

# 岩石电子背散射衍射 (EBSD) 组构分析及应用

刘俊来, 曹淑云, 邹运鑫, 宋志杰

LIU Jun-lai, CAO Shu-yun, ZOU Yun-xin, SONG Zhi-jie

中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 北京 100083

State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

**摘要:** 电子背散射衍射 (EBSD) 技术是现代构造地质学与显微构造分析领域一项崭新的技术, 它与现代高分辨率扫描电子显微镜和能谱分析设备结合, 可以对块状样品中微米或纳米级尺度的颗粒进行晶体结构分析, 从而使微观结构、微区成分与结晶学优选数据结合起来, 能够更精细地对比研究矿物和岩石显微构造, 为岩石显微构造分析开辟了一个全新的领域。分析了 EBSD 技术的基本原理、系统构成、样品制备和工作程序。介绍了石英组构测量, 极细粒物质 (微角砾岩) 的组构特点, 二轴晶矿物 (角闪石) 的组构、变形机制和金属硫化物组构分析的应用实例, 对于应用 EBSD 系统开展研究存在的一些问题进行了讨论。

**关键词:** 电子背散射衍射 (EBSD); 显微构造; 组构; 造岩矿物; 硫化物

中图分类号: P313

文献标志码: A

文章编号: 1671-2552(2008)10-1638-08

LIU J L, CAO S Y, ZOU Y X, SONG Z J. EBSD analysis of rock fabrics and its application. *Geological Bulletin of China*, 2008, 27(10):1638-1645

**Abstract:** The electron backscattered diffraction (EBSD) technique is a brand-new technique of fabric analysis in modern structural geology. Its combination with the high resolution scanning electron microscope and energy dispersion spectrometer provides the possibility to perform a crystallographic analysis of micron- to nano-scale particles in massive samples and thus comprehensively use the microtextural, microchemical and crystallographic data to conduct a more intensive comparative study of the microstructures of minerals and rocks. The technique has opened up a new area of study for microstructural analysis. This paper introduces the basic principles and major constitution of the EBSD technique, procedures of working and sample processing, as well as quartz fabric measurements, fabric features of very fine material (microbreccia), fabrics and deformation mechanism of biaxial minerals (hornblende) and fabric analysis of metal sulfide. The paper also discusses difficulties in data acquisition and processing in the application of the EBSD system.

**Key words:** EBSD; microstructure; fabric; rock-forming mineral; sulfide

岩石组构或晶体优选分析是构造地质学分析一个非常重要的方面, 它对于探讨岩石物理 (异向性) 力学 (强度及变化) 性质、阐明变形的运动学规律及揭示岩石内部矿物的变形机制等方面具有重要的作用<sup>[1-2]</sup>。对于岩石组构的分析与研究有不同的方法, 在宏观尺度上可以依据岩石面、线组构的发育与测量得到概略的了解。对于岩石组构或晶体优选的精确分析, 常常需要借助于不同的仪器设备, 包括传统

的费氏台、透射电子显微镜、X-射线衍射分析仪等。费氏台是传统上最为常用的设备, 它具有价廉、方便的优势, 但在精度、工作效率等方面却有很大的缺陷<sup>[3-4]</sup>。与费氏台相比, 透射电子显微镜具有很高的测量精度, 但由于样品常常很小, 缺乏足够的代表性。X-射线测角系统能够对于块状样品表面晶体的优选进行探测, 是具有较大优势的一种系统, 但从中只能获得宏观上各种晶体颗粒的总体组构样式<sup>[5]</sup>。

收稿日期: 2008-07-07; 修订日期: 2008-08-04

基金项目: 国家自然科学基金项目《辽南变质核杂岩的组成、结构与区域构造内涵》(编号: 40472105)、博士点基金项目《微米-纳米尺度上的岩石流动与低温超塑性问题研究》(编号: 20040491003) 资助。

作者简介: 刘俊来 (1960-), 男, 教授, 从事构造地质学与区域构造学方面的教学与研究。E-mail: jliu@cugb.edu.cn

EBSD(electron backscattered diffraction)即电子背散射衍射技术,是应用扫描电子显微镜获取岩石或矿石中晶体结晶学信息的一种方法<sup>[6]</sup>。其基本原理始于 20 世纪 50 年代,技术问世于 80 年代,设备的商品化使用则从 90 年代开始。EBSD 作为扫描电子显微镜(SEM)的一个标准分析附件,与 SEM 的其他功能(包括 EDS 等)结合,实现了晶体形态结构与成像分析、成分分析、大样品分析、粗糙表面成像分析等功能<sup>[7]</sup>。EBSD 已经成为材料科学领域的一种常规技术,并在地质学、冶金学等领域得到了广泛的应用<sup>[8-10]</sup>。

