

# 岩石组构学研究的最新技术 ——电子背散射衍射 (EBSD)

徐海军, 金淑燕\*, 郑伯让

(中国地质大学 地球科学学院, 湖北 武汉 430074)

**摘要:** 岩石组构分析是构造地质学研究的一项基础工作, 对理解许多地质过程非常关键。岩石组构学的理论研究和测试技术手段都有很大发展, 取得了许多重要成果。最近十几年来, 装备在扫描电镜上的电子背散射衍射 (EBSD) 新技术日臻成熟, 已经成为地球科学和材料科学组构分析的强有力手段。作为革命性的新技术, EBSD 的量化显微构造数据在地质学中具有广泛的应用前景, 例如相鉴定、变形机制、位错滑移系、结晶学优选方位 (CPO) 和变质过程研究等。本文介绍了池际尚教授在开拓我国岩石组构学教学和科学研究以及人才培养方面的重要贡献, 同时阐述了 EBSD 的仪器组成、基本原理和应用范围及其与费氏台、X 射线衍射、中子衍射和透射电镜优缺点的对比, 并展示了该方法在大别—苏鲁超高压榴辉岩组构分析中的应用。

**关键词:** 组构; EBSD; CPO; 榴辉岩; 石榴石; 绿辉石

**中图分类号:** P545; P585

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 8527 (2007) 02 - 0213 - 13

## New Technique of Petrofabric: Electron Backscatter Diffraction (EBSD)

XU Hai-jun, JIN Shu-yan, ZHENG Bo-rang

(Faculty of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan, Hubei 430074, China)

**Abstract:** Petrofabric analysis is one of the important work in structural geology, and plays a critical role for our understanding of many geological processes. Petrofabric subject traces its origin to the early twentieth century, and do much to the earth science with the great developments of theories and techniques ever since. Professor Chi Jishang was one of the most important founders of petrofabric subject in China, and did invaluable contributions to its developments. In the last 10 years, the electron backscatter diffraction (EBSD) technique has developed into a powerful tool for the study of petrofabrics in the scanning electron microscope (SEM). The quantitative crystallographic orientation data from EBSD have a wide variety of potential applications in geology, including phase identification, studying deformation mechanisms, crystallographic preferred orientation analysis, constraining dislocation slip systems, studying metamorphic processes and more. This paper briefly describes some of the physical fundamentals and the practical set-up of the technique and its application scope in geology. The advantages and disadvantages of EBSD as compared to some traditional methods such as universal stage, X-ray diffraction, neutron diffraction and transmission electron microscope (TEM) are also discussed. Finally, we presented here an application example of the petrofabric study of garnet and omphacite in the Dabie-Sulu ultra-high pressure eclogite.

**Key words:** petrofabric; EBSD; CPO; eclogite; garnet; omphacite

收稿日期: 2007-05-15; 改回日期: 2007-06-10; 责任编辑: 潘令枝。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40172068); 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室仪器开放基金项目 (07006)。

作者简介: 徐海军, 男, 博士研究生, 1978 年出生, 构造地质学专业, 主要从事显微构造和大陆深部构造的研究工作。

Email: hj\_xu@sina.com

\*通讯作者: 金淑燕, 女, 教授, 1941 年出生, 构造地质学专业, 主要从事岩石组构学的教学和科研工作。

Email: zmjn@cug.edu.cn

## 0 引言

岩石组构是构造地质学研究的一项重要基础工作。组构 (fabric) 译自德文 Gefüge, 又称为织构 (多用于冶金学和材料学), 是指一种集合体内部的几何形态和物理性质的数据在三维空间的分布规律。对于天然岩石, 组构包含结构、构造和优选方位三个方面的内容, 涉及矿物结晶程度、形状、大小、相互关系和排布情况。研究岩石组构的学科称为岩石组构学 (简称岩组学)、构造岩石学或者显微构造分析。岩组学的兴起始于变质岩形变的研究, 其基本概念是 Becker G F 在 1893 年提出来的。1930 年 Sander B 在奥地利学派实践工作基础上发表专著《Gefügekunde der Gesteine》(岩石的组构学)<sup>[1]</sup>, 标志着岩组学以一门独立分支学科出现。

岩组学的主要任务是借助光学显微镜、费氏台、X射线衍射仪、中子衍射仪、扫描电镜和透射电镜等技术手段, 揭示构造岩的显微组构特征, 借以探讨与岩石形成和变形相关的一些宏观构造应变规律、应力状态、运动方式和形成机制等构造信息。厘米到埃 (angstrom) 尺度的岩相学观测是岩组学研究的主要内容之一, 涉及岩石中矿物相的组成及其内部成分变化, 矿物相的大小、形态和空间分布, 矿物颗粒的结晶学方位及其内部变化, 颗粒或者亚颗粒边界的几何形态及其结构, 三联点 (triple junction) 的几何形态及其结构等。这些微观尺度的测量数据也是地球科学研究的基础和支撑。岩组学研究的另一个重要方面是描述岩石中矿物的优选方位特征, 并阐述其形成机制和构造环境。矿物有两种优选取向: 形态优选方位 (shape preferred orientation, 简称 SPO), 描述具有各向异性颗粒形态的取向分布特征; 结晶学优选方位 (crystallographic preferred orientation, 简称 CPO), 指的是矿物晶格的取向特征。变形或者定向生长造成岩石中矿物的定向性排列, 并引起物理性质的各向异性, 例如地球中地震波分裂。对材料结构的解释也依赖于对其内部矿物取向特征的定量描述。

自岩组学问世以来, 其研究技术不断更新和完善, 研究领域也不断被拓宽和深化。人们不仅将岩组学方法广泛应用于沉积岩、岩浆岩和变质岩等天然岩石的研究, 而且积极开展岩石与矿物实验变形和形成机制的研究, 加强了实验成果与

野外资料的对比分析。与此同时, 科研人员还广泛开展实验变形与模拟研究, 并引入物理冶金学和材料科学中的位错和流变学理论。随着计算机的广泛应用, 新的技术不断涌现和完善, 已由早期单一的光学显微镜分析, 发展到 X 射线衍射、中子衍射、透射电镜和扫描电镜等多种技术手段。装备在扫描电镜上的电子背散射衍射 (electron backscatter diffraction, 简称 EBSD) 是新近发展起来的技术。它是利用不同晶体结构和方位的背散射衍射衬度图像来研究金属及矿物显微构造的测试分析方法, 可以获得亚微米级的空间分辨率和 1 左右的角度分辨率。该技术在理论上可以对任何对称系的晶体开展晶格优选方位研究, 甚至光学显微镜无法研究的等轴晶系矿物和不透明矿物。EBSD 替代传统光学显微镜费氏台组构研究, 被称为显微构造在地质学领域的革命性变化。

本文主要包括以下 4 方面的内容: (1) 岩组学的发展沿革; (2) 池际尚院士对我国岩组学的主要贡献; (3) 岩组学研究的最新技术——EBSD 的系统组成、基本原理和应用范围以及与其他技术的比较; (4) EBSD 在超高压榴辉岩组构分析中的应用。

## 1 岩组学的发展沿革

### 1.1 国外岩组学发展历史

岩组学是构造地质学与岩石学和矿物学相结合的一个研究领域, 其发展与地质学尤其是构造地质学关系密切, 同时也得益于测试技术和方法的改进和发展。纵观世界岩组学的发展沿革, 大致可以将其划分为 5 个阶段。

第 1 阶段: 岩组学的萌芽和早期研究。自 1883 年 D'Halloy 发现岩石的定向性以来, 构造地质学家就被岩石中矿物的定向排列所吸引, 对岩石显微构造的研究产生浓厚兴趣。1881 年, 俄国结晶学家费德洛夫 ( ) 发明了费氏台 (universal stage microscopy, 简称 U-stage), 为岩石组构的研究提供了技术支持。1893 年, Becker G F 在变质岩形变研究的基础上, 首先提出了岩组学的基本概念。

第 2 阶段: 岩组学作为一门独立学科出现。20 世纪 20 年代末到 30 年代初, 奥地利学派代表人物 Sander B 和 Schmidt W 对阿尔卑斯山进行广泛研究, 利用费氏台和统计方法分析岩石中矿物组分的定向排列, 并拟定出岩石组构分析方法及

