

石英道芬双晶对晶格优选取向及变形机制的贡献和意义

占乐凡, 曹淑云

(中国地质大学(武汉)地球科学学院 地质过程与矿产资源国家重点实验室, 湖北 武汉 430074)

摘要: 矿物是岩石圈最基本的物质组成,其变形行为、特性和物理/化学过程直接影响着大陆岩石圈的力学强度和流变学性质。石英是地壳主要的组成矿物之一,对其变形机理及制约因素的研究,是理解地壳流变学性质的关键。石英中的道芬双晶在晶体形态上表现出沿 c 轴方向的6次对称,早期研究认为其只能形成于 α -和 β -石英的相变过程中,越来越多的研究发现,机械应力诱发的道芬双晶对温度和应力具有一定的依赖性。通过对高黎贡剪切带内变形石英的EBSD组构分析并结合前人的研究,发现石英道芬双晶对晶内塑性应变的分布及其不同滑移系的激活起着重要作用。 α -石英晶体中菱面 $\langle r \rangle$ 方向比 $\langle z \rangle$ 方向具有更高柔度,即更适应变形。在外力作用下,石英道芬双晶通过菱面 $\langle r \rangle$ 和 $\langle z \rangle$ 上的弹性性质差异,即相比 $\langle z \rangle$ 方向,在压缩方向(σ_1)上代表晶面方向的极点更多地聚集在 $\langle r \rangle$ 方向,形成一种较为少见的菱面 $\langle r \rangle$ 晶格优选取向。由此可见,道芬双晶是石英塑性变形过程中的一种特殊的流变弱化机制,其不仅使得晶体发生可恢复的结构弱化,还通过动态重结晶作用和颗粒边界滑移机制来细化颗粒协调应变,对矿物晶体内的应变局部化过程具有重要的贡献。此外,道芬双晶还是潜在的应力计。

关键词: 变形机制; 石英道芬双晶; 晶格优选取向; 弱化机制; 晶内变形; EBSD; 高黎贡剪切带

中图分类号: P572; P578.4⁺94; P313 文献标识码: A 文章编号: 1000-6524(2022)06-1135-12

The effect of Dauphiné twinning on the crystallographic preferred orientation and deformation mechanism in quartz

ZHAN Le-fan and CAO Shu-yun

(School of Earth Sciences, China University of Geosciences, State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, Wuhan 430074, China)

Abstract: Minerals are the most important component of the lithosphere, whose deformation behavior, properties and physical/chemical processes directly affect the mechanical strength and rheological property of the continental lithosphere. Quartz is one of the main minerals in the crust. Dauphiné twinning in quartz consists of a 60° rotation around the c -axis. Previous studies have shown that Dauphiné twinning is only formed in the transformation between the α -quartz and β -quartz, however, furthermore evidences reveal that mechanical Dauphiné twinning is related to the influence of temperature and stress. Combined with the previous studies, we present structure and EBSD analysis of the deformed quartzites in the Gaoligong shear zone and find that the presence of Dauphiné twins has a great influence in the deformation process in quartz. The compliance of positive rhomb $\langle r \rangle$ is greater than the compliance

收稿日期: 2022-06-06; 接受日期: 2022-08-22; 编辑: 郝艳丽

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(41972220); 国家自然科学基金优秀青年基金(41722207); 国家重点研发计划项目(SQ2017YFSF040030)

作者简介: 占乐凡(1997-), 男, 博士研究生, 构造地质学专业, E-mail: lefan@cug.edu.cn; 通讯作者: 曹淑云(1978-), 女, 教授, 博士生导师, 长期从事深部地壳构造-热-流体演化及流变学研究, E-mail: shuyun.cao@cug.edu.cn。

of negative rhomb $\langle z \rangle$ in α -quartz. Thus, the positive rhomb $\langle r \rangle$ direction is more compliant for the stress. Dauphiné twinning is driven by the anisotropy in the elastic compliance of quartz and results in a little-described quartz crystallographic preferred orientation, characterized by the alignment of the poles of the planes of the more compliant positive rhomb $\langle r \rangle$ nearly parallel to the compression direction. Dauphiné twinning also plays an important role in the distribution of the intracrystalline plastic deformation and the activation of different sets of slip systems in the plastic deformation of quartz. Dauphiné twinning is a specific weakening mechanism and has a great contribution to the processes of intracrystalline strain localization, which not only results in the recoverable structural weakening, but control the grain size reduction by dynamic recrystallization and grain boundary sliding mechanism. In addition, Dauphiné twinning could be a potential palaeopiezometer in quartz-bearing rocks.

Key words: deformation mechanism; Dauphiné twinning; crystal preferred orientation; weakening mechanism; intracrystalline deformation; EBSD; Gaoligong shear zone

Fund support: National Natural Science Foundation of China (41972220); Excellent Youth Fund of National Natural Science Foundation of China (41722207); National Key Research and Development Program (SQ2017YFSF040030)

石英是大陆地壳中主要的组成矿物之一,也是最常见造岩矿物,对其变形行为与机制的研究,是深入理解地壳强度和流变学性质的关键(Kohlstedt *et al.*, 1995; Stipp *et al.*, 2002; Passchier and Trouw, 2005; Stipp and Kunze, 2008; 张进江等, 2019)。纯的石英无色、透明,希腊人称为“Krystallos”,意思是“洁白的冰”。由于石英具有较为简单的化学成分和特殊的晶体结构,其塑性变形行为、组构特征及变形温度-压力之间的关系得到了前人的广泛研究(Stipp *et al.*, 2002; Lloyd, 2004; Cao *et al.*, 2013a, 2013b; Ceccato *et al.*, 2017; McGinn *et al.*, 2020)。

自然界中,尽管双晶在大多数种类的矿物晶体中不出现或少见,但是在少数的矿物如方解石、石英、斜长石、角闪石、锡石、十字石等晶体中常常发育双晶。研究表明,一些矿物变形过程中伴随有不同程度的双晶发育。长石和方解石的双晶非常发育,且在显微镜下常常可见。石英也发育双晶,然而,由于其双晶单体的光率体大致相同,因此,在显微镜下比较难以直接观测到。自1933年Zinserling和Schubnikov首次在石英单晶中发现机械应力诱导下能够形成道芬双晶(图1),之后许多学者相继开展了显微构造和岩石组构研究,来探究道芬双晶的作用及意义(Wooster and Wooster, 1946; Tullis, 1970; Tullis and Tullis, 1972; Markgraaff, 1986; Lloyd, 2004; Pehl and Wenk, 2005; Wenk *et al.*, 2005; Mengon *et al.*, 2011; Zhang *et al.*, 2012; Rahl *et al.*, 2018; McGinn *et al.*, 2020; Bidgood *et al.*,

2021)。早期的研究认为道芬双晶形成于低温 α -石英和高温 β -石英的相变过程中,随着先进的电子背散射衍射(EBSD)技术的广泛应用,发现机械应力诱发的道芬双晶对温度和应力具有一定的依赖性(Lloyd, 2004; Pehl and Wenk, 2005; Wenk *et al.*, 2005, 2006, 2007; Mengon *et al.*, 2011; McGinn *et al.*, 2020),也意识到在不同地质条件下道芬双晶的发育或存在可能对石英晶体塑性变形具有重要影响,并对其成因机制以及形成条件等进行了探讨(Piazolo *et al.*, 2005; Wenk *et al.*, 2009; Mengon *et al.*, 2011; Rahl *et al.*, 2018)。然而,到目前为止,天然岩石变形过程中,石英道芬双晶的存在对变形行为及机制的影响方面的研究仍然很少,制约了对地壳流变学性质的全面理解。