本文初步分析了 EBSD 技术的基本原理、系统构成、样品制备和工作方法,介绍了石英、方解石的组构测量、极细粒物质组构分析、二轴晶矿物组构分析和金属硫化物组构分析方面的研究成果,对于应用该系统存在的一些问题进行了讨论。

## 1 EBSD 技术原理

具有一定能量的入射电子束轰击样品表面时,电子与元素的原子核、外层电子发生单次或多次弹性和非弹性碰撞,会反射、折射或衍射出多种不同形式的粒子。其中,99%以上的入射电子能量转变成样品热能,而其余约 1%的入射电子能量从样品中激发出各种信号,包括二次电子、背散射电子、吸收电子、透射电子、俄歇电子、阴极荧光、X 射线等(图 1)。

在非弹性散射过程中,电子从样品表面下的一个原点向四周发散并从各个方向与结晶学平面碰撞,如果满足布拉格衍射条件( $n\lambda=2d \sin\theta$ , $\theta$ —衍射角, $n$ —衍射级的整数, $\lambda$ —电子束能量的波长, $d$ —晶格间距),则形成菊池衍射圆锥。对应每一个布拉格条件的晶面族,会产生 2 个衍射圆锥,一个产生于晶面的上侧,一个产生于晶面下侧。对于典型的电镜工作条件(20 kV),计算得到布拉格角  $\theta$  约为  $0.5^\circ$ ,衍射圆锥的顶角接近  $180^\circ$ ,因此将荧光屏直接置于样品之前使其与衍射圆锥相截,则截取的 2 个锥形段成为一对平行线,即“菊池线或菊池花样”。不同晶面的衍射菊池线组成的花样图像称为背散射电子衍射花样图(EBSP)。荧光屏截取菊池带的数量和宽度,与荧光屏的大小和荧光屏距样品(衍射源)的远近有关<sup>[11]</sup>。

在背散射电子衍射花样图中,①一条平行线亮带代表一个晶面;②亮带宽度反比于晶面间距;③亮

带交叉处代表一个结晶方向。EBSD 对背散射衍射花样图谱分析,并与标准数据库中相同成分晶体的数据库进行比较,进而快速地标定晶体的晶面符号,确定晶系、晶带和晶胞参数,精确地确定晶体优选。在现代 EBSD 技术中,荧光屏获取的电子信号被后面的高灵敏度 CCD 相机采集转换并显示出来,传输到计算机得到快速处理,获取晶体的结晶学优选信息。

## 2 EBSD 系统的构成

EBSD 系统主要由背散射探测器、高灵敏度 CCD 数字照相机、图像采集卡、计算机分析软件及数据库等组成(图 2)<sup>[8]</sup>。探测器用于获取样品中激发出的背散射电子信号。高灵敏度 CCD 数字照相机获得 EBSP 图像后,经过图像采集卡输送到计算机系统。计算机自动对采集的图像进行识别和标定,同时与标准数据库进行比对,进而获得晶体颗粒的结晶学信息。

## 3 岩石或矿石 EBSD 样品制备

由于非弹性散射电子束来源于样品表层几十纳米的范围内,样品表面状态对于 EBSD 的质量影响非常大,所以 EBSD 对于制样的要求非常高。样品表面矿物变形或者样品表面有污染物、氧化物存在等都会影响 EBSD 图像的质量。

对于 EBSD 分析样品表面的抛光有不同的制作方法,包括机械抛光、电解抛光、离子束抛光和聚焦离子束(FIB,focused ion beam)切割。对于地质学研究中的矿物样品,机械抛光是最为常用的方法。机械

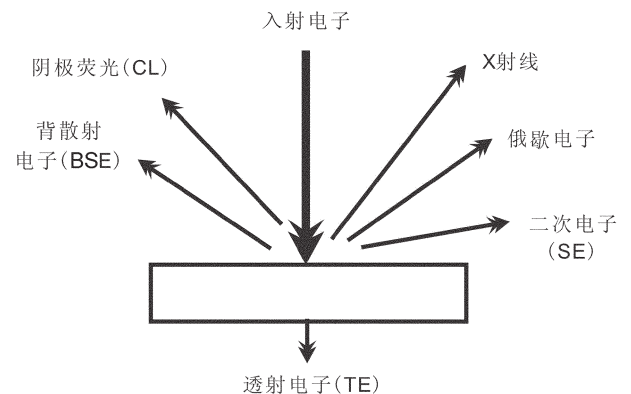


图 1 入射电子束轰击样品产生的信号  
Fig. 1 Signals generated by incident electron beam bombardment of samples

