沿塑性流动带的剪切位移及其摩擦热效应导致带内介质密度和强度的降低,从而促进岩浆的上涌和岩石圈速度结构的变化所致。塑性流动网络对地震时空分布的控制作用还表明,有可能将塑性流动网络的假说用于地震预测。岩石圈中塑性流动网络的存在及其对大陆动力学过程和构造变形的作用,迄今已被下述证据所证实。

2.1 地质和地球物理证据

(1) 由地震的网络状分布所确定的“塑性流动—地震”网络。例如,中东、西亚和南部欧洲的网络系统^[3,12,13]。

(2) 岩浆岩的网络状分布,即受塑性流动网络控制的岩浆岩网络。例如,亚洲中东部的晚古生代、中生代和新生代岩浆岩网络^[14]和北美洲南阿巴拉契亚地区的前寒武纪—古生代岩浆岩网络^[15]。

(3) 网络状速度结构。例如,中国新疆及邻近地区由地震层析成像揭示的网络结构,包括 22km 深度的高速异常网络和 50~220km 不同深度的低速异常网络,这些网络在总的走向趋势上与该地区的“塑性流动—地震”网络相一致^[14]。

2.2 实验证据

(1) 矿物、岩石及其它固体材料的实验变形表明,在适当的温度和围压条件下,塑性流动网络广泛地存在于它们的变形试件中。岩石中的塑性流动带,即延性剪切带,跨晶粒延伸,普通光下在其薄片常显示为相对暗色的条带(暗化带)^[1,2,4]。

(2) 采用塑化松香和干凝石膏粉浆作为相似材料,分别模拟岩石圈的延性下层和脆性上层(上部地壳)。物理模拟实验结果表明,下层内形成塑性流动网络,上层在下层塑性流动网络的控制下发育断裂网络^[14]。

2.3 在地震预测中的应用

以上述塑性流动网络假说作为理论基础之一,建立了一种用于中长期地震预测的构造物理方法^[16]。1994、1995 和 1996 年度的预测结果表明, $M_s \geq 6.0$ 的地震约有 80% 发生在预测的地震能量背景区内。

除上述证据外,本文所述组合流动律的建立和验证,则将使塑性流动网络假说在理论上得到进一步的证明。

3 稳态蠕变的组合流动律

众所周知,幂次流动律被用于描述稳态蠕变的流变行为。它在应变率与差应力关系的对数坐标图上表现为一条直线,其斜率为应力指数 n 。研究者们^[4,17~20]还指出, $\lg\{\dot{\epsilon}\}_s^{-1}$ 与 $\lg\{\sigma\}_{MPa}$ 关系曲线往往由几段直线组成,各分段的应力指数(n 值)不同,由于流变机制的改变,应力指数随着应变率或应力的上升而逐段增大。此外,值得指出的是,某些实验结果还表明,在 $\lg\{\dot{\epsilon}\}_s^{-1}$ 与 $\lg\{\sigma\}_{MPa}$ 关系曲线的一个分段范围内,其实验数据点并不一定沿直线分布,而往往呈上凸状^[20]。按照传统的做法,通常把所有的偏差,包括上凸状分布及其它原因造成的偏差,都归因于实验误差。然而,本文将证明,分段内部的曲线上凸并非偶然现象,而是塑性流动网络的发育所引起的必然结果。

考虑到粘性流动伴随着局部化延性剪切变形,笔者提出一种如图 2 左侧所示的粘塑性流变模型。它包括两个部分,即粘性流动和粘塑性流动,以网络状流动系数 β 表示塑性流动