云南高黎贡剪切带出露有同构造变形的石英脉,石英表现出典型的脆-韧性转换域下的变形特征(Dong *et al.*, 2019),其中的粗颗粒石英残斑大多发育道芬双晶,晶内发育有细粒化的重结晶集合体条带。本文在前人对道芬双晶的研究基础上,对高黎贡剪切带内石英脉中的石英开展了精细EBSD晶格优选取向研究,分析和总结了道芬双晶的结晶学特征及形成条件,并进一步探讨了道芬双晶对石英变形行为及机制的贡献和意义。

高黎贡剪切带石英脉平行糜棱叶理方向产出。本文石英脉样品来自于高黎贡剪切带边界处,按照平行矿物拉伸线理和垂直糜棱面理的XZ面切制了定向薄片。样品EBSD测试在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室完成,使用仪

器型号为蔡司 Sigma 300VP 场发射扫描电镜, 搭载有牛津 EBSD 探头。样品在精细抛光后在低真空下完成测试, 加速电压为 20 kV, 束流工作距离为 16 mm, 步长为 1 μm , 收集点至少匹配 8 个衍射带以被完整接收。后续处理软件为 Channel 5 和 Aztec crystal 软件。文中所展示的 IPF 面分布图是以应变椭圆中 Z 方向为基准进行的编码。颗粒边界迹线分析是一种通过 EBSD 数据来确定晶体活动滑移系的较为可靠的方法, 其原理为利用 EBSD 数据来确定晶体可能的旋转轴, 接着在理想的倾斜或扭曲边界根据模型与旋转轴间的关系来确定出颗粒所发育的活动滑移系, 具体方法可参考 Lloyd (2004)。

1 道芬双晶的结晶学特征及形成影响因素

石英具有相对复杂的结构组成, 具有一系列同质多像变体, 其中最常见的是低温 α -石英、高温 β -石英和高压柯石英 (Okrusch and Frimmel, 2020; Tilley, 2020)。受温度诱导, α -石英和 β -石英之间能发生可逆相转变, 一般认为, β -石英在 573 ~ 870 $^{\circ}\text{C}$ 的范围内稳定, α -石英在 573 $^{\circ}\text{C}$ 以下的范围内稳定 (Wenk *et al.*, 2007, 2009; Jacob and Cordier, 2010; Okrusch and Frimmel, 2020; Tilley, 2020)。石英双晶律种类较多, 常见的有道芬双晶律 (Dauphiné twins)、巴西双晶律、日本双晶律等 (Zhao *et al.*, 2013; Okrusch and Frimmel, 2020; Tilley, 2020), 其中道芬双晶最早 (20 世纪初) 发现于六方结构的 β -石英冷却相变为三方结构的 α -石英过程中, 因最早在法国南部道芬省发现而得名。道芬双晶以 c 轴为双晶轴, 由两个具有相同结构 (同为左形或右形) 的 α -石英晶体聚合在一起, 晶面绕 c 轴每转 60° 就重复 1 次而呈 6 次对称分布, 双晶律为 $\langle 0001 \rangle 60^{\circ}$ 。道芬双晶中, 正负菱面上的质点可被互相代替, 导致原始晶体呈现出 622 点群的假对称, 即单晶的 L^3 变为 L^6 , 且原晶体在垂直柱面上并无 L^2 , 但在双晶上却产生了垂直柱面的 L^2 (图 1)。图 1 中, a 是 α -石英的一般形, 左形; b 是由左形晶形成的道芬双晶; α -石英宏观形态下各晶轴和晶面符号为: $\langle c \rangle \rightarrow \langle 0001 \rangle$, $\langle a \rangle \rightarrow \langle 11\bar{2}0 \rangle$, $\{m\} \rightarrow \{10\bar{1}0\}$, $\{r\} \rightarrow \{10\bar{1}1\}$, $\{z\} \rightarrow \{01\bar{1}1\}$, $\{s\} \rightarrow \{61\bar{5}1\}$, $\{x\} \rightarrow \{21\bar{1}1\}$; 石英的左右形由三方双锥 $\{s\}$ 和三方偏面体 $\{x\}$ 方位确定。

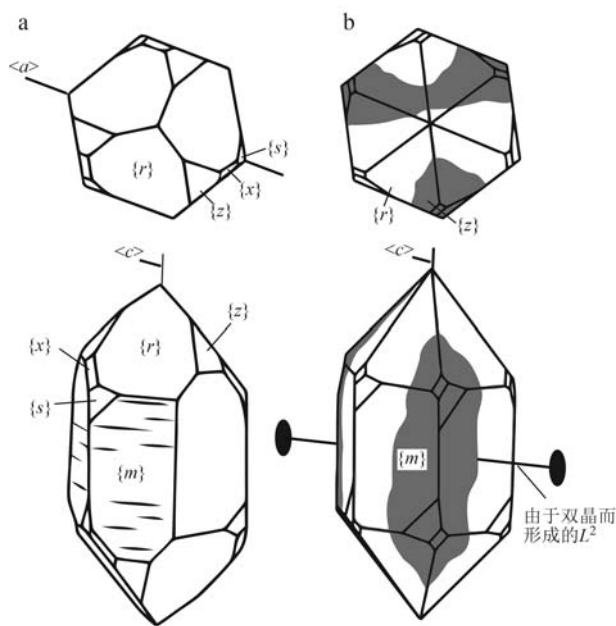


图 1 三方晶系 α -石英单晶(a)和道芬双晶(b)宏观示意图
Fig. 1 Sketch diagrams of the trigonal α -quartz(a) and the Dauphiné twinning(b)

早期的实验研究表明, 受到高应力的石英晶体会发生道芬双晶化 (Zinslerling and Schubnikov, 1933; Wooster *et al.*, 1947; Thomas and Wooster, 1951)。之后通过对石英的单晶压缩实验, 发现在 1 ~ 2 GPa 的差应力下, 石英晶体即发育道芬双晶 (Tullis and Tullis, 1972); 进一步的实验研究发现在 20 GPa 的冲击波下石英也能形成道芬双晶的形成 (Wenk *et al.*, 2005)。最近越来越多研究者注意到沉积岩 (Zhang *et al.*, 2012; Olierook *et al.*, 2014)、糜棱岩 (Lloyd, 2004; Pehl and Wenk, 2005; Menegeon *et al.*, 2011; McGinn *et al.*, 2020)、混合岩 (Levine *et al.*, 2016) 在经历构造变形过程中形成了道芬双晶, 甚至还发现陨石在撞击变形过程中也可形成石英道芬双晶 (Wenk *et al.*, 2005), 导致研究者开始思考外部条件对双晶活动的影响及其意义。

道芬双晶的形成过程与温度和差应力之间存在一定的耦合关系, 即当温度较高时, 只需要较低的差应力就能诱发道芬双晶 (Thomas and Wooster, 1951; Tullis, 1970; Tullis and Tullis, 1972; Wenk *et al.*, 2006)。受制于相变后道芬双晶消失的影响, 温度影响的上限不会超过相变温度 (约 570 ~ 600 $^{\circ}\text{C}$)。通过对未变形多晶石英的压缩实验研究发现, 在约 300 MPa 的围压、100 MPa 的差异应力和 300 ~ 400 $^{\circ}\text{C}$ 条件下, 石英会出现道芬双晶; 在 500 $^{\circ}\text{C}$

时,道芬双晶发育约需 50 MPa 的差异应力;在 600°C (接近相变过程温度)的温度下低于 50 MPa 的差应力就可诱发道芬双晶的形成 (Wenk *et al.*, 2006, 2007)。实验结果表明,差应力较低时,温度越高,越容易诱发道芬双晶。最近, Rahl 等 (2018) 报道了石英道芬双晶出现在未面理化的天然低级变质石英岩中,变质温度在 300~450°C 左右,同样也说明了道芬双晶只需要较低的差应力就能被诱发形成。实验数据还进一步表明,由于颗粒初始取向的限定,一个多晶样品中机械应力诱发的道芬双晶化的程度存在一个上限,在 500°C 下,多晶石英岩的组构在 450 MPa 下达到饱和,将差应力增加到 600 MPa 并不能激活取向较差的晶粒形成双晶 (图 2c) (Wenk *et al.*, 2006)。而在 600°C 下,多晶石英岩的组构在 300 MPa 下就达到了饱和。因此,可以得出温度的升高能够有效降低道芬双晶被激活的难度,如从动力学角度来解释,即温度的升高能够有效升高双晶化的势垒,从而降低双晶化的活化能,促进道芬双晶的形成。

