

· 宝玉石矿物学 ·

缅甸硬玉岩中后成合晶冠状体的含水性研究

邢莹莹¹, 齐利剑²

(1. 广州城市理工学院 珠宝学院, 广东 广州 510800; 2. 同济大学 海洋与地球科学学院, 上海 200092)

摘要: 基于多期次流体活动在硬玉岩及后成合晶冠状体的交互作用过程中发挥了至关重要的作用, 采用电子探针、显微红外光谱等测试方法, 从微尺度角度重点对缅甸角闪石质硬玉岩中角闪石+铬硬玉+硬玉后成合晶冠状体的成分和结构羟基赋存状态进行了研究。结果显示, 参与后成合晶冠状体形成的流体组分较为复杂且形成过程是多阶段的; 后成合晶冠状体的共生矿物组合不同, 角闪石质硬玉岩中普遍发育角闪石+铬硬玉+硬玉化学成分环带; 后成合晶冠状体中核部角闪石结构羟基含量较为均一, 铬硬玉边缘至硬玉、硬玉晶粒中的结构羟基含量呈较为规律的递增趋势。核部角闪石中结构羟基均一且外层硬玉中结构羟基含量的变化规律表明缅甸硬玉岩中后成合晶冠状体的形成环境相对稳定, 主要以多期次流体交代为主, 未出现较大规模的动力变质作用。缅甸硬玉岩中后成合晶冠状体成分及水含量的变化规律有助于解析该地区俯冲带流体参与硬玉岩交互作用的轨迹, 从而为缅甸硬玉岩的成岩机制提供一定的佐证。

关键词: 缅甸硬玉岩; 后成合晶冠状体; 结构羟基; 多期次流体

中图分类号: P588.3; P619.28⁺.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2021)04-0812-13

A preliminary study of water content of symplectitic coronas in jadeitite in Myanmar

XING Ying-ying¹ and QI Li-jian²

(1. Gemological Institute, Guangzhou City University of Technology, Guangzhou 510800, China; 2. School of Ocean and Earth Sciences, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Based on the fact that multi-stage fluid activities play an important role in the interaction between jadeitite and symplectitic coronas, the authors focused on the study of the composition and the mode of occurrence of water in the symplectitic coronas of amphibole + chromite jadeite + jadeite in Myanmar amphibolite jadeitite from the micro scale point of view. The results show that the fluid composition involved in the formation of symplectitic coronas is complex and the formation process is of multi-stage. The paragenetic minerals of symplectitic coronas are different, the chemical composition zone of amphibole + chromite jadeite + jadeite is widely developed in amphibolite jadeitite. In addition, the structural hydroxyl content of amphibole is more uniform in the core of symplectitic coronas, and from the edge of chromite jadeite to jadeite the structural hydroxyl content increases regularly. The change regularity of structural hydroxyl content further indicates that the formation environment of the symplectitic coronas in Myanmar jadeitite is relatively stable, which is dominated by multi-stage fluid metasomatism, without large-scale dynamic metamorphism. The evolution of the composition and water content of symplectitic coronas in Myanmar jadeitite is helpful to understanding the interaction trajectory of the fluids in the subduction zone in this area and

收稿日期: 2020-10-22; 接受日期: 2021-06-03; 编辑: 郝艳丽

基金项目: 广东省教育厅特色创新类项目(CQ190005); 广州城市理工学院重点学科建设项目(CQ190046); 广州城市理工学院优秀博士项目(KY200106)

作者简介: 邢莹莹(1984-), 女, 满族, 博士, 副教授, 矿物学、材料学专业, E-mail: xingyy@gcu.edu.cn。

providing some evidence for the diagenetic mechanism of Myanmar jadeitite.