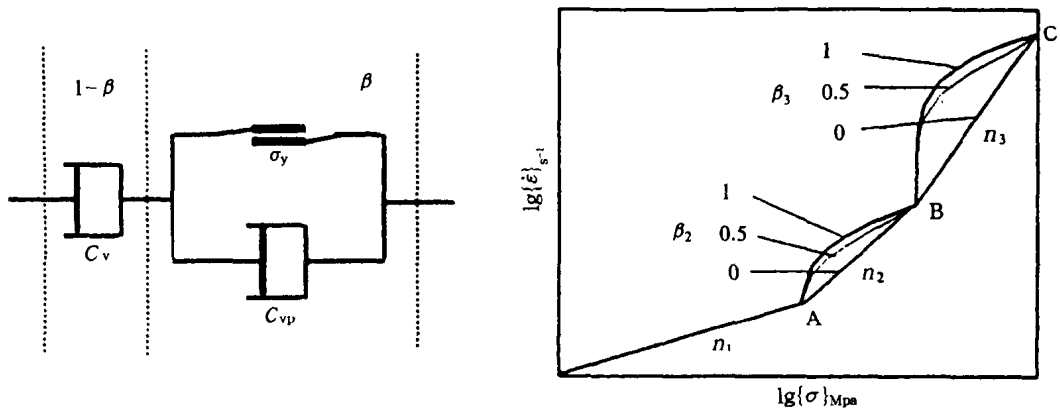


图 2 塑性流动的流变模型及其 $\lg\{\dot{\epsilon}\}_s^{-1}$ 与 $\lg\{\sigma\}_{MPa}$ 关系

$\dot{\epsilon}$ —应变率; σ —差应力; β, β_2, β_3 —网状流动系数; C_v —粘性流动的流动度; C_{vp} —粘塑性流动的流动度; σ_y —屈服限; n_1, n_2, n_3 —应力指数

网络的发育程度,系数在 0~1 范围内变化。基于这一模型,导出“幂次/线性二项式”组合流动律,用于综合描述流变行为。图 2 右侧是相应的 $\lg\{\dot{\epsilon}\}_s^{-1}$ 与 $\lg\{\sigma\}_{MPa}$ 关系示意图。该组合流动律为:

$$\dot{\epsilon} = (1 - \beta)\dot{\epsilon}_v + \beta\dot{\epsilon}_{vp} \quad (1)$$

式中各分段的 $\dot{\epsilon}_v$ 和 $\dot{\epsilon}_{vp}$ 可表达如下:

分段“—A”($\sigma \leq \sigma_A, n = n_1 = 1, \beta = 0$):

$$\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}_v = C_{v1}\sigma \quad (2)$$

$$C_{v1} = 1/(2\eta_1) = \dot{\epsilon}_A/\sigma_A \quad (3)$$

分段“A—B”($\sigma_A \leq \sigma \leq \sigma_B, n = n_2 > 1, \beta = \beta_2$):

$$\dot{\epsilon}_v = \dot{\epsilon}_{v2} = C_{v2}\sigma^{n_2} \quad (4)$$

$$C_{v2} = \dot{\epsilon}_A/\sigma_A^{n_2} \quad (5)$$

$$\dot{\epsilon}_{vp} = \dot{\epsilon}_{vp2} = C_{vp2}(\sigma - \sigma_{y2}) \quad (6)$$

$$C_{vp2} = (\dot{\epsilon}_B - \dot{\epsilon}_A)/(\sigma_B - \sigma_A) \quad (7)$$

$$\sigma_{y2} = \sigma_A - \dot{\epsilon}_A/C_{vp2} \quad (8)$$

分段“B—C”($\sigma_B \leq \sigma \leq \sigma_C, n = n_3 > n_2, \beta = \beta_3$):

$$\dot{\epsilon}_v = \dot{\epsilon}_{v3} = C_{v3}\sigma^{n_3} \quad (9)$$

$$C_{v3} = \dot{\epsilon}_B/\sigma_B^{n_3} \quad (10)$$

$$\dot{\epsilon}_{vp} = \dot{\epsilon}_{vp3} = C_{vp3}(\sigma - \sigma_{y3}) \quad (11)$$

$$C_{vp3} = (\dot{\epsilon}_C - \dot{\epsilon}_B)/(\sigma_C - \sigma_B) \quad (12)$$

$$\sigma_{y3} = \sigma_B - \dot{\epsilon}_B/C_{vp3} \quad (13)$$

式中: $\dot{\epsilon}, \dot{\epsilon}_v$ 和 $\dot{\epsilon}_{vp}$ 分别为总的、粘性和粘塑性应变率; n 为应力指数; β 为网状流动系数; $\dot{\epsilon}_A$ 和 $\dot{\epsilon}_B$ 分别为拐点 A 和 B 处的应变率; σ_A 和 σ_B 为拐点应力, 或称视屈服限; σ_{y2} 和 σ_{y3} 为屈服限; C_{v1} 和 η_1 : “—A” 分段粘性流动的流动度和粘度; C_{v2}, C_{v3} : “A—B” 和 “B—C” 分段粘性流动的流动度; C_{vp2} 和 C_{vp3} : “A—B” 和 “B—C” 分段塑性流动带的流动度。