其在地质实践中的应用。1930年, Sander B 发表专著《Gefügekunde der Gesteine》(岩石的组构学)<sup>[1]</sup>, 系统论述了变形岩石的组构及其几何学分析方法和运动学解释原则。该书是有关岩石组构研究最早的阶段总结, 引起国际地质学界的广泛重视和传播, 标志着岩组学以一门独立分支学科出现。在这一阶段, Sander B 所提倡的岩石组构研究方法逐渐得到推广和应用。人们主要利用费氏台和光学显微镜对天然变形岩石的优选方位进行测量, 借以分析岩石的变形历史和应力等构造环境, 并在变质岩构造的解释中获得巨大成功。该阶段的研究以组构类型的描述和解释为主, 对其形成机制研究很少, 因而其解释存在一定的臆测性。

第 3 阶段: 变形实验与组构研究的结合。20 世纪 50 至 60 年代, 人们开始关注岩石组构形成的机制问题, 开展一系列矿物和岩石的变形实验研究。通过这些研究, 不仅了解到大量矿物和岩石的塑性变形性质, 而且对优选方位产生的类型及其变化特征与应力、应变和岩石组构之间的联系也有了比较深入的认识。1963 年, Tümer F J 和 Weiss L E 根据当时积累的数据、成果和经验, 编著《变质构造岩的构造分析》<sup>[2]</sup>, 对变形岩石构造分析的相关概念、方法以及组构分析的程序进行了总结、充实和修改, 书中系统阐述了构造岩组构分析的实用尺度以及相关构造资料的运动学和动力学解释, 强调野外研究和室内研究的结合。该书的出版以及组构与变形实验研究的结合可以作为该阶段的主要标志。

第 4 阶段: 位错和流变学理论的引入。20 世纪 70 年代以来, 许多构造地质学家大力强调岩石组构分析在构造地质学研究中的作用, 并引入物理冶金学和材料科学中的位错和流变学理论。与此同时, 计算机技术开始广泛使用, 透射电镜 (TEM) 技术、X 射线岩组测量技术、中子衍射和扫描电镜 (SEM) 也得到较大发展。新理论的引入和测试技术的改进使得显微构造研究在广度和深度上都得到了蓬勃发展。1976 年, Nicolas A 和 Poirier J P 出版《变质岩的晶质塑性和固态流变》<sup>[3]</sup>; 1985 年, Wenk H R 主编专辑《变形金属和岩石的优选方位》<sup>[4]</sup>。他们积极倡导将物理冶金学原理和方法引进到岩石的显微构造分析, 并全面收集丰富的变形实验资料, 对变形岩石固态流变和位错机制等方面研究的许多新进展以及矿物

变形组构的形成机制和运动学解释进行了新的总结。这两本著作的发表可以作为该阶段研究成果的两个里程碑。

第 5 阶段: 电子背散射衍射 (EBSD) 技术的出现和广泛应用。EBSD 是利用不同晶体结构和方位的背散射衍射衬度图像来研究金属及矿物显微构造的技术, 可以获得亚微米级的空间分辨率和  $1^\circ$  左右角度分辨率的物质组构信息。该技术在理论上可以对任何对称系的晶体展开晶格优选方位研究, 甚至光学显微镜无法研究的等轴晶系矿物和不透明矿物<sup>[5]</sup>。与其他组构测量技术相比, EBSD 具有制样简单、数据采集速度快、高分辨率、自动化和定量化等优点。EBSD 替代传统光学显微镜的费氏台组构研究, 被称为显微构造在地质学领域的革命性变化, 使我们可以对隐晶质、纤维质和超显微晶粒的微细矿物进行鉴定并研究其取向, 扩大了岩石组构研究的领域, 大大提高了研究效率, 为岩组学的发展开拓了广阔前景。

## 1.2 中国岩组学的历史和现状

我国岩石组构的研究可以追溯到 20 世纪 30 年代, 其发展与矿物学家和岩石学家的贡献密切相关<sup>[6]</sup>。何作霖教授是我国显微组构研究和发展的先驱者, 曾受李四光教授委托就学于 Sander B, 于 20 世纪 30 年代初将岩组学和费氏台技术介绍到国内地质学界, 并首先将 X 射线衍射技术引入岩石组构分析。王嘉荫教授在 20 世纪 40 年代至 50 年代开展组构研究工作, 在一轴晶矿物光轴方位测定方面进行了新方法的探索, 并在应力矿物方面有较深入的研究。20 世纪 40 年代末至 50 年代初, 池际尚教授在美国从事构造岩石学和岩石变形实验研究工作, 取得了一些开拓性成果<sup>[7]</sup>。1950 年, 池际尚教授回到祖国, 长期从事岩组学的科研和教学工作, 在岩组学研究方面积极介绍国外先进的研究技术和方法, 并开设岩组学课程, 为我国岩石组构事业的发展和研究型人才的培养做出了不懈努力。20 世纪 60 年代, 马杏垣教授提出构造解析方法, 在区域调查中起到一定作用。何永年教授的科研小组开展了显微组构研究工作, 并在幔源橄榄石的位错构造和流变机制方面取得了出色成果。张保民先生也为我国岩组学的发展起着重要的推动作用<sup>[8]</sup>。1981 年以来, 在钱祥麟教授的倡导下, 中国构造地质学会下设了显微构造地质分会, 并先后在国内召开多次显微构造和组构学术研讨会, 为我国岩石组构研究的推广做

出了重要贡献。

我国岩石组构研究虽然早在 20 世纪 30 年代就已经开始,但是此后 30 多年时间里由于受到实验设备等限制而局限于少数学术单位和学者。直到 20 世纪 70 年代中期以来,随着国内科研条件的改善,全国各大地质院校和综合大学地质系开展岩石组学课程,国内科研人员开始广泛与国际合作交流,才使得岩石组学在中国得到较快发展<sup>[6]</sup>。在我国岩石组学的发展历程中,一些学者先后将国外重要的岩石组构研究理论、方法和成果介绍到地质学界,翻译国外关键书籍<sup>[9-13]</sup>,并编写了一些实用教程<sup>[8,14-24]</sup>,为我国显微组构研究的推广和人才的培养做出了重要贡献。目前,我国岩石组构研究已经取得较大进展,但是与国际同行相比在技术手段和科研成果等方面还存在相当大的差距。

## 2 池际尚院士对我国岩石组学的贡献

池际尚院士是我国著名的岩石学家和教育家,也是我国岩石组学的主要奠基人之一,为岩石组学的创建和发展做出了重要贡献。池先生在岩石组学的成就和贡献集中体现在三个方面:早期在美国从事岩石组构的相关研究,并取得一些开拓性成果;归国后将岩石组学及其分析方法——费德洛夫法系统地引入我国地质学领域,并长期坚持岩石组学的教学工作;言传身教,精心培育我国的岩石组学人才。

### 2.1 20 世纪 50 年代池际尚院士在国外的构造岩石学研究成果

1946 年,池先生在袁复礼教授推荐下获得美国宾夕法尼亚布伦茂大学研究生奖学金,赴美深造。1949 年,她在导师魏克福教授的指导下出色地完成博士论文——《Wissahickon 片岩的构造岩石学》。该论文对当时国际上热烈争论的“花岗岩化”问题进行了详细的物理化学平衡以及变质作用关系分析,阐明了其成因机理,并把不同类型 S 面理的形成与褶皱发展的期次有机联系起来,提出变形-组构的统一模型<sup>[25]</sup>。池先生的研究成果发表之后,受到美国著名岩石学家特涅尔(Tumer F J)的好评,并被推荐到伯克利加州大学地质系当特涅尔教授的科研助理。随后的一年时间内,池先生与特涅尔教授合作进行了高温高压大理岩

变形实验研究,并相继发表具有开拓性的研究成果<sup>[26-28]</sup>。这些研究成果为岩石组构的形成和解释提供了重要的实验变形约束,至今仍然具有十分重要的参考意义。

### 2.2 在国内开辟岩石组学教学和科研方向

1950 年,池先生在清华大学地质系工作期间编写了内容丰富、新颖的费德洛夫法讲义,开始引进岩石组学分析方法。1952 年,全国高等学校院系调整,池先生到刚刚成立的北京地质学院任教授。1962 年,先生在参考大量国外文献和多年教学经验的基础上,编著了《费德洛夫法简明教程》。1975 年,武汉地质学院成立,池际尚先后担任地质系副主任、主任和武汉地质学院常务副院长。她克服了各种困难,为实验测试设备的筹建和师资队伍的建设付出艰辛努力,并一直坚持担任岩石组学的教学工作,相继编著《构造岩岩石组分析入门》<sup>[15]</sup>和《费德洛夫法》<sup>[16]</sup>等教材和专著。

