

# 变形岩石的显微构造与岩石圈流变学

刘俊来

(中国地质大学,北京 100083)

**摘要:**岩石圈的流变学分析和岩石构造、显微构造证据揭示出大陆岩石圈具有显著的横向和纵向上的异向性,并具有明显的非板块表现。全面开展不同温度和压力条件下变形岩石的构造与显微构造分析,正确认识岩石圈不同层次上岩石的流变学规律、流动机理及其制约因素等,将成为后板块构造研究与新的岩石圈演化理论建立的基础和主要动力。岩石流动的宏观-微观尺度问题(岩石圈结构与流变性、边界弱化效应和岩石流变学与显微构造响应等)、岩石流动的时间问题(不同时间尺度岩石的流动性、实验室模拟与天然岩石流动的协调性、浅层岩石流动变形的有效定年等)、岩石流动的制约因素(内在的成分与结构、外在的物理与化学环境)将成为岩石圈流动与岩石变形显微构造研究的重要方面。现代化实验室建设和最新实验技术、手段的利用将成为解决上述科学问题的必要条件。

**关键词:**岩石圈;流变学;显微构造

中图分类号:P542+.4

文献标识码:A

文章编号:1671-2552(2004)09-10-0980-06

板块构造理论最基本的假设之一就是,岩石圈板块作为一个完整的刚性块体漂浮在软流圈上<sup>[1]</sup>。对于大洋岩石圈板块的研究为此提供了充分的证据,年轻的洋壳不但在成分上,而且在结构上都显示出横向和纵向上的一致性<sup>[2,3]</sup>。另一方面,主要发育于岩石圈板块边界的火山、地震和造山作用过程也为此提供了有力的旁证<sup>[3]</sup>。

然而,大陆构造分析与岩石流变学实验揭示,岩石圈板块(尤其大陆岩石圈板块)无论在横向上亦或纵向上都存在着显著的异向性<sup>[4]</sup>。横向上,广泛存在着带状“薄弱”单元<sup>[5,6]</sup>。在造山带和陆内构造带,现代GPS地壳运动监测揭示出不同地块之间的差异性水平运动,以及地震震中沿着某些特殊构造带的集中等都是最有利的证据<sup>[7,8]</sup>。纵向上,地球物理探测揭示出岩石圈的水平成层性及其侧向变化,下部地壳存在着众多低速高导“透明体”<sup>[9]</sup>;模拟条件下的高温高压实验岩石变形同样揭示出岩石圈强度和力学性质变化的“圣诞树”演变规律<sup>[4]</sup>。特别是近年的研究成果显示,在某些地区很有可能下部地壳的岩石圈强度远远高于上部地

幔岩石圈的强度<sup>[10]</sup>。鉴于大陆岩石圈的这种非板块表现(Non-plate behavior),美国国家自然科学基金会组织全美构造地质学家和大地构造学家开展了充分的讨论,发布了题为《New departures in structural geology and tectonics》的白皮书,提出了“后板块构造(Beyond plate tectonics)”的概念,并由此对大陆岩石圈研究的新课题及其意义开展了广泛讨论和展望<sup>[3]</sup>。诸如什么因素制约了岩石的流变性,并导致大陆岩石圈的非板块表现?岩石圈板块在漂移和演化过程中的板缘和板内行为规律如何?什么因素决定了板内-板缘过程的存在?大陆岩石圈不同层次岩石对于岩石圈板块演化的响应?岩石圈演化过程的时(从秒到百万年)-空(从纳米或微米到大陆岩石圈)尺度的耦合关系及其对应的过程演变?