4 组合流动律的实验验证

4.1 WRC 混合物的塑性流动

WRC 是石蜡(W)、松香(R)和水泥粉(C)的混合物。石蜡和松香在加温熔融状态下以水泥粉为填料进行混合,三者的比值为 $W : R : C = 1 : (R/W) : 2.4$ 。室温下松香为脆性,故混合物的流动性随松香含量的减少而增强。在室温条件下对不同 R/W 比值的试件进行单轴压缩实验。圆柱状试件高 61~79mm,直径 38.5mm。

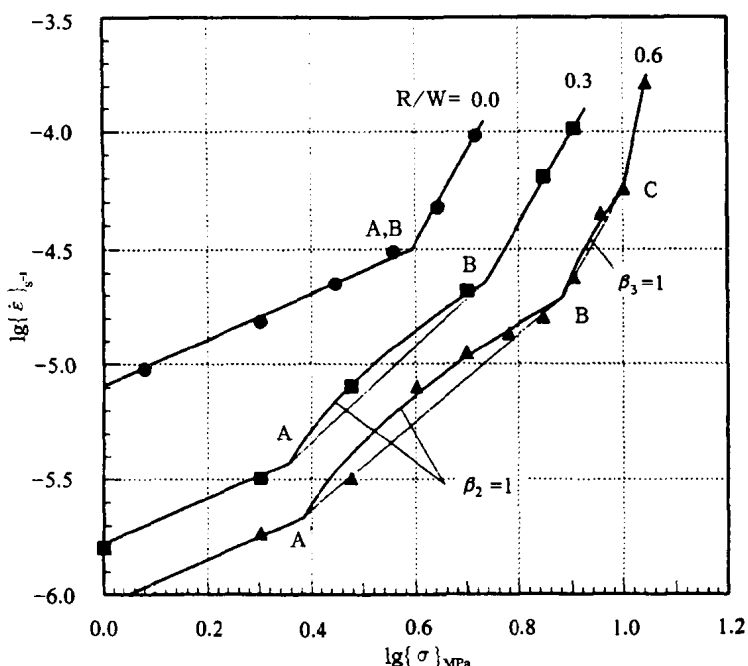


图 3 室温下 WRC 混合物的 $\lg\{\dot{\epsilon}\}^{-1}$ 与 $\lg\{\sigma\}_{MPa}$ 关系

根据试件中塑性流动网络的发育程度确定, $R/W = 0.2 \sim 0.6$ 时为网络状流动, $R/W = 0$ 时为均匀流动, 而 $R/W = 0.1$ 时试件中有局部发育的网络状流动。关于 $\lg\{\dot{\epsilon}\}^{-1}$ 与 $\lg\{\sigma\}_{MPa}$ 关系的实验数据^[21]以及按组合流动律拟合的曲线如图 3 所示。表 1 给出了有关的流变参数。

n_1, n_2 和 n_3 值依次等于 1、1.98~1.91 和 3.90~3.96。 $R/W = 0.6$ 和 0.3 时的 β_2 值以及 $R/W = 0.3$ 时的 β_3 值等于 1。总的来说, 试件中的塑性流动网络的发育程度随着 R/W 比值的减小而呈下降趋势, 当 $R/W = 0$ 时, 则网络消失。

4.2 石灰岩的塑性流动

Solenhofen 石灰岩的应力松弛实验数据^[22]被用于 $\lg\{\dot{\epsilon}\}^{-1}$ 与 $\lg\{\sigma\}_{MPa}$ 关系的分析研究中, 其中包括 SH-2/4 和 SH-3 两组三轴压缩实验。轴压作用方向分别垂直和平行于层理, 实验温度为 600℃, 围压为 200MPa。如图 4 所示, 实验结果可以相当好地由组合流动律予以拟合, 表 2 给出了它们的流变参数。

表1 WRC混合物的流变参数

R/W		0.0	0.3	0.6
A	n_1	1	1	1
	$\eta_1/(\text{Pa} \cdot \text{s})$	6.20×10^{10}	2.99×10^{11}	5.56×10^{11}
A	n_2		1.98	1.91
	$\dot{\epsilon}_A/s^{-1}$	3.18×10^{-5}	3.55×10^{-6}	2.19×10^{-6}
	σ_A/MPa	3.95	2.13	2.43
	σ_{y2}/MPa		1.51	1.77
B	$C_{v2}/(\text{MPa}^{-n_2} \cdot \text{s}^{-1})$		8.01×10^{-7}	4.00×10^{-7}
	$C_{vp2}/(\text{MPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1})$		5.81×10^{-6}	3.33×10^{-6}
	β_2		1	1
B	n_3	3.95	3.90	3.96
	$\dot{\epsilon}_B/s^{-1}$	3.18×10^{-5}	2.29×10^{-5}	1.95×10^{-5}
	σ_B/MPa	3.95	5.46	7.64
	σ_{y3}/MPa			6.40
C	$C_{v3}/(\text{MPa}^{-n_3} \cdot \text{s}^{-1})$			6.24×10^{-9}
	$C_{vp3}/(\text{MPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1})$			1.58×10^{-5}
	β_3	0	0	1

