

缅甸硬玉的 AFM 无损检测

郭颖^① 杨翔^① 赖兴运^② 潘兆轸^① 熊宁^①

(中国地质大学材料科学与工程学院^① 北京 100083)

(中国地质大学地球科学与资源学院^② 北京 100083)

摘要 对具有较高价值的缅甸硬玉的表面利用原子力显微镜(AFM)进行检测,整个过程在恒高模式下,保证探针与样品的不接触状态。通过细致观察其纳米级范围内矿晶体的超显微结构及构造特征,进一步探讨其形成的动态过程和物理化学等外部条件。大部分硬玉中的 $[\text{Si}_2\text{O}_6]$ 等链出现了明显的扭曲或扭折的现象,证明了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。硬玉形成的晚期或后期至少经历过一次强烈的韧性应变,表现为晶内亚晶粒、扭折带等应变现象,在这个阶段硬玉岩中的质量迁移以蠕动流变为主,而不可能产生大量的张裂隙或脆性裂隙,因此环境中的流体与硬玉岩之间的物质交换数量是很有限的。同时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。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 缅甸 硬玉 塑性变形 扭折带 亚晶粒

1 AFM 原理及实验条件

AFM 为 Atomic Force Microscope 的简写,是众多扫描探针显微镜的一种。AFM 可以对导体到非导体的各种材料的样品在实物空间上测量其三维形貌,使得它在当前研究矿物表面微区-超微区形貌特征中发挥越来越重要的作用(C. B. Prater, 1995)。AFM 技术作为研究非导电矿物表面超微结构的手段,早在 1992 年、1993 年 Gauthier^[1]和 Germann^[2]就分别将其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 10~100nm 的尺度范围内晶体结构及晶体变形最理想的工具之一,能够获得矿物内一些重要结构信息的直接图像,为说明矿物形成的物理化学条件、地质环境等提供重要信息(Y. E. STRAUSS-ER, 1994)。

本文所用样品采自缅北帕岗,主要矿物组分有硬玉、绿辉石、透辉石和钠铁闪石等。标

① 郭颖:男,1973年3月生,博士研究生,矿物学,通信地址:中国地质大学(北京)98 博信箱,邮编:100083,电话:010-82320410,传真:010-66168373, E-mail: tianbaoboshi@sina.com.cn

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^[3]。实验样品经酒精清洗。

仪器使用 CSPM-930 型多功能扫描探针显微镜的 AFM 功能。测试条件为大气条件,恒高级模式,扫描针尖为 Si_3N_4 微悬臂式针尖,激光检测。测试单位是中国地质大学(北京)晶体结构及晶体化学研究室。

2 缅甸硬玉的结晶矿物学特征

八三玉中的硬玉是一种以 $[\text{SiO}_4]$ 四面体共角顶相连而成的沿一维方向无限延伸的单链硅酸盐矿物。每个硅氧四面体 $[\text{SiO}_4]$ 以两个角顶与相邻的硅氧四面体 $[\text{SiO}_4]$ 共用,每两个 $[\text{SiO}_4]$ 四面体为一重复周期,计为 $[\text{Si}_2\text{O}_6]$ (如图 1)。链内每个四面体有两个桥氧 O_3 和两个端氧 O_1 、 O_2 。在结构中两个 O_3 氧和一个 O_2 氧构成的三角形大致平行(100),成为四面体的基底,而 O_1 成为四面体的角顶氧。相邻的链其四面体角顶氧指向相反。链间以阳离子相连;阳离子的占位分为 $M1$ 位、 $M2$ 位。 $M1$ 位位于硅氧四面体角顶相对的位置,八三玉中硬玉的 $M1$ 位主要是由 Al^{3+} 占据; Al^{3+} 呈八面体配位,与其配位的均是端氧,即四个 O_1 和两个 O_2 ;八面体以共棱的方式联结成平行 C 轴的、与 $[\text{Si}_2\text{O}_6]$ 链相匹配的八面体折状链。 $M2$ 位位于硅氧四面体底面相对的位置,主要由 Na^+ 离子占据; Na^+ 为八次配位,即由四个端氧(两个 O_1 和两个 O_2)及四个桥氧(O_3)与其配位。硬玉的理想化学式为 $\text{NaAl}(\text{Si}_2\text{O}_6)$ 。

