第45卷 第1期 岩 石 矿 物 学 杂 志 Vol. 45, No. 1: 157~179
2026年1月 ACTA PETROLOGICA ET MINERALOGICA Jan., 2026

·综述与进展·

Doi: 10.20086/j.cnki.yskw.2026.3145

电子背散射衍射（EBSD）技术在地质学研究中的应用进展

张岩岩[1],赵中宝[1,2],梁凤华[1],杜瑾雪[3],熊发挥[1,2],李海兵[1,2],马绪宣[1,2],孙丽静[4]
(1. 中国地质科学院地质研究所, 自然资源部大陆动力学重点实验室, 北京 100037; 2. 江苏东海大陆深孔地壳活动国家野外科学观测研究站, 江苏 东海 222300; 3. 中国地质大学（北京）地球科学与资源学院, 北京 100083; 4. 中国地质调查局地学文献中心, 北京 100083)

摘 要: 电子背散射衍射（EBSD）技术是构造地质学的新兴支柱测试技术之一,尤其在显微构造和流变学研究方向。近20年来,该技术取得了长足的进步,样品扫描速度成倍增加,识别精度大幅度提高,数据处理方法也日益丰富,从而使其在地质样品微观结构表征方面的能力不断增强,在地质学研究中的应用也更加深入广泛。传统的EBSD技术可以获得晶粒尺寸、晶体取向和晶界分布特征等晶体的基本信息,伴随高分辨率EBSD技术的快速发展,其广泛地应用于识别晶体粒内应变,并能高效、大规模地获取其他关键参数,例如菊池条带衬度等。EBSD数据的三维可视化表达及其与其他研究手段采集数据的联合使用,进一步拓展了该技术在地质学中的应用前景。自然资源部大陆动力学重点实验室的EBSD自开放运行至今的20年时间里,积累了丰富的测试经验、样品处理技巧和数据分析方法等。本文以此为基础,结合前人的研究成果,系统地梳理了EBSD的测试原理、技术发展、样品制备技术、数据采集和处理方法等方面的最新进展,并通过列举近年来EBSD技术在地质学研究中的一些典型案例,更直观地介绍了EBSD技术的应用进展,不仅构建了多尺度构造解析的方法学体系,更为揭示大陆流变分层、深部变形机制及构造演化过程提供了不可替代的实验证据。

关键词: EBSD技术; 显微构造分析; 地质学研究
中图分类号: P575 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6524(2026)01-0157-23

Advances in the application of electron backscatter diffraction (EBSD) technology in geological research

ZHANG Yan-yan[1], ZHAO Zhong-bao[1,2], LIANG Feng-hua[1], DU Jin-xue[3], XIONG Fa-hui[1,2], LI Hai-bing[1,2], MA Xu-xuan[1,2] and SUN Li-jing[4]
(1. Key Laboratory of Continental Dynamics of Ministry of Natural Resources, Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2. Jiangsu Donghai Continental Deep Hole Crustal Activity National Observation and Research Station, Donghai 222300, China; 3. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 4. Geoscience Documentation Center, China Geological Survey, Beijing 100083, China)

Abstract: Electron Backscatter Diffraction (EBSD) technology has emerged as one of the pivotal analytical tech-

收稿日期: 2023-11-06; **接受日期:** 2025-11-02; **编辑:** 郝艳丽
基金项目: 中国地质科学院自然资源部深地科学与探测技术重点实验室基本科研业务费项目(JB2314);国家自然科学基金项目(41902211);中国地质调查项目(DD20243482,DD20221630)
作者简介: 张岩岩(1998-),女,博士研究生,地质学专业,E-mail:yanyanzhang21@163.com;通讯作者:赵中宝(1985-),男,博士,副研究员,区域构造解析及显微变形研究方向,E-mail:zhaozhb04@163.com;梁凤华(1978-),女,博士,副研究员,地幔岩变质与变形研究方向,E-mail:liangfenghua1026@gmail.com。

niques in structural geology, particularly in the fields of microstructural analysis and rheological studies. Over the past two decades, this technology has made significant advancements, with sample scanning speeds multiplying, identification accuracy greatly improving, and data processing methods becoming increasingly diverse. Consequently, EBSD's capability for microstructural analyses of geological samples has been increasingly enhanced, and its application in geological research has become more profound and widespread. Traditional EBSD technology can provide basic crystallographic information such as grain size, crystal orientation, and grain boundary distribution. With the rapid development of high-resolution EBSD technology, it has been widely applied to identify intragranular strain in crystals and to efficiently obtain additional key parameters on a large scale, such as Kikuchi band contrast and so on. The realization of three-dimensional expression of EBSD data, along with the integration of data together with other analyses methods, has significantly expanded the application prospects of this technology in geological studies. Since its establishment, the EBSD facility at the Key Laboratory of Continental Dynamics of Ministry of Natural Resources, has accumulated extensive testing experience, sample preparation techniques, and data processing methods over more than two decades. Based on this foundation, combined with previous research, this paper systematically reviews the latest advancements in the testing principles, technical developments, sample preparation techniques, data acquisition, and processing methods of EBSD. In addition, it highlights several typical cases of EBSD applications in geological research in recent years to more intuitively showcase the advancement of EBSD technology. It not only constructed a methodological system for multi-scale structural analysis, but also provided crucial experimental evidence for revealing the stratification of continental rheology, the mechanism of deep deformation and the process of tectonic evolution.

Key words: EBSD technology; microstructural analysis; geological research

Fund support: Basic Scientific Research Expenses of the Key Laboratory of Deep Earth Science and Exploration Technology, Ministry of Natural Resources, Chinese Academy of Geological Sciences (JB2314); National Natural Science Foundation of China (41902211); China Geological Survey Project (DD20243482, DD20221630)

岩石的显微变形特征反映了变形温度、围岩压力、差应力、应变速率和流体环境等变形条件,是研究岩石经历的热动力学过程不可或缺的信息(Passchie and Trouw, 2005)。岩石组构分析是显微构造地质学中显微变形分析非常重要的方面,特指一种或多种矿物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,包括岩石中矿物相的组成和内部成分变化、矿物相的形态和空间展布、矿物颗粒的结晶学方位和晶内结构、矿物颗粒或亚颗粒边界的几何形态和结构等诸多微观现象(胡玲等, 2009)。矿物沿特定方向发生位错蠕变可形成晶格优选定向,即组构,而当矿物晶体发生择优取向时,会导致其性能(力学、物理、化学性能等)的各向异性。因此,岩石组构分析对于探讨岩石物理学性质的形成、阐明矿物变形机制以及揭示岩石乃至行星岩石圈变形过程等方面具有非常重要的作用(Passchier and Trouw, 2005)。岩石中矿物有两种优选取向:形态优选方位(shape preferred orientation,简称SPO),描述矿物颗粒形态的取向分布特征;结晶学优选方位(crystal Preferred orientation,简称CPO),描述矿物晶格的取向分布特征(胡玲等, 2009)。通过对矿物CPO的测量,可以了解矿物的变形机制,厘定主控矿物变形的位错滑移系,并识别矿物的双晶等(Barrie *et al.*, 2008)。矿物变形或者定向生长造成岩石中矿物的定向性排列,也会引起岩石物理性质的各向异性,例如导致岩石地震波各向异性(Halfpenny *et al.*, 2012; Boneh *et al.*, 2015)。

电子背散射衍射(electron backscattered diffraction, EBSD)技术目前已成为获取岩石或矿物结晶学优选方位的最主要方法(曹淑云等, 2006; 刘俊来等, 2008; 陈柏林等, 2014)。该技术基于扫描电子显微镜,利用EBSD探头,收集不同晶体结构和方位的电子背散射衍射菊池花样,以此分析晶体的结晶取向、优选方位、晶粒尺寸、晶界特征和晶体应变等信息,也可以与能谱探头相结合,同时获取衍射花样和X射线谱图,联合分析结构和成分,进行相鉴定。

EBSD 技术在理论上可以对任意对称系的晶体开展晶格优选方位和晶体结构研究（Chen *et al.*, 2012; Sneddon *et al.*, 2016; 张青等, 2021），包括不透明矿物（Barrie *et al.*, 2008），既可以获取亚微米级空间分辨率和 0.05°±角分辨率的精细晶体结构数据（Wilkinson *et al.*, 2006, 2010），又可以开展大面积扫描，获取岩石整体组构数据（徐海军等, 2007; 黄学猛等, 2016），因而成为连接从 10^{-8} cm 显微结构到 10^{8} cm 宏观构造的重要测试技术手段（许志琴等, 2009）。

随着 EBSD 技术的迅速发展，其在地质学领域的应用也越来越广泛与深入（Dutta *et al.*, 2022），并促进了显微构造地质学、流变学等的发展（Zaefferer, 2004; 徐海军等, 2007; Prior *et al.*, 2009; Haghdadi *et al.*, 2020; You *et al.*, 2020）。在过去 20 年里，已有不少中国学者对 EBSD 的工作原理、在组构分析中的应用以及在地质学中的应用等做过较系统的介绍（曹淑云等, 2006; 徐海军等, 2007; 刘俊来等, 2008; 许志琴等, 2009; 黄学猛等, 2016），然而随着技术的持续更新，EBSD 的应用深度和广度在近年又有了长足的进展。自然资源部大陆动力学重点实验室的 EBSD 自开放运行至今的 20 年时间里，积累了大量测试经验、样品处理技巧和数据处理方法等，且在近期引进了最新一代 EBSD Symmtry S3 探头，又获取了更精细更深入的数据和处理方法。

为了使学者能够更全面地了解 EBSD 技术及其最新进展，本文将以我们多年的积累为基础，结合前人已有的研究应用成果，系统对 EBSD 的测试原理、新技术发展、样品制备技巧及数据采集和处理方法等进行梳理，直观地表述 EBSD 技术的应用进展和前景。更重要的是，本文将系统梳理过去数年中 EBSD 应用的具体场景，以及该技术是如何从微观到宏观服务于地质学研究的。

1　EBSD 技术简介及方法新进展

1.1　EBSD 技术的基本原理及系统构成

EBSD 工作系统由扫描电子显微镜（scanning electron microscope, SEM）、电子背散射衍射探头和终端图像处理设备等构成（图 1）。SEM 发射稳定高能电子束并承载其他工作探头。EBSD 探头为接收和处理背散射电子衍射信号的核心部件，传统结构含高灵敏度的前端荧光屏（多为磷光屏）和后部电荷耦合（charge coupled device, CCD）数字相机。目前，牛津仪器多采用 CMOS（complementary metal oxide semiconductor）传感器技术，其新式数字转换技术采集处理速度约为 400~4 500 像素点/秒，兼顾速度与花样分辨率。终端设备负责数据转换、处理和分析。

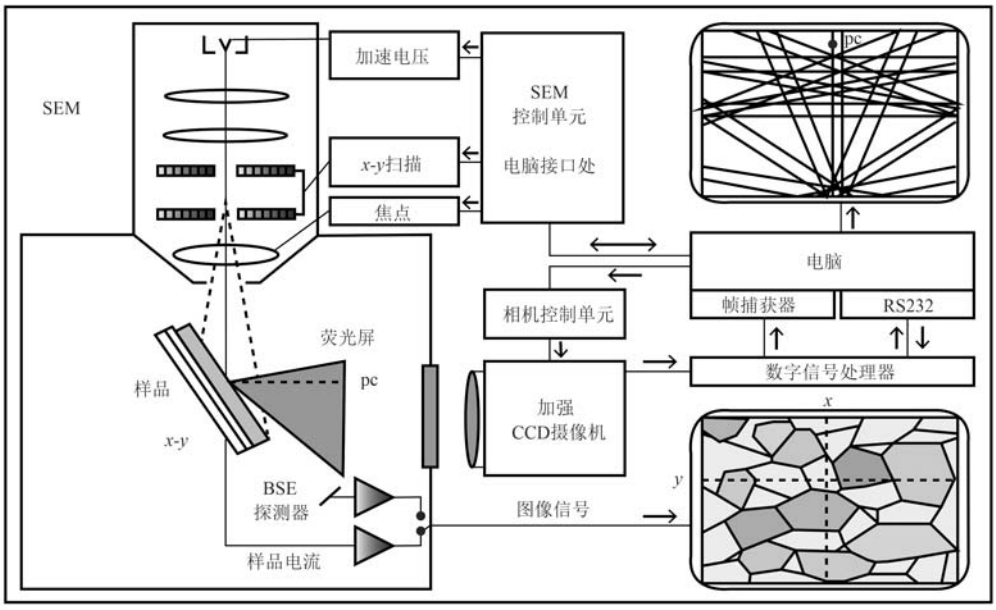

图 1　EBSD 仪器工作原理图解

Fig. 1　EBSD instrument working principle diagram

工作时,精细抛光样品通常以 70°高倾角固定于 SEM 样品舱。高能电子束轰击样品表面,与原子及外层电子发生相互作用激发二次电子、背散射电子、特征 X 射线、连续 X 射线及阴极发光等信号。其中,背散射电子(BSE)源于入射电子束与原子核的散射。当散射电子方向满足布拉格方程时即发生衍射。布拉格衍射方程为:$n\lambda = 2d\sin\theta$,其中 n 为整数,λ 为电子束波长,d 为衍射面的间距(晶面间距),θ 为电子束在晶面上的入射角,2θ 即为入射电子束与衍射电子束之间的夹角。

三维空间中满足布拉格方程的电子衍射形成一对顶角近 180°的大角衍射圆锥,在荧光屏上截取近平行直线(分别对应晶体的 hkl 晶面和 $\overline{hkl}$ 晶面),即菊池线(Kikuchi lines)。相邻菊池线间更亮的条带状区域为菊池条带(Kikuchi band)。不同晶面形成宽度不一的菊池条带,在磷光屏上构成该晶体的背散射衍射花样图(electron backscatter diffraction pattern, EBSP)(图 2)。

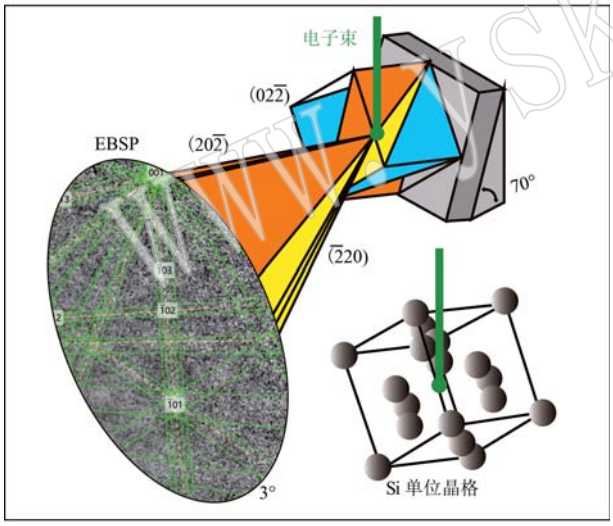

图 2 电子背散射衍射花样(EBSP)原理图

Fig. 2 Schematic diagram of electron backscatter diffraction pattern (EBSP)