实际上,上述诸多问题的产生与疑问的存在很大程度上归咎于对岩石圈(尤其大陆岩石圈)在演化过程中的表现及其制约因素尚未能达到全面和正确的了解<sup>[3]</sup>。岩石圈流变学(流动规律、宏观与微观流变型式、制约因素等)研究的深入开展,将为“后板块构造”的地学研究以及新的岩石圈演化理论的建立

收稿日期:2004-06-10;修订日期:2004-08-04

基金项目:国家自然科学基金项目(No.40272084)资助。

作者简介:刘俊来(1960-)男,博士,教授,从事构造地质学与构造物理学研究。E-mail:jliu@cugb.edu.cn

开创新的纪元。本文就近期岩石圈流变学、显微构造研究的主要成就和进一步开展研究的思路进行简要的概括和总结。

## 1 岩石流动的宏观—微观尺度问题

### 1.1 岩石圈结构与流变性:从颗粒尺度到岩石圈

以往模拟不同环境条件下(上地壳、下地壳和地幔)不同成分岩石(长英质岩石、角闪质岩石和橄榄质岩石)的力学属性和流变性,自然条件与模拟条件下岩石圈物质的粘性、弹性及其蠕变规律,以及对于天然与实验变形岩石的力学与流变学的研究,积累了丰富的资料<sup>[4,11]</sup>。实验岩石流变学研究从早期对于单矿物(石英和方解石)<sup>[12-14]</sup>和单矿物岩石(石英岩、灰岩、大理岩和白云岩等)的实验研究<sup>[15-19]</sup>,已发展到后期对于复矿物岩石(花岗岩和榴辉岩等)的尝试<sup>[20-22]</sup>。同时研究内容也从单纯的岩石力学或流变学研究发展到后来多方面或多学科的综合研究。天然与实验研究建立、修正和完善了岩石圈的力学与流变学结构。其中包括 Sibson<sup>[23,24]</sup>基于对 Moine 断层带天然变形岩石的研究及其理论模拟建立的地壳断层带双层结构模型;Mattaer<sup>[25]</sup>提出了地壳层次的概念,建立的地壳结构模型中不同的地壳层次对应着地质构造样式的变化;Scholz<sup>[26]</sup>提出的断层带模型应用了长石和石英的流变学表现;而 Kawamoto 等<sup>[27]</sup>应用盐岩的模拟实验研究结果,尤其实验中对于 S-C 组构的观察与解释,建立了由脆性域、半脆性域、半韧性域和韧性域构成的地壳断层带结构模型;Shimada 等<sup>[20]</sup>、刘俊来等<sup>[21]</sup>注意到地壳浅部层次岩石强度的变化及其与大陆地壳多震层的对应性,提出了新的地壳断层带模型。近年来对地壳与地幔岩石流变性的研究显示,岩石圈不同层次岩石的流变性、强度及流动机制有很大的变化,其变化受边界条件(变形环境)的影响十分显著,在不同的尺度上既有相似性又有不一致的表现。进一步的研究工作应该立足于对不同环境和不同尺度上岩石(尤其多相岩石)流变性的研究,包括天然变形和实验变形的研究。晶体/岩石/岩石圈尺度岩石的力学性状与流动机制的研究内容包括:晶内缺陷与位错的物理化学,破裂、微破裂的成核、扩展,断层带的发生、发展与演化,微米级或毫米级尺度上晶体颗粒变形中的位错蠕变过程,更大尺度上的效应,如应变分异作用过程的意义,岩石圈的分层结构与区域不均匀性等。

### 1.2 边界弱化效应

受组成物质的差异、流体相的存在及其活动性、应变分解与分异等制约,大陆岩石圈的变形,无论是脆性、脆—韧性转变,还是塑性变形,往往具有显著的垂向、侧向和随时间演变的不均匀性<sup>[5,28]</sup>。大量应变主要集中在一些狭窄的带状域内,在不同尺度上分别表现在颗粒边界、岩层界面、断层边界、岩石圈边界与板块边界上<sup>[29]</sup>。