Key words: Myanmar jadeitite; symplectitic coronas; structural hydroxyl; multi-stage fluid

Fund support: Guangdong Provincial Department of Education's Characteristic Innovation Projects (CQ190005); Key Discipline Construction Funding Project of Guangzhou City University of Technology (CQ190046); Excellent Doctoral Program of Guangzhou City University of Technology (KY200106)

世界上已知的硬玉岩产地较少,仅发现于缅甸西北部帕敢地区(包括 Longkin 和 Tawmaw)、日本的 Kotaki 和 Oo sacho 地区、美国加州 San Benito、俄罗斯的 Polar Urals 和 PayYer 地块、哈萨克斯坦的 NearBalkash 北部地区以及危地马拉的 Motagua 断裂带两侧,其中具有商业开采价值的硬玉岩原生矿主要产自缅甸西北部帕敢地区。缅甸硬玉岩位于欧亚板块与印度板块相互碰撞的俯冲带上(丘志力等, 2008), Harlow 等(2015)认为硬玉岩的形成基本都与俯冲带中的流体活动相关,且绝大多数的硬玉岩都是直接从蛇纹橄榄岩或高压低温变质岩的空洞、裂缝或裂缝中的富 Na-Al-Si 溶液中结晶而成,其形成温压条件为 $p < 2.5$ GPa 和 $t < 600^{\circ}\text{C}$ 。俯冲带中的流体活动是变质作用、岩浆作用以及成矿作用的重要控制因素,水是流体活动性元素(如大离子亲石元素 LILE)的良好载体,它可以通过板块俯冲和随后在俯冲隧道内发生的板块-地幔相互作用而从地壳进入地幔(Harlow and Sorensen, 2005; Shi *et al.*, 2005; Shi, 2006; 郑永飞等, 2015)。

后成合晶通常定义为具显微假像结构的多组矿物组合,若其中的矿物具有次变边结构或冠状体结构的称之为后成合晶冠状体(张泽明, 1996; Zheng *et al.*, 2007; Xia *et al.*, 2010; Chen *et al.*, 2011; Zheng, 2012; 刘卫平, 2018)。课题组前期的研究结果(邢莹莹, 2018)表明,在多期次流体活动的参与下,缅甸硬玉岩中一些矿物通过扩散交代反应作用而形成后成合晶冠状体,依据硬玉岩中的反应矿物组成中是否含有铬铁矿,可将后成合晶冠状体分为两类,其中不含铬铁矿硬玉岩常出现 4 种不同的矿物组合类型:①核部为钠铬辉石,沿钠铬辉石向边缘依次为铬硬玉+绿辉石矿物环边,构成球状或椭球状并具放射状结构的后成合晶冠状体;②核部为铬硬玉,沿铬硬玉向边缘为钠铬辉石矿物环边,构成球状或椭球状并具交代反应边结构的后成合晶冠状体;③发育韵律结晶生长环带并具自形-半自形硬玉晶粒,多分布在粗粒变晶结构的硬玉岩中;④核部为角闪石,沿铬硬玉向边缘为铬硬玉+硬玉矿物环

边,构成具冠状交代结构的后成合晶冠状体。亓利剑等(1999)认为变质作用高峰期后,铬铁矿与硬玉矿物粒间或晶内离子的扩散交代与流体渗滤交代的联合作用是导致钠铬辉石等后成合晶及成分变异环带形成的主要原因。Shi 等(2005)认为硬玉岩中铬铁矿被钠铬辉石交代和钠铬辉石被铬硬玉交代均与流体交代作用有关。

流体活动在变质作用中有着重要的意义,其不仅仅直接参与变质作用,而且流体的成分和含量也会影响变质反应发生的温压条件,控制变质反应的速率,因此俯冲带中的流体活动一直是地质学家关注的重点问题。目前,硬玉晶粒中含有结构羟基已成为一个普遍认同的观点,但迄今为止对缅甸北部帕敢地区俯冲带中流体如何参与硬玉岩的成岩过程,多期次流体活动如何实现硬玉岩交代结构的多样性等问题都尚未明确。本文选取缅甸帕敢地区原生硬玉岩中的后成合晶冠状体进行成分和含水量研究,进而探讨多期次流体如何参与硬玉岩后成合晶冠状体的形成过程,欲为多期次流体活动参与下缅甸硬玉岩的交互作用提供佐证。研究结果有助于解析缅甸硬玉岩的成岩机制,对于揭示硬玉岩的形成过程以及条件具有重要的科学意义。