1977—1978 年间(即文化大革命晚期),池际尚先生在十分困难的条件下在原武汉地质学院编写了《构造岩岩石组讲义》。第一次为地质力学专业高年级学生和构造教研室以及地质力学教研室的教师开设岩石组学入门课程。本文作者之一(金淑燕教授)作为池先生岩石组学课程的助教,全程听完了先生的讲课。池先生在讲课中思维敏捷、条理清晰,她严谨的科学理念和诲人不倦的精神使金淑燕教授终生难忘。正是由于池先生这门课程的启蒙,金淑燕教授走上了毕生从事岩石组构学教学和科学研究的生涯。从此之后,岩石组构学作为正式课程在地质力学专业高年级学生和研究生中授课。

### 2.3 精心培养岩石组学人才

池先生为培养我国从事岩石组学教学和科学研究的人才做出了重大贡献。池先生指出:“老一辈地质学家的力量是有限的,要把主要精力放在发现和培养人才上,要使每一个层次都后继有人。”她不仅很有远见地看到地质研究人员的潜能,而且积极为他们提供锻炼和深造的机会,鼓励和支持年青人去开拓新的领域。在池先生的指导和帮助下,武汉地质学院原地质力学系成立了以郑伯让教授为学术带头人的岩石组学科研小组。科研小组一方面在池先生的《构造岩岩石组讲义》基础上正式编写出版《构造岩岩石组学》教材<sup>[23]</sup>,同时积极开

池际尚. 构造岩岩石组学讲义. 武汉地质学院, 1978 年 5 月.

展岩组学在构造地质学应用的科研工作。郑伯让和金淑燕在池先生指导下,第一次运用方解石 e 双晶 C-T图解方法推导了大冶铁山麻雀脑地区新华夏构造体系的应力作用方向<sup>[29]</sup>。岩石组构学在其他方面的应用也取得丰硕成果<sup>[30-42]</sup>。池先生也非常注重培养研究生,并鼓励他们开拓和创新。钟增球教授是池先生培养的第一个岩组学研究生,他在先生的指导下不仅出色地完成研究生论文,而且取得很好的科研成果<sup>[43]</sup>,后来又系统介绍了变形岩石优选方位和显微构造的最新研究进展<sup>[44-45]</sup>,并编著《构造岩与显微构造》<sup>[24]</sup>。

池先生作为我国岩组学的主要创始人之一,始终关心着该学科发展和人才的成长,建立高水平的岩组学科研平台和做出高水平的科研成果是先生殷切的希望。中国地质大学秉承先生教诲,始终坚持岩组学的教学和科研工作,并跟踪国际前沿动态。2005年3月,中国地质大学(武汉)引进岩组学最新技术——电子背散射衍射(EBSD),正是对岩组学建设的继承和发展。下面简要介绍 EBSD 技术,并给出其在超高压榴辉岩组构研究中的应用实例。

### 3 岩石组构研究的最新技术——电子背散射衍射 (EBSD)

电子背散射衍射 (EBSD)系统通常安装在扫描电镜 (SEM)上。该技术通过采集样品在高能电子束轰击下产生的电子背散射衍射图像 (electron backscatter diffraction pattern, 简称 EBSDP),并将之与数据库中不同晶体的 EBSDP模拟结果进行匹配,从而反演出样品中晶体的相分布特征及其三维取向关系等显微构造信息。测量数据的空间分辨率优于 1  $\mu\text{m}$ , 装配在场发射扫描电镜 (field emission gun SEM, 简称 FEG-SEM)上的 EBSD 可为 10 nm 左右;角度分辨率可达到 0.5°~1°<sup>[46-47]</sup>。理论上,EBSD 可以对所有对称晶系的晶体进行显微构造分析。EBSD 技术的开发和研制拓展了扫描电镜的应用范围,使其不仅能对材料进行形貌观察和成分分析,而且能够对材料进行晶体结构、晶粒取向等晶体学特征分析和未知矿物相的鉴定<sup>[5, 48]</sup>。

#### 3.1 系统组成和工作原理

EBSD 仪器系统的基本组成包括一台扫描电镜和一套电子背散射衍射仪。扫描电镜是 EBSD 的寄主仪器,为其提供样品室和高能电子束,并与 EBSD 一起实现对样品台和电子束以及图像采集的

控制功能。EBSD 分为硬件和软件两大部分:硬件系统通常包括一台高灵敏度的 CCD 相机和一套用来进行电子背散射衍射花样平均化和背景校正的图像处理系统;软件系统则主要用于控制 EBSD 图像的采集和数据分析。此外,还涉及仪器的辅助设备,包括扫描电镜和电子背散射衍射仪的附件、样品磨片机和抛光机、离子溅射仪、超声波清洗器和电解抛光仪等。

EBSD 是利用背散射衍射花样 (EBSP)实现晶粒测量的,其获得一个晶粒的晶体取向数据是相对直接的。首先,将高度抛光的样品高角度倾斜 (一般为 70°)放入 SEM 样品室。打在样品表面的入射电子束发生弹性散射,从样品表面下方出射,从各个方向撞击晶面。其中,某些特殊方位的散射电子轨道将满足布拉格衍射条件,从而发生布拉格衍射。布拉格方程的表达式为:

$$n\lambda = 2d_{hkl}\sin\theta$$

其中:  $n$  是整数 (衍射级);  $\lambda$  是电子束波长, SEM 的电子束波长  $\lambda = 0.387/\sqrt{kV}$  (单位  $10^{-10}\text{ m}$ ),  $V$  是加速电压;  $d_{hkl}$  是晶面网格间距;  $\theta$  是衍射角。

在三维空间中,满足布拉格方程的电子轨迹形成两个圆锥体,并产生两个衍射电子锥形体。衍射电子一般要经过几十到几百 keV 的加速,其所产生的布拉格衍射角  $\theta$  很小 (通常只有 0.5°),相应的衍射锥面开角近 180°;因此当它们被 EBSD 的荧光屏或 EM 胶卷截获就会形成两条近似平行的直线——菊池线 (Kikuchi line)。这组菊池线共同形成一个菊池条带 (Kikuchi band),其宽度取决于晶面间距 (图 1)。对于每一个晶面,最低级的衍射 (取决于空间群)将产生最强的衍射强度。尽管衍射强度依赖于形成晶面的原子间距,但是每一个晶面都会产生两个衍射圆锥体,只是一些晶面产生高强度的衍射,而另一些则相对较弱。也就是说,在高能电子束作用下,晶体的所有晶面都会产生相应的电子衍射锥形体,并在荧光屏上形成电子背散射花样 (EBSP),也就是菊池花样。EBSP 由两两平行的菊池线组成,每一组对应于 (hkl)晶面和 (hk $\bar{l}$ )晶面,它本质上包括晶体的所有角度关系 (包括晶带间夹角和晶面间夹角),也就是晶体的对称性。因此,可以直接通过 EBSDP 上衍射条带的相对位置和亮点确定晶体的对称要素。EBSD 软件自动计算菊池条带的位置,并与相关晶相的理论值对比,快速计算出该点对应矿物颗粒

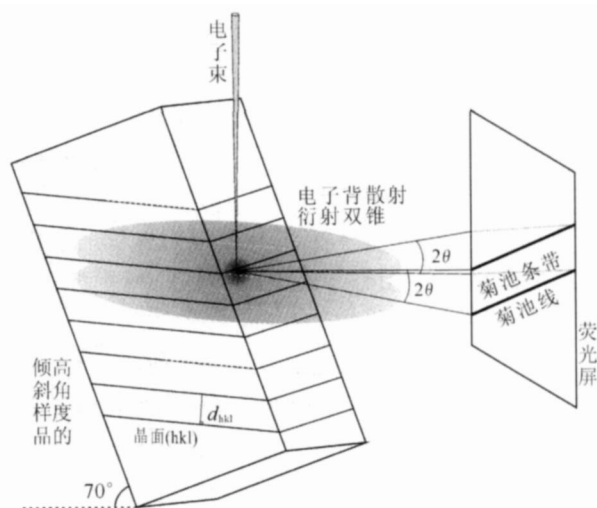


图 1 入射电子束在晶体上产生菊池条带的示意图<sup>[49]</sup>

Fig. 1 Scheme for the formation of Kikuchi bands by diffraction of electrons from a point source inside of the crystal<sup>[49]</sup>