区域尺度上应变的局部化、断层带上的软化效应、沿断层带区域性物质的运移与流动、断层带对于岩石圈失稳的效应、边界存在对于其他过程的意义等,应该在近期的研究中开展进一步的讨论。局部化与软化的制约因素对于不同的地质环境会有很大的变化,可能的制约因素包括成分弱化、应变弱化、几何弱化和结构弱化等。

在显微域内天然变形岩石的颗粒边界处,微界面的存在对于晶内和晶间的变形过程具有重要的制约作用,尤其在微米级和纳米级尺度上是控制晶体颗粒和岩石蠕变的基本因素<sup>[30]</sup>。初步研究结果表明,尽管材料科学中普遍认为物质粒度达到纳米级时,材料的物理、化学属性会发生剧变<sup>[31,32]</sup>,但对于天然变形环境中的岩石材料只要颗粒粒度达到几百纳米,岩石的流变学属性和流动机制即可以发生显著的变化。例如碳酸盐岩即使在低温条件下(低于 100℃)也会发生由碎裂流动向晶质塑性变形的脆—韧性转变。这种效应也许是由晶间过程向晶内过程转变所致,其中颗粒的界面具有重要意义。

### 1.3 大地构造过程的岩石流变学与显微构造响应

岩石的流变学与力学表现直接受制于不同环境或大地构造环境下错综复杂的变形条件,表现为变形岩石的显微构造响应<sup>[33,34]</sup>。对造山环境条件下变形岩石的显微构造分析已经成为研究岩石变形的流变性与流动过程的重要依据,并以此为依据广泛开展了造山带的  $p-T-t$  演化研究。

当前开展的研究工作更多地侧重于极端条件下岩石的流变学行为及其流动机制与相应的显微构造表现。其中下列研究工作应该是值得进一步关注的重要方面。

(1) 岩石的低温与极低温变形与流动过程<sup>[35-38]</sup>。近地表环境中岩石的力学与流变学表现直接与表层系统的减灾和国民的生存密切相关,因而一直是也将依然是进一步研究的重点方向。研究中值得注意

的一个重要问题是,尽管岩石物质组成、物质结构和局部性的低温、低压条件在很大程度上限制了岩石的力学与流变学特性,但是表层和低温环境条件下广泛出现的地质流体,其作用对于岩石的表现也有着重要的意义<sup>[37-38]</sup>。尤其在微量水存在的条件下出现的水弱化效应将随着岩石粒度的减小和水/岩接触面积的增大,其意义仍然是有待进一步深入讨论的重要方向。其中流体相的成分、酸碱度和氧逸度等变化的弱化效应无疑是研究中的重要课题。

(2)下地壳与上地幔岩石流动的构造、显微构造和流动机制<sup>[39]</sup>。地球物理探测揭示出的大陆下地壳低速高导层的广泛存在,为岩石圈深部构造的研究增添了色彩,也成为挑战经典板块构造观念的重要依据。对这些透明体的成因,曾经提出了含水层、熔体层、韧性流变层、富碳质薄膜域等多种解释,应该说上述认识更多的还是在猜测,而目前对下地壳的组成和岩石流变性的了解(如从出露的深部地壳剖面、高温高压实验等)还远远不能满足对大陆岩石圈深部结构的成因解释。另外,地幔岩石的流变性、天然地幔岩石(主要以幔源包体为代表)的区域构造动力学意义等也是目前尝试性研究的重要方面。

(3)高压、超高压条件下岩石变形的显微构造特点和流动机理。高压、超高压岩石的形成直接与陆-陆碰撞及由此而导致的大陆深俯冲过程密切相关,俯冲深度达上百公里的超高压岩石,在形成后经历了复杂的剥露过程,这已由大量岩石学、矿物学和地球化学证据所证实。然而,高压和超高压条件下岩石的流变学表现、深俯冲和剥露过程中岩石的变形行为、显微构造特点,一直是人们十分关注但还未能深入展开研究的一个重要课题<sup>[39,40]</sup>。