整个衍射花样图由多对菊池条带构成,两条带相交对应一个区轴,反映了晶体原子面间角度关系和对称性(杨平, 2007)(图 2)。通过与数据库标准 EBSP 比对,可反演样品晶体分布及三维取向信息(Schwartz *et al.*, 2009)。通过构建极图、反极图(inverse pole figure, IPF)等图件可获得矿物结晶学优选方位、晶粒取向差、晶界特征、位错密度及晶内应变特征等信息(Carneiro and Simões, 2020)。

1.2 EBSD 测试技术的进展

1.2.1 技术性能提升与新型模式发展

EBSD 应用日益广泛,其数据采集与处理能力持续进步,主要体现在高角分辨率电子背散射衍射(HR-EBSD)、透射 EBSD(TKD)、电子通道衬度成像(ECCI)及三维 EBSD 技术等,以及 EBSD 在相识别、取向分析等多方面的应用。

衍射带的检测效率是 EBSD 分析的基础,直接影响数据质量。Thomsen 等(2013)提出将衍射带视为双曲线并优化修正的新模式,显著提高了常规 EBSD 的角分辨率,且不影响速度和实用性。传统 EBSD 系统的空间分辨率通常为 25~100 nm,角分辨率通常在 0.5°~0.7°之间(Humphreys, 2001)。Wilkinson 等(2006)引入的高分辨率 EBSD(HR-EBSD)技术,通过互相关联的图像分析精确比对两组菊池衍射图,更精确地测量了晶面间角度的变化,使测量精度提高了两个数量级,获得了更高的 EBSD 空间分辨率。目前装配在场发射扫描电镜(field emission SEM, FE-SEM)上的 EBSD 探头,空间分辨率已可达到<10 nm,角分辨率达 0.06°,有效解决了传统 EBSD 难以区分应变造成的微小亚晶结构及"伪对称性"导致的取向误判等问题。

透射 EBSD,也叫透射菊池衍射(transmission Kikuchi diffraction, TKD)(Keller and Geiss, 2012; Trimby, 2012; Suzuki, 2013),是研究纳米结构的理想技术。传统 EBSD 的分辨率受限于花样产生源的体积(25~100 nm),难以准确地测量真正的纳米结构材料(平均晶粒尺寸小于 100 nm),而 TKD 技术空间分辨率可优于 10 nm。样品厚度是关键,最好使用 50~150 nm 范围内相对较薄的样品,可用透射电子显微镜(TEM)样品的标准制样方法制备。使用 TKD 的 EBSD 与传统 EBSD 的样品和探头的空间几何位置有差异,导致采集到的 TKD 花样存在一些问题,例如花样底部衍射带宽度异常和强度不对称等,会影响检测准确度,进而导致命中率下降,取向精度降低。为解决此问题,在后处理软件中加入了创新性的 TKD 优化模式,可以准确解析 TKD 花样,获得更准确的数据(www.ebsd.cn 网站)。

另外,三维 EBSD(3D EBSD)可揭示样品内部三维微观结构信息。常规的 EBSD 仅显示样品的表面信息,想要获取样品中的三维晶粒组织、晶粒尺寸和界面等信息,可通过两种方式:对于大尺度样品可以采用机械切片技术,在样品不同深度处暴露新

的表面进行分析；对于小尺度样品，需要结合使用扫描电镜和聚焦离子束（FIB-SEM），用离子束逐层切割，随即逐层进行 EBSD 扫描测试。要获取准确的信息，样品的放置需适合离子束切割，即离子束与样品表面平行，且便于 EBSD 数据的采集。通过重复采集 EBSD 数据和暴露新的表面这个过程，可以在分析区域内建立三维的微观组织显示图。要获得高的分辨率，需要采集足够数量切片的数据。通过 3D EBSD 技术，可以获得三维取向图，经过重建和处理后，可以在 *X*、*Y* 和 *Z* 平面上展示截面，从而突出显示选定的晶粒。Bachmann 等（2011）基于 2D 或 3D 测量域的 Voronoi 分解，实现了快速的 3D EBSD 数据的晶粒结构重建。

1.2.2　EBSD 技术应用功能拓展与深化

高角分辨率电子背散射衍射（HR-EBSD）技术已广泛应用于地质学研究（Wallis *et al.*，2016），特别是在变形分析领域（Britton and Hickey，2018）。晶体滑移过程中位错的存在、移动和晶体旋转等，会影响遵循布拉格定律的晶面间距的变化，进而导致菊池衍射带的移动，传统 EBSD 对此不敏感（Schwartz *et al.*，2009；Wilkinson and Britton，2012），而应用 HR-EBSD 可定量测量晶体内部应变数据，获得更精确的晶体平均取向差图（kernel average map，KAM）（图 3）（Wilkinson *et al.*，2014）。电子通道衬度成像用于研究岩石和矿物中的晶体取向和缺陷，可以深入了解地质过程和岩石形成机制。

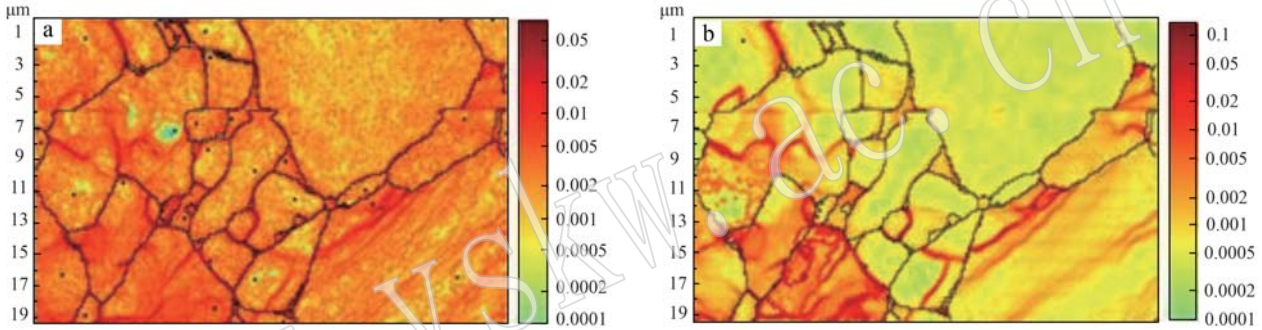

图 3　晶体平均取向差图（修改自 Dingley *et al.*，2018）

Fig. 3　Kernel average maps（KAM）（modified from Dingley *et al.*，2018）

a—标准电子背散射衍射；b—高角分辨率电子背散射衍射

a—standard EBSD；b—HR-EBSD

相识别是 EBSD 技术的另一重要应用（Chen *et al.*，2012；Zhao *et al.*，2020）。通过采集能谱（EDS）和电子背散射衍射（EBSD），结合矿物化学数据进行相识别。新的硬件安装结构和软件处理系统使得这项技术成为可能。EDS 探头和 EBSD 探头在扫描电镜样品舱内以合适的几何位置安装。当从一个点采集的 EBSD 花样可能来自多个相的时候，同时采集 EDS 数据并参考谱的相关性就可以将解析结果排序和加权处理，提高相似相的区分准确性。

2　地质学 EBSD 测试样品的制备

2.1　定向样品采集

EBSD 测试通常是测定矿物结晶学优选方位，样品的准备需从野外定向采集开始。在地质应用中，采集野外手标本需要标注运动学坐标系，即 *X* 方向代表拉伸线理方向，*XY* 面代表面理面，*Z* 方向代表垂直面理方向（图 4）（Dutta *et al.*，2022）。采集手标本样品应标明构造定向或自然定向，室内磨制薄片定向切 *XZ* 面，以显示最大拉伸应变及剪切方向。

2.2　样品平整表面制备

EBSD 数据的质量由衍射花样的质量决定，因信号来源很浅，其质量很大程度上取决于样品的表面质量（Nowell *et al.*，2005；Schwartz *et al.*，2009；Chen *et al.*，2011）。绝大多数地质样品呈矿物颗粒混杂而成的多相特征，使得样品表面制备难度增大。当入射电子束作用于样品，会产生一个形似水滴状的信号源，其中背散射电子信号来自<50 nm（尤其是表面 20 nm 范围内）的样品表面层，且原子序数越大，背散射电子的来源越靠近样品表面；样品的倾斜角度越大，背散射电子的来源也越靠近样品表面（通常需要将样品倾斜 70°）。不平整表面会产生死角，阻碍背散射电子逃逸形成衍射花样，因此对于 EBSD 测试，细致的样品制备工作，是获取高质量真

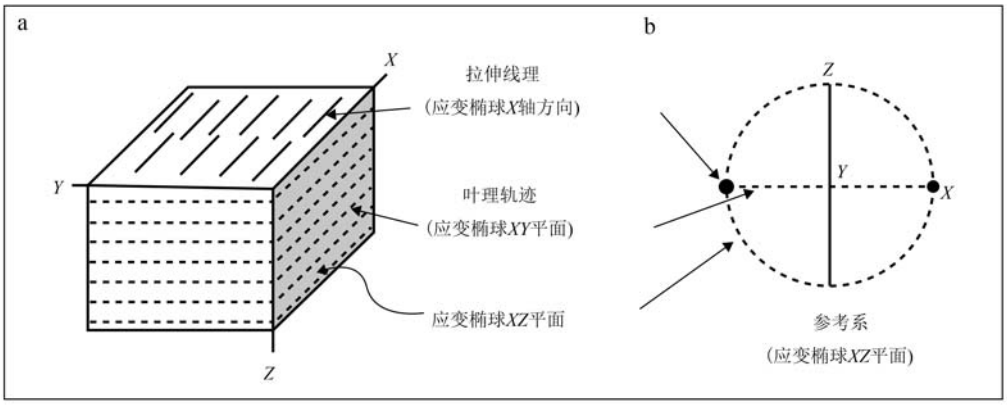

图4 定向样品方位示意图

Fig. 4 Directional sample orientation diagram

实EBSD数据的首要关键因素。

在EBSD测试前通常要进行精抛光,可以去除制样过程中产生的变形和划痕,获得高质量的反射表面。常用的精抛光方法包括机械抛光、电解抛光和离子抛光(Chen *et al.*, 2012)。地质样品多采用机械抛光(由具有不同回弹性的抛光布配合不同磨料实现)。为获取最佳的样品表面进行测试,一般需要根据样品的材料性质和表面情况选择合适的抛光磨料、抛光布、抛光参数等。通常先用已知最硬的磨料——金刚石,实现对初始样品粗糙表面的高效去除,可根据样品的表面粗糙情况选择不同粒度的金刚石抛光液,之后再根据情况选择更小粒度(如0.05 μm、0.02 μm等)的氧化铝或氧化硅抛光液。抛光布需根据情况适当选择,硬抛光布可以得到更平的表面,但可能会留下样品表面的抛光损伤和划伤;软抛光布允许最大的冲击吸收性,能够引入很少量损伤的温和抛光,但其磨料会在不同区域有不同的磨削速率,易引发"浮凸",因此需控制抛光时长并选择适当的抛光参数,如旋转速度、方向、压力等,可以改善抛光效率和质量。此外,抛光全程均需关注抛光磨料的情况和抛光布的清洁,不当的操作或混入杂质都可能造成已抛光表面的损毁。

最后需要振动抛光,在机械研磨和精抛光过程中,由于转盘的同方向旋转易在样品表面遗留少量形变,可能影响测试结果的准确性,振动抛光可以有效去除这种影响,其原理是每分钟7 200个周期的水平方向振动,获得更少的变形和更平整的表面。

2.3 提升样品导电性

除了良好的样品表面之外,导电性也是影响EBSD衍射花样质量的重要因素之一。地质样品多数导电性较差易致电荷积累,严重影响衍射花样的质量,因此实验前和过程中采取有效措施增强导电性也非常重要。常用的方法包括确保表面抛光良好,测试前在区域外围进行对中聚焦,减少测试区域样品的倾斜角度(<70°),用导电胶或金属带将样品连接到样品台。高真空下快速扫描使电子束不能在同一个区域停留太久,若长时间扫描需选择在低真空下进行,并使用水蒸气进行导电。目前常用的方法是对地质样品表面进行纳米导电镀膜,其要点是保证镀膜均匀且很薄,范围在3~5 nm,如果太厚,会降低衍射花样,如果太薄,就没有足够的导电材料以消除放电。碳膜是理想镀膜,其原子质量较小,对花样的干扰较小,可以采用溅射或蒸镀的方式,使用能够精确控制镀膜厚度至纳米级的镀膜仪在样品上镀碳膜。

3 EBSD数据的采集及分析处理

3.1 EBSD数据的采集

数据采集方式包括自动扫描(电子束移动或样品台移动)和手动采点。电子束移动扫描,即扫描过程中电子束移动,样品台不动,这种扫描方式操作简单、速度快,但通常情况下工作区域范围较小。样品台移动扫描则是电子束不动,样品台移动,这种扫描方式可以进行大面积扫描。随着现在EBSD检测效率的大幅提高,对样品的大面积扫描效果也越来越好。现多采用样品台移动扫描方式。自动扫描一方面可以快速表征大量晶体信息,进行矿物结晶优选方位的统计,另一方面较为方便地呈现出样品的总体结构分布。但自动扫描也会受局限,例如采集一幅包含残斑晶的重结晶样品分布图时,扫描区域

内的残斑晶和重结晶颗粒信息将同时被收集，导致难以区分早期优选方位和晚期优选方位。如果其中部分残斑晶的颗粒很大，将不可避免地被多次采集，颗粒越大，统计点越多，造成人为的统计加密，导致总体极密散乱（Kilian and Heilbronner, 2017），不能准确地表征不同期次的结晶信息。因此，对于非均匀分布的样品需要具有针对性地进行处理，例如 Cross 等（2017a）建议晶轴组构数据应按颗粒粒度分别处理，并依据粒内形变量区分可能残斑晶和重结晶颗粒（图 5）。与自动扫描对应的是手动采点，也称互动分析，即手动标定每个选点上晶体颗粒的晶体取向参数。这种采集方法对于需要特别区分大小颗粒混合的样品分析具有重要意义，可以获得更为准确的晶体颗粒优选性统计。但由于实际操作中速度慢而不适合大面积分析，而且需要注意重结晶颗粒和小颗粒残斑晶如何进行有效区分等问题。