的三维取向。整个过程所需时间可以少于 0.02 s。

### 3.2 测量数据和应用范围

EBSD自动分析技术的发展, 可以通过 SEM 电子束和样品台的自动控制, 在样品表面进行快速的点扫描、线扫描和面扫描工作。其输出的最基本数据包括每一个测量点在测量区域中的位置坐标、晶体的相、晶粒的三维取向以及标定误差。EBSD系统的配套软件, 例如 HKL 公司的 Channel 5, 通过对采集数据的处理绘制成取向成像图、极图和反极图, 还可以计算取向(差)分布函数(ODF)。用户利用分析软件可以从 EBSD 测量数据中提取关于样品的大量晶体学信息, 包括晶体组构和界面取向差、晶粒尺寸和形状分布、晶界-亚晶界和孪晶界性质分析、应变和重结晶分析等。EBSD 技术与微区化学分析相结合, 还可以进行相鉴定, 其优点在于区分化学成分相似的矿物相<sup>[50]</sup>。

EBSD 技术拓展了扫描电镜的应用范围, 使其不仅能对材料进行形貌观察和成分分析, 而且能够对材料进行晶体结构、晶粒取向等晶体学特征的分析, 实现诸如矿物相鉴定、变形机制研究、确定位错滑移系、显微构造定量化、变质过程研究、结晶学优选方位和约束化学微量取样等。这些研究中可以得到量化的结晶学方位数据, 从而对显微构造的解释模型提供更加严格约束, 对于构造学家、岩石学家和岩相学家的研究非常重要<sup>[5, 49, 51-55]</sup>。

### 3.3 EBSD 与其他测试技术的比较

测定岩石多晶集合体中矿物晶格优选方位可以分为光学方法和衍射方法两大类。光学方法即传统的光学显微镜研究方法, 以费氏台 (U-stage) 为代表。衍射方法包括 X 射线衍射法、中子衍射法和电子衍射法, 它们分别利用晶体结构对 X 射线束、中子束和电子束的衍射作用来进行测定。而电子衍射法通常采用透射电子显微镜 (TEM) 的透射电子衍射方法, 或者基于扫描电镜的电子背散射衍射方法 (EBSD)。下面对几种方法的优缺点进行比较。

传统的光学显微研究方法历史悠久, 它主要是根据晶体的光学各向异性或者可见的分离性不连续面, 例如一轴晶矿物的光轴、二轴晶矿物的光率体主轴和双晶纹、变形纹、矿物解理等, 借助于显微镜和旋转台进行晶格或者形态优选方位的测定。光学方法的最大优点是能相当直观地看到被观测对象, 能够进行选择性的分析, 也可以根据矿物颗粒大小、形状、波状消光、变形纹、双晶纹、重结晶及其他特征进行分选测量, 还可以用光学方法观测到各种显微构造现象<sup>[16, 21, 23]</sup>。其缺点表现在: 难以测量不透明矿物或者颗粒细小 (小于 30 μm) 的矿物以及均质矿物, 并且用光学方法对矿物颗粒进行逐个测定是一件相当费时耗力的工作。

X 射线衍射是借助 X 射线测量宏观材料中的晶体结构及其宏观取向的统计分析方法。其主要优点在于: 应用范围广, 可以测量各种常见矿物的优选方位, 包括一轴晶、二轴晶矿物、均质矿物和不透明矿物; 自动化程度较高, 从测量到最终成图可以完全自动进行, 准确可靠、省时省力; 有多种分析方法, 例如极图法、反极图法、三维取向分布函数法, 能从不同方面说明问题<sup>[19]</sup>。X 射线衍射方法适用于成分比较单一、结构构造比较均匀的各种岩石和矿石中细—中粒的矿物优选方位的测定分析。但是, 这种方法不具备点衍射的测量功能, 不能进行特选分析, 无法将测量数据与显微形貌相对应, 也不适宜于分析成分复杂、结构明显不均匀的样品。

中子衍射与 X 射线衍射的原理类似, 不同之处在于其使用的衍射源是中子。中子衍射技术继承了 X 射线衍射仪的大部分优点。由于中子的穿透性大大强于 X 射线, 可以测量直径 1~10 cm 的大样品, 因而具有更好的统计效果。中子衍射还

可以进行原位实验的同时进行组构变化的观测。与 X 射线衍射和 EBSD 相比, 中子衍射分析的结构数据少, 这主要源于: 中子衍射仪器稀少; 获取和处理数据需要相当专业的技能, 例如用 Rietveld 方法需要几个小时甚至数个星期 (与样品有关); 价格昂贵<sup>[56]</sup>。

透射电镜 (TEM) 多用于原位相鉴定、多晶体材料亚组构观测和位向测量等。其优点突出表现在高分辨率。但是, 透射电镜下所能观测的范围通常过于细小, 观测的结果一般不具有宏观统计意义; 而且大量的统计性透射电镜观测不仅使得研究工作复杂化, 也会明显提高研究成本, 费时耗力; 同时, 在透射电镜试样的加工过程中在一定程度上会改变多晶材料的原始缺陷结构和组织结构状况, 从而使得其分析结果夹带一些失真信息。

EBSD 技术具有不同于传统光学显微镜方法、X 射线衍射、中子衍射和透射电镜进行晶体结构和取向分析的特点, 它可以在观测微观组织结构的同时快速、统计性地获得多晶体各晶粒的取向信息, 并计算扫描电镜观测微区组织的结构, 从而解决了宏观统计性分析与微观局域性分析之间的矛盾。EBSD 的优点包括: (1) 理论上可以对所有对称晶系的晶体进行测量, 尤其是不透明矿物和均质矿物; (2) 晶体结构分析的精度高, 角度分辨率达到  $0.5^\circ$ ; 空间分辨率达到  $0.5\ \mu\text{m}$  (钨灯丝 SEM) 和  $0.1\ \mu\text{m}$  (场发射 FEG-SEM); (3) 更完整的显微构造特征, 研究人员可以方便地选择感兴趣的区域, 把显微结构和颗粒取向信息联系起来, 反映样品显微结构和边界特征及其能量的变化; (4) 制样相对简单, 可以研究样品的较大区域 (数平方厘米), 数据更能够代表研究样品的总体特征; (5) 数据移植性强, 可以用于物理性质 (例如地震波速  $v_p$ 、 $v_s$ ) 各向异性的数值模拟研究; (6) 自动快速的数据获取和分析; (7) 价格比较低廉。

但是, 仍然有一些问题困扰着 EBSD 在地质上的分析应用: (1) EBSD 误标定和不能标定, 这与花样质量有关 (有些矿物即使花样质量很好也很难标定), 并随着晶体对称性减低而增强。只有少数矿物, 例如方解石、石榴石、岩盐和一些立方体金属矿物的标定率可以到达 99%; 其他矿物, 如石英, 只能通过优化软件参数或者去掉不可信的分析数据来提高标定率。因此, 使用自动 EBSD 测量必须评估误标定的程度, 并讨论其产生的影响。

对于测量数据进行噪音处理 (noise reduction) 可以去掉一些误标定和不能标定的数据, 使得测量图看起来更为可信, 但是处理不当也可能会产生人工的错误干预。(2) 使用 EBSD 面临最大的挑战在于, 如何优化数据采集和如何使用测量数据。因为, 即使最好的数据采集方法也会有其存在的问题。所以, EBSD 分析技术需要与传统光学显微镜方法、OC 图像分析和 TEM 分析相结合, 以弥补其宏观分析和显微分析的不足, 进而提高其数据解释的准确性。

## 4 EBSD 在超高压榴辉岩组构分析中的应用

20 世纪 80 年代以来, 柯石英和微粒金刚石等超高压矿物在世界各地的造山带中相继被发现, 证明榴辉岩等表壳岩石曾经俯冲到上地幔深度而后又折返回到地表。超高压岩石的发现向传统地球科学理论提出了重要挑战, 改变了人们对岩石变质深度和陆内碰撞深俯冲的认识。有关超高压岩石形成和折返过程的动力学机制已成为地学界所关注的科学难题之一, 地质学家建立了多种理论模型。但是, 有关超高压榴辉岩形成和变形的物理环境参数很难直接获取, 许多模型都涉及其特定流变学、变形机制和应变速率条件下的偏应力等资料的准确性, 并且建立和检验这些模型还需要研究榴辉岩的变形条件 (压扁、收缩、剪切) 以及榴辉岩相主矿物的变形机制和应力大小。因此, 超高压岩体俯冲折返模型的建立在很大程度上依赖于榴辉岩的流变学研究<sup>[33, 57-58]</sup>。流变学实验可以在宏观上定量确定岩石的流变强度和变形机制, 但对变形机制的深入了解必须建立在显微构造研究之上。结晶学优选方位 (CPO) 的测量是显微组构研究的重要方面, 它可以提供变形机制的微观信息, 并确定岩石变形参数, 是流变学实验研究的重要补充。同时, 榴辉岩显微构造和组构分析提供了详细的重建折返路径的信息, 可以提供 UHP 岩石折返的重要信息, 特别是折返机制、折返运动学信息, 是对超高压变质岩体温压演化的重要补充<sup>[33, 40, 57]</sup>。