另外,时间因素对于道芬双晶化过程也是一个重要的影响因素。早期有实验研究认为,单晶中道芬双晶化是一个极短的过程,几乎是一瞬间 (Schubnikov and Zinslerling, 1932; Wooster and Wooster, 1946),例如天然多晶石英岩样品在陨石撞击过程中形成的道芬双晶同样被认为是短时间内迅速形成的 (Trepmann and Spray, 2005; Wenk *et al.*, 2005)。虽然目前实验条件下还没有验证道芬双晶的短时效应,但是 Wenk 等 (2006) 对比了 500°C 下 2 h 和 31 h 的应力作用所产生的组构强度类似,说明道芬双晶至少在 2 h 时已经达到了饱和。来自于钛铁矿的机械双晶的形成类似于道芬双晶,同样仅发生了轻微的原子位移重排,且已经被证明发生在微秒的尺度上相关 (Harrison *et al.*, 2003)。与之类比,道芬双晶很可能同样仅发生在微秒尺度,遗憾地是目前还没有研究能够证明。

2 石英的菱面择优取向及微观机理

天然变形或实验条件下,变形岩石中的石英集合体在一定温度压力下常常会形成<c>轴方向的优选定向 (CPO) (Schmid and Casey, 1986; Stipp *et al.*, 2002; 许志琴等, 2009; 夏浩然等, 2011; Kilian *et al.*, 2011; Cao *et al.*, 2013a, 2013b; Ceccato *et*

al., 2017)。然而,在天然和实验样品中石英还发育一种由菱面取向主导的特殊组构 (图 2, 图中 S_1 和 S_3 代表两个主应力方向,反极图方向为压缩方向 Z_0 , m. u. d. 指示极点的密度)。通过对云南高黎贡剪切带中变形石英脉中的石英 EBSD 晶体取向进行分析,可以见到在菱面 $\{r\}$ 上发育明显的 CPO,在菱面 $\{z\}$ 上发育相对弱的 CPO,<c>轴和<a>轴方向上的 CPO 趋于随机均匀分布 (图 2a),其结果与美国弗吉尼亚蓝岭地区样品中的石英组构 (图 2b) (Rahl *et al.*, 2018) 非常相似。

对这种在菱面 $\{r\}$ 上发育的特殊组构类型,最早 Tullis (1968) 通过石英塑性变形中菱面滑移过程来解释。然而,这种观点被实验结果所质疑 (Tullis, 1970)。塑性变形中滑移系启动的决定性因素在于变形应力是否达到了临界分切应力值。如果是滑移导致的优选定向,那么菱面上<r>和<z>方向的临界分切应力会出现明显差异。通过两个单晶轴向压缩实验证明<r>和<z>取向的晶体在相同差应力下具有相同的塑性变形构造特征,即启动的滑移系一致 (Tullis, 1970)。此外,一般认为具有六方对称性的 β -石英相发生塑性变形时不可能存在正负菱面方向的组构差异,因此,晶体塑性变形的滑移过程似乎还不能很好地解释择优取向的不对称选择。这也导致对石英<r>轴在平行于 σ_1 (最大主应力) 方向会出现优选方向的机制的重新思考,这种机制显然既不涉及滑移过程,也不涉及重结晶过程。

在 α -石英域,石英很容易受机械剪应力诱导形成道芬双晶,且不会发生永久的应变 (Zinslerling and Schubnikov, 1933; Tullis, 1970; Tullis and Tullis, 1972; Wenk *et al.*, 2006, 2007; Barton and Wenk, 2007)。图 3 展示了发生双晶化的 α -石英模型,从中可以看出双晶化后仅发生了少量原子的重排,并没有任何化学键的断裂。该模型仅包括硅原子,颜色代表原子的能级,模型视角垂直于 c 轴, a 代表石英<1120>晶轴。可以认为是道芬双晶引起了石英菱面 $\{r\}$ 和菱面 $\{z\}$ 上的原子重新排布,很可能这就是导致<r>上优选定向的机制。然而仍然存在一个重要问题:为什么实验中在 σ_1 的方向上<r>上的取向选择会远大于<z>上的取向选择?

石英是一轴晶且具有很强的各向异性,不同晶

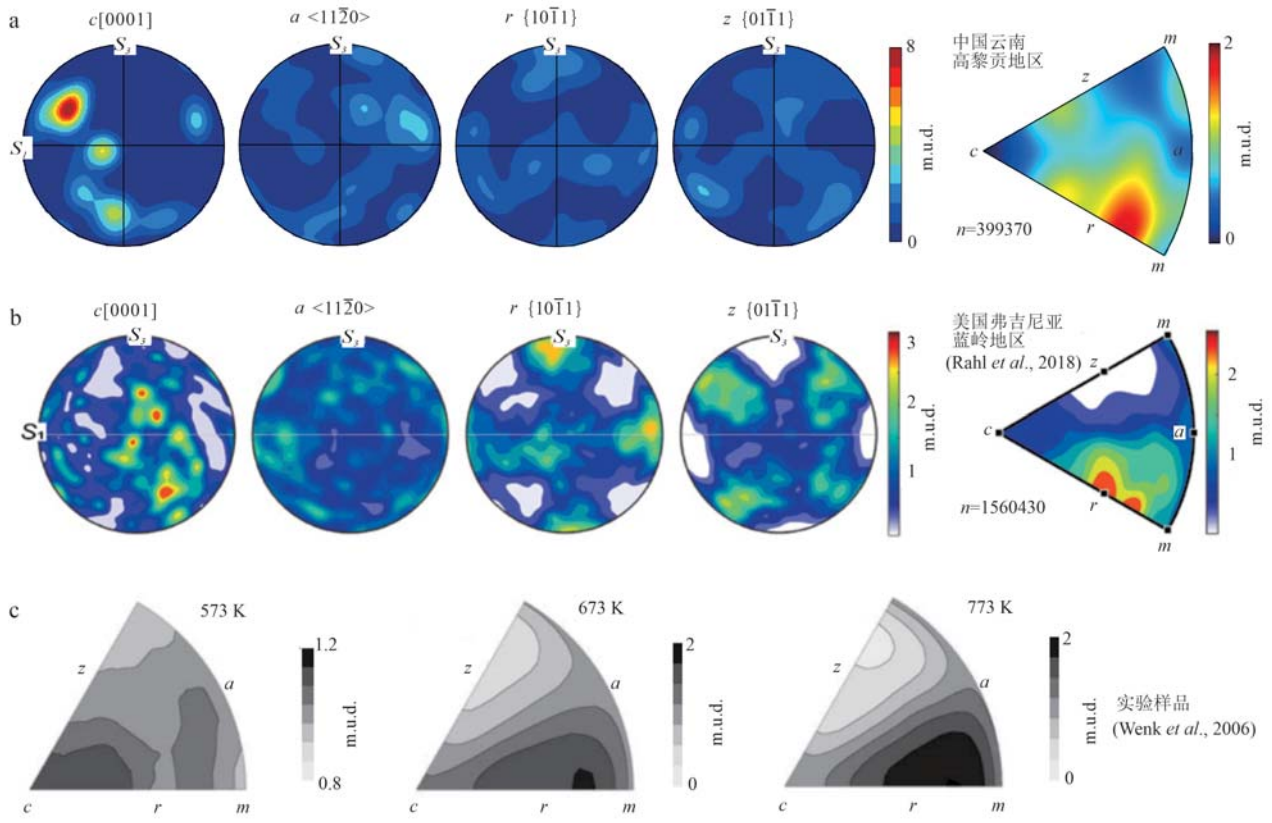


图 2 弱变形含石英岩石的石英组构特征

Fig. 2 Characteristics of quartz fabric in the weak deformed quartz-bearing rocks