抛光过程的主要目的在于去除样品制备初期阶段磨制过程中在样品表面形成的几个纳米厚的变形层(图3),以使得背散射电子信号真正有效地反映晶体内部的结构特征。样品制备包括2个阶段,即磨制阶段和抛光阶段。

(1)磨片:将拟观察分析的样品制作成普通光片或光薄片,最好用较细的金刚砂磨制成光薄片。光薄片的大小随磨抛机样品夹尺寸的不同而不同,标乐磨抛机标准样品夹的尺寸为47 mm×28 mm。

(2)抛光:依次使用9 μm、6 μm、3 μm 金刚石溶液和1 μm 或 0.3 μm alpha 氧化铝、0.05 μm 或 0.02 μm 硅胶/氧化铝抛光液或抛光膏进行抛光。抛光时间与设定的加载强度和光薄片的光度有关。

(3)喷镀:对于不导电的非金属样品,还需要在样品表面喷碳或镀金,以便于观察和获取更好的信号。值得注意的是,由于背散射电子获取的信号是样品表面10 nm 以内的晶体结构信息,样品喷镀的厚度需要严格掌握。

### 4 EBSD 分析的工作方法

EBSD 分析主要包括2个方面,即数据采集与数据处理。

#### (1)数据采集

一个完整的点数据标定过程包括下述几项。

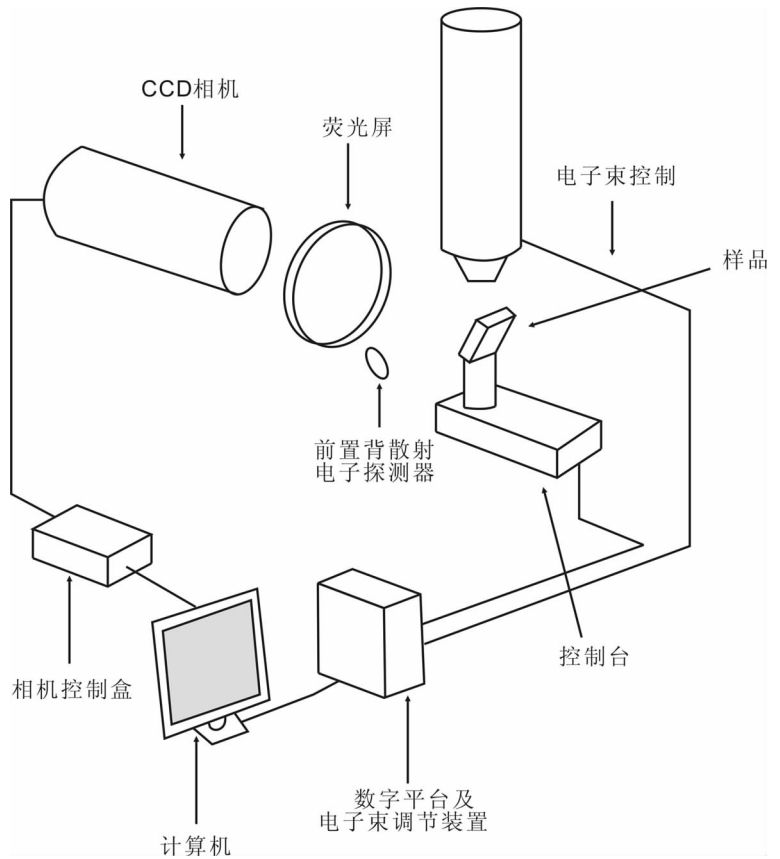


图2 EBSD系统的结构<sup>[1]</sup>

Fig. 2 Structure of the EBSD system

获取背底:在放大倍数较低的情况下选择所要观察的区域,并在快速扫描状态下采集图像,之后选择合适的每帧所用的时间,使得消除背底影响后能够得到比较清晰的菊池花样,且不使电子束过于集中而烧焦样品。