(4)显微构造与大地构造问题<sup>[33,34]</sup>。包括造山带应变分解过程及其微观表现,岩石圈板块碰撞与后碰撞(青藏)的显微构造响应,不同大地构造环境形成的构造域内岩石的宏观、微观和亚微观构造表现(如以华北为代表的克拉通环境、东亚中-新生代板内伸展与岩石圈减薄过程、秦岭-大别收缩造山与俯冲作用、以青藏高原为代表的现代碰撞与后碰撞环境)。

## 2 岩石流动的时间——瞬间到百万年

天然岩石流动的时间问题主要表现在3个方面:

①岩石圈的流动过程从瞬间的地震活动到百万年

的造山活动,其时间尺度跨度很大。十分重要但长期以来却未给予足够重视的是,在 $10^2\sim 10^4$ s尺度上岩石流动及其相伴的主要地质过程。有机地将这些不同时间尺度上的过程联系起来,深入研究青藏高原的新生代后碰撞变形与演化将为此提供很好的天然实验室。②实验室的模拟过程往往是采用厘米级样品在以天、周、月、年为时间单位的尺度内完成的。而自然界的天然应变过程,尤其岩石圈的宏观流动与岩石的大应变韧性变形过程却是在百万年尺度上完成的。如何将实验室确定的流动率与天然岩石变形的蠕变率联系起来,是长期以来一直在讨论且尚未解决的重要课题之一<sup>[41]</sup>。③变形作用发生与发展的有效定年。尽管目前已经发展了多种不同的热年代学手段,但结合显微构造分析开展的有效定年工作,尤其针对低温变形环境寻找可以利用的定年目标矿物的构造年代学分析(虽然Ben van der Pluijm等作了一些尝试)(图1),仍然有待于进一步深入探索<sup>[42-45]</sup>。

## 3 岩石与岩石圈流动的制约因素

岩石与岩石圈流动的制约因素主要表现在2个重要方面,即岩石内在的物质成分与结构、岩石变形的物理化学环境<sup>[21,23,24]</sup>。其中物理化学环境的变化通过影响岩石圈物质的内在属性变化而起作用。

一方面,温度、压力和应变速率等物理环境在很大程度上决定了矿物、岩石和岩石圈板块的流变学表现和变形特点<sup>[23-25]</sup>。但是,近期研究显示,岩石变形的化学环境(水、氧逸度、硅的活动性等)、岩石变形过程中岩浆的活动性(熔融与熔体的含量、熔体成分与性质等)对于岩石的物理-力学表现、岩石的变形性质、流动机制和相应不同尺度上的变形构造、显微构造的发育都有着深刻的影响。尤其近期对于超临界水的研究表明,当温度超过 $374^\circ\text{C}$ 时,所谓的“水”已经不再具有常温常压条件下水的所有属性,而转变为一种既具有强酸性、又具有强碱性的物质<sup>[46]</sup>。在这种条件下它对岩石物质的相转变、成矿物质的溶解与搬运、岩石流动过程与机理的影响,恐怕难以用常规的思路去演绎了。由此可见,综合考虑岩石圈内部物质所处的物理-化学环境而开展的矿物、岩石、岩石圈流动规律的定量研究,是正确理解地球岩石圈的流动性、下部地壳和岩石圈地幔解耦等岩石圈内部过程的关键之所在。

