

文章编号:1000-4734(2003)02-0158-05

硬玉塑性变形的 AFM 特征

郭颖¹, 赖兴运²

(1. 中国地质大学(北京) 珠宝学院, 北京 100083; 2. 中国地质大学(北京) 地球科学与资源学院, 北京 100083)

摘要:利用原子力显微镜(AFM)对缅甸硬玉进行表面观察,研究其纳米级范围内矿物晶体的超显微结构及构造特征,探讨其形成的动态过程和物理化学等外部条件。结果发现在缅甸硬玉表面存在大量残余变形现象,尤其是以典型的扭折带、亚晶粒、晶粒扭曲结构为特征,反映了硬玉晶体内聚集了大量的位错。这些现象表明硬玉在其结晶之后曾在高压及较高温的地壳深处经历了强烈的塑性变形过程,它们与地表或近地表低温、低压条件下形成的以脆性破裂为主的变形方式有本质的差别。硬玉中大量的塑性变形现象表明了它是在比较复杂的动态地质环境中形成的,深部的这种复杂变形作用使得缅甸硬玉有别于世界上其它地方的硬玉,其独特的地质形成过程造就了本区为世界上典型的也是最大的翡翠矿床。

关键词:硬玉;塑性变形;扭折带;亚晶粒

中图分类号:P578.954 **文献标识码:**A

作者简介:郭颖,男,1973年生,博士,讲师,主要从事矿物学的研究和教学工作。

自从1986年AFM(原子力显微镜)在隧道扫描显微镜的基础上发展起来,首先在生物领域的研究上得到广泛应用^[1,2]。1992年和1993年Gauthier^[3]和German^[4]分别将AFM技术应用于对云母与金刚石表面的超微结构研究。目前,AFM已成为研究矿物10~100 nm尺度范围内晶体结构及晶体变形的最理想的工具之一,能够获得矿物内一些重要结构信息的直接图像,为进一步说明矿物形成的物理化学条件、地质环境等提供了重要信息^[5~8]。本文将缅甸硬玉作为研究对象,利用中国地质大学(北京)晶体结构与晶体化学实验室的CSPM-930型多功能扫描探针显微镜的AFM功能进行了实验,并尝试解释了动力变质作用对硬玉形成的影响。

1 样品及测试

缅甸北部的硬玉岩以质地细腻、颜色鲜艳的翡翠闻名于世,多产在喜马拉雅褶皱区外侧高压带与前寒武纪地块的交界处的近东北和西南向构造带的复合部位,矿体呈脉状或透镜状产于北东向展布的蛇纹岩中。关于硬玉的形成条件,已有大量的热力学及实验岩石学的资料,普遍认为它形成于低温

高压的变质环境,温度大约在300~400℃,压力高于1.2~1.4 GPa^[9],相当于蓝片岩相。

样品采自缅北帕岗,主要矿物有硬玉、绿辉石、透辉石和钠铁闪石等。标本呈深绿色,镜下观察以变晶结构为主,晶体颗粒较粗,粒径范围在0.1~3 mm,晶粒间排列不紧密、结构疏松。实验样品经酒精清洗。测试条件为大气条件,恒高模式,采用针尖为Si₃N₄微悬臂式尖锐针尖,激光检测。

在AFM下可以直接观察到硬玉晶体中明显的晶粒扭曲、位错、位错壁、堆垛位错、亚晶界结构现象等。

2 硬玉显微结构特征

在放大1000倍的SEM形貌像中(图1a),可见其表面颗粒间排列不紧密,结构疏松,裂隙发育良好,且裂隙比较规则,大部分呈平行或近平行的方式排列,其它方向的裂隙较不规则,但总体上显示出硬玉呈脆性破裂的方式,反映了矿物受到外界压力的作用。这可能是硬玉颗粒生成后由于后期在较低温度下的机械破碎外力所造成的破坏。