但是, 目前榴辉岩完整组构的测量还比较缺乏, 其原因主要有以下几个方面: (1) 使用费氏台测量绿辉石显微组构的工作量繁重、耗时, 并且容易出错。光学测量方法只能确定石英和金红石的  $c$  轴, 而立方对称的石榴石则无法测量。(2) 传



统的 X 射线衍射组构测量仪, 由于颗粒太大、多矿物衍射峰值叠加等原因不太实用。(3) 中子衍射仪少, 价格昂贵。电子背散射衍射 (EBSD) 技术的发展和应用于超高压榴辉岩显微结构的研究提供了强大的技术支持, 目前国内外学者已经利用 EBSD 对实验和天然的单斜辉石和石榴石进行了大量的显微结构分析, 并且获得了许多的有用信息 [40, 42, 59 - 63]。下面将展示作者利用 EBSD 新技术对大别—苏鲁超高压榴辉岩中石榴石和绿辉石显微结构的研究实例。

#### 4.1 实验样品和测试方法

本文所研究的 5 块超高压榴辉岩样品来自大别—苏鲁超高压变质带。样品首先根据岩石的宏观矿物线理和面理严格定向, 即  $X$  轴平行于矿物

的自然线理方向,  $Z$  轴平行于岩石面理的法线方向,  $Y$  轴在面理面内垂直线理方向。然后, 沿垂直面理和平行线理的方向 ( $XZ$ ) 切制光学薄片, 厚度约为  $30\text{ }\mu\text{m}$ 。

BXL3-2 和 BXL5-4-2 采自大别山碧溪岭浅色榴辉岩, 岩石新鲜, 主要组成矿物为石榴石、绿辉石、石英以及少量金红石和多硅白云母。其中, BXL3-2 号样品手标本上显示非常强的线理化, 绿辉石和石榴石显示明显的条带状 (图 2(a)); 而 BXL5-4-2 号样品只显示弱变形面理。DS-12 和 SH-1 来自大别山双河地区, 均有不同程度的退变质, 镜下可以看到绿辉石被斜长石 + 透辉石 + 角闪石后成合金部分取代 (图 2(b))。MB98-08 号样品新鲜, 具有较强的变形面理, 主矿物石榴石和绿辉

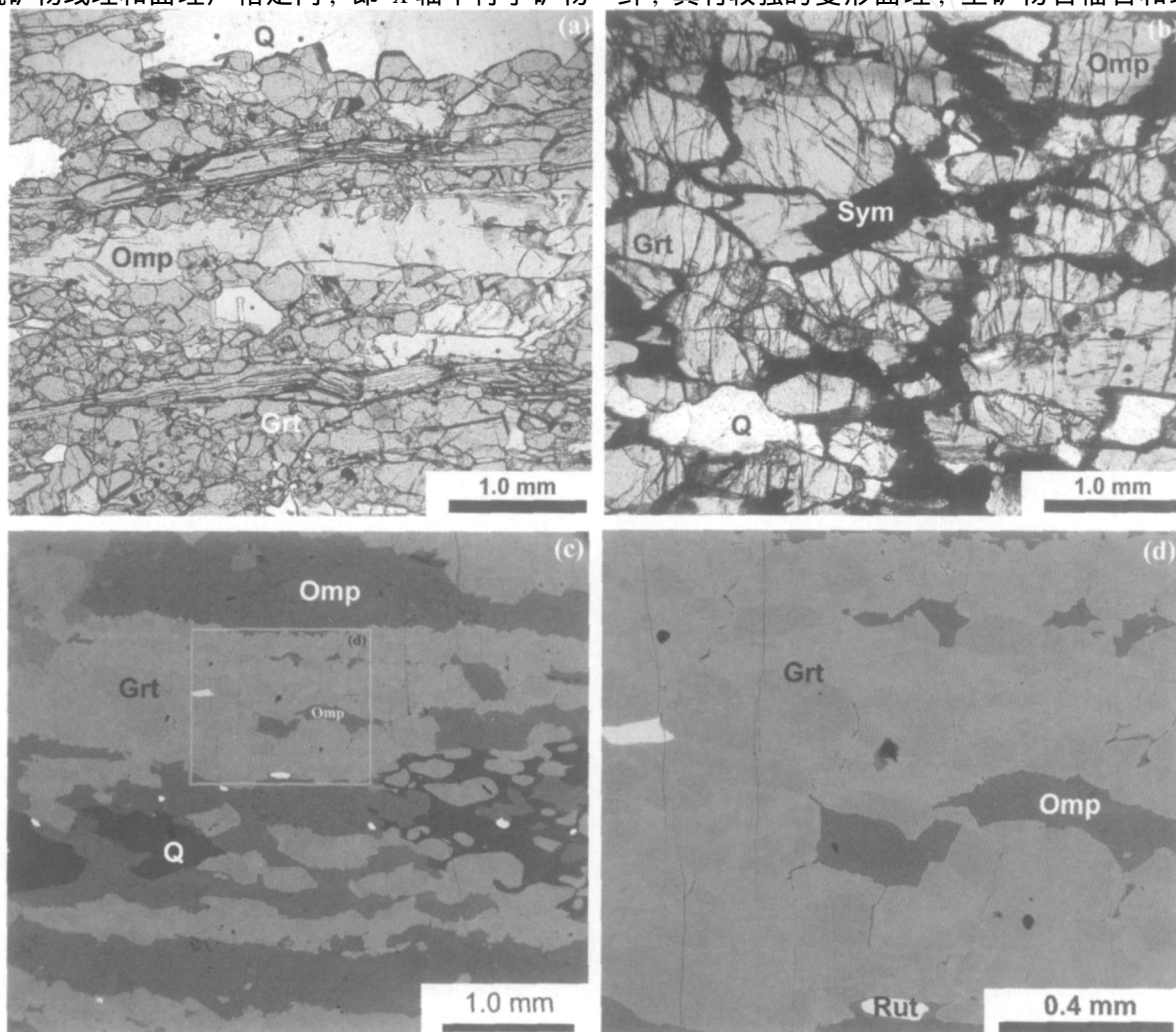


图 2 大别—苏鲁超高压榴辉岩显微构造特征 ( $XZ$  切面)

Fig. 2 Microstructures of the UHP eclogites from Dabie-Sulu ( $XZ$  sections)

(a) 强变形榴辉岩 BXL3-2 显微照片, 单偏光, 石榴石和绿辉石为强烈拉长状条带; (b) 弱退变质榴辉岩 DS-12 显微照片, 单偏光, 绿辉石部分转变为后成合金; (c) 变形榴辉岩 MB98-08 电子背散射图像, 绿辉石和石榴石形成条带状; (d) 图 (c) 局部放大图像, 石榴石由众多亚颗粒组成。矿物缩写: Grt. 石榴石; Omp. 绿辉石; Q. 石英; Rut. 金红石; Sym. 后成合金



石形成局部富集域, 并显示强烈拉长状 (图 2(c))。进一步的扫描电镜观测发现, 强烈拉长状的石榴石实际上是由众多亚颗粒组成, 石榴石的化学成分不均一, 在电子背散射图像上显示为不同的平均原子衬度 (图 2(d))。

电子背散射衍射 (EBSD) 是一种对样品表面测量的技术, 其背散射衍射花样产生于样品表面 5 nm ~ 20 nm 深度范围。为获取样品表面几个纳米深度内晶体结构的三维信息, 我们对 XZ 薄片样品进行高度机械抛光, 然后喷镀 2 ~ 5 nm 厚度的碳膜。榴辉岩的 EBSD 分析在中国地质大学 (武汉) 环境扫描电子显微镜实验室 FEI Quanta 200 钨灯丝扫描电镜上完成, EBSD 的型号为 HKL 公司的 Channel 5.0 & Nordlys II Detector。采用的工作条件为: 20 kV 加速电压, 21.2 mm 工作距离, 样品倾斜 70°; 有效束流 ~ 5 nA。测量过程中采用人机交互模式, 手动控制分析的精度, 对单斜晶系的绿辉石收集至少 150 个颗粒的晶体取向数据, 对石榴石由于其高晶体对称性而收集 250 个以上的数据。