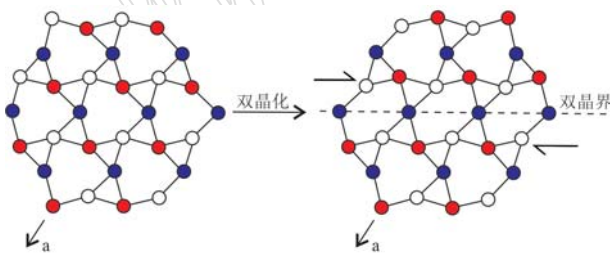


图 3 剪切诱导形成的道芬双晶结构模型

Fig. 3 The model for structure of Dauphiné twinning in the quartz induced by shear

体学取向的力学性能有很大的差异。石英各结晶学方向柔度 S'_{11} (刚度的倒数, 跟杨氏模量有一定相关性) 的变化表明, $\langle r \rangle$ 方向比 $\langle z \rangle$ 方向具有更大顺应性, 换句话说, $\langle z \rangle$ 方向具有更强的抵抗变形的能力, 而 $\langle r \rangle$ 方向更软(图 4, 图中数据测量于室温和标准大气压下)。双晶的形成可使整个晶体在给定的应力下尽可能地屈服, 因此, 对于道芬双晶而言, 尽可能趋向 $\langle r \rangle$ 方向是在外加应力下更顺应的表现,

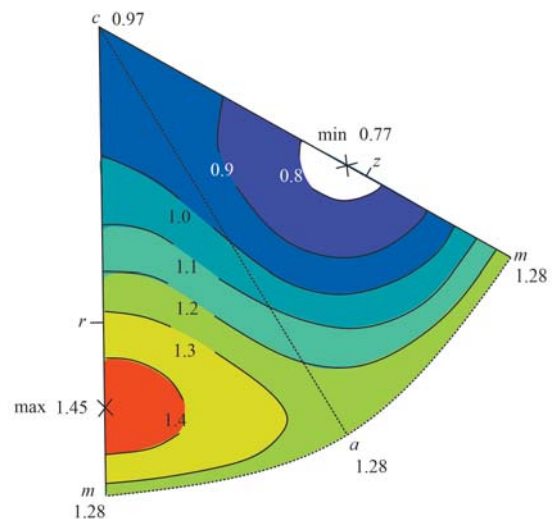


图 4 石英不同晶体方向上 S'_{11} 的反极图(改自 Tullis, 1970)

Fig. 4 The inverse pole figure of S'_{11} with different crystal directions in quartz(modified from Tullis, 1970)

即当晶体受到外部应力作用, 根据能量守恒原则, 应力所做的功会转移到晶体内部, 这部分能量在没发生塑性变形的情况下通过原子重排使之作为弹性

应变能储存在晶体内部。弹性应变能在差应力实验中符合以下关系(Tullis, 1970): $\Delta E = 1/2(\sigma_1 - \sigma_3)^2 \Delta S'_{11}$, 式中, 弹性应变能 ΔE 与柔度 S'_{11} 成正比, $\sigma_1 - \sigma_3$ 表示差异应力值。该关系式显示在应力分布均匀的条件下, 柔度越大, 弹性应变能就越高。因此, 在道芬双晶中, 当外部应力方向趋向于 $\langle r \rangle$ 方向, 则能储存更多的弹性应变能, 也就更适应变形。机械应力诱导的道芬双晶是一种石英晶体相对于应力场的取向有关的应力依赖特征, 它在外部应力作用下能最大化晶体的弹性应变能, 这是系统内部能量最小化过程的一部分(Tullis and Tullis, 1972)。Tullis (1970) 的两个单晶实验同样证实了这一点, 虽然两个晶体具有相似的塑性变形构造特征, 但是其取向强烈表现出菱面 $\{r\}$ 方向明显大于菱面 $\{z\}$ 方向(图 5)(Tullis, 1970; Tullis and Tullis, 1972)。因此, 我们认为道芬双晶形成的重要驱动机制是石英晶体的弹性各向异性, 而道芬双晶是石英变形的特殊弱化机制, 它通过 $\langle r \rangle$ 方向上的优选定向导致石英结构上的弱化, 从而使石英更容易发生变形。

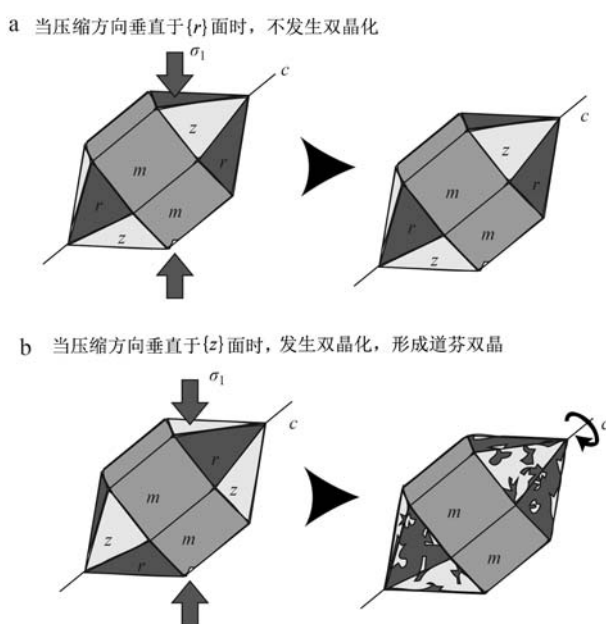


图 5 石英单晶轴向压缩实验结果示意图

Fig. 5 The sketches of the results of the axial compression experiments on single quartz crystals

3 道芬双晶对天然石英塑性变形行为的制约作用

由于之前研究的道芬双晶并不涉及塑性变形, 也就是说并不能容纳永久应变, 因此很少有研究注

意到道芬双晶对塑性域下含石英岩石显微构造演化和变形行为上的贡献。然而, 随着近年来技术的发展, 越来越多的研究注意到, 道芬双晶对天然样品中石英晶内塑性变形的分布、不同滑移系的激活、动态重结晶的位置具有重要影响(Stipp and Kunze, 2008; Mengon *et al.*, 2011; McGinn *et al.*, 2020)。

高黎贡剪切带同构造变形的石英脉中石英具有典型的脆-韧性转换域下的变形特征(图 6, 图示结果来自于对高黎贡剪切带中石英脉薄片的 EBSD 面扫描), 其运动学方向与高黎贡剪切带主体保持一致(Dong *et al.*, 2019)。图 6a 和 6b 是石英脉的正交偏光显微照片, 图 6a 中石英残斑指示剪切方向为右行, 与区域剪切方向一致; 图 6c 左图为 ipf 面分布图, 黑框代表图 7 面分布图区域, 右图为颗粒边界迹线分析结果, BT 代表边界迹线, Rot. axis 代表旋转轴方向, 极点图右下角数字代表边界的取向差角度。由图 6 可见, 其中的粗颗粒石英残斑大多发育道芬双晶, 并且晶内发育有细粒化的重结晶集合体条带(图 6b)。为了方便后续讨论, 我们将道芬双晶中菱面 $\{z\}$ 垂直于主应力的部分称为 z -双晶, 菱面 $\{r\}$ 垂直于主应力的部分称为 r -双晶。通过对高黎贡剪切带内变形石英脉的精细分析发现, 石英的道芬双晶中 r -双晶和 z -双晶都叠加明显的晶体塑性变形。其中 r -双晶中的小角度边界 ($<10^\circ$) 密度明显大于 z -双晶的小角度边界密度, 因此, r -双晶明显比 z -双晶能容纳更多的塑性应变(图 6c)。这也与 Mengon 等 (2011) 的研究有相似性, 即 r -双晶显示的小角度边界密度是 z -双晶的两倍, 因为 r -双晶相比 z -双晶具有更高的弹性应变能。在材料学中, 只有外部应力达到弹性极限之上, 才可以看到塑性流动引起的材料永久变形。与 z -双晶相比, r -双晶中的塑性应变反映了储存在 r -双晶中的更大的弹性应变能及较低的差应力下发生的塑性屈服, 所以 r -双晶中容纳了更多的塑性应变。