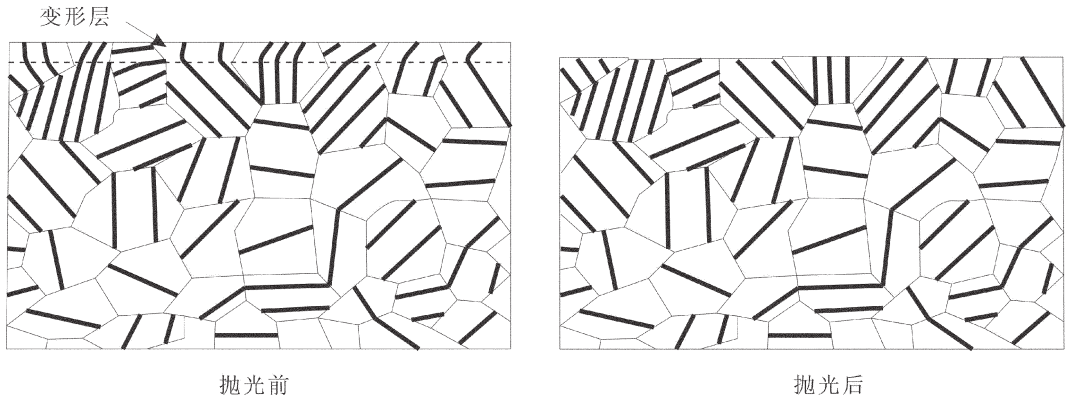


图3 样品加工前后的表面结构

Fig. 3 Surface structure before and after sample processing



采集图像:在放大倍数较高的情况下(相对于取背底时)选取所要观察的区域,运用慢速扫描模式获取清晰的图像。

选择数据库与设置基本参数:选择样品中已经确定的矿物成分数据库,同时设置采集图像时对应的参数,包括电压、工作距离等。电压要相同,工作距离要选择最相近的数值。

取点:选择希望获得晶格取向的颗粒内部的一个点,并观察其产生的菊池花样是否清晰。

采集花样:系统自动标出了比较清晰明了的菊池带,组成初始的菊池花样。

图像处理与菊池带识别:编辑系统自动选取的菊池带,添加或删除部分菊池带,使得菊池带花样更加接近于数据库中某种矿物的标准花样。

输出相及取向结果:选取的菊池花样与标准数据库对比,得出矿物相及晶体取向。可能得到不同的矿物相及晶体取向,通常选取误差最小的矿物相及晶体取向。

校对并给出标定结果:改进菊池花样与标准数据库的匹配程度,使得实际菊池带花样与标准数据库对比误差为最小,并给出最终的矿物相及晶体取向。

至此就完成了对一个选定的点数据的标定(见图 4)。

在每一个区域的工作过程中,需要选择几个不同的点并重复以上步骤取点—校对并给出标定结果

数次(一般 5~6 次),进一步确定系统的参考标准。

EBSD 工作的扫描方式有 2 种:电子束扫描和样品台扫描。前者即电子束移动,样品台不动。这种扫描方式操作简单、速度快,但通常情况下仅仅有较小的聚焦区域。后者是电子束不动,样品台移动,这种扫描方式可以进行大面积扫描,但速度慢、扫描步长较大(1 μm 以上)。

扫描类型包括 3 种,即点扫描、线扫描和面扫描。点扫描即获取单个点的晶体取向信息,线扫描为获取一条线上各晶体颗粒的取向信息,面扫描是获取某一设定面积内各种晶体颗粒的取向成像图。

在线扫描和面扫描中,依据研究内容选择一个目标线或目标区域,并设定一定的扫描步长,系统将自动获取扫描区域内各个点上的衍射花样与晶体信息。依据采集的数据,可以分析扫描区域内部不同成分类型晶体颗粒的优选与优选分布规律。对于大样品可以通过系统对于样品台的控制,移动样品台,并将各个扫描区域内获得的结果叠加,构成统一的数据体。

另外一种重要的扫描类型为互动分析,也即手动标定各个具有代表性的点上晶体颗粒的晶体取向参数,并保存结果。这种扫描类型对于地质样品分析,尤其是大颗粒地质样品分析具有重要意义,可以获得观察视域内晶体颗粒优选性的统计规律。