1 地质背景

缅甸硬玉岩主要呈脉状或块状构造产出,于 Sagaing 走滑断裂带西部的蛇纹岩中(施光海等, 2004; Tsujimori and Harlow, 2012)。Sagaing 走滑断裂带近南北向,长数千公里,北起密支那北,经曼德勒向南一直延伸到安达曼海(赵子欧等, 2017)。缅甸硬玉岩原生矿床由于未遭受外力地质作用,其主体结构未被侵蚀破坏,质地比较坚硬,开采相对困难;而经持续地质活动出露于地表的于地壳深处形成的硬玉岩矿床,经过漫长的风化剥蚀、地质搬运以及沉积作用形成次生矿床。缅甸硬玉岩原生矿产于第三纪的蛇纹石化橄榄岩体内,分布在缅北密支那以西,可分为帕敢、南其和后江三大矿区,其中帕敢、

龙肯、会卡、香洞、达木坎为帕敢矿区的5个重要矿山(欧阳秋眉, 2005)。

大多数原生硬玉岩以岩墙、脉状及透镜状产于蛇纹石化橄榄岩中,以脉状为主。硬玉岩脉体可达几米至近百米长,数十厘米至几十米宽,带状构造明显发育,即中间为较纯硬玉岩,硬玉钠长岩、钠长岩、蓝闪石片岩、蛇纹石化橄榄岩以硬玉岩为中心向外顺次分布。帕敢地区原生硬玉岩由中粗粒硬玉矿物组成,块状构造,以透镜状侵入于蛇纹石化超基性岩中。硬玉岩脉和蛇纹石化超基性岩之间边界清晰,但由于强烈的变质交代和变形作用导致硬玉岩与钠铬辉石岩或角闪石岩等常混杂堆积(周征宇等, 2005; 易晓等, 2006; 王静等, 2013; 祁敏等, 2015)。

2 样品与测试条件

采用电子探针、显微红外光谱等测试方法,重点对角闪石质硬玉岩中核部为角闪石、具冠状交代结构(角闪石+铬硬玉+硬玉)的后成合晶冠状体变异环带的成分和结构羟基进行了研究。

角闪石质硬玉岩样品(样号 MJ-1)产自缅甸帕敢矿区,主要组成矿物为硬玉,并含少量角闪石、铬硬玉等次要矿物。将样品切磨成厚度约为 1 mm 的岩石薄片(图1),通过偏光显微镜、宝石显微镜对光片进行观察,选择不同交代特征的后成合晶冠状体(样号 MJ-1-01~07)(图2)进行分析测试。镜下观

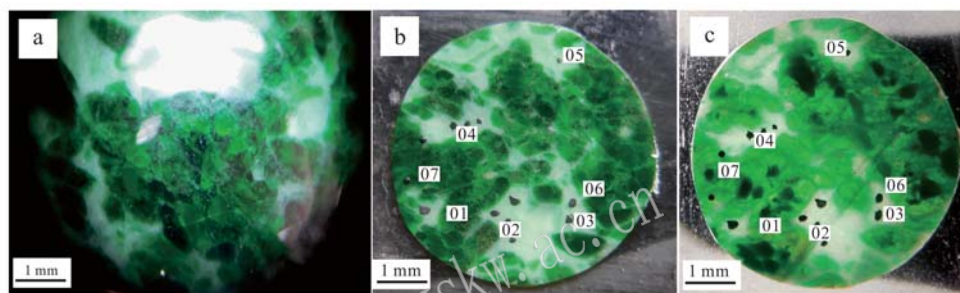


图1 角闪石质硬玉岩样品(MJ-1)照片

Fig. 1 Microphotos of amphibolite jadeitite (MJ-1)

a—原始样品; b—样品光片(反射光); c—样品光片(透射光)

a—raw material; b—light sheet(reflected light); c—light sheet(transmission light)