通过对高黎贡剪切带内石英脉中石英的进一步精细的 EBSD 面扫描分析, 发现变形石英中发育道芬双晶化的同时, 在塑性域下还主要激活了 $\{\pi\} \langle a \rangle$ 和 $\{\pi'\} \langle a \rangle$ 滑移系(图 6c 右图)。有研究同样发现道芬双晶化的石英晶体在绿片岩相的变质条件下会激活 $\{\pi\} \langle a \rangle$ 和 $\{\pi'\} \langle a \rangle$ 滑移系(Mengon *et al.*, 2011)。然而, 在绿片岩相下 $\{c\} \langle a \rangle$ 滑移系是石英中最常见的(Schmid and Casey, 1986; Stipp *et al.*, 2002; Cao *et al.*, 2013a), 因此, 道芬双晶很有可能

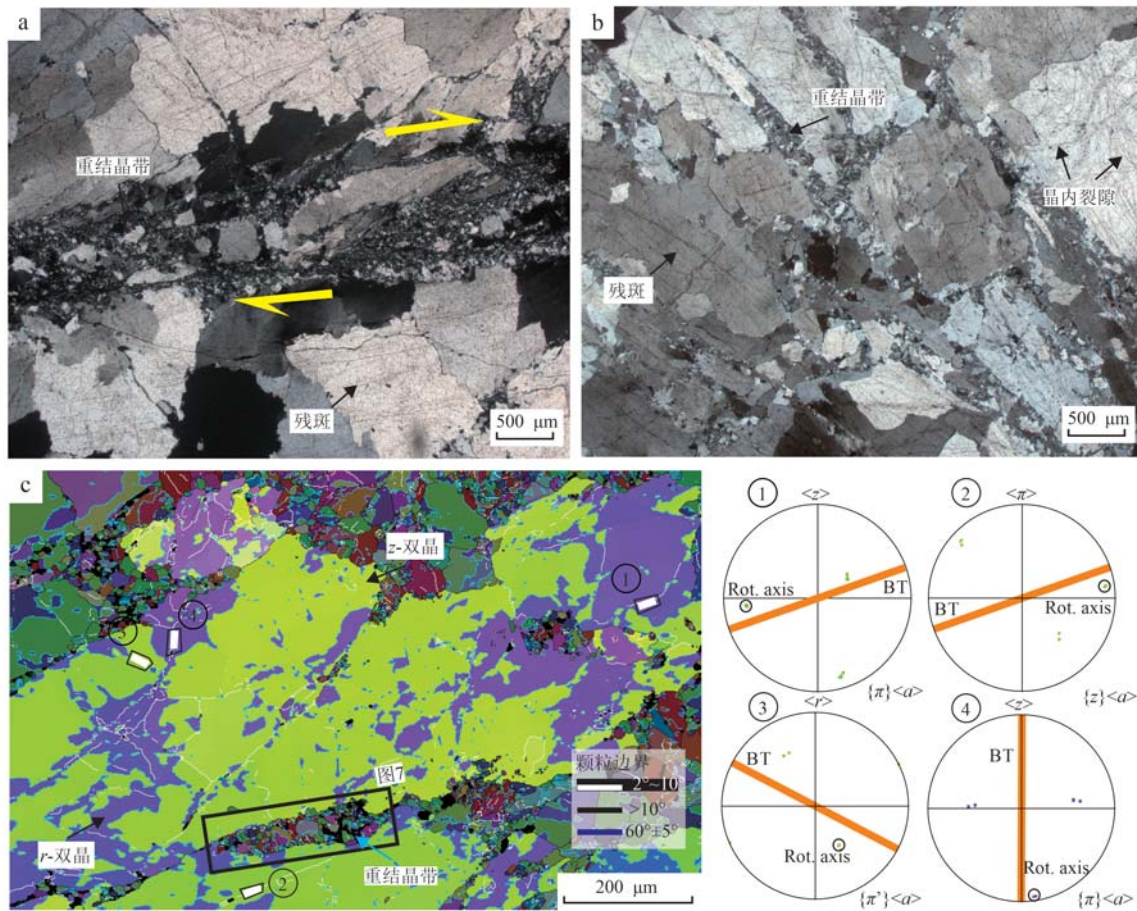


图 6 高黎贡剪切带内石英脉的变形特征

Fig. 6 The deformation characteristics of the quartz veins in the Gaoligong shear zone

可以控制石英塑性变形过程中主体滑移系的激活。在变形初期，石英晶体受 $\{c\}\langle a \rangle$ 滑移系控制，由于道芬双晶的影响， r -双晶中相比 z -双晶容纳了更多的塑性应变，导致 r -双晶的晶格畸变大于 z -双晶的，这就导致了双晶界的错位偏移，原本 60° 的双晶界变成一般的高角度晶界，并且位错也更容易在此堆积导致角度偏移更大 (Mengon *et al.*, 2011)。石英晶体在几何上发生了一定的旋转，原来的底面 $\langle a \rangle$ 方向可能不能满足临界剪切应力条件， $\{c\}\langle a \rangle$ 滑移系难以激活，而导致其他定向良好的滑移系在石英晶体内部被激活，如 $\{r\}\langle a \rangle$ 和 $\{\pi\}\langle a \rangle$ 等。当然，这种情况对取向有一定要求，可能只适用于菱面垂直于应力方向的石英晶体。此外，Barrie 等 (2008) 在黄铁矿单晶中同样发现了类似的滑移系转换。

综上所述，可以认为道芬双晶导致石英发生塑性变形时晶格的应变优先集中在 r -双晶中，并且在递进变形中由于 r -双晶和 z -双晶的力学差异导致晶

界旋转，最终影响主导滑移系的选择。

此外，在本文研究样品中还发现一个有趣的现象，道芬双晶化的石英动态重结晶作用多发生在 r -双晶中及双晶界上，而在 z -双晶中几乎没有发现 (图 6a、图 7a)，这很有可能说明道芬双晶的发育制约动态重结晶作用出现的位置 (Stipp and Kunze, 2008; Mengon *et al.*, 2011; McGinn *et al.*, 2020)。由于塑性变形中 r -双晶积累了更高的晶格畸变，某些区域由于位错堆叠而变成了晶体内的薄弱位置，由于“前兆效应”的影响，发生了应变局部化 (Pencacchioni and Mancktelow, 2018)，并通过动态重结晶作用来容纳在此聚集的剪切应变量。许多研究展示了在绿片岩相-低角闪岩相下亚颗粒旋转重结晶作用对石英晶体在应变弱化方面的影响，并且将之应用于应力计算中 (王新社等, 2001; Stipp *et al.*, 2002; Stipp and Tullis, 2003; Lloyd, 2004; Stipp and Kunze, 2008; Kilian *et al.*, 2011; Cao *et al.*, 2013a,