在 EBSD 标定与数据获取过程中,菊池带花样的质量直接影响着数据的精度。对花样质量的影响

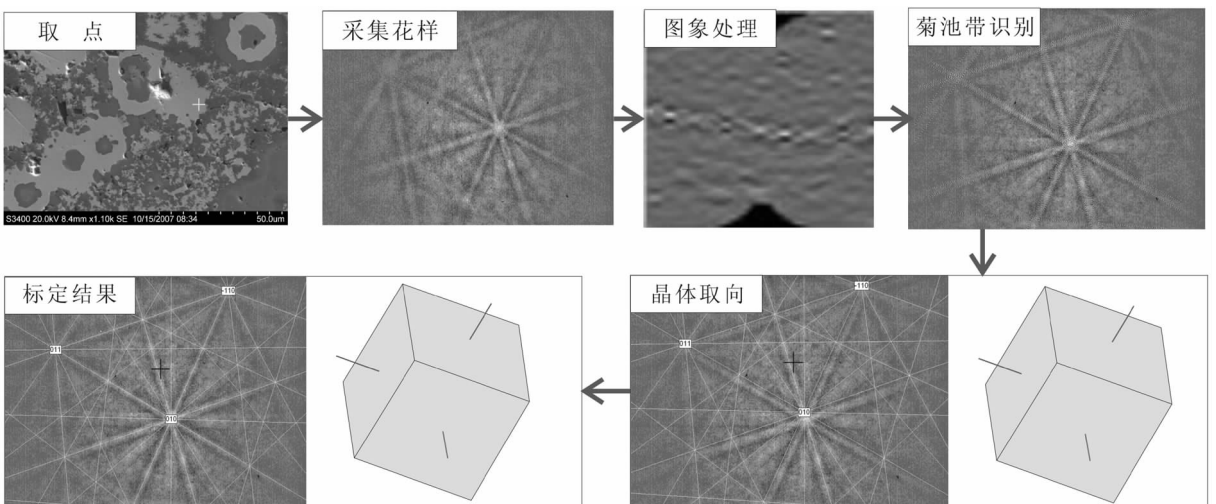


图 4 EBSD 系统的工作程序

Fig. 4 Work procedures of the EBSD system

因素包括多个方面,如样品的平整光洁度、喷镀质量与厚度、样品倾斜角度、电子显微镜参数(加速电压、真空度等)。因此需要综合调整以上参数,以获得更好的图像质量。

## (2) 数据处理

EBSD 数据包含了晶体取向等多方面的非常有价值的信息,因此,对于 EBSD 数据的处理,也就是表达和分析所获得的结果,是非常关键的一个方面。经过 EBSD 系统分析获得的数据,可以获得极图、反极图、取向成像图、取向分布函数图、取向差分布图、转轴分布图、晶粒尺寸分布图、菊池带质量图等不同的图件。依据不同的研究目的,可以获得不同的输出结果。

在实际工作中,数据输出之前还有一个十分重要的步骤,即进行必要的坐标变换。地质样品坐标系与材料样品坐标系的初始定义不同,因此需要将 EBSD 数据坐标系与样品坐标系进行适当调整和转换,以使之具有统一性。

## 5 EBSD 应用实例

配合背散射电子图像、波谱、能谱成分分析等,EBSD 可以进行精确的晶体优选与错向(微观结构分析、晶界特征分析、变形与重结晶研究)、晶粒尺寸测量、应变估算、物相鉴定等方面的研究。它克服了传统分析方法中的一些缺点,为材料、地质等研究开辟了一个全新的科学领域<sup>[1,9-10]</sup>。在岩石(矿石)组构研究中,EBSD 具有以下几个方面的优越性:①能够获取海量数据,精确地进行晶体定向与错向分析(微观结构分析、晶界特征分析、变形与重结晶研究等);②使研究极细粒物质(微米-纳米级)的定向组构成为可能<sup>[8]</sup>;③使得确定二轴晶矿物的结晶学组构更简便<sup>[12]</sup>;④为获得等轴晶系均质体矿物的结晶学组构提供了技术支撑<sup>[13-15]</sup>;⑤使得快速准确地确定金属矿物和不透明矿物结晶学组构成为现实<sup>[16]</sup>;⑥其他方面还包括矿物相鉴定、晶粒尺寸测量、亚微域内的应变估算等。下面主要介绍组构分析的几个方面的应用。

### 5.1 石英

石英由于在天然断层带中广泛出现,其组构与优选是传统文献中研究最多的一个方面。在 EBSD 分析中石英的组构分析也是最为常见的<sup>[17-18]</sup>。

图 5-a、b、c 是取自哀牢山地区的 3 种具有不同

应变历史的岩石中石英的组构图,显见早期经历多阶段变形叠加与改造的岩石中石英的组构具有显著的复杂性(图 5-a),而仅仅经历了最后一期阶段变形改造的石英脉内石英的组构十分简单(图 5-c),不同阶段演化形成的构造岩普遍具有晚期叠加变形改造形成的简单极密。这些变形叠加现象已经得到显微构造分析的证实<sup>[19]</sup>。

### 5.2 极细粒物质的组构分析

微角砾岩是拆离断层带上经常出现的一种特殊的构造岩,岩石呈极细粒状,粒度为微米或几百纳米数量级<sup>[20]</sup>。能谱分析揭示其组成成分以石英为主,含少量钾长石或斜长石。对于这种岩石的成因研究目前尚属空白领域,是机械磨碎还是极细粒物质的晶质塑性变形所致,目前尚无有效的证据,主要原因在于其极细的粒级。