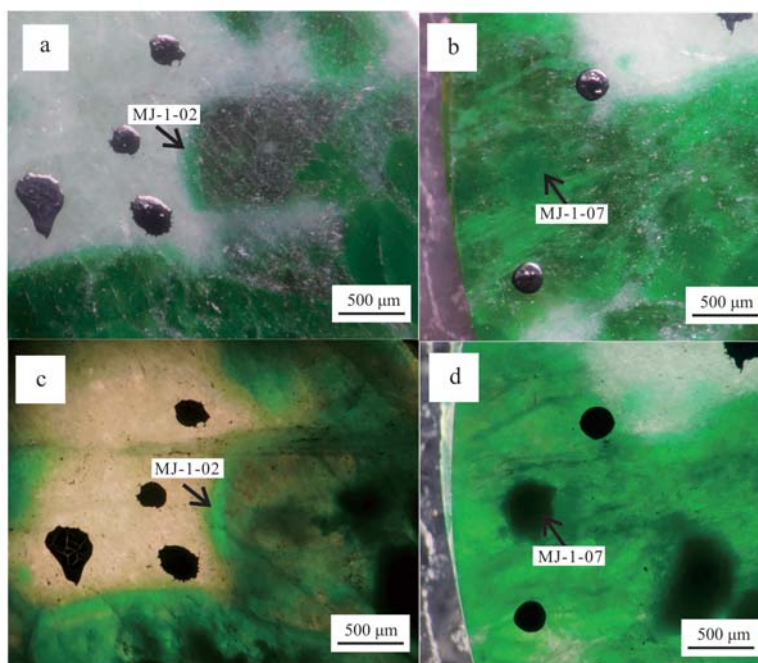


图2 角闪石质硬玉岩(MJ-1)中后成合晶冠状体显微照片

Fig. 2 Microphotos of symplectitic coronas in amphibolite jadeitite (MJ-1)

a—MJ-1-02(反射光); b—MJ-1-07(反射光); c—MJ-1-02(透射光); d—MJ-1-07(透射光)

a—MJ-1-02(reflected light); b—MJ-1-07(reflected light); c—MJ-1-02(transmission light); d—MJ-1-07(transmission light)

察结果显示,后成合晶冠状体中深绿色角闪石被翠绿色铬硬玉反应矿物环边包裹。为确保光片晶粒间隙和微裂隙处无吸附水,用无水乙醇对光片进行清洗,并置于烘箱中在 100℃ 干燥 5 h 以上。

后成合晶冠状体中矿物的主量元素含量分析在安徽省地质实验研究所的 EPMA-1720 型电子探针上完成,并通过波谱面扫描分析对所选晶粒进行测试,加速电压 15 kV,束流 10 nA,束斑直径 5 μm 。

拉曼光谱分析在同济大学宝石实验室的 LabRAM HR Evol 型激光显微拉曼光谱仪上完成,激光器波长为 785 nm,功率约为 10 mW,光斑直径约为 2 μm ,叠加 3 次,曝光时间为 20 s,扫描范围为 100~4 000 cm^{-1} ,测试前利用硅片对拉曼光谱仪进行校准。

后成合晶冠状体中矿物结构羟基含量采用单点测试和面扫描两种方式相结合的方法,在同济大学

海洋和地球科学学院的显微傅里叶变换红外光谱仪 (BRUKER LUMOS) 上完成测试,非偏振光,波数采集范围 4 000~600 m^{-1} ,扫描次数 32 次,分辨率 4 cm^{-1} ,束斑直径为 50 μm ,其中 MJ-1-02 和 MJ-1-07 面扫描时束斑直径分别为 50 μm 和 70 μm ,谱图收集和处理均采用 OPUS 7.2 软件,谱图经基线校准、拟合及积分处理。

3 测试结果分析

3.1 电子探针成分分析

角闪石质硬玉岩中角闪石被铬硬玉反应矿物环边包裹,构成后成合晶冠状体,后期铬硬玉交代部分角闪石,硬玉沿其周围分布,形成特征的“补丁状”结构(图 3)。电子探针成分分析结果(表 1)显示,铬硬玉反应矿物中 Cr_2O_3 含量达到 12.64%,且 TFeO 含

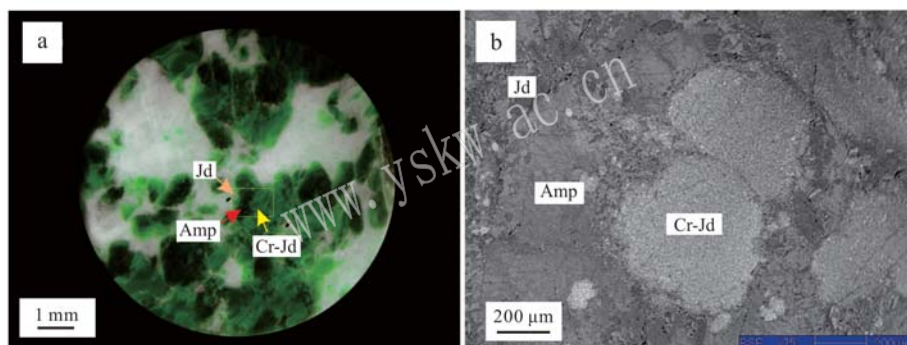


图 3 角闪石质硬玉岩中后成合晶冠状体的电子探针测试区域(a)和电子探针背散射电子像(b)