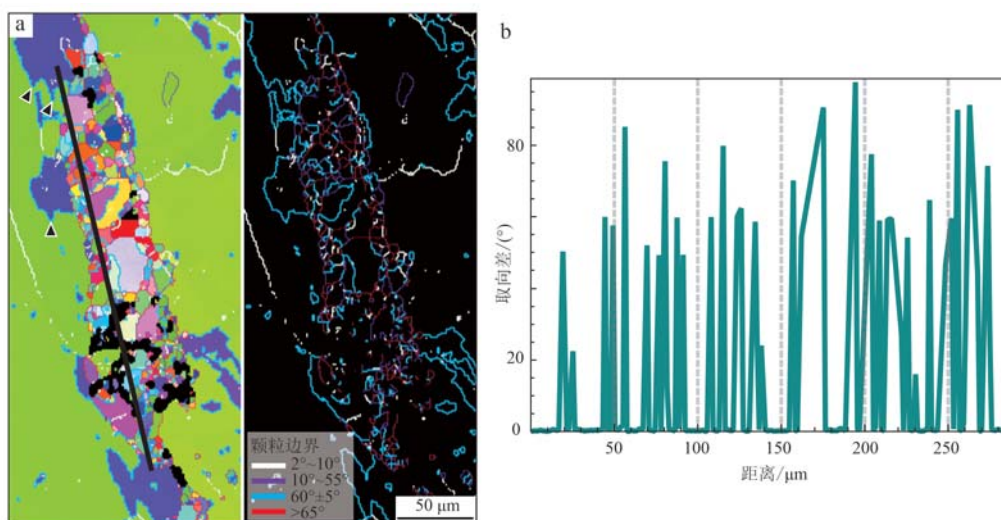


图7 高黎贡剪切带石英脉中重结晶晶粒的 ipf 面分布和颗粒边界取向差面分布图(a)及取向差剖面图(b)
Fig. 7 The inverse pole figure map and the grain boundary misorientation map (a) and misorientation profile (b) of the recrystallized grains within the quartz veins in the Gaoligong shear zone

2013b; Ceccato, 2017; Dong *et al.*, 2019)。

研究样品中发育道芬双晶化的石英颗粒,重结晶晶粒的颗粒取向和 r -双晶的取向有紧密的联系,此外,重结晶晶粒大小也与 r -双晶中亚颗粒的大小保持大致类似(图7a),这说明亚颗粒旋转重结晶在动态重结晶过程中起到了主导地位。根据 Stipp 和 Kunze (2008) 的定义,膨凸成核重结晶是一种综合的重结晶机制,包括局部缓慢的晶界迁移和亚颗粒的旋转。在局部区域, r -双晶晶界的凸起支持了这一模型(图7a)。然而,样品中重结晶晶粒为高角度晶界($>60^\circ$) (图7b),仅通过晶内滑移或是亚颗粒旋转重结晶作用很难达到,需要一个新的机制来协调其变形。数值模拟实验或天然样品研究发现,晶界滑移可促进晶粒发生旋转,并导致高角度的重结晶颗粒边界来承担应变局部化过程中的大部分应变变量(Bons and den Brok, 2000; Jiang *et al.*, 2000; Bestmann and Prior, 2003; Passchier and Trouw, 2005; Kilian *et al.*, 2011; Platt, 2015; Mansard *et al.*, 2018)。此外,晶界滑移还能抑制重结晶晶粒的再生长,反而会保持相对均匀的粒径通过晶界滑移机制来协调应变局部化过程,这与样品中较为均匀的重结晶晶粒粒径现象相一致(图7a)。

4 讨论

4.1 道芬双晶的力学性质与弱化机制

结晶学中,根据双晶形成机理可分为生长双

晶、转变双晶、机械双晶等(Okrusch and Frimmel, 2020)。生长双晶形成于晶体成核或晶体生长阶段,而转变双晶多发生于同质多像体间对称程度较高的变体转变为对称程度较低的变体阶段,在外部机械应力作用下受塑性滑移机制控制可以形成机械双晶。然而,对于道芬双晶,很难用一种类型来概括它的性质与特征,因为道芬双晶可形成于相变过程中以及外界机械应力的作用下,且诱发机理与一般认识上的机械双晶等有所区别。此外,过去有研究认为道芬双晶也可以被认为是生长双晶(FrondeI, 1945; Barton and Wenk, 2007),然而依笔者理解,生长双晶主要形成于晶体生长过程中,而道芬双晶只能形成于 α -石英域,并达不到石英结晶的环境条件,因此,虽然塑性域下重结晶过程能诱发道芬双晶形成,但并不能认为道芬双晶为生长双晶。

对于石英的热力学与动力学分析表明,道芬双晶的形成是为了晶体最大化弹性应变能,这是热力学平衡的必需条件(Tullis, 1970; Tullis and Tullis, 1972; Barton and Wenk, 2007)。正如前面提到的,道芬双晶的形成是为了降低晶体硬度使之弱化。机械应力诱导激活道芬双晶取决于外加应力的方向,道芬双晶能使晶体向柔度更高更具有顺应性的方向排列(Tullis, 1970)。与方解石中的 e -双晶律相比,道芬双晶并不能算是机械双晶,因为道芬双晶并不会发生晶格永久性的破坏,也就是说道芬双晶并不能产生永久应变。但并不是说道芬双晶会像弹簧一样发生弹性变形,撤去外部应力就会复原,相反撤

去外部应力,只要在稳定的外部条件下道芬双晶能保存数亿年之久(Wenk *et al.*, 2005)。道芬双晶在晶格尺度下仅发生轻微的原子重排。

Wenk 等(2006, 2007)的实验研究表明,将在 α -石英域中取向随机分布的多晶石英,通过压缩实验诱发形成道芬双晶后,如果将其进一步升温至 β -石英域,道芬双晶会消失;如果再次降温至 α -石英域中时,道芬双晶现象不会出现,晶粒取向趋于最初的随机分布状态。此外,在对多晶石英岩的原位压缩实验里,实验诱导形成的道芬双晶在卸载过程中会发生部分反转,少部分道芬双晶化的晶体会恢复原始取向,即表现出部分弹性变形特征(Wenk *et al.*, 2007)。因此,很难用弹性变形机制或塑性变形机制去形容道芬双晶,虽然道芬双晶引入了晶格应变,但是这是可恢复的,也就是说,道芬双晶不能完全被认为是一种应变调节机制,其更像是晶体适应应力作用的流变弱化机制。

4.2 潜在性的地质应力计

方解石中的机械双晶常常被用作古应力计来求解地质历史过程中古应力方向和大小。这是因为机械 e -双晶是方解石在低温低压下主要的晶体塑性变形特征,且主应力轴与双晶面成固定角度。Tullis (1970)最早发现并探讨了石英道芬双晶引起的菱面上的择优取向,同时发现了双晶形成模式与外加应力方向上的关联性,之后进一步对道芬双晶的形成过程进行了热力学分析,思考道芬双晶作为古应力计的可能性(Tullis and Tullis, 1972)。石英在机械应力诱导下发育道芬双晶,引起晶体变形并储存一定的弹性应变能,因此,认为道芬双晶可潜在性地作为古应力计。然而,这些早期的研究仅仅提供了一个猜想,并没有进行实际的案例应用。

随着研究的深入,人们重新评估了在天然构造岩中将道芬双晶作为变形条件信息来源的可能性。Pehl 和 Wenk (2005)对天然剪切带中的花岗质糜棱岩样品的分析进一步认为道芬双晶可以作为含石英岩石的古应力计,并且认为,道芬双晶可发生在构造变形的任何时期,但是如果在早期形成,有可能被后期形成的构造特征所覆盖。Wenk 等(2006)在对细粒石英岩在不同温度和不同应力下进行了一系列变形实验后,建立了道芬双晶对应力和温度的耦合关系。Mengon 等(2011)根据 Wenk 等(2006)的实验结果将之应用在绿片岩相下形成的花岗糜棱岩中,以此来证明道芬双晶作为古应力计的可能,