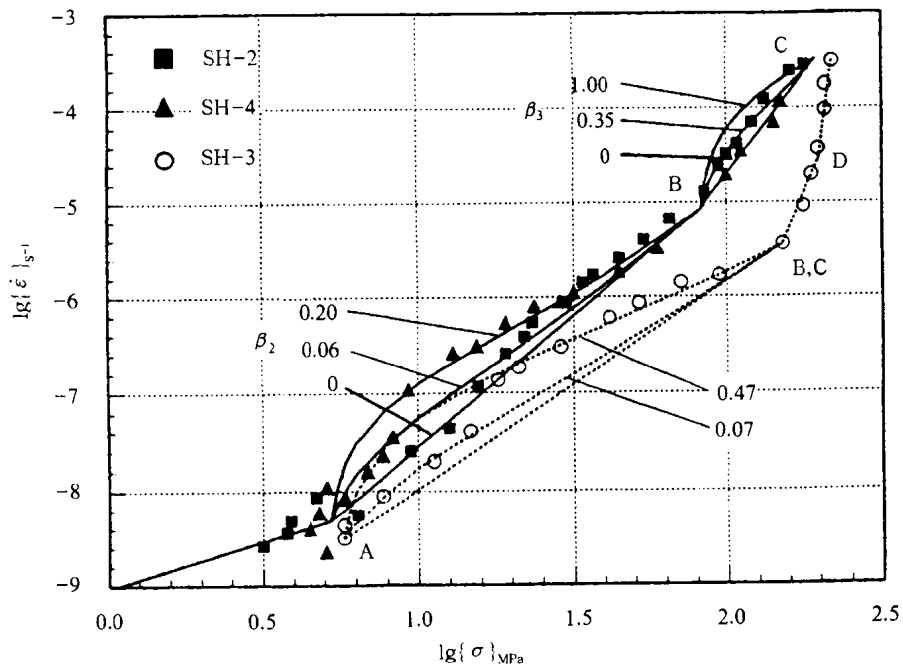


图4 温度 600°C 和围压 200MPa 条件下 Solenhofen 石灰岩的 $\lg\{\dot{\epsilon}\}^{-1}$ 与 $\lg\{\sigma\}_{\text{MPa}}$ 关系
(实验数据引自文献[22])

表 2 Solenhofen 石灰岩的流变参数

		SH-2/4	SH-3
A	n_1	1	
	$\eta_1/(\text{Pa} \cdot \text{s})$	5.36×10^{14}	
A	n_2	2.71	2.15
	$\dot{\epsilon}_A/\text{s}^{-1}$	4.90×10^{-9}	3.16×10^{-9}
B	σ_A/MPa	5.25	5.78
	σ_{y2}/MPa	5.20	5.65
B	$C_{v2}/(\text{MPa}^{-n_2} \cdot \text{s}^{-1})$	5.47×10^{-11}	7.25×10^{-11}
	$C_{vp2}/(\text{MPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1})$	1.11×10^{-7}	2.46×10^{-8}
		β_2	0.00, 0.06, 0.20
B	n_3	4.21	
	$\dot{\epsilon}_B/\text{s}^{-1}$	8.51×10^{-6}	2.57×10^{-6}
C	σ_B/MPa	82.22	146.2
	σ_{y3}/MPa	79.18	
C	$C_{v3}/(\text{MPa}^{-n_3} \cdot \text{s}^{-1})$	7.28×10^{-14}	
	$C_{vp3}/(\text{MPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1})$	2.79×10^{-6}	
		β_3	0.00, 0.35, 1.00

n_2 和 n_3 值分别等于 2.15 ~ 2.71 和 4.21。与类似温压条件下 Solenhofen 石灰岩以往按幂次律估计的应力指数 $n_2 = 1.66$ 和 $n_3 = 4.70^{[19]}$ 相比较,以往研究由于忽略了“A—B”和“B—C”分段曲线的上凸性质,以至低估了 n_2 值,而高估了 n_3 值。显然,就爬升的上凸曲线而言,其下段和上段的坡度必然分别陡于和缓于曲线的平均坡度。