Fig. 3 Test zone of electron probe (a) and backscattered electron image (b) of symplectitic coronas in amphibolite jadeite

Jd—硬玉; Amp—角闪石; Cr-Jd—铬硬玉

Jd—jadeite; Amp—amphibole; Cr-Jd—Cr-jadeite

表 1 后成合晶冠状体化学成分及分子式计算

Table 1 Chemical composition and molecular formula of symplectitic coronas

矿物归属	组分	Na ₂ O	MgO	K ₂ O	TiO ₂	Cr ₂ O ₃	TFeO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	MnO	Total
硬玉	w _B /%	12.71	3.01	0.01	0.02	0.05	1.37	20.15	57.74	4.25	0.04	99.35
	单位分子中阳离子数	0.849	0.155	0.001	0.001	0.002	0.036	0.818	1.990	0.157	0.001	
	化学分子式	(Na _{0.849} Ca _{0.157})(Al _{0.808} Mg _{0.155} Fe ³⁺ _{0.036} Cr _{0.002} Mn _{0.001})(Si _{1.990} Al _{0.010}) ₂ O ₆										
角闪石	w _B /%	5.74	19.16	0.11	0.03	1.02	3.37	3.76	53.98	8.21	0.2	95.58
	单位分子中阳离子数	0.820	2.105	0.010	0.002	0.059	0.187	0.327	3.978	0.648	0.012	
	化学分子式	(Na _{0.878} Ca _{0.095} Fe ²⁺ _{0.004} K _{0.001})(Al _{0.415} Cr _{0.357} Mg _{0.095} Si _{0.013} Fe ³⁺ _{0.118} Ti _{0.003} Mn _{0.002})Si ₂ O ₆										
铬硬玉	w _B /%	12.69	1.78	0.02	0.09	12.64	4.54	9.85	56.38	2.48	0.06	100.53
	单位分子中阳离子数	0.878	0.095	0.001	0.003	0.357	0.122	0.415	2.013	0.095	0.002	
	化学分子式	(Na _{0.878} Ca _{0.095} Fe ²⁺ _{0.004} K _{0.001})(Al _{0.415} Cr _{0.357} Mg _{0.095} Si _{0.013} Fe ³⁺ _{0.118} Ti _{0.003} Mn _{0.002})Si ₂ O ₆										

注: 因电子探针结果无法确定 OH 含量,故未计算角闪石化学分子式。

量偏高,为 4.54%;角闪石主要组成化学成分为 SiO_2 、 MgO 和 CaO ,其中 SiO_2 含量为 53.98%, MgO 含量为 19.16%, CaO 含量为 8.21%;硬玉矿物中 SiO_2 含量为 57.74%, Al_2O_3 含量为 20.15%, Na_2O 含

量为 12.71%。波谱面扫描结果显示,角闪石中 Mg 、 Ca 浓度部分偏高,铬硬玉反应矿物和硬玉偏低;反之,铬硬玉反应矿物中 Cr 、 Fe 浓度偏高,所测得的化学成分及对应的矿物种属相吻合(图 4)。