另一方面,自然界的物质具有固、液和气三态。岩石圈物质的主体以固态物质为主,这一点是公认的常识。值得注意的问题是,在漫长的地质历史长河中,岩石圈固体物质的表现如何?它与液态物质、气态物质之间具有怎样的联系?能否简单地利用粘度变化来描述它们?<sup>[46]</sup>从脆性固态岩石—韧性流变岩石—含熔体岩石—岩浆—高盐度水溶液—水—气体,实际上可以看做一个粘度变化的不连续系列)。开展固—液—汽三相物质流动率的系统相关性研究,将有力地揭示出三者之间的相互关系。实际上,近期研究已经表明,地球各圈层三态物质的演化具有广泛的统一性,无论是物质结构、相互转变,还是宏观组合与结构演化。在剔除了时间因素的影响之后,固态物质(层圈)与液态物质(层圈)和气态物质(层圈)具有相似的表现与流动规律。定量开展三相物质的相关性与耦合规律的研究,将为开展固体岩石圈的组成、结构与演化提供新的思路。最近对夏威夷帝王海山火山链的成因研究揭示,在帝王海山火山链的形成过程中,下伏的热点与上覆的大洋岩石圈板块之间的相对运动主要归咎于下伏热点在不断地向着东南方向运动,而其运动轨迹与河流里的漩涡和飓风的运动轨迹具有很大的相似性,并由此隐示着固态岩石圈内发生的过程与气态大气圈中发生的过程存在某种内在的联系(图 2)<sup>[47]</sup>。

#### 4 现代实验和分析技术

北美学者已经意识到,在最近的 20 年来,他们在

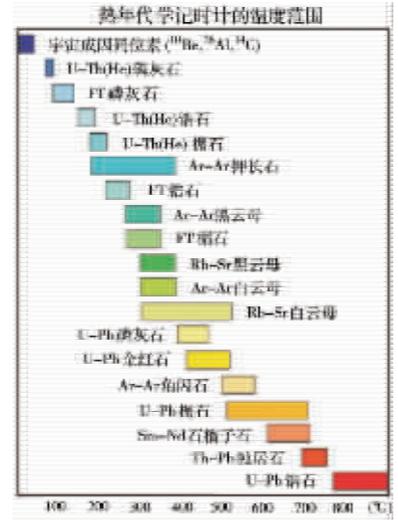


图 1 不同矿物常用热年代学方法及其封闭温度<sup>[3]</sup>  
Fig.1 Commonly used thermal chronological methods and closing temperatures of different minerals

实验技术和方法应用上已经远远地落后于欧洲而失去了领导地位。而相对于欧美和日本学者而言,中国构造地质学家和地球物理学家在开展岩石圈流变学方面的研究中遇到的困难更加艰巨。现代化实验室建设(高温高压专业实验室)实验手段(动态高压和超高压实验设备)和分析研究手段(EBSD分析、数值模拟分析等)的不断完善,是上述研究课题和研究内容得以顺利实施的基本保障。为此,在中国加强高温高压实验室的基本建设,根据当前的科学任务不断完善和更新设备,同时加大对于有关方面研究的资