不同的 β_2 和 β_3 值表明了实验数据点分布的上凸和偏离程度,它们与试件内网络状流动不同的发育程度有关。因此,可以推断,若在显微镜下用普通光对横切共轭滑移面的薄片进行观察,会看到以暗化迹线的方式显示的塑性流动带及其网络。值得注意的是,在 SH-2/4 组的实验中,A—B 和 B—C 分段范围内的部分实验数据点沿 β_2 和 β_3 值等于零的斜线分布,这意味着试件内不存在塑性流动网络,也就是说,均匀流动有可能是非牛顿流。

视屈服限 σ_A 等于 5.25 ~ 5.78MPa,相应的临界剪应力为 $\tau_A = \sigma_A/2 = 2.63 \sim 2.89\text{MPa}$ 。已知,在温度为 600°C 的单轴压缩条件下,方解石单晶的临界分解剪应力 τ_c 为: r —滑移情况下, $\tau_c = 7.5\text{MPa}^{[18]}$ 或 $16.0\text{MPa}^{[23]}$; f —滑移情况下, $\tau_c = 18.0\text{MPa}^{[23]}$ 。比较 τ_A 与 τ_c 可见,由组合流动律估计的 τ_A 值明显小于单晶的 τ_c 值。本文引用数据的实验应变率最低约为 10^{-8}s^{-1} , σ_A 值偏低的原因可能与低应变率有关。

4.3 橄榄石的塑性流动

实验数据引自文献[24],包括三部分:橄榄石单晶,温度 1428 ~ 1650°C,单轴压缩^[24]; Burnette 山纯橄榄岩(干),温度 1100 ~ 1350°C,三轴压缩,围压 1.5GPa^[25]; Burnette 山纯橄榄岩(干),温度 1100°C,三轴压缩,围压 1.5GPa^[26]。这些数据都按 1400°C 的统一温度条件经过换算处理,也即将实验应变率乘以 $\exp(Q/RT - Q/RT_0)$,其中激活能 $Q = 522.5\text{kJ/mol}$,温度 $T_0 = 1400^\circ\text{C}^{[24]}$ 。一些研究者曾基于幂次流动律,利用这些调整后的数据,研究橄榄石的流变行为,把 $\lg\{\dot{\epsilon}\}_{\text{s}^{-1}}$ 与 $\lg\{\sigma\}_{\text{MPa}}$ 的关系看成是连续曲线^[24]、直线^[20],或直线—曲线^[18]。应指出的是,来自不同研究者的数据之间,偏差如此之大。例如 Carter 等^[24,25] 与 Kirby 等^[24,25] 的数据之间的差别,不可能仅仅将其归因于偶然误差。

基于组合流动律,上述数据点可得到如图 5 所示的相当好的拟合。表 3 给出了相应的流变参数。根据以往的研究结果,应力指数(n 值)的范围为:橄榄石单晶,3.0 ~ 3.7^[24,27~29];干纯橄榄岩,3.0 ~ 4.8^[25,26,28,30]。由于忽略了 $\lg\{\dot{\epsilon}\}_s^{-1}$ 与 $\lg\{\sigma\}_{\text{MPa}}$ 关系曲线的适当分段和延性变形局部化的影响,这些数值都大于 $n_2(= 2.27 \sim 2.39)$ 而小于 $n_3(= 5.60 \sim 5.24)$ 。 β_2 值(0, 0.20 和 1.0) 和 β_3 值(0 和 0.39 ~ 1.0) 表明了网络状流动不同的发育程度,并可由此推断,Carter 等^[24,25] 和 Kirby 等^[24,26] 的数据之间的差异可能是由于 β 值不同所造成的。