#### 4.2 结果与分析

石榴石和绿辉石的晶格优选方位 (CPO) 采用标准化极点密度分布图 (multiples of a random distribution, m. r. d.) 等面积下半球投影表示, 每个极

图下方的 Max. 和 Min. 分别表示其最大和最小极密值。极图坐标系根据样品的面理和线理来确定, 即  $X$  = 线理,  $XY$  = 面理 ( $S$ )。

石榴石测量数据方位差角相对频率分布图都接近理论随机分布 (图 3)。5 块样品的极图都很复杂, 不显示明显的优选方位, 其极密值最小为 0.34 (样品 BXL 的  $\langle 100 \rangle$  轴)、最大为 1.77 (样品 DS-12 的  $\langle 100 \rangle$  轴) (图 4)。该测量结果与前人的研究基本一致<sup>[42, 61, 64]</sup>。石榴石的 CPO 不能用简单的滑移系滑移来解释, 例如  $1/2 \langle 111 \rangle \{110\}$ 、 $1/2 \langle 111 \rangle \{112\}$ 、 $1/2 \langle 111 \rangle \{123\}$ 、 $[110]\{001\}$ 、 $[100]\{010\}$ 、 $[100]\{011\}$ , 产生这种近于随机分布的复杂组构可能源于多滑移系共同作用的结果。实验模拟和天然变形石榴石的 CPO 测量结果显示, 石榴石虽然可以产生非常大的塑性变形, 具有明显的 SPO, 但是基本不显示 CPO, 或者只有非常微弱的 CPO。石榴石的高对称性特征决定了其即使以位错蠕变为主, 仍然难以产生明显的 CPO<sup>[65-66]</sup>。需要指出的是, 石榴石不产生明显 CPO 的事实并不能证明其变形机制不是位错滑移, 也不能为其他变形机制如扩散蠕变和定向生长提

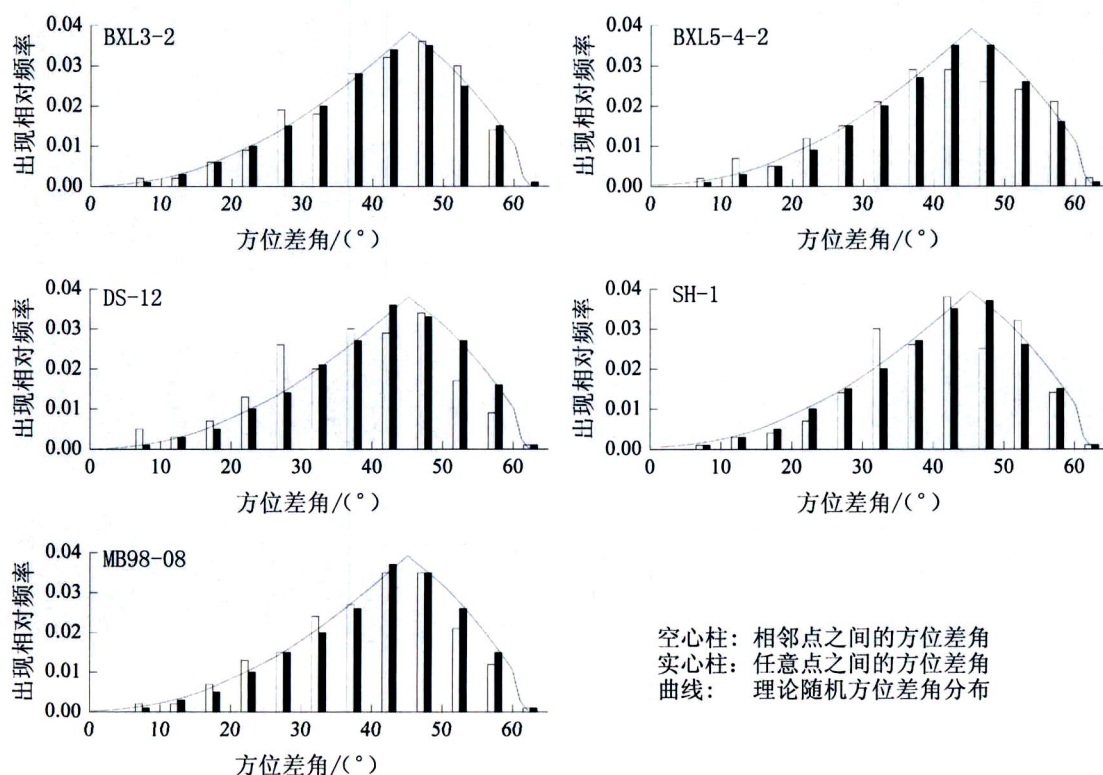


图 3 石榴石方位差角相对频率分布图

Fig. 3 The relative frequency of misorientation angles of garnet grains

供有效证据。我们对于拉长石榴石的光学显微镜和 SEM 观察发现, 拉长的石榴石实际上是由众多石榴石亚颗粒组成的 (图 2(d))。这说明超高压榴辉岩俯冲折返过程中, 变形石榴石经过有一定的恢复作用, 其颗粒边界过程可能对调节石榴石变形起到重要作用<sup>[42]</sup>。因此, 仅仅通过组构分析推导石榴石的变形机制是不够的, 研究石榴石的变形机制还需要配合 TEM 等其他手段。

绿辉石的 EBSD 测量结果显示, 5 块样品都具有较强的晶格优选方位 (图 4)。大别山碧溪岭样品 BXL3-2、BXL5-4-2 和双河样品 DS-12、SH-1 为 L 型组构: [001] 轴极点在面理面上, 其最大极密对应轴向近平行线理; (010) 面极点为垂直线理分布的大圆环, 最大极密对应晶面近平行面理; BXL5-4-2 和 DS-12 的 [100] 轴极密点比较分散, 而 BXL3-2 和 SH-1 的 [100] 轴极密为近垂直面理的大

圆环最大极密近于平行 Z 轴; (110) 解理面极点为垂直线理分布的大圆环带, 最大极密不显著。L 型组构与前人的测量结果基本相当, 表明该绿辉石是在以剪切为主的变形条件下形成的。值得注意的是, SH-1 和 BXL3-2 样品的 [001] 轴在线理附近具有非常强的极密值, 这与手标本上线理发育和显微镜下观察到的绿辉石具有强烈拉长变形的特征相吻合。同时也说明, 榴辉岩变形的强弱, 即线理发育程度与其绿辉石 [001] 轴极密程度具有良好的对应关系。MB98-08 为 LS 型组构<sup>[42]</sup>: [001] 轴极点在面理面上呈大圆环带分布, 最大极密对应轴向近平行线理; (010) 面极点为垂直线理分布的大圆环, 最大极密对应晶面近平行面理; [100] 轴极点比较分散, 其主要极密在 Y 轴附近形成; (110) 解理面形成三个极密, 两个最大的极密近似平行于 Z 轴, 第三个较弱的极密在 Y 轴附近。说