并认为道芬双晶的形成阶段稍早于绿片岩相下的糜棱岩化作用,但大致同步,即构造变形条件相同。在绿片岩相(300~400°C)下,道芬双晶形成于大约 100 MPa 下,而通过动态重结晶晶粒粒度应力计测出的差应力为 100 MPa,因此可以认为它确实代表了一种潜在的应力计。实验表明(Wenk *et al.*, 2006),在一定条件下增大应力会促进更多晶粒形成道芬双晶,100 MPa 可能只能作为应力估算的下限。此外,Wenk 等(2007)对细粒石英岩的原位变形实验表明,道芬双晶在外部应力撤去后会发生部分反转,目前的研究并不能确定反转量,很难通过样品中的道芬双晶现象去还原变形历史过程中准确的应力大小。因此,虽然道芬双晶的形成表现出一定的应力相关性,但是目前的研究在相对简单、干扰较少的实验室条件下都还无法做到对变形过程应力大小的反演。要做到将道芬双晶作为应力计外推至复杂的天然构造变形过程,还需要更准确更科学的实验数据来进行经验公式的推导,也需要对样品进行详细的地质背景调查和多尺度的综合分析。

4.3 道芬双晶对地壳岩石塑性变形及流变弱化的影响

道芬双晶的存在对塑性变形过程中塑性应变的分配和局部化过程以及主要滑移系的选择具有深远的影响。过去的研究常常认为石英的变形在地壳层次从浅至深分别被脆性的破裂过程和塑性的位错滑移过程所控制,但是我们的研究结果显示道芬双晶在地壳变形过程中同样有着不可忽视的作用。石英的道芬双晶普遍发育于弱变形样品中,是矿物晶体适应应力作用的弱化机制。机械应力驱动的道芬双晶使得柔度更大的菱面 r 方向与最大主应力方向对齐,双晶化过程有效地重组了石英晶体的大部分,并将石英晶体从“僵硬的”和随机分布的初始取向解放出来,转变为更“柔软的”的取向方向,因此,大大软化了石英的晶体结构,并在后续的渐进变形过程中具有重要意义。双晶化的石英晶体的大部分塑性应变集中在 r -双晶中,这是由于更软的 r -双晶储存了较高的应变能。 r -双晶中逐渐增大的晶格变形将双晶界的部分修改为一般的高角度边界,由此底面方向在这些边界上发生错位。晶体错位可能导致了主要滑移系的转变,由于“前兆效应”的影响,应变局部化过程更容易在晶体薄弱位置就位(Pennacchioni and Mancktelow, 2018)。道芬双晶化的石英晶体在后续塑性变形过程中, r -双晶容纳了更高的

晶格畸变,双晶界也变为更弱的高角度晶界,因此动态重结晶主要在这两个区域发生局部化。

综上所述,研究认为在地壳变形过程中道芬双晶容纳了相当的晶格应变,这对于解释地壳石英的变形行为非常重要,并且表明道芬双晶可能会成为一种新的古应力工具。然而,其中还存在着相当多的问题,最重要的是如何确定晶体的初始取向和道芬双晶化后取向与最大主应力方向的相关性,这对于确定样品道芬双晶化程度以及所容纳的应变大小来说至关重要。另外,地壳的不同深度下道芬双晶的敏感性以及前述提到的反转现象都是值得深入讨论的问题。尽管还有诸多的问题亟待深入分析,但是道芬双晶显然是地壳中低级变质岩或者较低程度变形的含石英岩石对应力作用的常见反应和重要弱化机制,未来相关研究可能对解释浅层地壳变形过程具有重要的潜在性意义。

5 结论

(1) 石英道芬双晶形成的重要驱动机制来自晶体的弹性各向异性,在天然变形岩石中,在菱面 $\{r\}$ 和 $\{z\}$ 上发育择优取向。

(2) 道芬双晶的形成机制是一个石英塑性变形的特殊的流变弱化机制,其通过 $\langle r \rangle$ 方向上的优选定向导致石英结构上的弱化,从而使石英更容易发生变形。

(3) 道芬双晶的发育导致石英发生塑性变形时晶格应变优先集中在 r -双晶中,在递进变形中 r -双晶和 z -双晶的力学差异导致晶界旋转,最终影响主导滑移系的选择和应变局部化过程的就位,因此,对矿物晶体内的应变局部化过程具有重要的贡献和意义。

(4) 鉴于地壳中广泛存在含石英岩石,道芬双晶作为一种有潜在可能性的古应力计,在古应力场的恢复和重建中可能会发挥重要作用。

References

- Barrie C D, Boyle A P, Cox S F, *et al.* 2008. Slip systems and critical resolved shear stress in pyrite: An electron backscatter diffraction (EBSD) investigation [J]. *Mineralogical Magazine*, 72: 1 181 ~ 1 199.
- Barton N R and Wenk H R. 2007. Dauphiné twinning in polycrystalline quartz[J]. *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, 15: 369.
- Bestmann M and Prior D J. 2003. Intragranular dynamic recrystallization in naturally deformed calcite marble: Diffusion accommodated grain boundary sliding as a result of subgrain rotation recrystallization[J]. *Journal of Structure Geology*, 25: 1 597~1 613.
- Bidgood A K, Parsons A J, Lloyd G E, *et al.* 2021. EBSD-based criteria for coesite-quartz transformation[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 39: 165~180.
- Bons P D and den Brok B. 2000. Crystallographic preferred orientation development by dissolution-precipitation creep[J]. *Journal of Structure Geology*, 22: 1 713~1 722.
- Cao S Y, Neubauer F, Bernroider M, *et al.* 2013a. The lateral boundary of a metamorphic core complex: The Moutsounas shear zone on Naxos, Cyclades, Greece[J]. *Journal of Structure Geology*, 54: 103~128.
- Cao S Y, Neubauer F, Bernroider M, *et al.* 2013b. Structures, microfabrics and textures of the Cordilleran-type Rechnitz metamorphic core complex, Eastern Alps[J]. *Tectonophysics*, 608: 1 201~1 225.
- Ceccato A, Pennacchioni G, Menegon L, *et al.* 2017. Crystallographic control and texture inheritance during mylonitization of coarse grained quartz veins[J]. *Lithos*, 290: 210~227.
- Dong Y L, Cao S Y, Cheng X M, *et al.* 2019. Grain-size reduction of feldspar and flow of deformed granites within the Gaoligong shear zone, southwestern Yunnan, China[J]. *Science China-Earth Science*, 62: 1 379~1 398.
- Frondel C. 1945. Secondary Dauphiné twinning in quartz[J]. *Journal of Earth and Planetary Materials*, 30: 447~460.
- Harrison R J, Redfern S A T, Buckley A, *et al.* 2003. Application of real-time, stroboscopic X-ray diffraction with dynamical mechanical analysis to characterize the motion of ferroelastic domains[J]. *Journal of Applied Physics*, 95: 1 706~1 717.
- Jacob D and Cordier P. 2010. A precession electron diffraction study of α , β phases and Dauphiné twin in quartz[J]. *Ultramicroscopy*, 110: 1 166~1 177.
- Jiang Z, Prior D J and Wheeler J. 2000. Albite crystallographic preferred orientation and grain misorientation distribution in a low-grade mylonite: Implications for granular flow[J]. *Journal of Structure Geology*, 22: 1 663~1 674.
- Kilian R, Heilbronner R and Stünitz H. 2011. Quartz grain size reduction in a granitoid rock and the transition from dislocation to diffusion creep [J]. *Journal of Structure Geology*, 33: 1 265~1 284.
- Kohlstedt D L, Evans B and Mackwell S J. 1995. Strength of the litho-