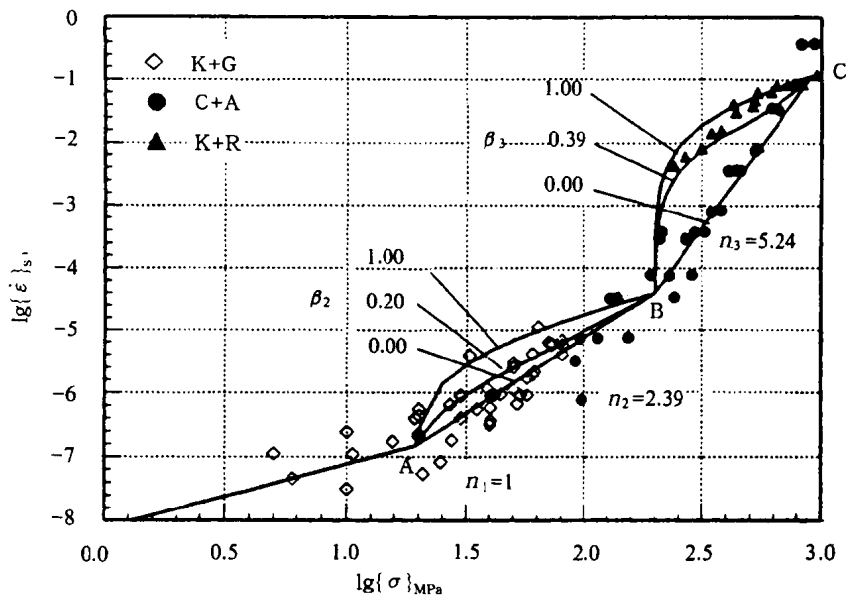


图 5 温度 1400°C 条件下橄榄石的 $\lg\{\dot{\epsilon}\}_s^{-1}$ 与 $\lg\{\sigma\}_{\text{MPa}}$ 关系
K + G—引自文献[24]; C + A—引自文献[24,25]; K + R—引自文献[24,26]

表 3 橄榄石的流变参数

A	n_1 $\eta_1/(\text{Pa} \cdot \text{s})$	1 6.41×10^{13}
A	n_2	2.39
	$\dot{\epsilon}_A/\text{s}^{-1}$	1.51×10^{-7}
	σ_A/MPa	19.41
	σ_{y2}/MPa	18.72
B	$C_{v2}/(\text{MPa}^{-n_2} \cdot \text{s}^{-1})$	1.26×10^{-10}
	$C_{vp2}/(\text{MPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1})$	2.20×10^{-7}
	β_2	0.00, 0.20, 1.00
B	n_3	5.24
	$\dot{\epsilon}_B/\text{s}^{-1}$	3.98×10^{-5}
	σ_B/MPa	199.53
	σ_{y3}/MPa	199.29
C	$C_{v3}/(\text{MPa}^{-n_3} \cdot \text{s}^{-1})$	3.46×10^{-17}
	$C_{vp3}/(\text{MPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1})$	1.66×10^{-4}
	β_3	0.00, 0.39, 1.00

5 讨论：流变参数的含义

根据“幂次 / 线性二项式”组合流动律,流变行为可由下列基本参数表征:① 粘性流动部分,包括应力指数 n ,拐点应力 σ_A 、 σ_B 或 σ_C ,基质(非局部化)流动度 C_v ;② 粘塑性流动部分,包括屈服限 σ_y ,流动带内介质的流动度 C_p ;③ 网络状流动系数 β ,用于定量估计粘塑性流动部分所占比率。

众所周知,应力指数(n)主要取决于塑性流动的微观机制。可以认为,就石灰岩和橄榄石而言,“—A”分段, $n = n_1$,对应于扩散控制机制;“A—B”分段, $n = n_2$,主要受位错滑移机制控制;“B—C”分段, $n = n_3$,可能反映流变机制的某些变化。例如,垂直于主滑移带的另一组滑移带或扭折带的产生,交叉滑移的影响,甚或有局部的破裂伴随塑性流动^[1,18]。

屈服限 σ_{y2} ,或者近似地以拐点应力 σ_A 表示,标志着延性剪切局部化的开始,超过此点,变形即由均匀分布转变为局部化。应注意的是, n 值的改变是晶内变形机制变化的显示,而屈服限则对应于一个阈值,大于此值,即可能发生晶内的局部化变形。除此而外, σ_{y3} 和 σ_{y4} ,或者 σ_B 和 σ_C ,则表征着变形局部化的其它某些变化。

WRC 混合物的实验结果表明,应变率随着脆性材料(松香)含量的增加而趋于下降,而当 R/W 比值近似于零时,“A—B”分段趋于消失。与此相类似,升高温度也可引起这种变化。流动度 C_v 或 C_p 正比于 $\exp(-Q/RT)$ ^[20,28],其中 Q 是激活能, R 是气体常数, T 是绝对温度,故应变率作为温度的函数而变化。此外,升温时,“A—B”和“B—C”分段的位置会因拐点应力 σ_A 、 σ_B 和 σ_C 的增大而改变,而当 $\sigma_A = \sigma_B$ 或 $\sigma_B = \sigma_C$ 时,“A—B”或“B—C”分段即消失。