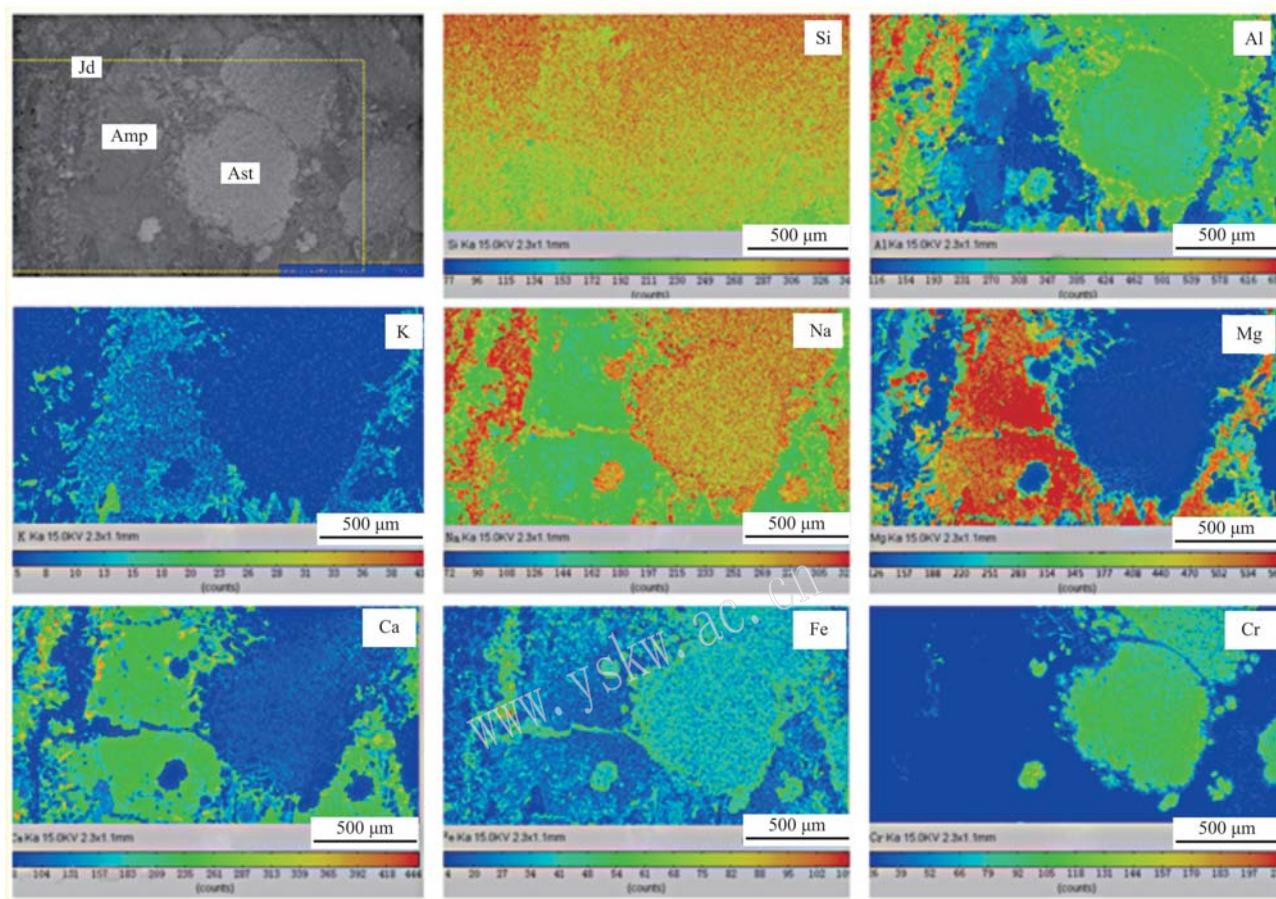


图 4 角闪石质硬玉岩(MJ-1)中后成合晶冠状体电子探针波谱面扫描分析
Fig. 4 Spectrum surface scan of symplectitic coronas in amphibolite jadeite(MJ-1)

3.2 拉曼光谱分析

后成合晶冠状体的拉曼光谱分析结果见图 5 所示。1 034 和 982 cm^{-1} 附近拉曼谱峰主要由硬玉反应矿物中 $[\text{Si}_2\text{O}_6]^{4-}$ 基团 $\nu(\text{Si}-\text{O}_{\text{nb}})$ 伸缩振动所致, $\delta_s(\text{Si}-\text{O}-\text{Si})$ 弯曲振动所致的拉曼谱带主要位于 691 cm^{-1} 附近, 372 cm^{-1} 附近的吸收谱带归属于 $\delta_{\text{as}}(\text{Si}-\text{O}-\text{Si})$ 不对称弯曲振动, 202 cm^{-1} 附近较强的吸收谱带由 $\delta_s(\text{Si}-\text{O}-\text{Si})$ 弯曲振动所致。角闪石中 1 070、1 033 和 932 cm^{-1} 吸收峰由 $\nu(\text{Si}-\text{O})$ 伸缩振动所致, 677 cm^{-1} 峰由 $\nu(\text{Si}-\text{O}-\text{Si})$ 伸缩振动所致, 395、366、234 cm^{-1} 处的吸收谱带为晶格振动所致。上述结果表明, 铬硬玉、角闪石和硬玉这 3 种矿物为 MJ-1 样品中的主要组成矿物, 这与前人所做的翡翠拉曼光谱分析结果(范建良等, 2007; 王昆林