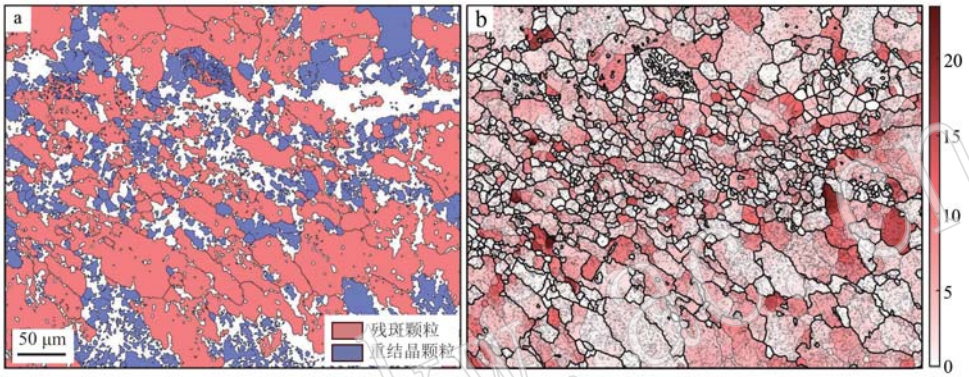

图 5　石英颗粒 EBSD 结果分析图

Fig. 5　EBSD result analysis diagram of quartz grains

a—依据 GOS 值区分残斑颗粒和重结晶颗粒；b—颗粒取向与粒内平均取向差图

a—separate parent grains and recrystallized grains based on GOS values; b—grain orientation and kernel average map

总之，不同的采集方法各有优缺点，需要根据不同的样品情况和测试需求择优选择。随着 EBSD 探头扫描速度和精度的日益提高以及数据处理手段的精细化，小范围小步长的精准扫描能力逐渐增强，复杂样品的处理效率极大提高。

3.2　EBSD 数据的处理

经过处理后的衍射花样数据，可以获取所需的各种结果数据或图解。处理数据需先确认校准坐标系，对于定向样品尤其要注意校准拉伸线理 X 轴方向，若样品切割时有偏差可通过旋转相应角度予以调整。EBSD 的配套软件，例如 HKL 公司的 Channel 5 或者牛津仪器 AZtecCrystal 等均可进行 EBSD 数据处理，并绘制晶体取向图、极图和反极图，还可计算取向（差）分布函数（ODF）等。MTEX 是基于 Matlab 开发的一款开放且免费的工具，是现今分析晶体取向数据非常有效的多功能手段，可用来估算取向密度函数、制作可视化衍射极图、模拟极图，生成各种组构图件（Bachmann *et al.*, 2010, 2011; Mainprice, 2014; Mainprice *et al.*, 2015; Rafailov *et al.*, 2020）。

对于中高级用户，通常可以从菊池花样数据中提取信息，并在 3D 工具中进行研究，例如使用 MTEX（http://mtex-toolbox.github.io/）（Yardley *et al.*, 2015）、晶体可塑性工具（Britton *et al.*, 2010, 2013; Zhang *et al.*, 2014）或更为复杂的微观结构分析软件包 Dream3D（Robertson *et al.*, 2011）。此外，传统 EBSD 数据处理方法确定的晶格参数存在较大误差（5% ~ 20%）（Goehner and Michael, 1996; Dingley and Wright, 2009）。Dingley 和 Wright（2009）提出了一种基于 EBSD 数据重建 3D 晶体结构的方法，利用菊池线表现出的对称特性，改善原始晶胞参数的准确性。

3.3　EBSD 数据集的仿真模拟

在新矿物的研究中常常需要对未知矿物相开展工作，利用 X 射线衍射（XRD）技术只能测定矿物颗粒粒径较大（>10 μm）的未知矿物（Ali *et al.*, 2022）。对于微纳米级矿物相进行晶体参数测定需要利用透射电子显微镜（TEM），但透射电子显微镜测试样品的制备过程非常复杂，并且可能会破坏珍贵的单颗粒样品（Dinnebier and Friese, 2003），而

EBSD 技术为微纳米级晶体分析提供了新方案。

在 EBSP 图案中,数十个菊池条带表示晶格面 $(hkl)_i$ 的衍射信号,这些菊池条带相互交叉,形成数百个晶体轴 $[uvw]_m$。迹线的两个交点之间的连接定义了晶格面,与其他迹线的交点再次指示其他晶格方向,这适用于任何晶体对称性、取向或衍射源位置(投影中心)(图 6)。通过精确测量其间的相应平面间距和角度,再利用方程来求解晶格参数和晶体取向(Li and Han, 2015)。依据这些基本原理,基于 EBSD 技术开发的程序为未知相的布拉维晶格的晶体学表征提供了可靠的工具(Han 等 2018)。此外,EBSD 技术针对低对称性的晶胞难以准确测定,Han 等(2018)利用对菊池线拟合的新方法提高了该技术在完全未知、低对称性布拉维晶胞的晶格常数方面的准确性,结果表明,在理想条件下(即低噪声 EBSD 模式和已知投影中心),晶胞常数(a、b、c)的相对误差小于 0.3%,轴比的相对误差小于 0.3%,轴间角(α、β、γ)和晶体取向的绝对误差约为 0.1°。这些手段促使 EBSD 数据集仿真模拟能够获得更为精确的晶体参数,显著拓展 EBSD 技术的应用范围。

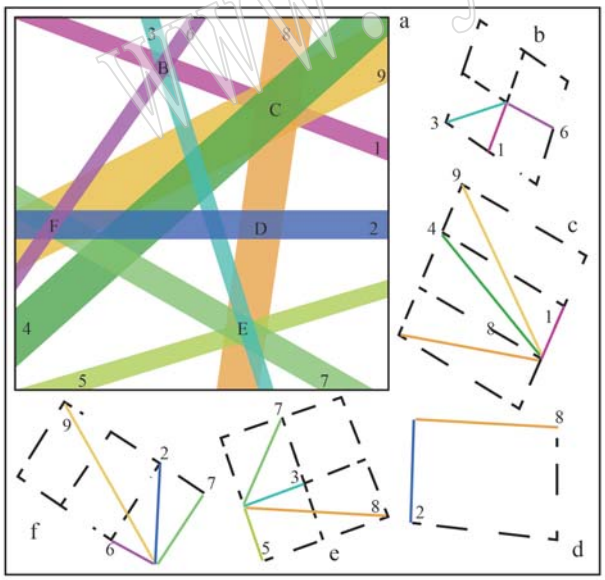

图 6 EBSP 菊池原理示意图

Fig. 6 Schematic diagrams of EBSP Kikuchi

a—具有 9 个波段(编号为 1~9)和 5 个带轴(标记为 B~F);b、c、d、e、f—导出的互向晶格平面包含其所有互向晶格向量,分别属于 a 中所示的带轴 B~F

a—a schematic Kikuchi pattern with nine bands (numbered 1~9) and five zone axes (marked B~F); b, c, d, e, f—derived reciprocal-lattice planes containing all their reciprocal-lattice vectors, belonging to the zone axes B~F shown in a

4 EBSD 技术在地质学中的应用进展

EBSD 数据常被投制成各种面分布图、曲线图等来加以分析,例如表征样品整体变形特征的欧拉角取向分布图(图 7a)、反极图(IPF)、取向分布函数图(ODF)、晶粒取向分布图(GOS)、取向差角分布图(KAM)等;矿物晶体方向的二维表征,例如矿物内部的晶格方向变化及累积变化曲线图(图 7b)、蠕变曲线及变形前后的取向变化曲线图等;矿物某一晶轴的吴氏网投影,例如极图(采用赤平投影的方式,将 EBSD 获取的大量单个矿物取向数据或全部或分组投影到某一设定平面上而做出的等密图)(图 7c);还有不同矿物颗粒的边界关系图(图 7d)、取向差角度分布直方图、亚颗粒边界分布图、玫瑰花图以及利用 3D-EBSD 技术重建和处理获得的三维取向图等。

EBSD 技术理论上可以对所有晶体进行测试研究(非晶体由于不存在规律重复的晶格结构,不能产生规则的电子背散射衍射花样,所以无法用 EBSD 测试)。但若要有效可靠地解译和应用 EBSD 数据,通常需要相对应的晶体高温高压实验作为基础,尤其是对晶格优选定向即组构的研究。许志琴等(2009)在结合高温高压数据和实测结果的基础上,总结了部分典型的地壳-上地幔常见矿物的主控滑移系和变形条件,包括石英、长石、橄榄石、单斜辉石、石榴子石、夕线石等,指出形成矿物不同组构类型的控制因素很多,包括矿物的晶体结构、在岩石中的含量、变形时的温度、压力、应变速率、流体状况以及矿物晶体中可能启动的主导滑移机制等。在解译 EBSD 测得的组构及研究其所代表的构造环境时,需要结合高温高压实验结果、区域构造特征、岩石整体组成、矿物成分特征等因素综合分析。

构造地质学家和固体地球物理学家们在应用 EBSD 技术的过程中,除了用于常规的显微结构研究[变形机制和滑移系统(Passchier and Trouw, 2005)、变形温度(Law, 2014)、运动学指向(Passchier and Trouw, 2005)和运动学涡度(Xypolias, 2010)等](图 8),也常与其他技术手段相结合以开展更广泛的研究,如与地球物理测得的各向异性、弹性系数等结合,可研究各向异性矿物(例如层状硅酸盐、辉石、橄榄石、蛇纹石等)在地球深处定向排

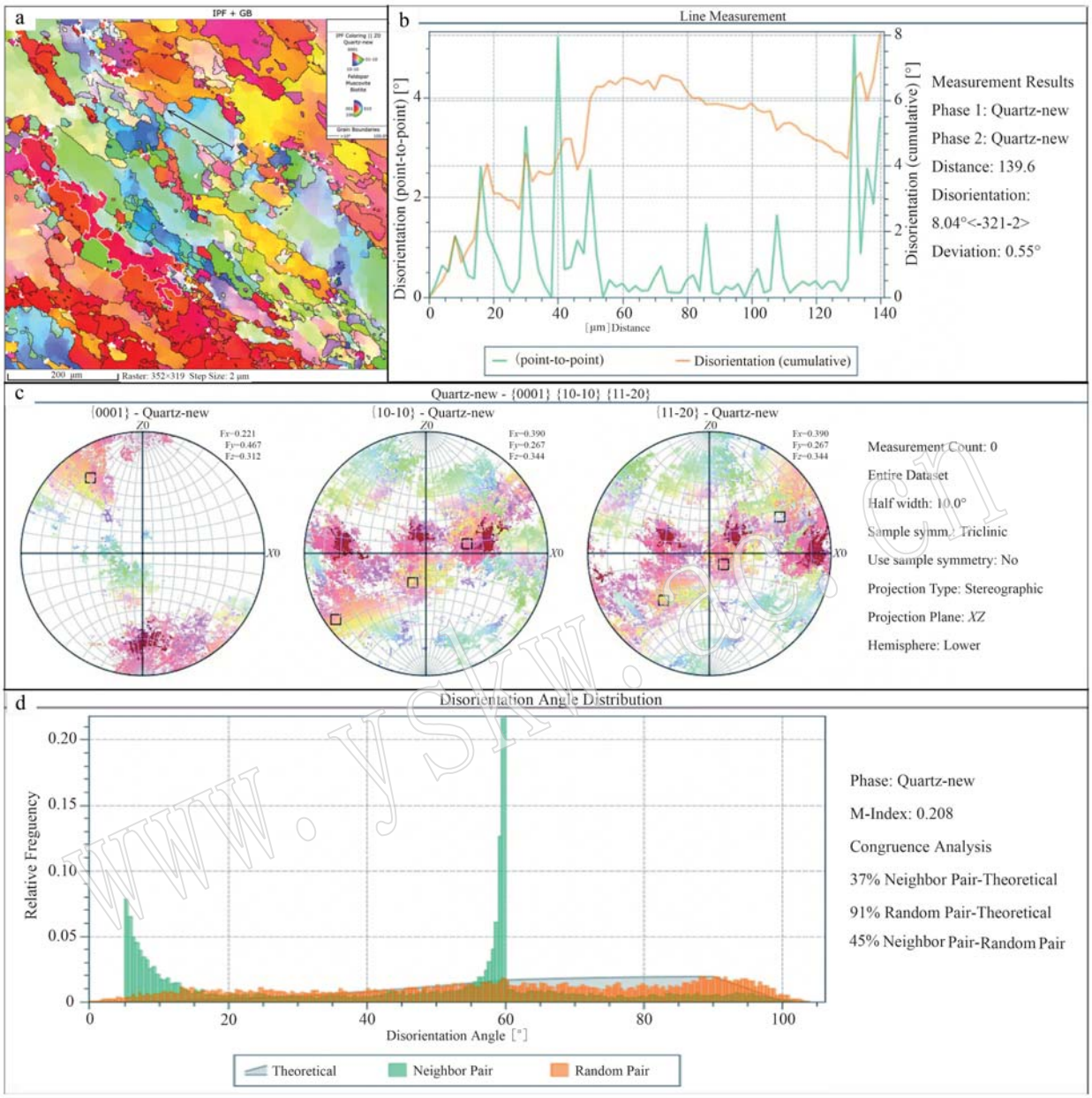

图 7　石英 EBSD 分析结果投图

Fig. 7　Quartz EBSD analysis result images

a—矿物形变的反极图着色图；b—矿物内部的二维晶格取向变化及累积变化曲线图；c—矿物某一晶轴的极图；d—不同矿物颗粒的边界关系图

a—inverse pole figure color map of mineral deformation; b—two-dimensional lattice orientation variation on an arbitrarily line and cumulative variation curve; c—pole figure of a specific crystallographic axis of the mineral; d—boundary relationship map of different mineral grains

列而形成的地震各向异性（Almqvist and Mainprice, 2017），进而了解地球深部的变形信息。与数值模拟和高温高压变形实验相结合，可研究地球内部不同深度不同温压条件下的物理过程和变形机制（Prior *et al.*, 2009）。与成分分析相结合，可研究不同构造环境中不同变形条件下矿物的元素迁移机制、成因机制等。新的 EBSD Aztec 系统可实现 EBSD 与能谱（结构与成分）的同步采集和分析，这使得 EBSD 在新矿物或疑难矿物的发现和鉴定方面大有可为，因为晶粒太小或较为稀有时难以通过 X 射线方法鉴定，而 EBSD 与能谱的结合则可弥补这一缺陷（Ma and Rossman, 2008）。EBSD 还可与同位素原位测年技术相结合，以研究变形带中由变形导致的同位素变化，进而获得变形的时代（图 8）。

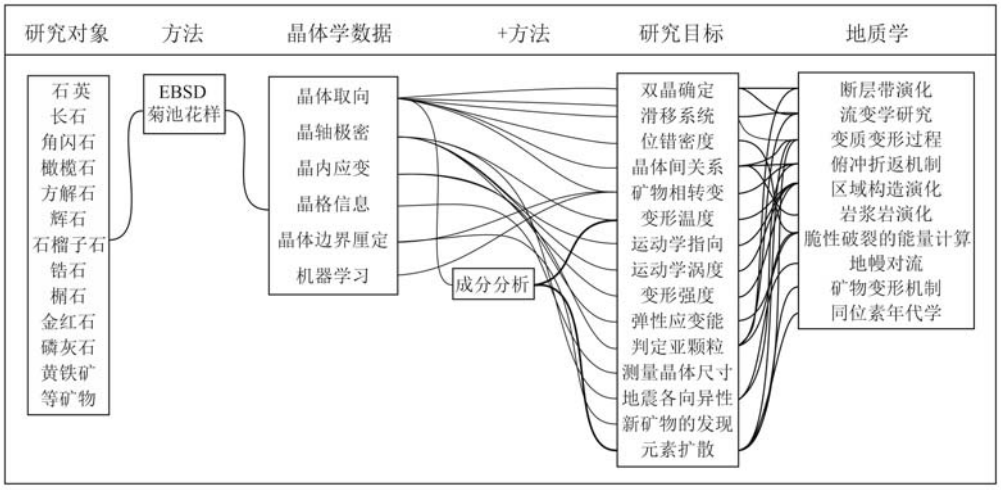

图 8 EBSD 的测试对象、生成数据类型、研究内容及其在大陆动力学研究中的应用场景

Fig. 8 Target analysis minerals, types of produced data, research topics of the EBSD method and its application scenarios in the study of geodynamics