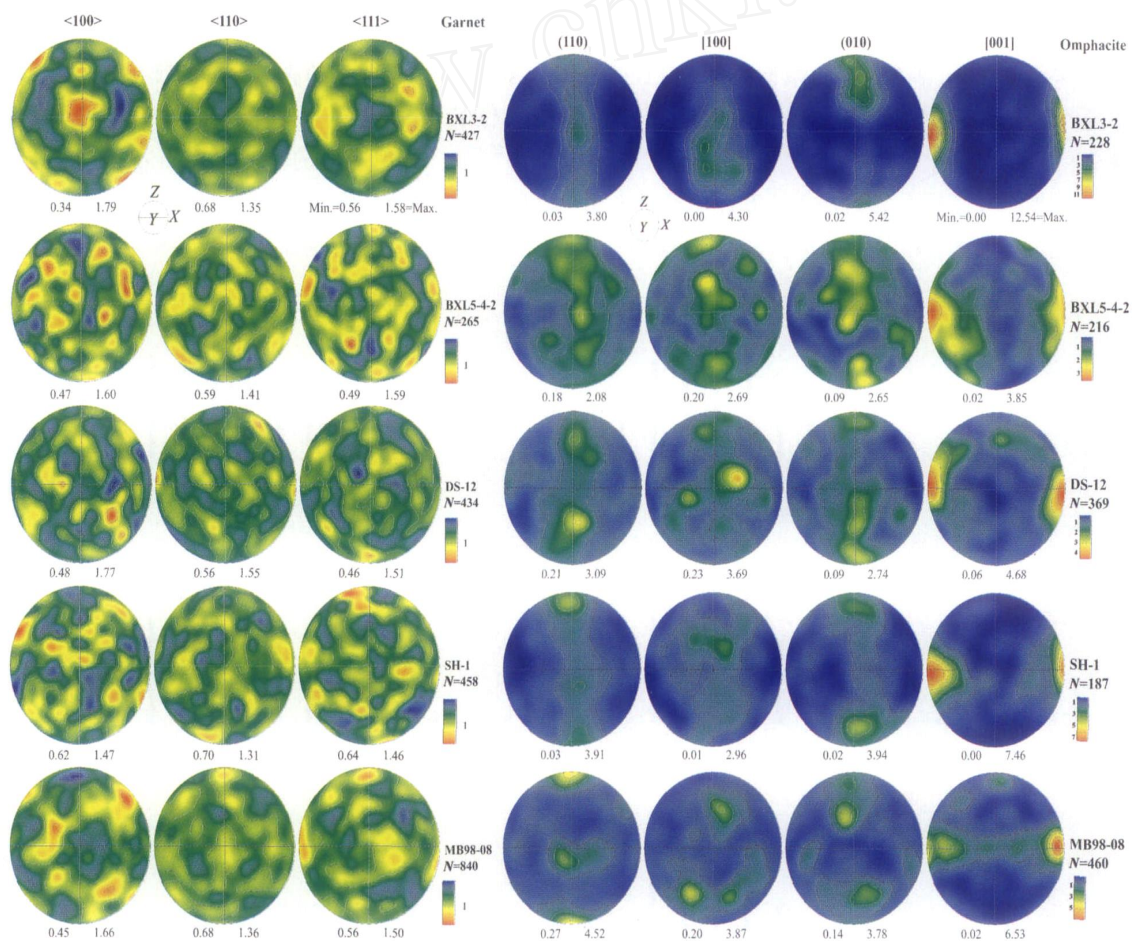


图 4 EBSD 测量的石榴石和绿辉石的结晶学优选方位极点密度图等面积下半球投影

Fig. 4 Stereographic projections (lower hemisphere equal area) of crystal preferred orientations of garnet and omphacite determined by EBSD

半宽: 20° (石榴石), 15° (绿辉石); 类域 5°; 标尺: 极密 (mrd), 极图下方的 Max 和 Min 分别表示其最大和最小极密值; X: 线理; Z: 垂直面理; Y: 垂直 XZ; N: 颗粒数

明该样品所代表的毛北超高压榴辉岩变形以剪切为主，兼有一定的轴向压缩。本文的绿辉石组构与前人的测量结果基本一致，表明绿辉石晶格优选方位 CPO 的形成机制为位错蠕变。通过 CPO 推导的滑移系应该为 (010) [001]，这与辉石滑移系 {110}  $1/2 \langle 110 \rangle$ 、{110} [001]、(100) [001] 的报道不一致。因此，绿辉石 CPO 组构特征是多滑移系共同作用的结果<sup>[42, 62-63, 67-68]</sup>。

#### 4.3 讨论

利用 EBSD 对来自大别—苏鲁 5 块典型超高压榴辉岩样品的显微组构研究表明：(1) 绿辉石的组构为 L 型或者 LS，即 [001] 轴极点在面理面上呈大圆环带分布，最大极密对应轴向近平行线理，(010) 面极点为垂直线理分布的大圆环，最大极密对应晶面近平行面理。表明这些榴辉岩体形成于以剪切为主的变形条件下。(2) 强变形榴辉岩和弱变形榴辉岩中的石榴石都具有近于随机分布的组构特征，不显示明显的优选方位。强变形榴辉岩的石榴石具有明显的 SPO 特征，与 CPO 具有强烈的不一致现象。石榴石不产生明显 CPO 的事实并不能证明其变形机制不是位错滑移，也不能为其他变形机制如扩散蠕变和定向生长提供有效证据，研究石榴石的变形机制还需要配合 TEM 等其他手段。

### 5 结 语

自 1930 年岩组学创立以来，国内外众多地质学家对之倾注了大量热情，广泛开展实验研究和理论研究工作，并进行了多次阶段性的总结，为岩石组构研究的发展起到了重要作用。目前，随着大量新理论的引入和发展，以及多种技术的开发和应用，特别是 EBSD 测量技术的广泛应用，岩石组构的研究进入又一个黄金时期，必将为地质学尤其是构造地质学的发展做出更大贡献。

1995 年，我国宝山钢铁公司最先引入 EBSD 设备，安装在电子探针上。到 2007 年，中国已有 70 多台 EBSD，分别来自丹麦 HKL 公司、英国 Oxford Instruments 公司、美国 EDAX/TSI 公司。但是，目前中国的设备数量和成果都落后于国外发达国家的水平<sup>[54]</sup>。我国地质学家，尤其是构造地质学家，要沿着池际尚院士开拓的岩组学研究方向，将 EBSD 新技术作为岩石组构研究中的一种常规手段，争取在该领域做出高水平的科学研究成果。

致谢：在撰写文章过程中，金振民院士对本文提出了宝贵的修改意见；张素新教授在扫描电镜操作和 EBSD 测量过程中提供技术支持；章军峰副教授在样品制作和实验分析方面给予帮助；柳首鲜师傅磨制了 EBSD 薄片样品；牛津仪器公司康伟工程师在 EBSD 仪器安装调试和操作方面给予大量帮助。作者在此一并表示衷心感谢！

谨以此文纪念池际尚院士诞辰 90 周年。

#### 参考文献：

- [1] Sander B. Gefügekunde der Gesteine [M]. Berlin: Springer, 1930.
- [2] Turner F J, Weiss L E. Structural Analysis of Metamorphic Tectonites [M]. New York: McGraw Hill Book Company, 1963.
- [3] Nicolas A, Poirier J P. Crystalline Plasticity and Solid State Flow in Metamorphic Rocks [M]. New York: John Wiley & Sons, 1976.
- [4] Wenk H R. Preferred Orientation in Deformed Metals and Rocks: An Introduction to Modern Texture Analysis [M]. Orlando: Academic Press, 1985.
- [5] Prior D J, Boyle Alan P, Brenker F, et al. The application of electron backscatter diffraction and orientation contrast imaging in the SEM to textural problems in rocks [J]. American Mineralogist, 1999, 84: 1741 - 1759.
- [6] 刘瑞卿. 中国显微构造地质学的回顾 [J]. 地质论评, 2002, 48(2): 178 - 181.
- [7] 中国地质大学岩石教研室. 池际尚论文选集 [M]. 北京: 地质出版社, 1997.
- [8] 张保民, 曹熹. 构造岩岩组分析的方法和基础 [M]. 北京: 地质出版社, 1977.
- [9] 菲尔班 H W. 岩组学 [M]. 何作霖, 译. 北京: 地质出版社, 1981.
- [10] 卡雷拉斯 J, 埃斯特拉达 A, 怀特 S. 组构和显微构造 [M]. 何永年, 林传勇, 史兰斌, 译. 北京: 科学出版社, 1980.
- [11] 林传勇, 史兰斌. 变质岩的晶质塑性和固态流变 [M]. 北京: 科学出版社, 1985.
- [12] 尼可拉斯 A, 泊利埃 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.
- [13] 特纳 F J, 韦斯 L E. 变质构造岩的构造分析 [M]. 周金城, 张绍宗, 宋鸿林, 译. 北京: 地质出版社, 1978.
- [14] 池际尚. 弗德洛夫简明教程 [M]. 北京: 中国工业出版社, 1962.
- [15] 池际尚. 构造岩岩组分析入门 [M] / 岩组分析方法文集. 北京: 地质出版社, 1977.
- [16] 池际尚, 吴国忠. 费德洛夫法 [M]. 北京: 地质出版社, 1983.
- [17] 何永年, 林传勇, 史兰斌. 构造岩石学基础 [M]. 北京: 地质出版社, 1988.
- [18] 胡玲. 显微构造 [M]. 北京: 地质出版社, 1998.
- [19] 姜光熹, 刘兆霞, 魏大海, 等. X 射线岩组学 [M]. 北京:

- 地质出版社, 1997.
- [20] 刘瑞卿. 显微构造地质学 [M]. 北京: 北京大学出版社, 1988.
- [21] 吴香尧. 岩组学导论 [M]. 重庆: 重庆出版社, 1986.
- [22] 许志琴. 地壳表形与显微构造 [M]. 北京: 地质出版社, 1984.
- [23] 郑伯让, 金淑燕. 构造岩岩组学 [M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1989.
- [24] 钟增球, 郭宝罗. 构造岩与显微构造 [M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1991.
- [25] Ch'ih C S. Structural petrology of the Wissahickon schist near Philadelphia, Pennsylvania with special reference to granitization [J]. Bulletin of Geological Society of America, 1950, 61: 923 - 956.
- [26] Tumer F J, Ch'ih C S. Deformation of Yule marble, Part : Observed fabric changes due to deformation at 10000 atmospheres confining pressure, room temperature, Dry [J]. Bulletin of the Geological Society of America, 1951, 62(8): 887 - 905.
- [27] Tumer F J, Griggs D T, Ch'ih C S. Note on survival of fabric characters in Yule marble after heating to 700 [J]. American Journal of Science, 1950, 248(5): 347 - 354.
- [28] Tumer F J, Griggs D T, Ch'ih C S. Fabric of Yule marble deformed experimentally at ordinary temperatures in absence of water [J]. Bulletin of Geological Society of America, 1950, 61: 1152.
- [29] 郑伯让, 邓士安, 金淑燕, 等. 湖北大冶铁山矿区构造的岩组分析 [J]. 地球科学——武汉地质学院学报, 1985, 10(4): 85 - 93.
- [30] 焦述强, 金振民, 金淑燕, 等. 大别超高压岩石中石英的组构和变形 [J]. 长春科技大学学报, 2001, 31(1): 32 - 36.
- [31] 金淑燕. 上地幔的岩石组构和各向异性 [J]. 地质科技情报, 1993, 12(3): 32 - 38.
- [32] 金淑燕. 斜长石组构与下地壳各向异性 [J]. 地质科技情报, 2000, 19(3): 1 - 6.
- [33] 金淑燕, 焦述强. 超高压榴辉岩中绿辉石组构测定及其流变学意义 [J]. 地球科学——中国地质大学学报, 1998, 23(1): 37 - 40.
- [34] 金淑燕, 李江风, 马长玲, 等. 东秦岭丹凤—商南剪切带的构造岩研究 [J]. 地球科学——中国地质大学学报, 1989, 14(增刊): 85 - 95.
- [35] 金振民, Ji S C, 金淑燕. 橄榄石晶格优选方位和上地幔地震波速各向异性 [J]. 地球物理学报, 1994, 37(4): 469 - 477.
- [36] 金振民, 金淑燕, 李隽波. 地球动力学和地震学的桥梁: 变形岩石组构与波速各向异性关系 [J]. 地球科学进展, 1990, 5(5): 39 - 42.
- [37] 马芳, 金淑燕, Kem H. 河北大麻坪超基性岩包体的岩石组构和地震波速各向异性 [J]. 北京大学学报(自然科学版), 2001, 37(4): 515 - 522.
- [38] 陈意, 金振民, 欧新功, 等. 韧性剪切带中片麻岩和超高压榴辉岩变形特征及其与地震波速各向异性的关系: 来自中国大陆科学钻探 (CCSD) 680 ~ 1200 米岩心的证据 [J]. 岩石学报, 2004, 20(1): 97 - 108.
- [39] 王璐, 金振民, 刘祥文, 等. 大别山双河超高压硬玉石英岩显微组构特征及其流变学意义 [J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2004, 29(3): 293 - 302.
- [40] 王璐, 金振民, 章军峰. 超高压榴辉岩中绿辉石组构和变形机制研究进展 [J]. 地质科技情报, 2005, 24(1): 19 - 24.
- [41] 王永锋, 郑有业, 金振民. 西藏东巧方辉橄辉岩的显微构造特征及其流变学意义 [J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2005, 30(1): 52 - 60.
- [42] 章军峰, 金振民, Green H W. 结构水引起的榴辉岩变形组构和变形机制 [J]. 科学通报, 2005, 50(6): 559 - 564.
- [43] 钟增球. 陕西黑山—杨诗城地区一些断裂中的石英变形纹及其动力学分析 [J]. 地球科学——武汉地质学院学报, 1984, 26(3): 91 - 103.
- [44] 钟增球. 变形岩石优选方位研究的进展 [J]. 地质科技情报, 1988, 7(3): 21 - 29.
- [45] 钟增球. 变形岩石显微构造研究的一些进展 [J]. 地质科技情报, 1988, 7(4): 1 - 7.
- [46] Humphreys F J. Review grain and subgrain characterisation by electron backscatter diffraction [J]. Journal of Materials Science, 2001, 36: 3833 - 3854.
- [47] Humphreys F J. Characterisation of fine-scale microstructures by electron backscatter diffraction (EBSD) [J]. Scripta Materialia, 2004, 51: 771 - 776.
- [48] Zaefferer S. The electron backscatter diffraction technique: A powerful tool to study microstructures by SEM [J]. JEOL News, 2004, 39(1): 10 - 15.
- [49] Schwartz A J, Kumar M, Adams B L. Electron Backscatter Diffraction in Materials Science [M]. New York: Kluwer Academic/Plenum Publishers, 2000.
- [50] Nowell M M, Wright S I. Phase differentiation via combined EBSD and XEDS [J]. Journal of Microscopy, 2005, 213: 296 - 305.
- [51] Day A P, Quested T E. A comparison of grain imaging and measurement using horizontal orientation and colour orientation contrast imaging, electron backscatter pattern and optical methods [J]. Journal of Microscopy, 1999, 195: 186 - 196.
- [52] Dingley D J, Randle V. Microtexture determination by electron back-scatter diffraction [J]. Journal of Material Science, 1992, 27: 4545 - 4566.
- [53] Mason T A, Adams B L. The application of orientation imaging microscopy [J]. Journal of the Minerals, Metals & Materials Society, 1994, 46(10): 43 - 45.
- [54] 刘庆. 电子背散射衍射技术及其在材料科学中的应用 [J]. 中国体视学与图像分析, 2005, 10(4): 205 - 210.
- [55] 曹淑云, 刘俊来. 岩石显微构造分析现代技术——EBSD 技术及应用 [J]. 地球科学进展, 2006, 21(10): 1091 - 1096.
- [56] Wenk H R. Neutron diffraction texture analysis [J]. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 2006, 63(1): 399 - 426.
- [57] Brenker F E, Prior D J, Muller W F. Cation ordering in omphacite and effect on deformation mechanism and lattice preferred orientation (LPO) [J]. Journal of Structural Geology, 2002, 24



- (12): 1991 - 2005.
- [58] Jin ZM, Zhang J, Green HW, et al Eclogite rheology: implications for subducted lithosphere [J]. *Geology*, 2001, 29: 667 - 670.
- [59] Prior D J, Wheeler J, Brenker F E, et al Crystal plasticity of natural garnet: New microstructural evidence [J]. *Geology*, 2000, 28(11): 1003 - 1006.
- [60] Kleinschrodt R, Duyster J P. HT-deformation of garnet: an EBSD study on granulites from Sri Lanka, India and the Ivrea Zone [J]. *Journal of Structural Geology*, 2002, 24 (11): 1829 - 1844.
- [61] Ji S C, Sanwadari K, Mainprice D, et al Microstructures, petrofabrics and seismic properties of ultra high-pressure eclogites from Sulu region, China: implications for rheology of subducted continental crust and origin of mantle reflections [J]. *Tectonophysics*, 2003, 370(1 - 4): 49 - 76.
- [62] Kurz W, Jansen E, Hundenbom R, et al Microstructures and crystallographic preferred orientations of omphacite in Alpine eclogites: implications for the exhumation of (ultra-) high-pressure units [J]. *Journal of Geodynamics*, 2004, 37: 1 - 55.
- [63] Zhang J F, Green H W, Bozhikov K N. Rheology of omphacite at high temperature and pressure and significance of its lattice preferred orientations [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2006, 246(3 - 4): 432 - 443.
- [64] 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.
- [65] Karato S, Wang Z C, Liu B, et al Plastic deformation of garnets: systematics and implications for the rheology of the mantle transition zone [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1995, 130: 13 - 30.
- [66] 刘祥文, 金振民, 金淑燕, 等. 两类榴辉岩的石榴石变形特征差异——来自 TEM 研究的证据 [J]. *岩石学报*, 2005, 21(2): 411 - 420.
- [67] Godard G, van Roermund H L M. Deformation-induced clinopyroxene fabrics from eclogites [J]. *Journal of Structural Geology*, 1995, 17(10): 1425 - 1443.
- [68] Bascou J, Tommasi A, Mainprice D. Plastic deformation and development of clinopyroxene lattice preferred orientations in eclogites [J]. *Journal of Structural Geology*, 2002, 24: 1357 - 1368.