2.1 晶粒扭曲

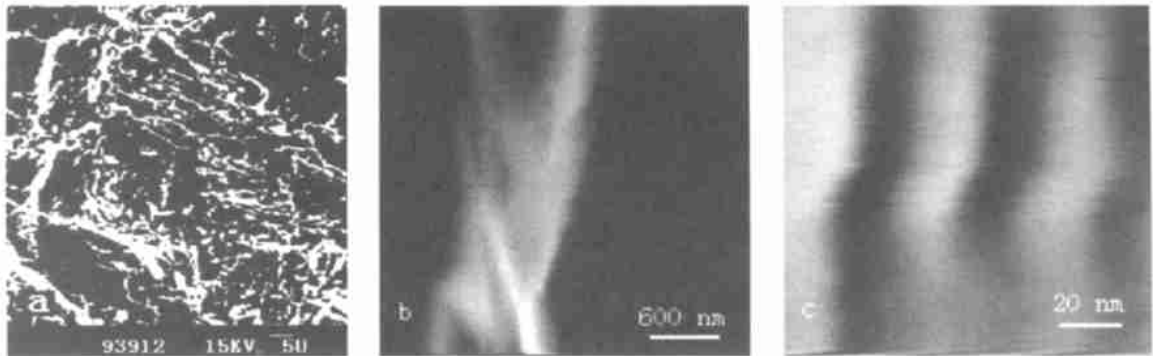
纤维状硬玉晶体显示出明显的麻花状扭曲现象(图1b),显然这是硬玉的晶体环绕纤维延伸方向即[001]方向受到了一个强烈顺时针扭力的结

收稿日期:2002-08-03

基金项目:国家自然科学基金项目(批准号:49902016; 40272032)

果(从上向下看)。能看到麻花状残余变形存在表明这是高温下的塑性形变,因为硬玉单链内以共价键相连的 Si-O 键力较强,此键不易断裂,所以

晶体发生扭应变之后只是延性扭曲,而不致碎裂。反映了硬玉晶体的塑性流变,应力的强度未达到弹性极限。



a. 空洞及充填在其中的碎屑物

b. 硬玉晶体麻花状扭曲图

c. 硬玉晶粒位错图

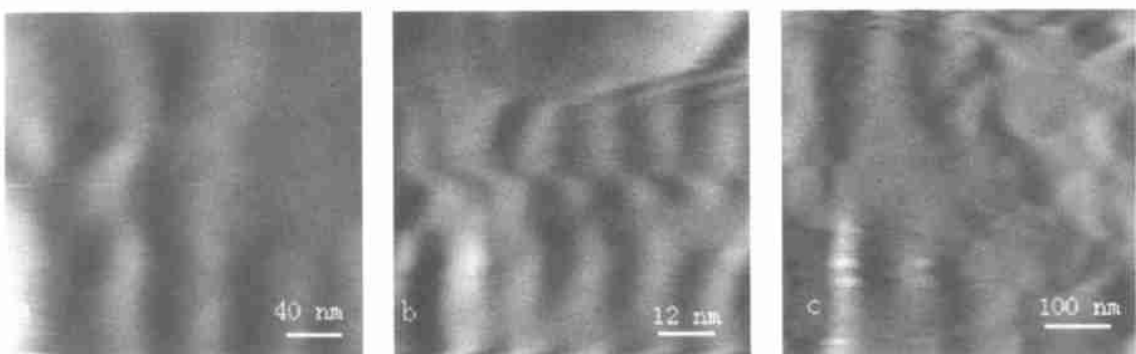
图 1 硬玉表面形貌与硬玉晶粒的扭曲、位错

Fig. 1. Appearance and distortion, dislocation of jadeite crystal.