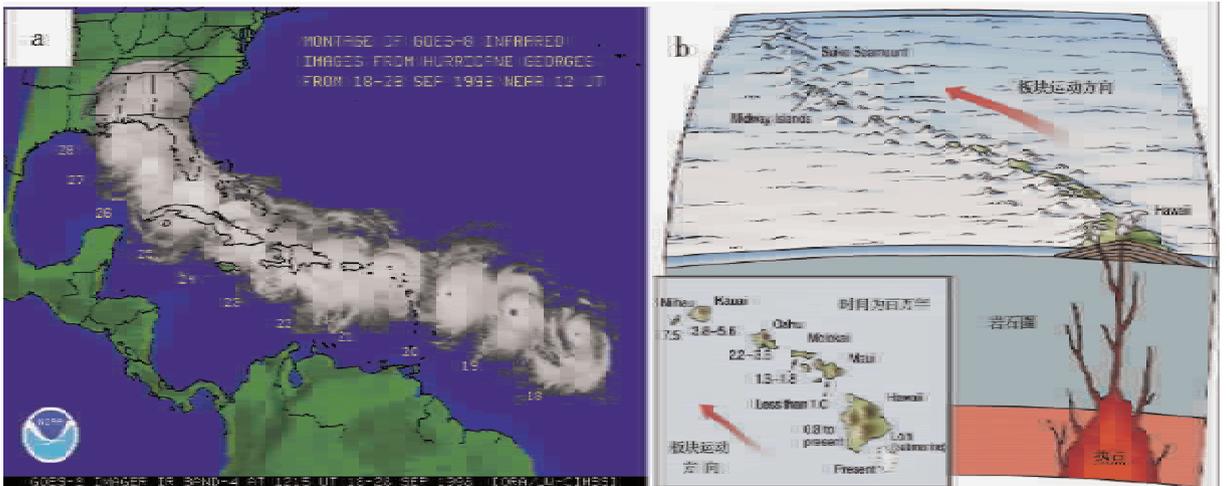


图 2 物质流动轨迹的相似性

Fig.2 Similarities in flow paths of different materials  
a—1998年Georges飓风运行轨迹<sup>[47]</sup> b—帝王海山热点轨迹<sup>[46]</sup>