总之,如图 8 所示,EBSD 是一项以晶体结构信息为核心的研究手段,可与其他多项技术交叉结合,进而衍生出一系列分析功能和应用方向的地质学方法,且随着技术的不断进步,可应用精度和领域仍在持续扩展和进步中。以下,我们在近些年实际应用和了解的基础上,列举了部分重要的应用案例,为具体了解 EBSD 的应用提供参考。

4.1 EBSD 技术在晶体取向方面的应用

利用 EBSD 技术很容易获得矿物的晶体取向,而对具有相关性晶体取向的研究可以确定晶体的双晶并判定晶体的滑移系,这些晶体学信息是矿物变形机制和流变学研究的基础。矿物的晶体取向还可以用来确定岩浆岩中不同矿物的结晶学关系,进而探讨岩浆岩的演化,也可以用来确定矿物相转变的具体过程,解释更为精细的变质变形过程(图 8)。

晶体双晶的存在可能导致晶体内薄弱面的发生。晶体的双晶面往往是晶内的结构薄弱面,因此可能在韧性变形发生和发展的过程中扮演重要的角色,EBSD 技术可以用来确定石英双晶(Zhao *et al.*, 2017)。对花岗质糜棱岩中的石英残斑进行 EBSD 分析发现道芬双晶在糜棱岩发育的初期普遍发生,负菱面 $\{z\}$ 几乎垂直于最大压应力方向(z-双晶方向),且正菱面 $\{r\}$ 几乎平行于压缩方向(r-双晶方向)(Menegon *et al.*, 2011)。道芬双晶的存在促进了主滑移系的转换,主滑移面从底面 <a>(没有孪生的区域)转换到了 $\{\pi\}$ <a> 和 $\{\pi'\}$ <a>(孪晶发育的区域)滑移面(Menegon *et al.*, 2011)。此外,最新的 EBSD 研究工作表明,剪切带内石英母晶粒与新晶粒的 c 轴间的取向差接近 90°,并与新晶粒共享 $\{m\}$ 面和 $\{1122\}$ 轴,这指示了日本双晶的存在(图 9)(Bestmann *et al.*, 2021)。因此,双晶的发育(如道芬双晶、日本双晶等)在地壳的晶质塑性变形过程中可能发挥重要作用,是控制含石英岩石初始糜棱岩化的重要机制。

基于 EBSD 数据生成的晶体取向图,可以揭示矿物横向连续变形带特征,这些变形带方向的持续变化可以看作运动轨迹,由运动轨迹组成的面是连续变形面,其法线就是变形轴,当连续变形面与晶格滑移面的矢量几何形状相结合时,可以确定潜在的滑移系(图 10)。Barrie 等(2008)通过此方法识别出 $\{001\}$ <100> 是黄铁矿的主要滑移系,并进一步提出多晶黄铁矿聚集体中缺乏晶格优选方位(CPO)可能由于存在两个独立的对称等效滑移系,因而不满足 von Mises 准则,无法形成 CPO 极密。Reddy 等(2007)对变形锆石的 EBSD 分析发现,变形锆石晶体取向极密与位错线 [100] 所在的倾斜面方向一致,这个倾斜边界可能与 $\{100\}$ <001> 滑移系的滑动相关。对锆石强变形区域中微小边界的分析表明,变形主要是通过刃型位错导致的 $[0\bar{1}0]$(001)或螺旋位错导致的 [100](100)和 [001](100)滑移引起,在晶内的其他部分,可能存在(111)、$(11\bar{1})$和(112)面共同发生的$[1\bar{1}0]$方向

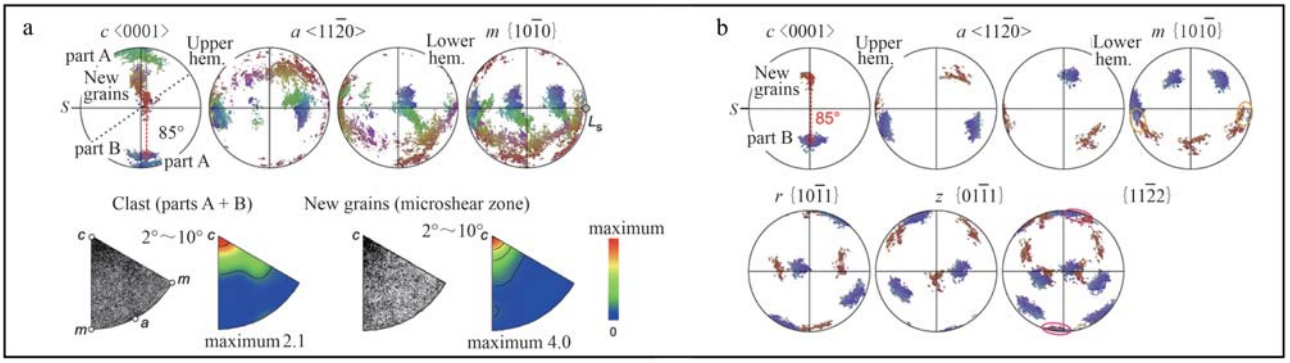

图 9　日本双晶 EBSD 结果示意图（修改自 Bestmann *et al.*，2021）

Fig. 9　Schematic diagram of the EBSD results of Japan-Law twin (modified from Bestmann *et al.*, 2021)

a—剪切带中碎屑颗粒与部分新晶粒的 <*c*> 轴间的取向差为 85°；b—碎屑颗粒取向和部分新晶粒的日本双晶对称实验示意图

a—<*c*>-axis angle of 85° between porphyroclast and part of new grains in the shear zone; b—Japan-Law twin symmetry test for clast orientation and part of new grains

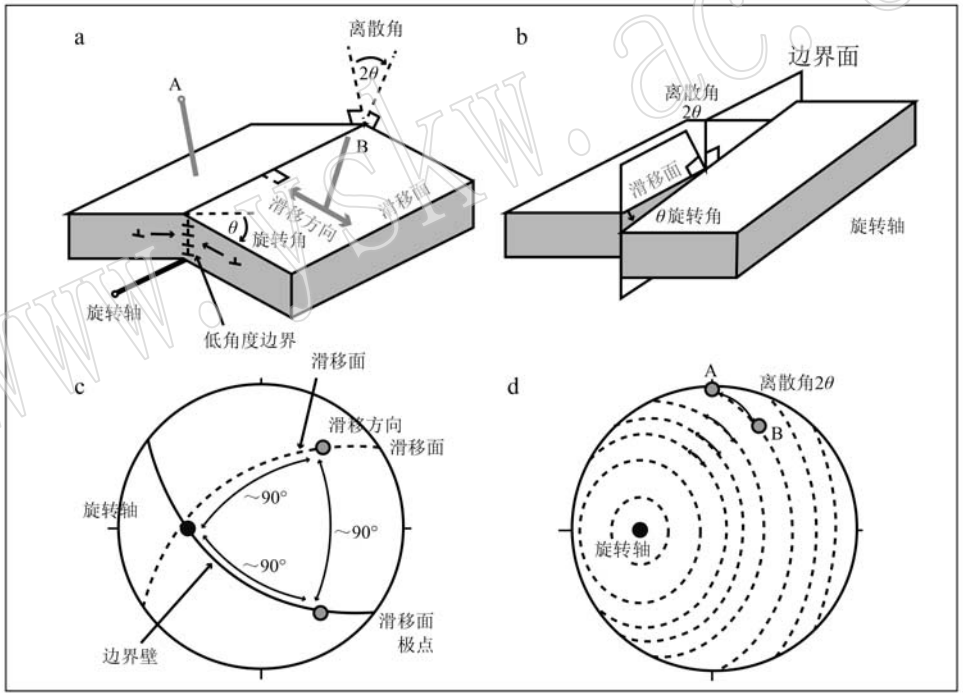

图 10　晶界位错滑移机制的几何模型与赤平投影表征（修改自 Reddy *et al.*，2007）

Fig. 10　Geometric model and stereographic projection characterization of grain boundary dislocation slip mechanism (modified from Reddy *et al.*, 2007)

a—对称低角度倾斜边界示意图；b—变形边界示意图，显示了边界面、滑移面、滑移方向以及由于位错滑动引起的旋转轴和离散角之间的几何关系；c—a 所示边界/滑移系的立体投影图，在低角度条件下，滑移面、滑移方向和旋转轴相互垂直，旋转轴、极点与滑移面均包含在边界面的平面内；d—显示线性特征 A 和 B 沿绕旋转轴的小圆分布的立体投影图

a—schematic diagram of symmetric low-angle tilt boundary; b—schematic diagram of twist boundary showing the geometric relationships between the boundary wall, slip plane, slip direction, and rotation axis and dispersion angle due to dislocation glide; c—stereographic projection of the boundary/slip system shown in a, at low tilt magnitudes the slip plane, slip direction and rotation axis are mutually perpendicular, and the rotation axis and pole to slip plane are contained within the plane of the boundary wall; d—stereographic projection showing the dispersion of linear features A and B along small circles around the rotation axis

滑移。这项研究结果首次对自然变形的锆石进行了详细的微观结构分析,并证实了位错形成和迁移到低角度边界促进了锆石的晶体塑性变形。对矿物滑移系统的研究是位错蠕变流变学研究的根本所在。

最新研究利用 EBSD 数据获取矿物晶格取向,根据晶格取向的变化计算曲率张量,然后将其反算为位错密度,将单个位错类型以及晶体取向差的密度与变形晶体上测量到的取向变化进行比较,经过去噪,计算出的位错密度与高分辨率 EBSD 获得的位错密度相当(Faul, 2021)。因此,EBSD 能够相对有效地观察与晶内变形相关的位错结构,这些位错既分布在亚颗粒边界上,也位于亚颗粒内部(Faul, 2021)。Wallis 等(2018)使用高分辨率电子背散射衍射(HR-EBSD)技术定量表征了石英亚晶粒结构中的几何位错,确定了石英棋盘亚晶粒中的位错结构,证实棋盘亚晶粒主要由两组亚晶界形成,一组主要由 $\{m\}$ [c] 刃型位错组成,另一组主要由具有<a>Burgers 向量的位错。

地质学家利用 EBSD 方法对深俯冲折返的榴辉岩开展了大量的矿物晶体学方面的研究,有助于精细化俯冲折返过程中的矿物变质变形行为。针对挪威西部榴辉岩的 EBSD 研究发现,绿辉石的分解在榴辉岩的退变质及折返过程中起着重要作用。EBSD 结果指示绿辉石的分解反应(绿辉石→透辉石+斜长石±角闪石)导致透辉石-斜长石蠕虫状合晶的形成(图 11),而(透辉石)单斜辉石-斜长石蠕虫状合晶的成核受晶体学控制,特征是透辉石继承了绿辉石的晶格取向,斜长石沿透辉石面生长,它们具有相似的晶面间距(Zertani *et al.*, 2024)。(透辉石)单斜辉石-斜长石蠕虫状合晶的进一步变形通常通过破裂发生,蠕虫状合晶岩的形成与榴辉岩渗透性和变质过程中流体流动的增强无关,此外,蠕虫状合晶的形成还增强了榴辉岩对晶粒尺寸敏感的变形,促进了流体通道的重新分布和榴辉岩的弱化(Zertani *et al.*, 2024)。

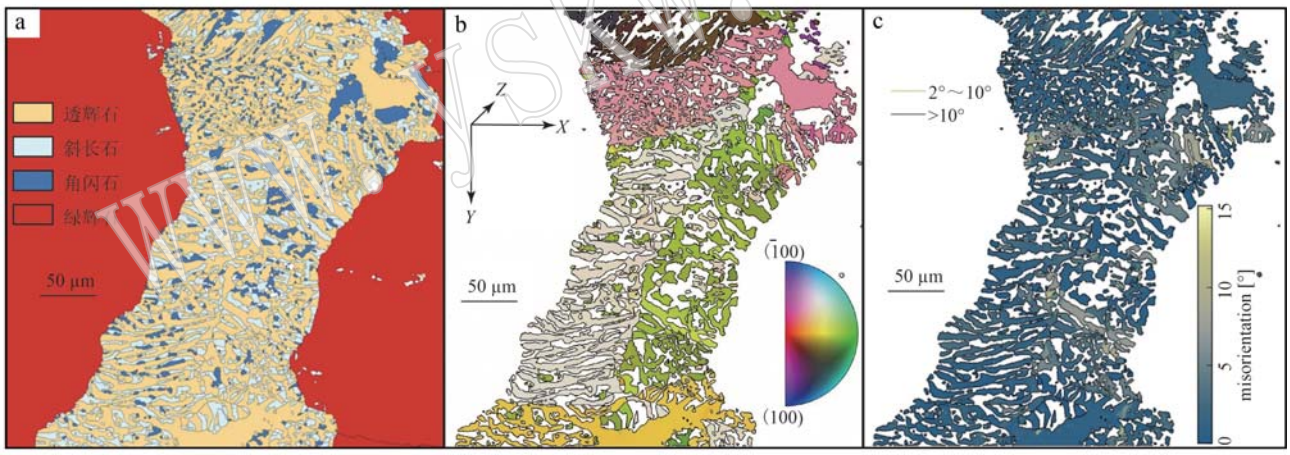

图 11 蠕虫状透辉石、绿辉石样品的电子背散射衍射(EBSD)分析结果投图(修改自 Zertani *et al.*, 2024)

Fig. 11 Results of EBSD analysis of vermicular diopside and parent omphacite (modified from Zertani *et al.*, 2024)

a—矿物相图; b—反极图(Z 轴方向;IPF-Z), 坐标轴分布如左上角所示; c—位错取向差图

a—phase map; b—inverse pole figure (Z-direction; IPFZ), the sample reference frame is given in the upper left corner; c—misorientation to mean orientation (mis2mean) map