2.2 扭折带

硬玉与其它单斜辉石有相似的晶体结构,其中的 Si-O 四面体通过桥氧相接形成辉石所特有的单链硅酸盐结构。当受到外力作用时, Si-O 四面体链不易断开, Si-O-Si 的键角极可能发生改变,而链之间往往发生滑移构成了单斜辉石特征的 [001] (100) 滑移系。由于晶内单滑移面的存在,当硬玉晶体受外力作用时,尤其是平行于滑移面的外力施加于晶体上时,扭折、滑移面弯曲等变

形现象就可发生。如图 1c 和图 2a 所示,硬玉晶体因变形而产生轻微扭转的位错纹,其平均密度可达 $2 \times 10^9 \sim 2 \times 10^{10}$ 条/cm²;图 2b 显示了一个复杂的变形现象,位错纹明显发生弯曲,并在局部出现即将错断的现象,如果进一步发展极有可能出现亚晶粒的边界。上述变形现象表明该硬玉晶体在外界多种较强的载荷作用下发生了复杂变形作用,进一步反映了在较高温压条件下晶体内塑性应变过程。



a. 晶粒位错

b. 晶粒位错墙

c. 晶粒锯齿状不规则迹线图

图 2 硬玉晶体位错、位错墙及晶粒间的不规则迹线

Fig. 2. Dislocation, dislocation wall and irregular boarder of jadeite.

2.3 位错

位错是在晶体生长(如堆垛)或变形时产生的。在晶内滑移的情况下,一个位错(或一系列位错)通

过应变局部化起作用,同时发生一个净位移,除位错点本身外,所有的原子都正常连接,所以位错大大降低了直线滑移所需要的力。通常移动一个单个的孤立的位错只需要一个非常小的力,变形能非

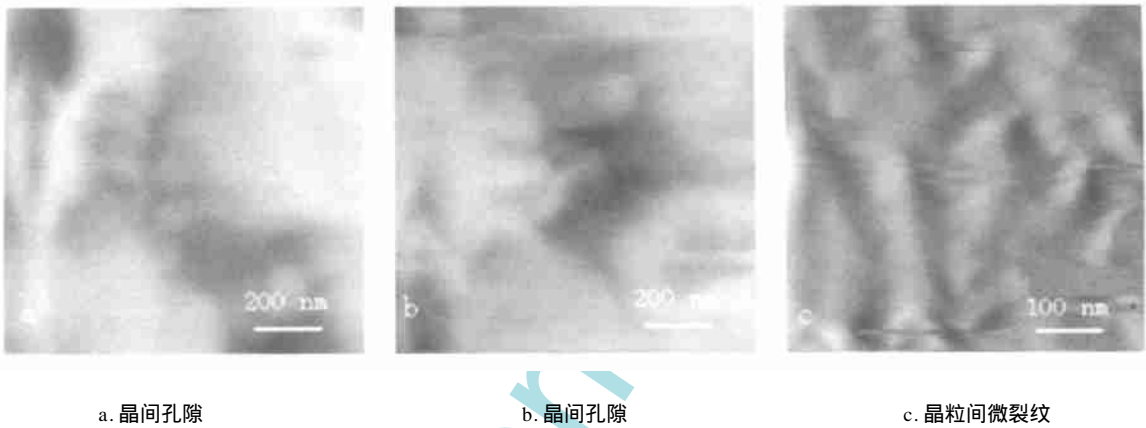
常小;而位错壁就需要相对较大的力,变形能相对也较大。局部或整体的变形则需要许多位错的共同运动,强的塑性变形常常改变多颗粒物质中的位错密度,从 $10^7 \sim 10^8$ 条/cm² 到 $10^{11} \sim 10^{12}$ 条/cm²。本次研究中在多个样品中均可以看见有较多位错壁的现象,证明了硬玉岩的形成过程经历了较强的构造作用。