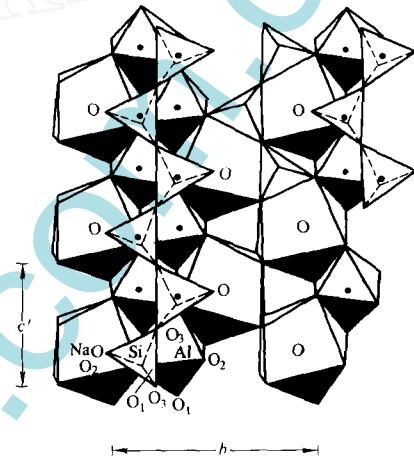


图 1 硬玉晶体结构示意图

3 硬玉表面超微结构的 AFM 特征

在 AFM 下观察硬玉矿物颗粒,晶体颗粒表面凹凸不平(见图 2a),长柱状的晶粒中部有两个近椭圆形且相似大小的沿 $[001]$ 方向的凹陷,椭圆凹陷长轴方向与硬玉晶粒的延伸方向一致,说明此两个硬玉表面的凹陷应与硬玉晶体同时生成,是早期动力变质作用的产物。与放大 1000 倍的 SEM 形貌像(见图 2b)相对比,可见其表面颗粒间排列不紧密,结构疏松,反映了矿物颗粒受到的外界压力的作用。从它表面的空洞随矿物颗粒大小的不同亦有所不同,且不同矿物颗粒间也有着大量的空洞,其内又多有碎屑物质充填的现象可知,这是硬玉颗粒生成后由于后期的机械破碎外力所造成的破坏。由此显示出缅甸硬玉的形成过程经过了多于一期的动力变质作用。

剪切应力使硬玉晶体内的 SiO_2 单链扭曲产生晶内滑移,链内以共价键相连的 Si-O 的连接保持不变,但 Si-O-Si 的键角可能改变,并在附近形成位错,平均密度 $2 \times 10^9/\text{cm}^2$,最大密度 $3 \times 10^{10}/\text{cm}^2$ (图 2c),证明硬玉晶体在变形过程中受到强的外界剪切应力,发生较强的塑性变形作用。硬玉晶体表面的纤维状明暗相间平行分布的条带发生了明显的扭折现象。进一步反

映了在较高压条件下晶体内延性应变。在扭折带的部位也是晶内位错发育集中的部位。



图2 硬玉晶粒表面超微结构特征

a—硬玉晶粒表面空洞,扫描范围:1240nm×1240 nm, $I_{ref}=0.75\text{nA}$, $V_z=100\text{V}$;

b—空洞及充填在其中的碎屑物,加速电压 15V,灯丝电流 90mA,放大 1000 倍;

c—硬玉晶体麻花状扭曲,扫描范围:3750nm×3750nm, $I_{ref}=0.79\text{nA}$, $V_z=136\text{V}$

此次工作中发现部分单个硬玉晶粒自身发生扭曲变形,部分晶粒甚至断裂。归结变形结构的原因仍主要是应力。因矿物颗粒在其母岩中整体排列杂乱,无完全定向,所以受应力作用程度也不等,变形后颗粒性质截然不同,大小各异。脆性变形是在应力作用时间短,所受压力强度超过矿物或岩石的弹性极限的情况下形成的碎裂或破碎结构,它生成许多棱角状次棱角状碎块。塑性变形不同于脆性变形,在变形过程中矿物颗粒不发生整体破裂,只有形状的改变,外应力消失后仍不能恢复,形成了硬玉晶体的扭曲。

4 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,这是因为大部分硬玉中的 $[\text{Si}_2\text{O}_6]$ 等链出现了明显的扭曲或扭折的现象。

(2) 在缅甸硬玉晶体生长过程中,受到多期应力作用,但其后期的一期甚至多期动力变质作用对硬玉晶体生长及形成的影响较小,只是使得硬玉颗粒发生类似定向排列被不同程度地破坏、颗粒扭曲、破碎等机械的物理变化,而对硬玉形成起决定作用的是其第一期动力变质作用。

参考文献

- 1 Gauthier-Manuel, *Europhys Lett*, Direct measurement of the short-range interaction between a tungsten tip and a mica surface. (Switzerland), 1992, 17, (3): 195~200
- 2 Germann G J. et al., Atomic scale friction of a diamond tip on diamond (100) and (111) surfaces. *J. Appl. Phys.* (USA), 1993, 73, (1): 163~7
- 3 GuoYing, LaiXingyun, YangXiang., Micro-Texture of Burma Jadeite and Its Physical Properties, 2000 Western Pacific Physical Meeting, (USA), 2000, 252