针对榴辉岩中绿辉石边部的角闪石晶体取向研究发现其与绿辉石的晶体取向相一致,显示[001]轴平行于线理,(010)和(110)面的极点形成垂直于面理的环带,表明在榴辉岩折返过程中绿辉石发生了成分置换,转变成了角闪石(Rehman *et al.*, 2023)。然而绿辉石和金红石表现出非随机晶体优选取向,其特点是金红石[001]和[100]轴与绿辉石的[001]和(010)轴呈亚平行排列,同时也与弱拉伸矿物线理近平行,这表明它们的 CPO 的发育是同时发生的(Bukała *et al.*, 2024)。进一步的研究发现垂直于面理的石榴子石微裂隙主要被绿辉石充填,且绿辉石的 CPO 和面理近平行,石榴子石微裂缝方向的系统性取向与峰值压力条件下的同轴变形一致,这表明在俯冲环境中,不需要外部流体源来促进榴辉岩的韧脆性变形(Bukała *et al.*, 2024)。

对喜马拉雅造山带内变质泥岩中的电气石组构

研究发现，电气石沿着黑云母层异质外延成核，并发生电气石和钾长石取代预先存在的黑云母和斜长石的矿物反应，电气石在黑云母上的异质外延关系的特点是电气石的 $\{10\bar{1}0\}$ 面与黑云母（001）平行，电气石 c 轴与黑云母［110］或［010］方向平行，这对变质泥岩生成熔体量的估算意义重大（Dyck and Larson, 2023）。通过系统研究岩浆岩中石榴子石内部的金红石的晶体取向，发现石榴子石不同扇区中金红石 CPO 和 SPO 特定变化，这表明金红石包体的微观结构可以反映石榴子石生长过程中岩浆成分、温度和压力的变化（Kohn *et al.*, 2024）。

4.2　利用晶轴极密图获取矿物晶体变形温度及涡度

变形矿物的晶轴定向性量化分析是 EBSD 最常见、最重要的应用之一。晶轴定向极密的程度可以用一些数值进行量化，例如 Kearns 因子（Gruber *et al.*, 2011）、J-index（Mainprice and Silver, 1993）和 M-index（Skemer *et al.*, 2005）。利用晶轴极密及其量化的数值可以实现变形运动学指向分析，对比变形强度，判定变形温度等。在合适的温度和应力条件下，晶体通过弯曲和/或扭曲其晶格而发生变形（Vernon, 2018），并且相应的晶轴指向会趋于一致，形成特征 CPO（Schmid and Casey, 1986）。这些微观的形变在岩石样品上表现为典型的线理和面理，对其量化可以获得与变形相关的温压条件和变形机制等信息（Law, 2014; Faleiros *et al.*, 2016），而 EBSD 技术是获取这些信息最重要的手段之一（Fossen, 2016; Hunter *et al.*, 2018）。Wu 等（2023）通过利用 EBSD 测量北祁连造山带内糜棱剪切带中石英 c 轴组构的开角（OA）温度计，估算了变形时的温度（图 12），得出大同韧性剪切带是在温度约为 500～550℃和压力约为 0.56 GPa 的角闪岩相变形条件下形成的，并结合区域地质背景，提出北祁连地体的强烈扭压变形反映了早古生代祁连造山运动期间俯冲的古祁连洋板片与上覆祁连块体的强烈耦合（Wu *et al.*, 2023）。

了解岩石变形的运动学涡度对于认识地球动力学演化过程至关重要，自然变形从来不是完全同轴或非同轴的，而是上述两个端员变形的组合。简单剪切和纯剪切的比例可以由运动学涡度（W_k）量化（Tikoff and Fossen, 1995; Xypolias, 2010）。EBSD 衍生的石英组构数据在涡度研究方面已被地质学家广泛采用（图 13）（Xypolias, 2010）。利用石英的 EBSD 数据，通过对北美中南部科迪勒拉山脉变质核杂岩相关的糜棱岩剪切带的 W_k 研究，发现大多数变质核杂岩样品表现出纯剪切应变至一般剪切应变的应变特征（平均 70%纯剪应变），这与在许多变质核杂岩系统中观察到的显著整体剪切带缩短（>80%）的结果相一致（Zuza *et al.*, 2024）。

4.3　EBSD 测定矿物晶内应变及对新生矿物颗粒的标定

利用 EBSD 技术开展变形矿物晶内应变特征研究和测量弹性应变能属于当前的热点研究方向（Field *et al.*, 2010; Wright *et al.*, 2011; Taufner *et al.*, 2023; Brückner *et al.*, 2023）。矿物常见的表征晶体粒内应变的参数或者图件有通常表征晶内平均的塑性变形强度的 grain orientation spread（GOS）、grain average misorientation（GAM）等和通常表征晶内局部的塑性变形强度的 kernel average neighbor misorientation（KAM）、misorientation to mean orientation（m2m）。

位错蠕变会导致动态重结晶作用并产生重结晶颗粒（Stipp *et al.*, 2002; Passchier and Trouw, 2005; Cross *et al.*, 2017b）。区分变形岩石中矿物的残斑颗粒和重结晶颗粒一直以来都是显微构造研究的难点（Xia and Platt, 2018）。Cross 等（2017b）使用 MTEX 工具箱中的 Voronoi 分解算法（Bachmann *et al.*, 2011），从原始 EBSD 数据中重新区分了矿物残斑颗粒和动态重结晶颗粒（图 14），其基本原理为：残斑晶体内部由于塑性变形程度更强，晶内积累的位错密度相对较高，而动态重结晶颗粒晶内的变形相对较弱，则晶内位错密度较低（Passchier and Trouw, 2005; Cross *et al.*, 2017b）。使用 MTEX 工具箱中的 GOS 参数，可以较好地标定晶内塑性变形强度并区分残斑颗粒与重结晶颗粒，对不同的变形样品与变形矿物可设定 GOS 阈值，残斑颗粒由于晶内变形较强，其 GOS 值高于阈值，重结晶颗粒晶内变形较弱，其 GOS 值则低于阈值（Cross *et al.*, 2017b）。近年来该方法被用于精确计算岩石变形时的差应力，进而获得研究区的地壳强度剖面，例如在藏南拆离系（Zhang *et al.*, 2022）和鲜水河断裂带（孙丽静等, 2021）的流变学工作。近期的研究通过对变形实验获得的橄榄石和石英开展精细 EBSD 分析，进而获得变形相关数据来校准基于亚晶粒尺寸的压力计，这些新型压力计可以对多相矿物岩石的 EBSD 分析结果进行应力估算，而且无需区分残斑颗

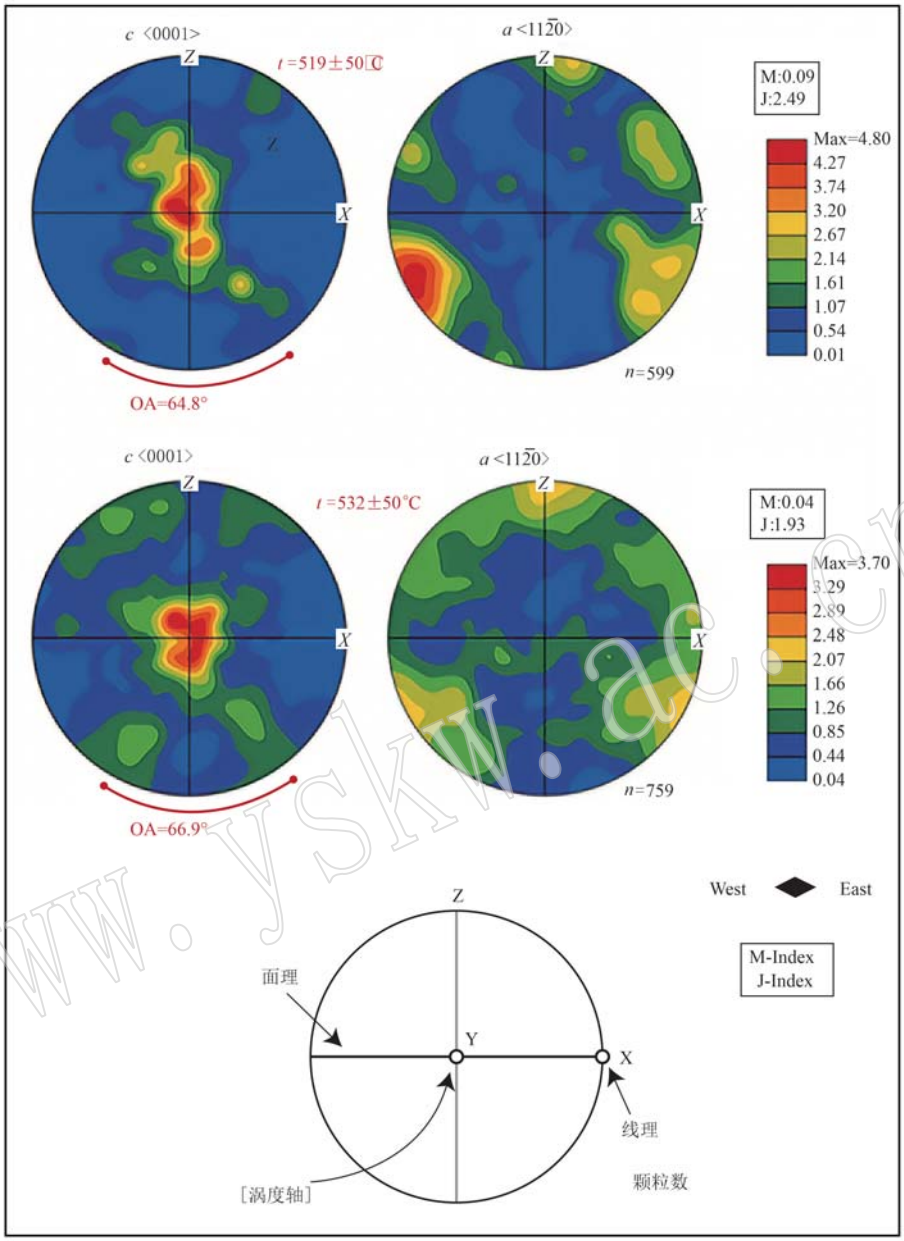

图 12 糜棱岩中石英晶粒的晶格优选方位（CPO）的下半球等面积投影（修改自 Wu *et al.*, 2023）

Fig. 12 Equal-area, lower-hemisphere projections of crystallographic preferred orientation (CPO) patterns of quartz matrix grains in the mylonite (modified from Wu *et al.*, 2023)

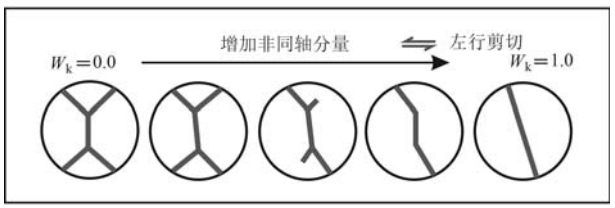

图 13 石英 CPO 结构随简单剪切分量增加而变化的示意图

Fig. 13 Schematic illustration showing the variation in quartz CPO sfabric keleton with increasing simple shear component of deformation

粒和重结晶颗粒，大大增加了适用范围（Goddard *et al.*, 2020）。

通常的流变学研究均需首先通过 EBSD 方法获取位错蠕变形成的新颗粒群的平均粒径，进而通过经验公式计算差应力。Duan 等（2024）对红河断裂带南北段动态重结晶石英的 EBSD 分析、重结晶颗粒尺寸的估算及差应力计算结果显示，北段差应力大（约 100 MPa），容易发生大震，进而形成假玄武玻璃。Toffol 等（2024）通过 HR-EBSD 方法对断层带

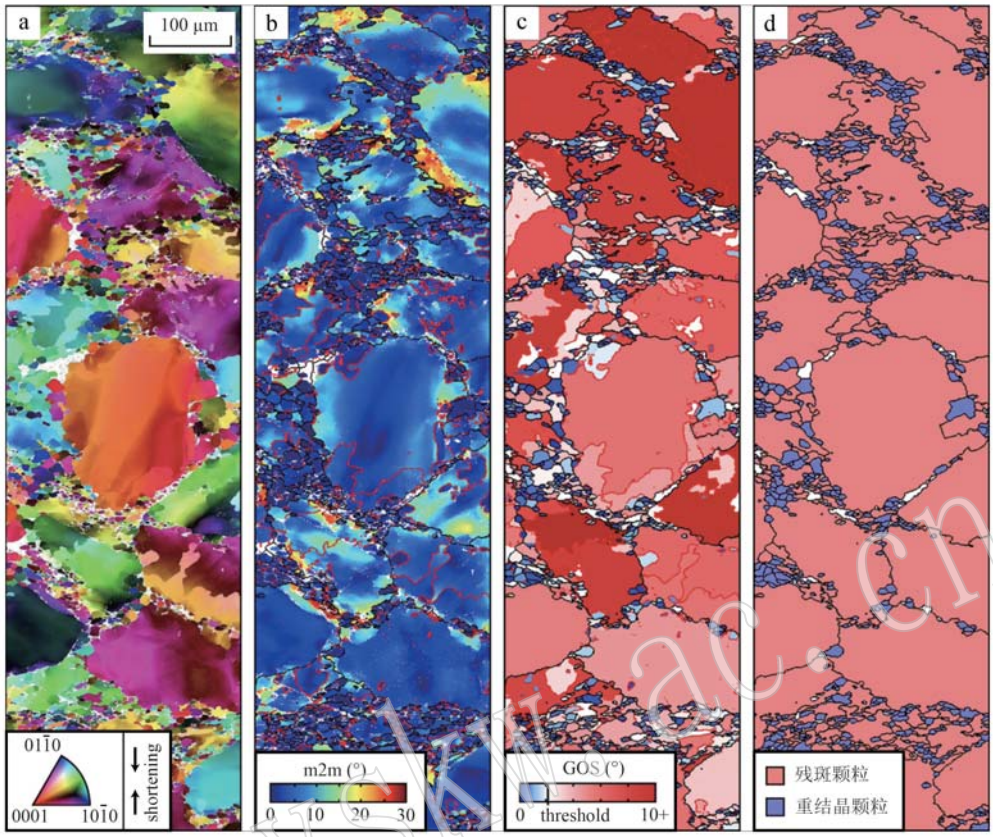

图 14　晶体塑性变形的空间分布与动态重结晶示意图（修改自 Cross *et al.*，2017b）

Fig. 14　Schematic diagram of spatial distribution patterns in crystal plastic deformation and dynamic recrystallization (modified from Cross *et al.*, 2017b)

a—反极图（IPF）显示相对于短轴（垂直方向）的晶体取向分布；b—每个测试点与母粒的平均取向之间的位错取向差图（m2m），黑线表示晶界，红线为道芬双晶边界；c—每个晶粒的取向分布图（GOS），白色表示 GOS 阈值，颜色以相对于重结晶颗粒（蓝色）和残斑颗粒（红色）之间来表示；d—GOS 分离的重结晶颗粒和残斑颗粒，双晶边界已被破坏

a—inverse pole figure (IPF) map showing crystal orientations with respect to the shortening axis (vertical); b—map of the misorientation between each pixel and the mean orientation of their parent grain (m2m), black lines are grain boundaries, red lines are Dauphiné twin boundaries; c—grain orientation spread (GOS) for each grain, colored relative to the GOS threshold (white) between recrystallized (blue) and relict (red) grains; d—GOS-separated recrystallized and relict grains, twin boundaries have been removed