2.4 亚晶粒

硬玉晶体的表面出现明显的锯齿状不规则迹线(图 2c),将硬玉分成若干个似连非连的小晶体,这是硬玉晶内延性变形的另一种表现方式,由

变形产生的位错在晶内攀移,最终在局部形成位错密度较高的位错壁(图 2b),位错壁的进一步发育就变成了若干个亚晶粒的晶界(图 2c)。

颗粒界面对粒间变形有影响,因为颗粒界面可以看成是过渡晶格,温度较低时,颗粒界面阻止位错运动的发生,因而增加硬化的速率。一般来说,单晶较之同相的多颗粒集合体更容易变形,即如果条件有利而没有足够的滑移系统,界面就会出现孔隙或裂纹,并可能最终导致破碎。因此在低温下或应变速率快时变形的多晶粒硅酸盐中,尤其是像硬玉这样的低对称性的硅酸盐矿物,可以看到孔隙(图 3a、b)和裂纹(图 3c)。



a. 晶间孔隙

b. 晶间孔隙

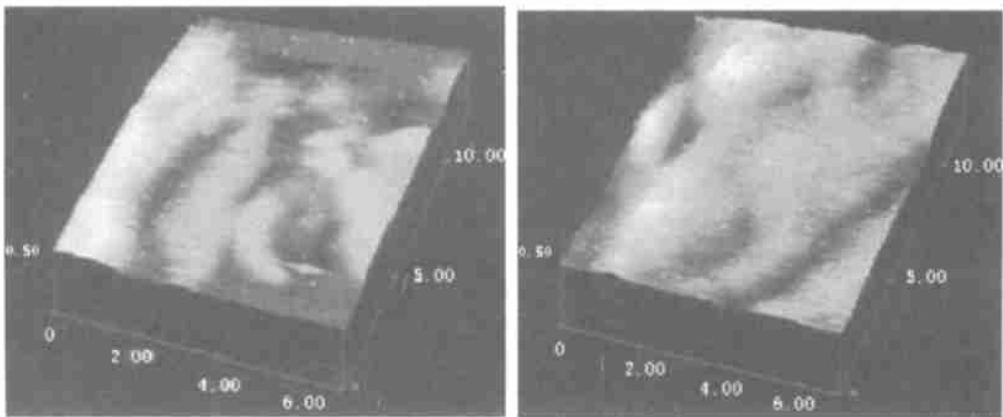
c. 晶间微裂纹

图 3 硬玉晶间孔隙及裂纹

Fig. 3. Holes and small cracks between jadeite crystals.

硬玉表面凹凸不明显,起伏不大(图 4)。图 4a 工作区域较大,达 1240 nm × 1240 nm,为 3D 立体 AFM 视图。图中硬玉晶体较完整,可见硬玉晶体突出的高度较其自身晶体长度比例很低,突起

程度不明显,且显示近平行生长,突起间隔大致相当,相交边界平缓,呈渐变趋势。说明硬玉的形成主要受前期动力变质作用的影响。图 4b 是图 4a 原位放大的 3D 立体 AFM 图,工作区域仅 118 nm



a. 扫描范围 1240 nm × 1240 nm

b. 扫描范围 118 nm × 118 nm(a 图局部放大)

图 4 硬玉表面起伏程度扫描图

Fig. 4. Surface undulation.

×118 nm。图中硬玉晶体表面在放大后未见明显扭折,没有受到后期应力作用的迹象,说明后期动力变质作用对硬玉晶体的改造较小。因而得知在硬玉的形成过程中虽然有两期或多期动力变质作用,但对其晶体的形成及生长起决定作用的是前期的变质作用。

3 结 论

(1) 硬玉晶体的结晶或形成至少不晚于、甚至早于塑性变形作用,大部分硬玉晶粒中出现了明显的扭曲或扭折的现象。

(2) 硬玉形成的晚期或后期至少经历过一次强烈的韧性变形,表现为晶内亚晶粒、扭折带等复杂变形现象,这种变形是在埋藏较深和较高温度的条件下完成的。据 Turner & Heard^[10],在 1.0 GPa 压力条件下,辉石类矿物须在温度大于 350 °C 时才

发生延性变形。这进一步说明了硬玉的韧性变形至少不是发生在地表或近地表的条件下。

(3) 硬玉岩中明显的脆性裂隙的出现,反映了曾经历过较高温压条件下塑性变形的岩石在抬升至较低温压下(可能近地表)发生了以脆性破裂为主的变形方式。大量裂隙的形成成为周围的流体活动提供了主要的空间和通道,有可能导致岩石与流体之间的物质交换,使得一些微量元素如 Cr^{3+} 进入到岩石中形成缅甸翡翠特有的鲜艳绿色。