EBSD 分析揭示出微角砾岩总体的组构特点为多极密分布,且无一定的分布规律(图 5-d),但是却具有晶体优选的局部性特点。总体组构中的各个极密点,往往是一系列细小颗粒集合体的组构,它们是一些较大颗粒的残斑附近具有统一或相近的定向性的细小晶体颗粒。显微构造分析表明,这些细小的晶体颗粒形成于低温条件下,细粒化过程包括早期阶段的碎裂作用及碎裂后的水解弱化过程<sup>[21]</sup>。

### 5.3 二轴晶矿物的组构分析

角闪石质岩石作为中下地壳的重要组成,在制约中下地壳岩石的物理、力学、流变学属性等方面起着十分重要的作用,因而对其深入研究得到了广泛的重视<sup>[22]</sup>。但是,由于它们属于二轴晶造岩矿物,受技术因素的制约,对其进行的组构测量与分析工作十分薄弱,而 EBSD 技术提供了十分便利的条件。图 5-e 和 5-f 是对于点苍山地区低角闪岩相条件下糜棱岩化斜长角闪岩中角闪石晶体的组构测量结果,发现晶体的<001>轴、(100)双晶面与岩石的叶理、线理具有强烈的平行性,结合显微构造分析,可以认为糜棱岩化过程中<001>(100)双晶作用起着十分重要的作用。

### 5.4 金属硫化物的组构分析

对于金属硫化物的研究,扫描电子显微镜与 EBSD 技术应该说有很大的优越性,主要原因在于背散射电子信号数目随原子序数的增加而增加,高原子序数样品的电子穿透区小,背散射信号强,表现为衍射细节更多、花样清晰度更高。