助力度,将会促进中国科学家在有关方面的研究中取得突破性的进展,为新的地学理论的产生做出贡献<sup>[48,49]</sup>。

### 参考文献:

- [1]Tackley P J. Mantle convection and plate tectonics: toward an integrated physical and chemical theory[J]. *Science*, 2000, 288: 2002~2007.
- [2]Solomatov V S, Moresi L N. Plate tectonics and mantle convection with ductile/ brittle rheology[J]. *Eos, Transactions, American Geophysical Union*, 1997, 78(17):322.
- [3]Pollard D D. Beyond plate tectonics: rheology and orogenesis of the continents[A]. In: *New departures in structural geology and tectonics[M]*. American Structural Geology and Tectonics Group, 2003. <http://www.pangea.stanford.edu/~dpollard/NSF>.
- [4]Vauchez A, Tommasi A, Barruol G. Rheological heterogeneity, mechanical anisotropy and deformation of the continental lithosphere[J]. *Tectonophysics*, 1998, 296: 61~86.
- [5]Storti F, Holdsworth R E, Salvini F. Intraplate strike-slip deformation belts[A]. In: Storti F, Holdsworth R E, Salvini F(eds). *Intraplate strike-slip deformation belts[C]*. Geological Society Special Publications, 2003, 210: 1~14.
- [6]Carter N L, Tsenn M C. Flow properties of continental lithosphere[J]. *Tectonophysics*, 1987, 136: 27~63.
- [7]Kenner S J. Localized intraplate weak zones, sources of stress and the spatial distribution of seismic slip[A]. In: *Abstracts with Programs[C]*. Geological Society of America, 2002, 34(6):78.
- [8]Liu J, Xu C, Song C, et al. Using repeated precise GPS campaigns for research of present-day crustal movement and strain in the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2001, 46(8):694~698.
- [9]Li B, Niu Z, Duan F. Preliminary analysis for the roles of crustal low-velocity and high-conductivity body in process of strong earthquake preparation[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2000, 13(2):151~158.
- [10]Maggi A, Jackson J A, McKenzie D, et al. Earthquake focal depths, effective elastic thickness, and the strength of the continental lithosphere[J]. *Geology*, 2000, 28(6):495~498.
- [11]Peter Bird. Lithosphere dynamics and continental deformation[J]. *Reviews of Geophysics*, 1995, (suppl.):379~383.
- [12]Christie J M, Heard H C, LaMori P N. Experimental deformation of quartz single crystals at 27~30 kb confining pressure and 24 degrees[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1960, 71(12):1842.
- [13]Turner F J, Griggs D T, Heard H C. Experimental deformation of calcite crystals[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1954, 65(9):883~933.
- [14]Rutter E H. The influence of temperature, strain rate and interstitial water in the experimental deformation of calcite rocks[J]. *Tectonophysics*, 1974, 22(3~4):311~334.
- [15]Kronenberg A K, Tullis J. Flow strengths of quartz aggregates: grain size and pressure effects due to hydrolytic weakening[A]. In: Kirby S H, Scholz C H (eds). *Chemical effects of water on the strength and deformation of crustal rocks [C]*. *Journal of Geophysical Research*, 1984, B89(6):4281~4297.
- [16]Kern H, Wenk H R. Experimental deformation of limestone-texture transitions and comparison of pure and simple shear[J]. *Terra Cognita*, 1988, 2(1):67~68.
- [17]Tullis J. Deformation of granitic rocks: experimental studies and natural examples[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 2002, 51: 51~95.
- [18]Heard H C. Effects of large changes in strain rate in experimental deformation of Yule marble[J]. *Journal of Geology*, 1963, 71: 162~195.
- [19]Turner F J, Griggs D T, Heard H C, et al. Plastic deformation of dolomite rock at 38°C[J]. *American Journal of Science*, 1954, 252: 477~488.
- [20]Shimada M, Liu J. Temperature dependence of strength of rocks under high confining pressure: micromechanism and implications[M]. *Disaster Prevention Research Institute Annuals*, 2000, 43(B-1):75~84.
- [21]Shimada M. Lithosphere strength inferred from fracture strength of rocks at high confining pressures and temperatures[J]. *Tectonophysics*, 1993, 217(1-2):55~64.
- [22]Shimada M, Cho A. Two types of brittle fracture of silicate rocks under confining pressure and their implications in the earth's crust[J]. *Tectonophysics*, 1990, 175(1~3):221~235.
- [23]Sibson R H. Fault rocks and fault mechanisms[J]. *Journal of the Geological Society of London*, 1977, 133: 191~213.
- [24]Sibson R H. Continental fault structure and the shallow earthquake source[J]. *J. Geol. Soc. Lond.*, 1983, 140: 741~767.
- [25]Rutter E H. The influence of temperature, strain rate and interstitial water in the experimental deformation of calcite rocks[J]. *Tectonophysics*, 1974, 22:311~334.
- [26]Scholz C H. *The mechanics of earthquakes and faulting[M]*. Cambridge: Cambridge University Press, 1990. 439.
- [27]Kawamoto E, Shimamoto T. Mechanical behavior of halite and calcite shear zones from brittle to fully plastic deformation and a revised fault model[A]. In: Zheng Yadong, Davis G A, Yin An (eds). *Proc. 30th Int. Geol. Congr[C]*. 1996, 14: 89~105.
- [28]Babuska V, Plomerova J, Sileny J. Models of seismic anisotropy in the deep continental lithosphere[J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 1993, 78(3~4):167~191.
- [29]Jackson J. Faulting, flow, and the strength of the continental lithosphere[J]. *International Geology Review*, 2002, 44(1):39~61.
- [30]Zhang Z, Zhu X. Potential applications of nano-scale science and technology in geosciences and experimental studies of nanometer-sized gold adsorption on minerals and rocks[J]. *Chinese Journal of Geochemistry*, 1997, 16(2):133~138.
- [31]赵新宇. *纳米世纪[M]*. 广州: 广州出版社, 2001. 228.
- [32]Krinley D, Dorn R, Tovey N K. Nanometer-scale layering in rock varnish: implications for genesis and paleoenvironmental interpretation[J]. *Journal of Geology*, 1995, 103(1):106~113.
- [33]Bozkurt E, Park R G. Microstructures of deformed grains in the Augen gneisses of southern Menderes Massif (western Turkey) and their tectonic significance[J]. *Geologische Rundschau*, 1997, 86(1):103~119.