(4) 在低温高压的变质作用过程中,硬玉、绿辉石等在结晶后的稳定状态很难再进行离子交换,塑性变形将有助于离子的扩散,位错运动为离子扩散、迁移提供了良好的途径,同时诱导重结晶作用有效地促进离子扩散和交换的完成,因此硬玉的残余变形对其离子尤其是致色离子的运移和扩散有着非常重要的作用。

参 考 文 献:

- [1] Engel A. Biological Applications of Scanning Probe Microscopes [J]. *Annu. Rev. Biophys. Biophys. Chem.*, 1991, 20: 79 ~ 108.
- [2] Mougín A, Dufour C and Maloufi N. From anisotropic dots to smooth RFe₂ (110) single crystal layers (R = rare earth) [J]. *The European Physical Journal B*, 2001, 19 (2): 289 ~ 296.
- [3] Gauthier-Manuel. Direct measurement of the short-range interaction between a tungsten tip and a mica surface [J]. *Europhys. Lett.* (Switzerland), 1992, 17 (3): 195 ~ 200.
- [4] Germann GJ, et al. Atomic scale friction of a diamond tip on diamond (100) and (111) surfaces [J]. *Appl. Phys.* (USA), 1993, 73 (1): 163 ~ 167.
- [5] 周 凌. Ti-Cr 合金中片状相表面浮突的研究[J]. *稀有金属*, 2002, 26(1): 1 ~ 6.
- [6] 黄文浩,等. 原子力显微镜在金刚石表面微结构分析中的应用[J]. *电子显微学报*, 2001, 20(5): 607 ~ 609.
- [7] 牟其善,等. 利用原子力显微镜研究 KTiOAsO₄ 晶体的铁电畴[J]. *人工晶体学报*, 2001, 30(3): 301 ~ 304.
- [8] 赵珊茸,等. 原子力显微镜在晶体生长机理研究中的应用[J]. *硅酸盐通报*, 2001 (2): 40 ~ 44.
- [9] Holland T J B. Reaction Albite = Jadeite + Quartz Determined Experimentally in the Range 600-1200 Degrees [J]. *Ame. Min.*, 1980, 65: 129 ~ 134.
- [10] Becker U and Gasharova B. AFM observations and simulations of jarosite growth at the molecular scale: probing the basis for the incorporation of foreign ions into jarosite as a storage mineral [J]. *Physics and Chemistry of Minerals*, 2001, 28 (8): 545 ~ 556.

ATOMIC FORCE MICROSCOPY OF PLASTIC DEFORMATION CHARACTERS OF JADEITE

GUO Ying¹, LAI Xing-yun²

(1. College of Material and Engineering, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

2. College of Earth Science and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract : The paper has investigated the micro to ultra microstructure of the surface of jadeite with AFM. The samples are mainly associated with albite and some Na-rich amphibole in North Burma. It is argued that there is a relation between the characters of ultra microstructures of the sample surface and the occurrence of Burma jadeite. The reaction for the occurrence of jadeite is: $Ab = Jd + Q$, and the temperature would be 300-400 °C, the pressure would be 300-500 MPa. The ultra microstructure of jadeite surface reveals its forming environment, i. e., regional metamorphism. And it is obviously indicated that all characters of Burma Jadeite under AFM are determined by the shearing stress during metamorphism while it was forming. It must be pointed out that the most important timing of occurrence of Burma Jadeite is the first period of metamorphism instead of later periods of metamorphism. Plastic deformation of minerals can be finished by many different mechanisms, and what is most important is determined by geological conditions, especially temperature, pressure, rate of strain and activity of water. And it benefits to the further understanding of rheological attributions of different structural layers in lithosphere.

Key words : jadeite; plastic deformation; distortion; sub grain