- sphere: Constraints imposed by laboratory measurements[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 100: 17 587~17 602.
- Levine J S F, Mosher S and Rahl J M. 2016. The role of subgrain boundaries in partial melting[J]. *Journal of Structural Geology*, 89: 181~196.
- Lloyd G E. 2004. Microstructural evolution in a mylonitic quartz simple shear zone: The significant roles of dauphine twinning and misorientation[J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 224: 39~61.
- Mansard N, Raimbourg H, Augier R, *et al.* 2018. Large-scale strain localization induced by phase nucleation in mid-crustal granitoids of the south Armorican massif[J]. *Tectonophysics*, 745: 46~65.
- Markgraaff J. 1986. Elastic behavior of quartz during stress induced Dauphiné twinning[J]. *Physics and Chemistry of Minerals*, 13: 102~112.
- McGinn C, Miranda E A and Hufford L J. 2020. The effects of quartz Dauphine twinning on strain localization in a mid-crustal shear zone [J]. *Journal of Structural Geology*, 134: 103980.
- Menegon L, Piazzolo S and Pennacchioni G. 2011. The effect of Dauphiné + twinning on plastic strain in quartz[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 161: 635~652.
- Okrusch M and Frimmel H E. 2020. *Mineralogy: An Introduction to Minerals, Rocks, and Mineral Deposits* [M]. Springer Nature, 201~211.
- Olierook H K H, Timms N E and Hamilton P J. 2014. Mechanisms for permeability modification in the damage zone of a normal fault, northern Perth Basin, Western Australia[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 50: 130~147.
- Passchier C W and Trouw R A J. 2005. *Microtectonics* [M]. Berlin: Springer, 43~44.
- Pehl J and Wenk H R. 2005. Evidence for regional Dauphiné twinning in quartz from the Santa Rosa mylonite zone in Southern California. A neutron diffraction study [J]. *Journal of Structural Geology*, 27: 1 741~1 749.
- Pennacchioni G and Mancktelow N S. 2018. Small-scale ductile shear zones: Neither extending, nor thickening, nor narrowing[J]. *Earth-Science Review*, 184: 1~12.
- Piazzolo S, Prior D J and Holness M D. 2005. The use of combined cathodoluminescence and EBSD analysis: A case study investigating grain boundary migration mechanisms in quartz[J]. *Journal of Microscopy*, 217: 152~161.
- Platt J P. 2015. Rheology of two-phase systems: A microphysical and observational approach[J]. *Journal of Structural Geology*, 77: 213~227.
- Rahl J M, McGrew A J, Fox J A, *et al.* 2018. Rhomb-dominated crystallographic preferred orientations in incipiently deformed quartz sandstones: A potential paleostress indicator for quartz-rich rocks [J]. *Geology*, 46: 195~198.
- Schmid S M and Casey M. 1986. Complete fabric analysis of some commonly observed quartz [c]-axis patterns[A]. Hobbs B E and Heard H C. *Mineral and Rock Deformation: Laboratory Studies*[C]. American Geophysical Union, *Geophysical Monograph*, 36: 263~286.
- Schubnikov A and Zinslering K. 1932. Ueber die Schlag- und Druckfiguren und ueber die mechanische Quertwillinge. *Zeitschrift für Kristallographie*[J]. *Crystalline Materials*, 83: 243~264.
- Stipp M and Kunze K. 2008. Dynamic recrystallization near the brittle-plastic transition in naturally and experimentally deformed quartz aggregates[J]. *Tectonophysics*, 448: 77~97.
- Stipp M, StüEnitz 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°C [J]. *Journal of Structure Geology*, 24: 1 861~1 884.
- Stipp M and Tullis J. 2003. The recrystallized grain size piezometer for quartz[J]. *Geophysical Research Letter*, 30(21): 3-1~3-5. doi: 10.102912003GL018444.
- Thomas L A and Wooster W A. 1951. Piezoerescence-the growth of Dauphiné twinning in quartz under stress. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A* [J]. *Mathematical and Physical Sciences*, 208: 43~62.
- Tilley R J D. 2020. *Crystals and Crystal Structures* [M]. John Wiley & Sons, 86.
- Trepmann C A and Spray J G. 2005. Planar microstructures and Dauphiné twins in shocked quartz from the Charlevoix impact structure, Canada [J]. *Geological Society, America, Special Publications*, 384: 315~328.
- Tullis J. 1968. Preferred orientation in experimental quartz mylonites[J]. *American Geophysical Union*, 49: 755.
- Tullis J. 1970. Quartz: Preferred orientation in rocks produced by Dauphiné twinning[J]. *Science*, 168: 1 342~1 344.
- Tullis J and Tullis T. 1972. Preferred orientation of quartz produced by mechanical Dauphiné twinning: Thermodynamics and axial experiments[J]. *Washington D C American Geophysical Union Geophysical Monograph Series*, 16: 67~82.
- Wang Xinshe, Zheng Yadong, Yang Chonghui, *et al.* 2001. Determination of the deformation temperature and strain rate by the fractal shape of dynamically recrystallized quartz grains [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 20: 36~41 (in Chinese with English abstract).

- Wenk H R, Barton N, Bortolotti M, *et al.* 2009. Dauphiné twinning and texture memory in polycrystalline quartz. Part 3: Texture memory during phase transformation[J]. *Physics and Chemistry of Minerals*, 36: 567~583.
- Wenk H R, Bortolotti M, Barton N, *et al.* 2007. Dauphiné twinning and texture memory in polycrystalline quartz[J]. *Physics and Chemistry of Minerals*, 34: 599~607.
- Wenk H R, Lonardelli I, Vogel S C, *et al.* 2005. Dauphiné twinning as evidence for an impact origin of preferred orientation in quartzite: an example from Vredefort, South Africa[J]. *Geology*, 33: 273~276.
- Wenk H R, Rybacki E, Dresen G, *et al.* 2006. Dauphiné twinning and texture memory in polycrystalline quartz. Part 1: Experimental deformation of novaculite[J]. *Physics and Chemistry of Minerals*, 33: 667~676.
- Wooster W A and Wooster N. 1946. Control of electrical twinning in quartz[J]. *Nature*, 157: 405~406.
- Wooster W A, Wooster N, Rycroft J L, *et al.* 1947. The control and elimination of electrical (Dauphine) twinning in quartz[J]. *Institute of Electrical Engineers Journal*, 94: 927~938.
- Xia Haoran and Liu Junlai. 2011. The crystallographic preferred orientation of quartz and its applications[J]. *Geological Bulletin of China*, 31(1): 58~70(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: 1 721~1 736(in Chinese with English abstract).
- Zhang B, Zhang J J, Yan S Y, *et al.* 2012. Detrital quartz and quartz cement in Upper Triassic reservoir sandstones of the Sichuan basin: Characteristics and mechanisms of formation based on cathodoluminescence and electron backscatter diffraction analysis[J]. *Sedimentary Geology*, 267: 104~114.
- Zhang Jinjiang, Shang Shan, Wei Chunjing, *et al.* 2019. Present status and development prospect of studies of rheology of continental lithosphere[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 40(1): 9~16(in Chinese with English abstract).
- Zhao S R, Xu H J, Wang Q Y, *et al.* 2013. Electron backscatter diffraction study of twins and intergrowths among quartz crystals in granite[J]. *Journal of Applied Crystallography*, 46: 1 414~1 424.
- Zinserling K and Schubnikow A. 1933. Über die Plastizität des Quarzes[J]. *Zeitschrift für Kristallographie-Crystalline Materials*, 85: 454~461.

附中文参考文献

- 王新社, 郑亚东, 杨崇辉, 等. 2001. 用动态重结晶石英颗粒的分形确定变形温度及应变速率[J]. *岩石矿物学杂志*, 20(1): 36~41.
- 夏浩然, 刘俊来. 2011. 石英结晶学优选与应用[J]. *地质通报*, 31(1): 58~70.
- 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.
- 张进江, 商 姗, 魏春景, 等. 2019. 大陆岩石圈流变学研究的发展现状与前景[J]. *地球学报*, 40(1): 9~16.