网络状流动系数 β_2 或 β_3 用于定量估计塑性流动网络或剪切变形局部化的发育程度,可将其看作由试件中局部化变形分布体积与总体积的比率。石灰岩和橄榄石的实验和拟合结果表明,作为延性变形局部化的一种极端,可能出现 $\beta_2 = 0$ 或 $\beta_3 = 0$ 的情况,这时,在岩石中,无跨晶粒的局部化剪切变形发生,或者在单晶体中,分散的位错滑移或小尺度的滑动不连接成连续的滑动面。

6 结论

(1) 岩石或其它材料的流变行为不仅取决于微观机制,而且与宏观结构有关,例如,条带状、共轭网络状、或其它形式的结构。根据塑性流动有或无网络状结构,可将其区分为两种基本类型,即网络状流动和均匀流动。网络状流动是一种粘塑性流动,即伴有延性剪切变形局部化或塑性流动网络的粘性流动。网络状流动或塑性流动网络广泛存在于下地壳和岩石圈地幔,它们在控制大陆内部构造变形、构造应力场、地震活动以及其它地质-地球物理过程中起着重要的作用。均匀流动,即对流流动,是不具有固体变形局部化的粘性流动,但作为地幔内的大尺度对流,它可以在热结构、密度结构和速度结构等方面具有非均一性。

(2) 基于塑性流动两种基本类型并存而建立的粘塑性模型,笔者提出了一种“幂次 / 线性二项式”组合流动律,用以描述稳态蠕变的流变行为。在组合流动律中,用网络状流动系数(β)定量地估计试件中塑性流动网络的发育程度。传统的幂次律只是组合流动律在 β 值等于零时的特殊情况。组合流动律为流变数据的处理提供了一条新的途径。借助组合流动

律,可以避免传统幂次律在拟合 $\lg\{\dot{\epsilon}\}_{s-1}$ 与 $\lg\{\sigma\}_{MPa}$ 关系曲线时所造成的偏差。此外,除了幂次流动律所用的参数,组合流动律还包含着更多的信息,其中包括网络状流动系数 β_2 和 β_3 、屈服限 σ_{y2} 和 σ_{y3} 以及流动带内介质的流动度 C_{vp2} 和 C_{vp3} 等。

(3) 在实验研究和理论分析基础上建立并经受检验的组合流动律进一步证明,壳幔一定深度范围内存在塑性流动网络的必然性。组合流动律为认识地球内部的流变行为提供了理论基础。例如,通过对塑性流动网络假说和组合流动律的进一步改进,有可能根据不同层次塑性流动网络的发育程度估计各层的 n 和 β 值。相反地,根据岩石流变实验的结果可推断各层的宏观结构型式。

致谢 本项研究得到地震科学联合基金会的资助(编号 85080103),在实验研究和数据处理等方面得到李建国、张宗淳和宋瑞卿等的协助, Gregory A. Davis 和郑亚东在论文评审中提出了有益的意见和建议,特此表示诚挚的感谢!