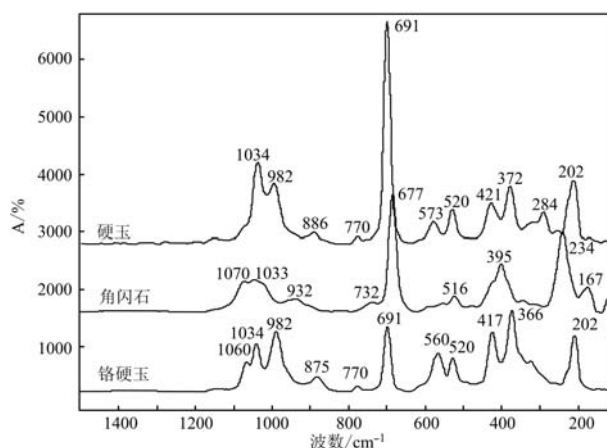


图 5 角闪石质硬玉岩(MJ-1)中后成合晶冠状体拉曼光谱特征
Fig. 5 Raman spectra of symplectitic coronas in amphibolite jadeite(MJ-1)

等, 2011; 陈全莉等, 2012; 陈木子, 2013) 相吻合。

3.3 红外光谱分析

3.3.1 红外光谱单点测试分析

红外光谱单点测试结果(图6)显示, 角闪石中, 由结构羟基伸缩振动导致的特征红外吸收谱带位于

3 569 和 3 434 cm^{-1} 附近, 其中 3 569 cm^{-1} 附近红外吸收谱带为半波宽较窄、相对吸收强度较大的吸收谱峰, 3 434 cm^{-1} 附近红外吸收谱带相对吸收强度稍弱且半波宽较宽, 另外还伴有 3 310~3 235 cm^{-1} 的宽缓吸收谱带。

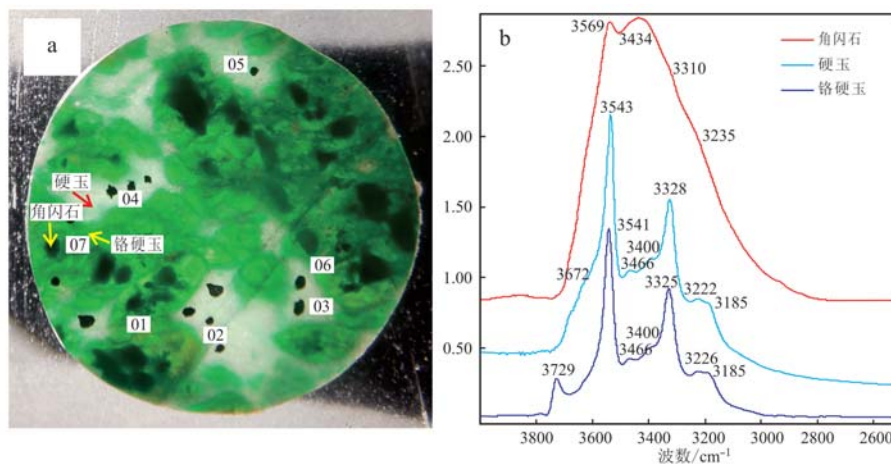


图6 角闪石质硬玉岩(MJ-1)中后成合晶冠状体红外光谱

Fig. 6 FTIR of symplectitic coronas in amphibolite jadeite (MJ-1)