内假玄武玻璃及其宿主岩石中的石榴子石位错的精细测量，进而估算导致这些位错的晶格畸变相关的能量，并结合每单位断层面的热能量值和破碎颗粒的表面能的估算，得出单次地震中能量的分配样式。

对岩石内矿物颗粒精细的粒内应变分析，可以确定某些变形岩石的流变强度或者排除岩石变形的机制不是位错蠕变主导的。通过对蓝片岩中矿物的精细 EBSD 分析、差应力分析和流变学特征的模拟得出蓝片岩的黏度高于变沉积岩（石英位错蠕变流变律），低于榴辉岩（绿辉石位错蠕变流变律）（Tokle *et al.*，2023）。而对意大利阿尔卑斯山采尔马特-萨斯的变形榴辉岩开展的 EBSD 研究结果显示，绿辉石形态和晶格优选形成了这些岩石中的面理和线理，并显示出强烈的 S 型晶格优选取向，与此同时位错蠕变相关的变形记录并不发育，加上在颗粒中观察到的尖锐不对称化学分区，表明扩散蠕变是这些榴辉岩中绿辉石的主要变形机制（McNamara *et al.*，2024）。海洋转换断层是主要的板块边界，代表洋中脊系统最易发生地震的部分。通过研究赤道大西洋圣保罗转换系统北部断层沿线的挤压性阿托巴海脊的变形地幔橄榄岩（超镁铁质糜棱岩）的矿物结构，发现在大洋岩石圈的压力和温度条件下，主要的变形机制是流体主导的溶解-沉淀蠕变，而非传统认为的位错蠕变（Bickert *et al.*，2023）。在变形过程中，较粗的辉石颗粒在流体存在下溶解，小间隙颗粒在周围沉淀，从而增强了颗粒尺寸的减小，导致应变在

比位错蠕变更低的应力下局部化,这种机制可能是海洋岩石圈的主要弱化因素,也是海洋转换断层发生和维持的主要控制因素(Bickert *et al.*, 2023)。

4.4 基于 EBSD 数据的地震波各向异性的分析

岩石地震波的各向异性主要受控于主要造岩矿物的晶格优选方位(Almqvist *et al.*, 2015; Almqvist and Mainprice, 2017)。在中下地壳,斜长石、角闪石和云母是变质岩中主要的各向异性矿物(Tatham, 2008; Lloyd *et al.*, 2011; Ji *et al.*, 2013),而在上地幔中,主要的各向异性矿物是橄榄石、斜方辉石和单斜辉石(Mainprice *et al.*, 2000; Vauchez *et al.*, 2000; Jung *et al.*, 2008)。在构造应力作用下,这些各向异性矿物发生塑性变形,形成 CPO,导致岩石圈介质具有物理参数的各向异性,尤其是地震波速度各向异性(Vonlanthen *et al.*, 2006)。因此,通常利用主要造岩矿物的 CPO 来解释地壳和上地幔的地震波各向异性和变形机制(滕吉文等, 2012; Ji *et al.*, 2013; 商咏梅等, 2019),将对岩石组构 EBSD 分析获得的各向异性数据与地震观测结果相结合,可以深入确定地震波各向异性的原因,进而理解岩石圈的变形机制,探索大尺度壳幔对流和板块的深俯冲过程等(Jung *et al.*, 2008; Wang *et al.*, 2013; Cao *et al.*, 2021)。

最新的基于 MATLAB 平台开发的 AnisEulerSC 软件(使用自洽近似的欧拉角各向异性),可用于模拟具有微裂纹的多矿物岩石的地震各向异性。该方法基于实验测量数据分析岩石样品的组成成分,并可计算和可视化地震波速度和极性(Kim *et al.*, 2020)。通过该方法研究发现 P 波各向异性(AVp)强度随蓝闪石丰度的增加而增加,随绿帘石或硬柱石丰度的增加而降低,并随蓝闪石晶体取向(CPO)强度的增加而增强,进一步证明了蓝闪石、绿帘石和硬柱石在产生蓝片岩地震各向异性方面的主要作用。该结论可能是绘制蓝片岩在活跃俯冲带中蓝片岩-榴辉岩过渡界限的有用工具(Ott *et al.*, 2024)。基于高分辨率的地震波数据,可利用地震参数的组合,如 Vp、Vs、Vp/Vs、AVp、剪切波分裂(AVs)强度和对称性以及 P 波或 S 波反射系数等,来区分俯冲通道内的榴辉岩、角闪岩、含石榴子石石英云母片岩的含量及相对位置(图 15)(Cao *et al.*, 2021)。

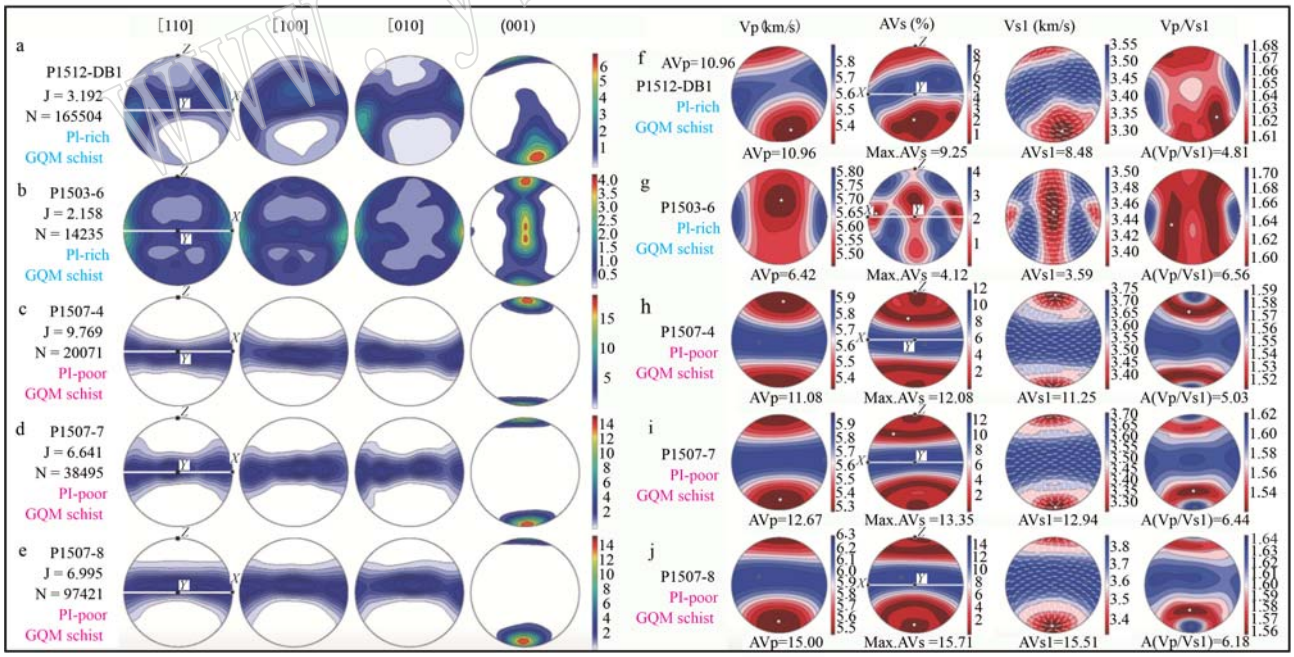

图 15 样品中云母组构与地震各向异性响应的岩性控制(修改自 Cao *et al.*, 2021)

Fig. 15 Lithological control of mica CPO and seismic anisotropic response in samples (modified from Cao *et al.*, 2021)

a、b—富斜长石的石榴石云母石英片岩中云母的 CPO 图; c、d、e—贫斜长石的石榴石云母石英片岩中云母的 CPO 图; f、g—富斜长石的石榴石云母石英片岩的地震各向异性示意图; h、i、j—贫斜长石的石榴石云母石英片岩的地震各向异性示意图

a, b—CPOs of phengite in the Pl-rich GQM schist; c, d, e—CPOs of phengite in the Pl-poor GQM schist; f, g—bulk-rock seismic anisotropies for Pl-rich GQM schist; h, i, j—bulk-rock seismic anisotropies for Pl-poor GQM schist

Zhou 等(2023)在对青藏高原南部日喀则蛇绿岩拆离断层带内剪切变形的辉长岩的研究中,利用EBSD 对沿断层带溶解沉淀蠕变形成的角闪石开展精细组构分析,并对其进行地震波速反算,得出这些角闪石慢速扩张洋脊下地壳的地震各向异性(P 波和 S 波)对 S 波延迟时间有很大贡献,而快剪切波的偏振方向与洋脊近平行,因此认为流体循环和剪切之间的正反馈与角闪石的溶解-沉淀蠕变有关。这项研究为慢速扩张洋脊下洋壳地震各向异性的起源提供了一种新的解释。

4.5　EBSD 数据与其他元素分析方法的联合使用

EBSD 方法可用于测量常见定年矿物的粒内变形,表征矿物内部的变形差异,并评估矿物变形对矿物同位素体系重置的影响(Reddy *et al.*, 2007)。许多矿物具有与各向异性相关的沿不同晶轴的不同的扩散率,EBSD 数据提供了在成分梯度分析中解释这一现象的新思路(Martin and Jonas, 2010)。过去 10 年,针对石榴子石(Phillips and Ji, 2021)、锆石(Condit *et al.*, 2018)、榍石(Gordon *et al.*, 2021)、磷灰石(Odlum *et al.*, 2022)和黄铁矿(Fougerouse *et al.*, 2021)等矿物的粒内应变及元素分布特征发现,矿物的塑性变形对矿物的元素扩散有影响,由于这些矿物是常见 U-Pb 定年矿物,研究其矿物形变及元素分布特征之间的关系,有助于为原位测年数据提供更合理的解释。

Enami 等(2017)采用 EBSD 组构分析和电子探针成分分析(EPMA)方法,对石榴子石颗粒的生长历史进行了精确研究,EPMA 元素扫描显示石榴子石似乎作为单晶生长,但 EBSD 数据显示石榴子石有核-幔结构,分别形成于榴辉岩相和绿帘-角闪岩相阶段,因此判断在折返过程中发生了核部和边部之间的生长中断,石榴子石具有多阶段生长模式。EBSD 方法针对独居石的显微结构研究确定了独居石的双晶、微米级晶格旋转和亚晶界,这些显微构造是在独居石韧性变形过程中形成的,并且这些显微构造发育的位置与较年轻的独居石 U-Pb 年龄相吻合,表明晶体缺陷在变形和变质过程中耦合溶解-沉淀,改变了晶内的放射性同位素分布特征,因此晶体缺陷(包括孪晶和亚晶粒)是流体的重要通道(Mottram and Cottle, 2024)。金红石晶粒的晶体塑性变形会产生小角度边界,这些小角度边界富含一些微量元素,包括 Fe 和 Ca,这证明微量元素沿位错边界发生了扩散和聚集(Verberne *et al.*, 2022)。

Taylor 等(2023)通过对来自 Wildhorse 的变形石英进行 EBSD 精细分析,划分出石英的演化阶段:变形最小的残留颗粒、石英条带和以亚晶粒旋转重结晶为主的基质,结合 EPMA 和热释光成像进行的半定量的石英中 Ti 元素含量分析,发现残余石英和带状石英保留了较高的 Ti 含量(约 60×10^{-6}),表明石英记录的温度>650℃,而重结晶石英含有较低的 Ti 含量($<5\times10^{-6}$),反映出平衡温度<450℃(图 16)。

4.6　EBSD 数据的机器学习

随着机器学习技术的普及,材料学的研究已将 EBSD 数据用来区分钢中的相变产物。通常区分钢铁中不同的相需要由非常专业的人花费大量的精力仔细分析,并且具有高度的主观性,因此大大增加了判别的难度和准确性。科学家利用卷积神经网络(CNN)的大数据分析方法自动对钢铁材料微观结构中的相进行分类,所选的样本为铁素体-马氏体,并选择 U-Net 数据分析方法,输入原始晶体取向数据时,相识别精度约为 95%,而使用取向衍生参数后[例如平均取向误差(KAM)或图案质量],相识别精度可达到约 98%。与其他可用于相位鉴别的其他方法相比,大数据模型在更短的时间内提供了更高的精度,新的结果为研究更复杂的材料的微观结构提供了可能性(Ostormujof *et al.*, 2021)。

5　结语

EBSD 技术可以对矿物晶体学数据进行量化分析,该技术的优势在于实现数据的多功能性,可用于广泛的地质学研究,例如使用 CPO 计算矿物和岩石的物理各向异性特征,查明位错滑移系,了解重结晶机制,确定孪生双晶,并且在不损坏样品的条件下具有极高的分辨率。尽管在矿物标定方面存在局限性,对数据的解释也依赖个人经验(韩宁等, 2021;张青等, 2021),并且地质样品的粒度不一、不均匀、成分复杂,给 EBSD 数据的采集及解释工作带来了很多挑战,例如层状硅酸盐(包括黏土和云母类矿物)的 EBSD 研究仍存在诸多问题。随着样品制备技术的提升、测试技术的进步、数据处理能力的提高以及与其他测试手段相结合,可以弥补该分析方法的不足,进而提高其数据解释的准确性。特别强调的是,细致的数据处理对于 EBSD 技术在地质领域的实际应用至关重要。总之,EBSD技术的发