参 考 文 献

- [1] 王绳祖. 盐湖岩盐变形破坏的试验研究与数学模拟. 岩土工程学报, 1982, 4(4): 17~28.
- [2] 王绳祖. 岩石共轭剪切网络的实验研究. 见: 现代地壳运动研究(1). 北京: 地震出版社, 1985, 171~178 页, 190~192 页.
- [3] Wang S-Z. Net-like earthquake distribution and plastic-flow network in central and eastern Asia. *Phys. Earth Planet. Inter.*, 1993, 77: 177~188.
- [4] 王绳祖. 岩石的脆性-延性转变及塑性流动网络. 地球物理学进展, 1993, 8(4): 25~37.
- [5] Lüders W. Über die äusserung der elasticität an stahlartigen eisenstäben und stahlstäben über eine beim biegen solcher stäbe beobachtete molekularbewegung. *Dingler's Polytechnische Journal*, 1860, 155: 18~22.
- [6] Rinne F. Double refraction due to stress. *NaCl, Z. Krist.*, 1925, 61: 389.
- [7] Schmid E, Boas W. *Plasticity of Crystals*. F. A. Hughes, London, 1950.
- [8] Schütze W. Stage of deformation, yield points of potassium halides, normal stress law, progress of fracture. *Z. Physik*, 1932, 76: 135.
- [9] Friedman M, Logan J M. Lüders' bands in experimentally deformed sandstone and limestone. *Bull. Geol. Soc. Am.*, 1973, 84: 1465~1476.
- [10] Heard H C. Transition from brittle fracture to ductile flow in Solenhofen limestone as a function of temperature, confining pressure, and interstitial fluid pressure. In: *Rock Deformation*, Griggs D, Handin J. (eds.), *Geol. Soc. Am.*, Memoir 79, 1960, 193~226.
- [11] Paterson M S. *Experimental Rock Deformation—The Brittle Field*. Springer-Verlag, Berlin, 1978.
- [12] Wang S-Z. Earthquake distribution and plastic-flow networks in the southern Eurasian continent. In: *Continental Earthquakes*, IASPEI Publication Series for the IDNDR, 1993, (3): 142~147.
- [13] 王绳祖, 张宗淳. 亚洲中东部“塑性流动—地震”网络系统及板内构造单元. *中国地震*, 1995, 10(3): 238~250.
- [14] 王绳祖. 板内岩石圈结构和构造特征与强震孕育关系的研究. 地震科学联合基金资助课题(编号 85080103)总报告. 1996.
- [15] Wang S-Z. Netlike magmatite distribution controlled by plastic-flow network tectonics in Asia and North America. In: *IUGG 21th General Assembly, Boulder, Abstracts*, 1995, 368.
- [16] Wang S-Z. A tectonophysical method for earthquake prediction: Applications of the multicriterion principle and the “Vor/Net” continental dynamics model. *Seismol. & Geol.*, 1996, 18(suppl.): 71~85.
- [17] Chopra P N. The plasticity of some fine-grained aggregates of olivine at high pressure and temperature. In: *Mineral and Rock deformation: Laboratory Studies, The Paterson Volume*. Hobbs B E, Heard H C. (eds.), *Geophys. Monogr.* 36, Amer. Geophys. Union, Washington, D. C., 1986, 25~33.

- [18] Nicolas A, Poirier J P. Crystalline Plasticity and Solid State Flow in Metamorphic Rocks. John Wiley & Sons, London, 1976.
- [19] Schmid S M, Boland J N, Paterson M S. Superplastic flow in fine-grained limestone. *Tectonophysics*, 1977, 43: 257~291.
- [20] Turcotte D L, Schubert G. Geodynamics: Applications of Continuum Physics to Geological Problems. John Wiley & Sons, New York, 1982.
- [21] 李建国, 宋瑞卿, 王绳祖. 若干固体材料脆-延性转变及宏观结构的实验研究. *地球物理学进展*, 1993, 8(4): 70~80.
- [22] Walker A N, Rutter E H, Brodie K H. Experimental study of grain-size sensitive flow of synthetic, hot-pressed calcite rocks. In: *Deformation Mechanisms, Rheology and Tectonics*, Knipe R J. (ed.), Geological Society Special Publications, 1990, 54: 259~284.
- [23] Wenk H-R Carbonate minerals. In: *Preferred Orientation in Deformed Metals and Rocks: An Introduction to Modern Texture Analysis*. Wenk H-R (ed.), Academic Press, New York, 1985, 241~258.
- [24] Kohlstedt D L, Goetze C. Low-stress high-temperature creep in olivine single crystals. *J. Geophys. Res.*, 1974, 79(14): 2045~2051.
- [25] Carter N L, Ave'Lallemant H G. High temperature flow of dunite and peridotite. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 1970, 81: 2181~2202.
- [26] Kirby S H, Raleigh C. B. Mechanisms of high-temperature, solid state flow in minerals and ceramics and their bearing on creep behavior of the mantle. *Tectonophysics* 1973, 19: 165~194.
- [27] Durham W B, Goetze C. Plastic flow of oriented single crystals of olivine. I. Mechanical data, *J. Geophys. Res.*, 1977, 82: 5737~5753.
- [28] Kirby S H, McCormick J W. Inelastic properties of rocks and minerals: Strength and rheology. In: *Handbook of Physical Properties of Rocks*, Volume III. Carmichael R S (ed.), CRC Press, Boca Raton, Florida, 1984, 139~280.
- [29] Kohlstedt D L, Goetze C, Durham W B. Experimental deformation of single crystal olivine with application to flow in the mantle. In: *The Physics and Chemistry of Minerals and Rocks*. Strens R G J (ed.), John Wiley & Sons, London, 1976, 35~49.
- [30] Raleigh C B, Kirby S H. Creep in the upper mantle. *Miner. Soc. Am. Spec. Pap.*, 1970, 3: 113~121.