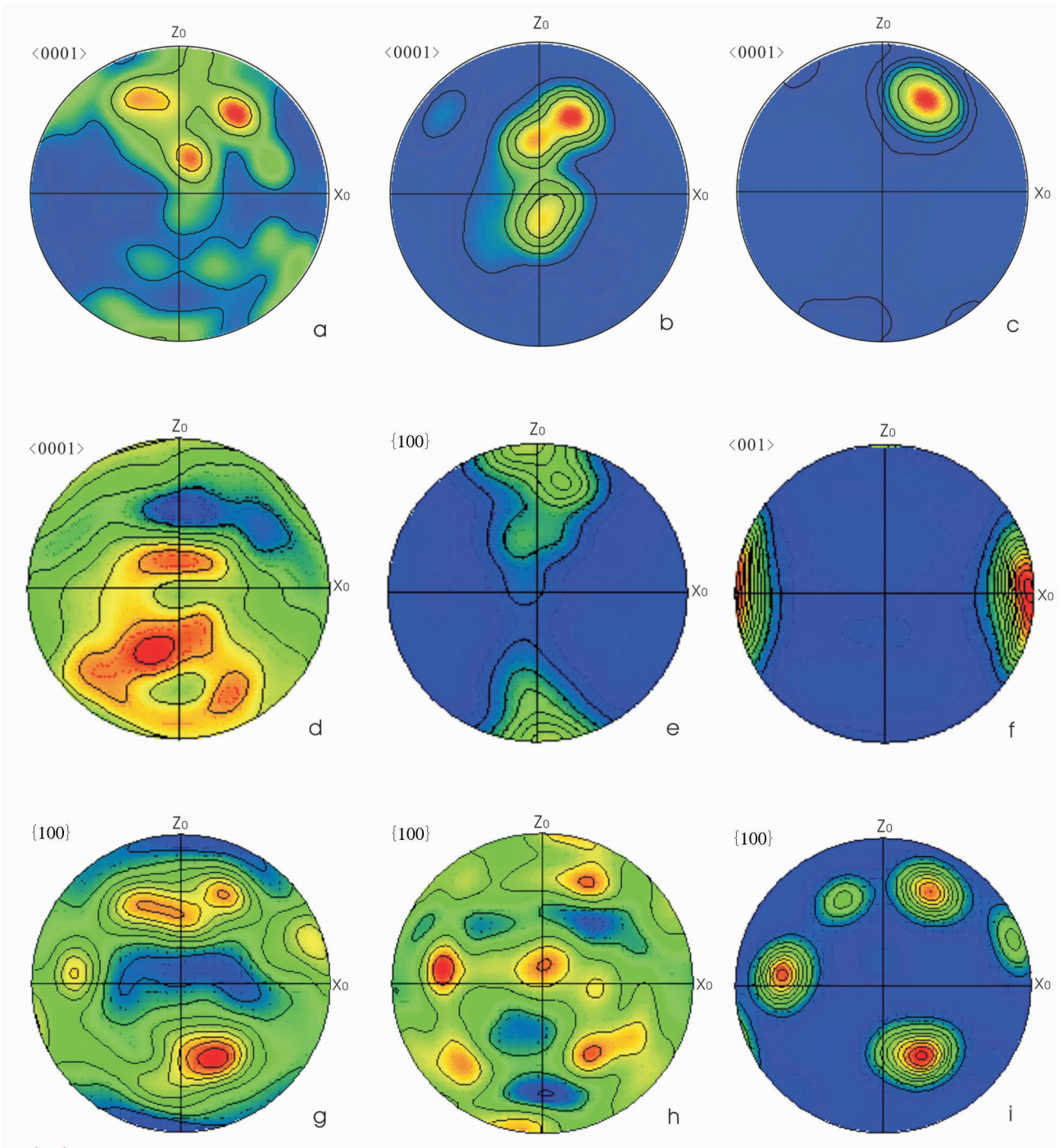


图 5 几种矿物的 EBSD 组构图

Fig. 5 EBSD fabric diagrams of several minerals

a-c—具有不同变形特点的石英的组构图:a—哀牢山群片麻岩;b—哀牢山 L 型糜棱岩;c—侵入 L 型糜棱岩的石英脉;d—微角砾岩内的石英;e—f—点苍山角闪质糜棱岩中的角闪石;  
g-i—金顶铅锌矿床灰岩角砾岩型矿石内的黄铁矿(g)、闪锌矿(h)和方铅矿(i)



在对低绿片岩相条件下天然变形黄铁矿矿石开展前置背散射(OC)结构分析与EBSD研究时, Freitag等<sup>[16]</sup>发现, 普通光学显微镜下所见的简单组构并不能真正反映黄铁矿的变形历史, 并且黄铁矿可以在比前人广泛接受的温度和压力/应变速率更低的条件下发生以位错蠕变为主的塑性变形。

对于热液和沉积成因的硫化物矿床的晶体组构分析, 有助于阐释矿床的就位与成因机制。图5-g, h, i是采自云南金顶铅锌矿床中的灰岩角砾岩型矿石中黄铁矿、闪锌矿和方铅矿的组构分析结果, 显见3种不同矿物之间的组构有很大的相似性, 表现是3种矿物的晶体颗粒均以2个方向的晶体为主。各自的(100)组构图上有2组极密存在, 其中一组为主极密, 另外一组为次极密, 以方铅矿的组构表现最为显著(图5-i)。

## 6 结论与分析

从下面的比较可以清楚地看出EBSD技术与常规的传统费氏台技术之间的差异<sup>[23]</sup>(表1)。传统的分析技术总体上有几方面的缺点: ①显微构造与结晶学之间没有直接联系起来; ②不能从测得的参数中得到单个晶粒的取向; ③不能得到包括晶体连接界面等在内的关于晶体空间要素的大量信息; ④不能区分成分相同(或相似)但有不同结晶学的、共存于显微组织中的相。

当然, EBSD分析仍然有其局限性。首先, 它对于制样的要求非常高, 样品抛光要非常精细。同时, 地质样品多为非导电样品, 需要在样品表面喷碳或镀金, 样品厚度仅为1~3 nm, 如何把握这种既均匀又很薄的喷镀技术, 是一个有待进一步解决的重要问题。问题的另一方面在于地质样品的粒度与不均匀性。由于扫描电子显微镜分辨率很高, 且线扫描与面扫描时是均匀取点获得统计规律的, 因此显示出其在研究细粒或极细粒物质时的优越性, 比如在材料科学中, 晶体颗粒的粒度常常是微米或纳米级。但地质样品颗粒的粒度常常是毫米级, 所以线扫描或面扫描获得的结果往往难以统计均匀, 只要视域内有一个大粒径的颗粒存在, 扫描频率致使其数据占有量很高, 因此在极点图或反极图上往往掩盖了细

表1 EBSD与传统光学显微镜在组构分析时的特点对比

Table 1 Comparison of the features of EBSD and the traditional optical microscope in the analysis of fabrics

对比项	光学显微镜	EBSD
倍数	低	高
定向参数	单轴定向(光轴)	三维定向(晶轴、晶面等)
分辨率	20~30 μm	约20nm
晶向敏感度	高角度边界(>10°)	所有低角度边界
低角度显微结构图	一般	好
定量晶向分布	差, 困难	好, 容易
综合结构图像	差	好
结构图像表示	费时, 欠精确	快速精确