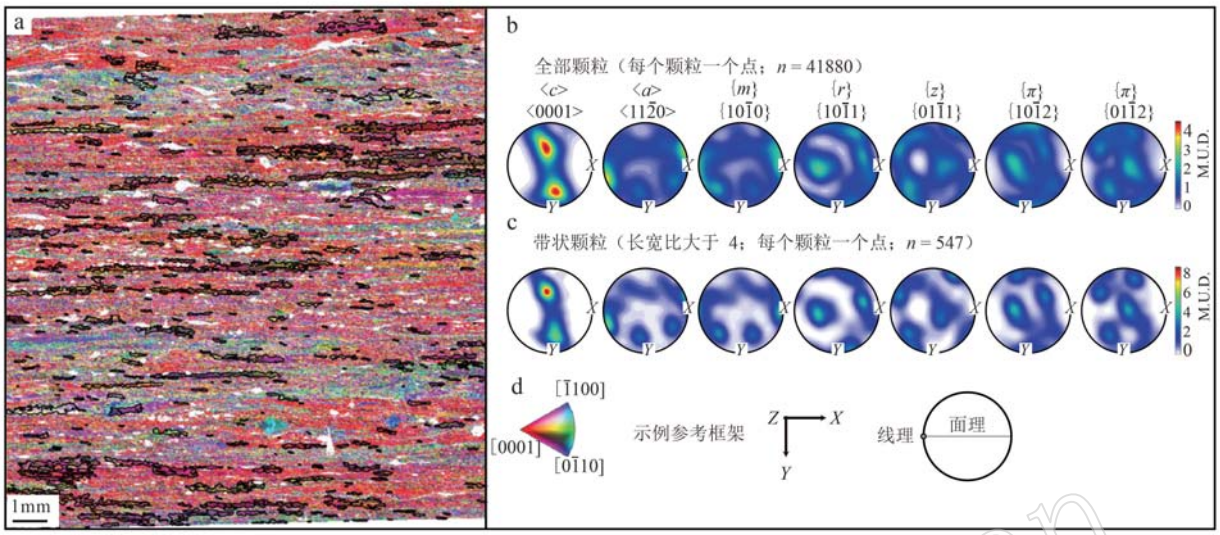

图 16 变形石英晶格优选方位（CPO）的形态及 EBSD 结果投图（修改自 Taylor *et al.*，2023）

Fig. 16 Morphological attributes and EBSD projection plots of crystallographic preferred orientation (CPO) in deformed quartz (modified from Taylor *et al.*, 2023)

a—带状石英 CPO 分布示意图；b—全部颗粒的下半球等面积投影极图；c—带状石英颗粒的下半球等面积投影极图；d—含带状石英颗粒区域的 EBSD 反极图（颗粒长短轴比值>4，*z* 轴方向参考图例）

a—ribbon quartz CPO; b—polar map of equal area of lower hemisphere of all grains; c—polar map of equal area of lower hemisphere of ribbon quartz grains; d—EBSD inverse pole map of a region containing ribbon quartz grains (aspect ratio >4, *z* direction-sample reference frame)

展让我们能够更精细地研究矿物组构和岩石显微构造，极大地推动了岩石流变学的发展，并为地质学研究开辟了更为广阔的领域。

自然资源部大陆动力学重点实验室组构分析实验室目前拥有岩石薄片机械抛光仪（BUEHLER EcoMet 300）及震动抛光仪（BUEHLER VibroMet 2），可以开展 EBSD 样品的制备，也拥有高精度镀膜仪（LEICA EM ACE600），可以针对不同的样品进行碳膜和金膜纳米级别精度的喷镀，还装备了最新的牛津仪器公司的 Symmetry S3 EBSD 探头，可以快速地获取高精度的矿物组构数据，再加上最新的 AZtecCrystal 数据处理软件，可以基本实现 EBSD 数据的处理及各种常用图件的绘制。

致谢 成文过程中得到中国地质大学（北京）、中国地质大学、地震局地质所等国内同行的鼓励，审稿专家及编辑对本文进行了细致的评阅，提出了宝贵的建议及意见，使本文质量得以提升，在此表示衷心的感谢。

References

Ali A, Chiang Y W and Santos R M. 2022. X-ray diffraction techniques for mineral characterization: A review for engineers of the fundamentals, applications, and research directions[J]. Minerals, 12(2): 205.

Almqvist B S G, Misra S, Klonowska I, *et al*. 2015. Ultrasonic velocity drops and anisotropy reduction in mica-schist analogues due to melting with implications for seismic imaging of continental crust[J]. Earth and Planetary Science Letters, 425: 24~33.

Almqvist B S G and Mainprice D. 2017. Seismic properties and anisotropy of the continental crust: Predictions based on mineral texture and rock microstructure[J]. Reviews of Geophysics, 55(2): 367~433.

Bachmann F, Hielscher R and Schaeben H. 2010. Texture analysis with MTEX-free and open source software toolbox[J]. Solid State Phenomena, 160: 63~68.

Bachmann F, Hielscher R and Schaeben H. 2011. Grain detection from 2d and 3d EBSD data—Specification of the MTEX algorithm[J]. Ultramicroscopy, 111(12): 1 720~1 733.

Barrie C D, Boyle A P, Cox S F, *et al*. 2008. Slip systems and critical esolved shear stress in pyrite: An electron backscatter diffraction (EBSD) investigation[J]. Mineralogical Magazine, 72(6): 1 181~1 199.

Bestmann M, Pennacchioni G and Grasemann B. 2021. Deformation-induced Japan twinning in quartz during incipient mylonitization[J]. Geology, 49(11): 1 267~1 271.

Bickert M, Kaczmarek M A, Brunelli D, *et al*. 2023. Fluid-assisted grain

size reduction leads to strain localization in oceanic transform faults [J]. Nature Communications, 14: 4 087.

Boneh Y, Morales L F G, Kaminski E, *et al*. 2015. Modeling olivine CPO evolution with complex deformation histories: Implications for the interpretation of seismic anisotropy in the mantle[J]. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 16(10): 3 436~3 455.

Britton T B and Hickey J L R. 2018. Understanding deformation with high angular resolution electron backscatter diffraction (HR-EBSD)[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 304(1): 012003.

Britton T B, Liang H, Dunne F P E, *et al*. 2010. The effect of crystal orientation on the indentation response of commercially pure titanium: Experiments and simulations[J]. Proceedings of the Royal Society of London Series A, 466(2115): 695~719.

Britton T B, Jiang J, Karamched P S, *et al*. 2013. Probing deformation and revealing microstructural mechanisms with cross-correlation-based, high-resolution electron backscatter diffraction[J]. JOM, 65(9): 1 245~1 253.

Brückner L M, Trepmann C A and Kaliwoda M. 2023. Rheology dependent on the distance to the propagating thrust tip-(ultra-) mylonites and pseudotachylytes of the silvretta basal thrust[J]. Tectonics, 42(10): e2023TC008010.

Bukała M, Hidas K, Klonowska I, *et al*. 2024. Dehydration-driven deformation of eclogite: Interplay between fluid discharge and rheology [J]. Journal of Metamorphic Geology, 42(5): 609~636.

Cao Shuyun and Liu Junlai. 2006. Modern techniques for the analysis of rock microstructure: EBSD and its application[J]. Advances in Earth Science, 21(10): 1 091~1 096(in Chinese with English abstract).

Cao Y, Du J X, Jung H, *et al*. 2021. Crystal preferred orientations, deformation mechanisms and seismic properties of high pressure metamorphic rocks from the Central Qiangtang metamorphic belt, Tibetan Plateau[J]. Journal of Structural Geology, 145: 104309.

Carneiro Í and Simões S. 2020. Recent advances in EBSD characterization of metals[J]. Metals, 10(8): 1 097.

Chen Bailin, Cui Lingling and Chen Zhengle. 2014. EBSD fabrics analysis of deformed rocks from kaladawan area, altun mountains, NW China[J]. Acta Geologica Sinica, 88(8): 1 475~1 484(in Chinese with English abstract).

Chen D, Kuo J C and Wu W T. 2011. Effect of microscopic parameters on EBSD spatial resolution[J]. Ultramicroscopy, 111(9~10): 1 488~1 494.

Chen Y J, Hjelen J and Roven H J. 2012. Application of EBSD technique to ultrafine grained and nanostructured materials processed by severe plastic deformation: Sample preparation, parameters optimization and analysis[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 22(8): 1 801~1 809.

Condit C B, Mahan K H, Curtis K C, *et al*. 2018. Dating metasomatism: Monazite and zircon growth during amphibolite facies albitization[J]. Minerals, 8(5): 187.

Cross A J, Hirth G and Prior D J. 2017a. Effects of secondary phases on crystallographic preferred orientations in mylonites[J]. Geology, 45(10): 955~958.

Cross A J, Prior D J, Stipp M, *et al*. 2017b. The recrystallized grain size piezometer for quartz: An EBSD-based calibration[J]. Geophysical Research Letters, 44(13): 6 667~6 674.

Dingley D J and Wright S I. 2009. Determination of crystal phase from an electron backscatter diffraction pattern[J]. Journal of Applied Crystallography, 42(2): 234~241.

Dingley D J, Meaden G, Dingley D J, *et al*. 2018. A review of EBSD: From rudimentary on line orientation measurements to high resolution elastic strain measurements over the past 30 years[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 375(1): 012003.

Dinnebier R E and Friese K. 2003. Modern XRD Methods in Mineralogy [M]. Introduction to the Mineralogical Sciences: Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS), 1~57.

Duan Q B, Fagereng Å, Chen J Y, *et al*. 2024. Fluid environment controls along-strike variation in slip style: Midcrustal geological signatures from the Red River fault, China[J]. Geology, 52(6): 405~410.

Dutta D, Maji V, Abdullah S, *et al*. 2022. Application of Electron Backscatter Diffraction (EBSD) Method in Earth Sciences[M]. Electron Microscopy in Science and Engineering. Singapore: Springer, 61~70.

Dyck B and Larson K P. 2023. Metasomatic origin of the Himalayan banded tourmaline leucogranite[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 178(7): 37.

Enami M, Nagaya T and Win M M. 2017. An integrated EPMA-EBSD study of metamorphic histories recorded in garnet[J]. American Mineralogist, 102(1): 192~204.

Faleiros F M, Moraes R, Pavan M, *et al*. 2016. A new empirical calibration of the quartz *c*-axis fabric opening-angle deformation thermometer [J]. Tectonophysics, 671: 173~182.

Faul U. 2021. Dislocation structure of deformed olivine single crystals from conventional EBSD maps[J]. Physics and Chemistry of Minerals, 48(9): 35.

Field D P, Magid K R, Mastorakos I N, *et al*. 2010. Mesoscale strain measurement in deformed crystals: A comparison of X-ray microdif-

fraction with electron backscatter diffraction[J]. Philosophical Magazine, 90(11): 1 451~1 464.

Fossen H. 2016. Structural Geology[M]. Cambridge University Press.

Fougerouse D, Reddy S M, Aylmore M, *et al*. 2021. A new kind of invisible gold in pyrite hosted in deformation-related dislocations[J]. Geology, 49(10): 1 225~1 229.

Goddard R M, Hansen L N, Wallis D, *et al*. 2020. A subgrain-size piezometer calibrated for EBSD[J]. Geophysical Research Letters, 47(23): e2020GL090056.

Goehner R P and Michael J R. 1996. Phase identification in a scanning electron microscope using backscattered electron Kikuchi patterns[J]. Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology, 101(3): 301~308.

Gordon S M, Kirkland C L, Reddy S M, *et al*. 2021. Deformation-enhanced recrystallization of titanite drives decoupling between U-Pb and trace elements[J]. Earth and Planetary Science Letters, 560: 116810.

Gruber J A, Brown S A and Lucadamo G A. 2011. Generalized Kearns texture factors and orientation texture measurement[J]. Journal of Nuclear Materials, 408(2): 176~182.

Haghdadi N, Primig S, Annasamy M, *et al*. 2020. Dynamic recrystallization in AlXCoCrFeNi duplex high entropy alloys[J]. Journal of Alloys and Compounds, 830: 154720.

Halfpenny A, Prior D J, and Wheeler J. 2012. Electron backscatter diffraction analysis to determine the mechanisms that operated during dynamic recrystallisation of quartz-rich rocks[J]. Journal of Structural Geology, 36: 2~15.

Han M, Chen C, Zhao G M, *et al*. 2018. Blind lattice-parameter determination of cubic and tetragonal phases with high accuracy using a single EBSD pattern[J]. Acta Crystallographica Section A Foundations and Advances, 74(6): 630~639.

Han Ning, Zhao Zhongbao, Wang Genhou, *et al*. 2021. Effect of the second phase on the strain localization in multiphase mylonite: A case study on the felsic mylonite in the Qinling Group[J]. Acta Geologica Sinica, 95(5): 1 614~1 629(in Chinese with English abstract).

Hu Ling, Liu Junlai, Ji Mo, *et al*. 2009. Handbook of Deformation Microstructure Identification [M]. Beijing: Geological Publishing House, 42~44(in Chinese)..

Huang Xuemeng, Zhang Jinjiang and Xu Zhiqin. 2016. The application of EBSD in the study of crustal structural deformation[J]. Acta Geologica Sinica, 90(6): 1 130~1 145(in Chinese with English abstract).

Humphreys F J. 2001. Review Grain and subgrain characterisation by electron backscatter diffraction[J]. Journal of Materials Science, 36(16): 3 833~3 854.

Hunter N J R, Weinberg R F, Wilson C J L, *et al*. 2018. Microscopic anatomy of a "hot-on-cold" shear zone: Insights from quartzites of the main central thrust in the alaknanda region (Garhwal Himalaya)[J]. 130(9~10): 1 519~1 539.

Jung H, Mo W and Green H W. 2008. Upper mantle seismic anisotropy resulting from pressure-induced slip transition in olivine[J]. Nature Geoscience, 2(1): 73~77.

Ji S C, Shao T B, Michibayashi K, *et al*. 2013. A new calibration of seismic velocities, anisotropy, fabrics, and elastic moduli of amphibole-rich rocks[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 118(9): 4 699~4 728.

Keller R R and Geiss R H. 2012. Transmission EBSD from 10 nm domains in a scanning electron microscope[J]. Journal of Microscopy, 245(3): 245~251.

Kilian R and Heilbronner R. 2017. Analysis of crystallographic preferred orientations of experimentally deformed Black Hills Quartzite[J]. Solid Earth, 8(5): 1 095~1 117.

Kim E, Kim Y and Mainprice D. 2020. AnisEulerSC: A MATLAB program combined with MTEX for modeling the anisotropic seismic properties of a polycrystalline aggregate with microcracks using self-consistent approximation[J]. Computers & Geosciences, 145: 104589.

Kohn V, Griffiths T A, Alifirova T, *et al*. 2024. Variations in orientation relationships between rutile inclusions and garnet host relate to magmatic growth zoning[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 179(7): 69.

Law R D. 2014. Deformation thermometry based on quartz c-axis fabrics and recrystallization microstructures: A review[J]. Journal of Structural Geology, 66: 129~161.

Li L L and Han M. 2015. Determining the Bravais lattice using a single electron backscatter diffraction pattern[J]. Journal of Applied Crystallography, 48(1): 107~115.

Liu Junlai, Cao Shuyun, Zou Yunxin, *et al*. 2008. EBSD analysis of rock fabrics and its application[J]. Geological Bulletin of China, 27(10): 1 638~1 645(in Chinese with English abstract).

Lloyd G E, Butler R W H, Casey M, *et al*. 2011. Constraints on the seismic properties of the middle and lower continental crust[J]. Geological Society, London, Special Publications, 360(1): 7~32.

Ma C and Rossman G R. 2008. Barioperovskite, $BaTiO_3$, a new mineral from the benitoite mine, California[J]. American Mineralogist, 93(1): 154~157.

Mainprice D and Silver P G. 1993. Interpretation of SKS-waves using

samples from the subcontinental lithosphere[J]. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 78(3~4): 257~280.

Mainprice D, Barruol G and Ben Ismaïl W. 2000. The seismic anisotropy of the earth's mantle: From single crystal to polycrystal[J]. Geophysical Monograph Series, 117: 237~264.

Mainprice D. 2014. Seismic anisotropy from crust to core: A mineral and rock physics perspective[C]//EGU General Assembly Conference Abstracts, 4 861.