- [34]Venera Z, Schulmann K, Kroener A. Intrusion within a transtensional tectonic domain, the Cista Granodiorite (Bohemian Massif) structure and rheological modeling[J]. *Journal of Structural Geology*, 2000, 22(10):1437~1454.
- [35]Riller U, Schwerdtner W M, Robin P Y F. Low-temperature deformation mechanisms at a lithotectonic interface near the Sudbury Basin, eastern Penokean Orogen, Canada[J]. *Tectonophysics*, 1998, 287(1~4):59~75.
- [36]Kennedy L A, Logan J M. Microstructures of cataclases in a limestone-on-shale thrust fault: Implications for low-temperature recrystallization of calcite[J]. *Tectonophysics*, 1998, 284:167~186.
- [37]Kennedy L A, White J C. Low-temperature recrystallization in calcite: Mechanisms and consequences[J]. *Geology*, 2001, 29:1027~1030.
- [38]Liu Junlai, Jens W, Klaus W. Fluid-enhanced low temperature plasticity of calcite rocks: microstructures and mechanisms[J]. *Geology*, 2002, 30:787~790.
- [39]Brown C D, Phillips R J. Crust-mantle decoupling by flexure of continental lithosphere[J]. *Journal of Geophysical Research*, B, 2000, 105(6):13221~13237.
- [40]Coleman R G, Wang X. Ultrahigh pressure metamorphism[J]. Cambridge Univ. Press, 1995.356~390.
- [41]Paterson M S. Problems in the extrapolation of laboratory rheological data[J]. *Tectonophysics*, 1987, 133(1~2):33~43.
- [42]Van der Pluijm B A, Hall C M, Vrolijk P J, et al. The dating of shallow faults in the Earth's crust[J]. *Nature*, 2001, 412:172~175.
- [43]Muller W, Aerden D, Halliday A. Isotopic dating of strain fringe increments: Duration and rates of deformation in shear zones[J]. *Science*, 2000, 288(23):2195~2198.
- [44]Foster D A, Raza A. Low-temperature thermochronological record of exhumation of the Bitterroot metamorphic core complex, northern Cordilleran Orogen[J]. *Tectonophysics*, 2002, 349:23~36.
- [45]Foster D A, John B E. Quantifying tectonic exhumation in an extensional orogen with thermochronology: examples from the southern Basin and Range Province [A]. In: Ring U, et al (eds). *Exhumation processes: Normal faulting, ductile flow, and erosion*[M]. Geological Society of London, Special Publication, 1999, 154:356~378.
- [46]Tarduno J A, Duncan R A, Scholl D W, et al. The Emperor seamounts: southward motion of the Hawaiian hotspot plume in Earth's mantle[J]. *Science*, 2003, 301:1064~1069.
- [47]<http://www.outlook.moaa.gov/98hurricanes>.
- [48]Bascou J, Barruol G, Vauchez A, et al. EBSD-measured lattice-preferred orientations and seismic properties of eclogites[J]. *Tectonophysics*, 2001, 342(1~2):61~80.
- [49]Lloyd G E. Grain boundary contact effects during faulting of quartzite: an SEM/EBSD analysis[J]. *Journal of Structural Geology*, 2000, 22(11~12):1675~1693.

## Microstructures of deformed rocks and rheology of the lithosphere

LIU Junlai

(China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Rheological analysis of the lithosphere and structural-microstructural analysis of deformed rocks reveal that the continental lithosphere of the Earth shows obvious lateral and vertical anisotropy and has the marked non-plate behavior. The structural and microstructural analyses of rocks deformed at different temperatures and pressures and correct understanding of the rheological laws of the lithosphere, mechanisms of rock flow and their constraints at different crustal levels are the basis and major driving forces for scientific investigations of beyond-plate tectonics and proposing new theories for the evolution of the lithosphere. Rock flow problems on macro and micro scales (including the lithospheric structure and rheology, boundary weakening effects and rheological and microstructural responses to different tectonic settings), rock flow at different time scales from seconds to million years (including rock rheology, experimental modeling and harmony of natural rock flow and effective dating of rock flow deformation at the shallow crustal level) and constraints of rock flow (internal composition and structure and external physical and chemical environment will become important aspects of the analysis and study of the lithospheric flow and rock deformation microstructures). Construction of modern laboratories and applications of modern techniques are necessary conditions for solving the above-mentioned scientific problems.

**Key words:** lithosphere; rheology; microstructure