小的颗粒, 而使得测量失去统计意义。其解决方法之一, 就是采用互动模式获得各个代表性颗粒或点的定向性数据, 并进而开展统计分析。

另外, 系统的结晶学知识是EBSD技术分析、开发和应用必备的基础知识, 需要结合晶体学知识分析和判别结果的可靠性。

作为一种崭新的技术方法, EBSD的应用还存在着一些难点, 但依然可以得出的结论是: EBSD是扫描电子显微镜应用里最具挑战性和令人激动的一项技术, 它改变了传统的显微构造和晶体学分析的研究方法, 在很多方面获得了长足的进步。它把显微构造与晶格结构(或结晶学)直接联系起来, 为准确、快速地测定研究样品的晶格方位、颗粒边界、定向与错向、晶体形态、晶体颗粒属性等提供了强有力的工具。在获取超微尺度上(微米或纳米尺度)的晶体优选及界面属性在内的晶体空间要素信息等方面, 克服了传统分析方法中的一些缺陷。总之, EBSD技术的发展, 让我们能够更精细地对比研究矿物和岩石的显微构造与组构, 为岩石显微构造与流变学分析开辟了一个全新的领域, 使得构造地质学的显微构造与组构分析步入一个新的阶段。

## 参考文献:

- [1]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.
- [2]徐海军, 金淑燕, 郑伯让. 岩石组构学研究的最新技术——电子背散射衍射(EBSD)[J]. 现代地质, 2007, 21(2): 213-225.
- [3]Turner F J, Weiss L E. Structural Analysis of Metamorphic Tectonites [M]. New York: McGraw Hill Book Company, 1963.
- [4]池际尚. 构造岩组分析入门[C]//岩组分析方法文集. 北京: 地质出版社, 1977.

- [5]姜光熹.X 射线岩组学[M].北京:地质出版社,1997.
- [6]Zaefferer S. The electron backscatter diffraction technique: A powerful tool to study microstructures by SEM [J]. JEOL News, 2004, 39 (1): 10-15.
- [7]Nowell M M, Wright S I. Phase differentiation via combined EBSD and XEDS [J]. Journal of Microscopy, 2005, 213: 296-305.
- [8]杨平.电子背散射衍射技术及其应用[M].北京:冶金工业出版社, 2007.
- [9]Schwartz A J, Kumar M, Adams B L. Electron Backscatter Diffraction in Materials Science[M]. New York: Kluwer Academic/Plenum Publishers, 2000.
- [10]Prior D J, Boyle A P, Brenker F E, 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.
- [11]牛津仪器.电子背散射衍射系统(EBSD)[EB/OL].[2008-06-29]. <http://www.oichina.cn/>
- [12]Prior D J, Wheeler J. Feldspar fabrics in a greenschist facies albite-rich mylonite from electron backscatter diffraction [J]. Tectonophysics, 1999, 303: 29-49.
- [13]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.
- [14]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.
- [15]Mainprice D, Bascou J, Cordier P, et al. Crystal preferred orientations of garnet: comparison between numerical simulations and electron back-scattered diffraction (EBSD) measurements in naturally deformed eclogites [J]. Journal of Structural Geology, 2004, 26: 2089-2102.
- [16]Freitag K, Boyle A P, Nelson E, et al. The use of electron backscatter diffraction and orientation contrast imaging as tools for sulphide textural studies: example from the Greens Creek deposit (Alaska)[J]. Mineralium Deposita, 2004, 39: 103-113.
- [17]Heidelbach F, Kunze K, Wenk H-R. Texture analysis of a recrystallized quartzite using electron diffraction in the scanning electron microscope[J]. Journal of Structural Geology, 2000, 22: 91-104.
- [18]Lloyd G E. Grain boundary contact effects during faulting of quartzite: an SEM/EBSD analysis[J]. Journal of Structural Geology, 2000, 22: 1675-1693.
- [19]张进江,钟大赉,桑海清,等.哀牢山-红河构造带古新世以来多期活动的构造和年代学证据[J].2006,41(2):291-310.
- [20]Lister G S, Davis G A. The origin of metamorphic core complexes and detachment faults formed during Tertiary continental extension in the northern Colorado River region, U.S.A[J]. Journal of Structural Geology, 1989, 11(1/2): 65-94.
- [21]Liu J L, Weber K, Walter J. Fluid-enhanced low-temperature plasticity of calcite marble: Microstructures and mechanisms[J]. Geology, 2002, 30 (9): 787-790.
- [22]Azipiroz M D, Lloyd G E, Ferna'ndez C. Development of lattice preferred orientation in clinoamphiboles deformed under low-pressure metamorphic conditions: A SEM/EBSD study of metabasites from the Aracena metamorphic belt (SW Spain)[J]. Journal of Structural Geology, 2007, 29 (4): 629-645.
- [23]Trimby P W, Prior D J. Microstructural imaging techniques: A comparison between light and scanning electron microscopy [J]. Tectonophysics, 1999, 303:71-81.