Mainprice D, Bachmann F, Hielscher R, *et al*. 2015. Descriptive tools for the analysis of texture projects with large datasets using MTEX: Strength, symmetry and components[J]. Geological Society of London Special Publications, 409(1): 251~271.

Martin É and Jonas J J. 2010. Evolution of microstructure and microtexture during the hot deformation of Mg-3% Al[J]. Acta Materialia, 58(12): 4 253~4 266.

McNamara D D, Wheeler J, Pearce M, *et al*. 2024. A key role for diffusion creep in eclogites: Omphacite deformation in the Zermatt-Saas unit, Italian Alps[J]. Journal of Structural Geology, 179: 105033.

Menegon L, Piazolo S and Pennacchioni G. 2011. The effect of Dauphiné twinning on plastic strain in quartz[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 161(4): 635~652.

Mottram C M and Cottle J M. 2024. An electron backscatter diffraction study of monazite: Linking the time-deformation path[J]. Chemical Geology, 663: 122238.

Nowell M M, Witt R A and True B W. 2005. EBSD sample preparation: Techniques, tips, and tricks[J]. Microscopy Today, 13(4): 44~49.

Odlum M L, Levy D A, Stockli D F, *et al*. 2022. Deformation and metasomatism recorded by single-grain apatite petrochronology[J]. Geology, 50(6): 697~703.

Ostormujof T M, Purohit R P R, Gey N, *et al*. 2021. Can convolutional neural networks be trained on EBSD data to classify phase transformation products in Steels?[C]//Virtual EBSD 2021.

Ott J N, Condit C B, Schulte-Pelkum V, *et al*. 2024. Seismic anisotropy of mafic blueschists: EBSD-based constraints from the exhumed rock record[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 129(2): e2023JB027679.

Passchier C W and Trouw R A J. 2005. Microtectonics[M]. Springer Science and Business Media.

Phillips N J and Ji S C. 2021. Constraining the ductile deformation mechanisms of garnet across pressure-temperature space[J]. Journal of Structural Geology, 148: 104356.

Prior D J, Mariani E and Wheeler J. 2009. EBSD in the Earth sciences: Applications, common practice, and challenges[C]//Electron Backscatter Diffraction in Materials Science. Boston, MA: Springer US: 345~360.

Rafailov G, Caspi E N, Hielscher R, *et al*. 2020. Visualization of texture components using MTEX[J]. Journal of Applied Crystallography, 53(2): 540~548.

Reddy S M, Timms N E, Pantleon W, *et al*. 2007. Quantitative characterization of plastic deformation of zircon and geological implications[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 153(6): 625~645.

Rehman H U, Mainprice D, Barou F, *et al*. 2023. Crystallographic preferred orientations and microtexture of the Himalayan eclogites revealing records of syn-deformation peak metamorphic stage and subsequent exhumation[J]. Journal of Structural Geology, 167: 104792.

Robertson I M, Schuh C A, Vetrano J S, *et al*. 2011. Towards an integrated materials characterization toolbox[J]. Journal of Materials Research, 26(11): 1 341~1 383.

Schmid S M and Casey M. 1986. Complete fabric analysis of some commonly observed quartz *C*-axis patterns[C]//Mineral and Rock Deformation: Laboratory Studies. Washington, D. C. American Geophysical Union, 263~286.

Schwartz A J, Kumar M, Adams B L, *et al*. 2009. Electron Backscatter Diffraction in Materials Science[M]. New York: Springer.

Shang Yongmei, Yang Yu and Yang Xiaosong. 2019. Crystallographic preferred orientation (cpo) of anisotropic minerals in the lithosphere and its significance to the study of lithosphere dynamics[J]. Seismology and Geology, 41(3): 704~725(in Chinese with English abstract

Skemer P, Katayama I, Jiang Z T, *et al*. 2005. The misorientation index: Development of a new method for calculating the strength of lattice-preferred orientation[J]. Tectonophysics, 411(1~4): 157~167.

Sneddon G C, Trimby P W and Cairney J M. 2016. Transmission Kikuchi diffraction in a scanning electron microscope: A review[J]. Materials Science and Engineering: R: Reports, 110: 1~12.

Stipp M, Stünitz H, Heilbronner R, *et al*. 2002. The eastern Tonale fault zone: A 'natural laboratory' for crystal plastic deformation of quartz over a temperature range from 250 to 700℃[J]. Journal of Structural Geology, 24(12): 1 861~1 884.

Sun Lijing, Zhao Zhongbao, Pan Jiawei, *et al*. 2021. The stress and strain state of Yalahe fault in the Kangding segment of the Xianshuihe fault zone and its seismogenic environment[J]. Acta Petrologica Sinica, 37(10): 3 225~3 245(in Chinese with English abstract).

Suzuki S. 2013. Evaluation of transmission-EBSD method and its application to observation of microstructures of metals[J]. Journal of the Ja-

pan Institute of Metals and Materials, 77(7): 268~275.

Tatham D J. 2008. Towards Using Seismic Anisotropy to Interpret Ductile Deformation in Mafic Lower Crust[D]. Leeds: University of Leeds.

Taufner R, Viegas G and Trepmann C. 2023. Interplay between crystal-plasticity, fracturing and dissolution-precipitation creep in lower-crustal ultramylonite from hole U1473A, Atlantis Bank, Southwest Indian Ridge[J]. Journal of Structural Geology, 167: 104780.

Taylor J M, Teyssier C, Whitney D L, *et al*. 2023. Linked microstructural and geochemical evolution of mylonitic quartzite during exhumation of a core complex[J]. Journal of Structural Geology, 169: 104846.

Teng Jiwen, Ruan Xiaomin, Zhang Yongqian, *et al*. 2012. The stratificational velocity structure of crust and covering strata of upper mantle and the orbit of deep interaquifer substance locus of movement for Tibetan Plateau[J]. Acta Petrologica Sinica, 28(12): 4 077~4 100 (in Chinese with English abstract).

Thomsen K, Schmidt N, Bewick A, *et al*. 2013. Improving the accuracy of orientation measurements using EBSD[J]. Microscopy and Microanalysis, 19(S2): 724~725.

Tikoff B and Fossen H. 1995. The limitations of three-dimensional kinematic vorticity analysis[J]. Journal of Structural Geology, 17(12): 1 771~1 784.

Toffol G, Pennacchioni G, Menegon L, *et al*. 2024. On-fault earthquake energy density partitioning from shocked garnet in an exhumed seismic midcrustal fault[J]. Science Advances, 10(9): eadi8533.

Tokle L, Hufford L J, Behr W M, *et al*. 2023. Diffusion creep of sodic amphibole-bearing blueschist limited by microboudinage[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 128(9): e2023JB026848.

Trimby P W. 2012. Orientation mapping of nanostructured materials using transmission Kikuchi diffraction in the scanning electron microscope [J]. Ultramicroscopy, 120: 16~24.

Vauchez A, Tommasi A, Barruol G, *et al*. 2000. Upper mantle deformation and seismic anisotropy in continental rifts[J]. Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and Geodesy, 25(2): 111~117.

Verberne R, Reddy S M, Saxey D W, *et al*. 2022. Dislocations in minerals: Fast-diffusion pathways or trace-element traps? [J]. Earth and Planetary Science Letters, 584: 117517.

Vernon R H. 2018. A Practical Guide to Rock Microstructure[M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press.

Vonlanthen P, Kunze K, Burlini L, *et al*. 2006. Seismic properties of the upper mantle beneath lanzarote (canary islands): Model predictions based on texture measurements by EBSD[J]. Tectonophysics, 428(1~4): 65~85.

Wallis D, Hansen L N, Ben Britton T, *et al*. 2016. Geometrically necessary dislocation densities in olivine obtained using high-angular resolution electron backscatter diffraction[J]. Ultramicroscopy, 168: 34~45.

Wallis D, Lloyd G E and Hansen L N. 2018. The role of strain hardening in the transition from dislocation-mediated to frictional deformation of marbles within the Karakoram Fault Zone, NW India[J]. Journal of Structural Geology, 107: 25~37.

Wang Q, Bagdassarov N and Ji S C. 2013. The Moho as a transition zone: A revisit from seismic and electrical properties of minerals and rocks[J]. Tectonophysics, 609: 395~422.

Wilkinson A J and Britton T B. 2012. Strains, planes, and EBSD in materials science[J]. Materials Today, 15(9): 366~376.

Wilkinson A J, Britton T B, Jiang J, *et al*. 2014. A review of advances and challenges in EBSD strain mapping[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 55(1): 012020.

Wilkinson A J, Clarke E E, Britton T B, *et al*. 2010. High-resolution electron backscatter diffraction: An emerging tool for studying local deformation[J]. The Journal of Strain Analysis for Engineering Design, 45(5): 365~376.

Wilkinson A J, Meaden G and Dingley D J. 2006. High-resolution elastic strain measurement from electron backscatter diffraction patterns: New levels of sensitivity[J]. Ultramicroscopy, 106(4~5): 307~313.

Wright S I, Nowell M M and Field D P. 2011. A review of strain analysis using electron backscatter diffraction[J]. Microscopy and Microanalysis, 17(3): 316~329.

Wu Y W, Zhang J X, Zhang B, *et al*. 2023. Early Paleozoic oblique convergence from subduction to collision: Insights from timing and structural style of the transpressional dextral shear zone in the Qilian orogen, northern Tibet of China[J]. GSA Bulletin, 136(5~6): 1 889~1 915.

Xia H R and Platt J P. 2018. Quartz grainsize evolution during dynamic recrystallization across a natural shear zone boundary[J]. Journal of Structural Geology, 109: 120~126.

Xu Haijun, Jin Shuyan and Zheng Borang. 2007. New technique of petrofabric: Electron backscatter diffraction(EBSD)[J]. Geoscience, 21(2): 213~225(in Chinese with English abstract).

Xu Zhiqin, Wang Qin, Liang Fenghua, *et al*. 2009. Electron backscatter diffraction (EBSD) technique and its application to study of continental dynamics[J]. Acta Petrologica Sinica, 25(7): 1 721~1 736(in Chinese with English abstract).

Xypolias P. 2010. Vorticity analysis in shear zones: A review of methods and applications[J]. Journal of Structural Geology, 32(12): 2 072~

2 092.

Yang Ping. 2007. Electron Backscattering Diffraction Technology and Its Application[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1~229(in Chinese).

Yardley V A, Fahimi S and Payton E J. 2015. Classification of creep crack and cavitation sites in tempered martensite ferritic steel microstructures using MTEX toolbox for EBSD[J]. Materials Science and Technology, 31(5): 547~553.

You J, Huang Y J, Liu C M, *et al*. 2020. Microstructural study of a Mg-Zn-Zr alloy hot compressed at a high strain rate[J]. Materials, 13(10): 2 348.

Zaefferer S. 2004. Investigation of the bainitic phase transformation in a low alloyed TRIP steel using EBSD and TEM[J]. TMS Letters, 1(7): 153~154.

Zertani S, Morales L F G and Menegon L. 2024. Omphacite breakdown: Nucleation and deformation of clinopyroxene-plagioclase symplectites[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 179(5): 44.

Zhao J H, Jin Z K, Jin Z J, *et al*. 2017. Origin of authigenic quartz in organic-rich shales of the Wufeng and Longmaxi Formations in the Sichuan Basin, South China: Implications for pore evolution[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 38: 21~38.

Zhao L, Zhang M N, Yu Z H, *et al*. 2020. Abnormal twinning behaviors in ZK60 alloy by powder metallurgy process[J]. Materials Science and Engineering: A, 779: 139145.

Zhou B J, Liu J L, Yan J X, *et al*. 2023. Shearing-enhanced deep fluid circulation induces seismic anisotropy in the lower crust at slow-spreading oceanic ridges[J]. Geology, 51(5): 465~470.

Zhang L, Zhang B, Zhang J J, *et al*. 2022. The rheology and deformation of the South Tibetan Detachment System as exposed at Zherger La, east-central Himalaya: Implications for exhumation of the Himalayan metamorphic core[J]. Journal of Structural Geology, 157: 104559.

Zhang Qing and Li Xin. 2021. The application and associated problems of EBSD technique in fabric analysis[J]. Acta Petrologica Sinica, 37(4): 1 000~1 014(in Chinese with English abstract).

Zhang T T, Collins D M, Dunne F P E, *et al*. 2014. Crystal plasticity and high-resolution electron backscatter diffraction analysis of full-field polycrystal Ni superalloy strains and rotations under thermal loading[J]. Acta Materialia, 80: 25~38.

Zuza A V, Cao W R, Levy D A, *et al*. 2024. Kinematic vorticity of shear zones that accommodate vertical crustal advection: Implications for metamorphic core complexes and pluton emplacement[J]. Earth and Planetary Science Letters, 646: 118964.

附中文参考文献

曹淑云, 刘俊来. 2006. 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, 21(10): 1 091~1 096.

陈柏林, 崔玲玲, 陈正乐. 2014. 阿尔金山喀腊大湾地区变形岩石 EBSD 组构分析[J]. 地质学报, 88(8): 1 475~1 484.

韩　宁, 赵中宝, 王根厚, 等. 2021. 多相糜棱岩内第二相对应变局部化的影响——以秦岭群花岗质糜棱岩为例[J]. 地质学报, 95(5): 1 614~1 629.

胡　玲, 刘俊来, 纪　沫, 等. 2009. 变形显微构造识别手册[J]. 北京: 地质出版社, 42~44.

黄学猛, 张进江, 许志琴. 2016. 电子背散射衍射(EBSD)技术在地壳构造变形研究中的应用[J]. 地质学报, 90(6): 1 130~1 145.

刘俊来, 曹淑云, 邹运鑫, 等. 2008. 岩石电子背散射衍射(EBSD)组构分析及应用[J]. 地质通报, 27(10): 1 638~1 645.

商咏梅, 杨　彧, 杨晓松. 2019. 岩石圈主要各向异性矿物的 CPO 特征及其对岩石圈动力学研究的启示[J]. 地震地质, 41(3): 704~725.

孙丽静, 赵中宝, 潘家伟, 等. 2021. 鲜水河断裂带康定段雅拉河断裂深部应力应变状态及其孕震环境[J]. 岩石学报, 37(10): 3 225~3 245.

滕吉文, 阮小敏, 张永谦, 等. 2012. 青藏高原地壳与上地幔成层速度结构与深部层间物质的运移轨迹[J]. 岩石学报, 28(12): 4 077~4 100.

徐海军, 金淑燕, 郑伯让. 2007. 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, 21(2): 213~225.

许志琴, 王　勤, 梁凤华, 等. 2009. 电子背散射衍射(EBSD)技术在大陆动力学研究中的应用[J]. 岩石学报, 25(7): 1 721~1 736.

杨　平. 2007. 电子背散射衍射技术及其应用[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1~229.

张　青, 李　馨. 2021. 电子背散射衍射技术(EBSD)在组构分析中的应用和相关问题[J]. 岩石学报, 37(4): 1 000~1 014.