硬玉、铬硬玉中由结构羟基伸缩振动所致的红外吸收谱带集中于 3 700~3 600、3 570~3 520、3 500~3 300 和 3 230~3 140 cm^{-1} 范围内, 具体表现为相对吸收强度最大的红外吸收谱带位于 3 543 cm^{-1} 附近, 其半波宽较窄且尖锐; 3 328 cm^{-1} 附近红外吸收谱带相对吸收强度中等偏弱; 3 466 和 3 400 cm^{-1} 附近红外吸收谱带的峰形整体表现为一组舒缓吸收宽谱带, 相对吸收强度较弱; 3 222 和 3 185 cm^{-1} 附近红外吸收谱带相对吸收强度最弱。此外, 硬玉中出现的较为舒缓且半波宽较大的 3 672 cm^{-1} 吸收峰, 主要来源于交代过程中残余角闪石中微细流体包裹

体; 铬硬玉伴随出现了 3 729 cm^{-1} 处吸收强度中等的红外吸收谱带, 此吸收谱带目前指代不明, 应该与交代过程中残余矿物成分相关。

3.3.2 红外光谱面扫描分析

选取 MJ-1-02 后成合晶冠状体(光片厚度为 0.092 cm)进行显微红外光谱面扫描分析, 根据 Lambert-Beer 公式 $c = \Delta / I \gamma d$ (樊孝玉等, 2007) 计算了与铬硬玉接触的硬玉中结构羟基的含量及变化趋势(图7), 式中, c 为结构羟基含量 (10^{-6}); Δ 为相对吸收强度, 相当于扣除基线后的结构羟基伸缩振动致红外吸收谱带的积分面积 (cm^{-1}); I 为单斜辉石

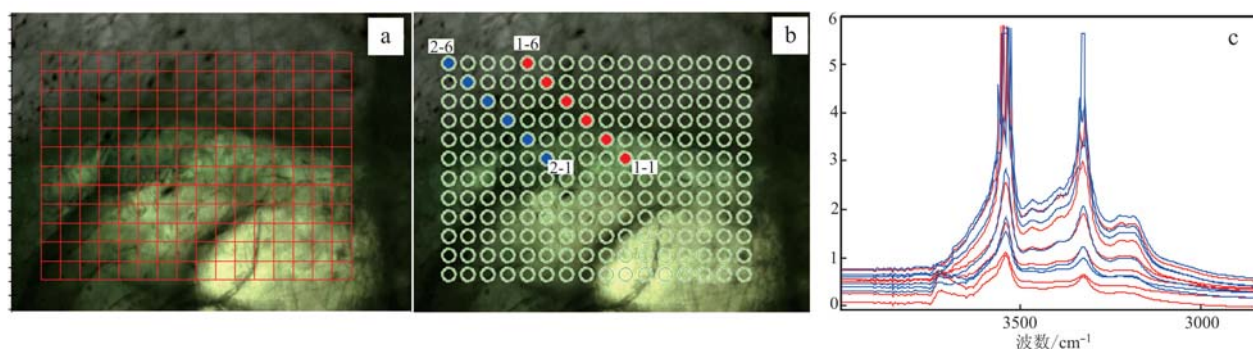


图7 角闪石质硬玉岩中后成合晶冠状体(MJ-1-02)的面扫描区域选点图(a、b)和选点红外光谱图(c)

Fig. 7 Measure-point distribution (a, b) and infrared spectrum with surface scan (c) of symplectitic coronas in amphibolite jadeite (MJ-1-02)

(硬玉)的摩尔吸收系数($7.09\times 10^{-6}\text{ cm}^2$); γ 为方向因子($1/3$); d 为光片厚度(cm)。在面扫描选点位按一定的方位选择硬玉红外谱峰计算结构羟基含量及变化趋势,计算结果显示,与铬硬玉接触的硬玉中均含有一定量的结构羟基,最高含量为 $3\,715.24\times 10^{-6}$,最低为 712.11×10^{-6} (表 2);从铬硬玉至硬玉,结构羟基含量变化趋势均呈现递增趋势(图 8)。又选择部分角闪石被后期铬硬玉交代而构成特

表 2 角闪石质硬玉岩中硬玉晶粒 (MJ-1-02) 面扫描结构羟基含量
Table 2 The content of structural hydroxyl of jadeite (MJ-1-02) in amphibolite jadeitite

点位	吸收峰位/ cm^{-1}	相对强度/%	宽度/ cm^{-1}	积分面积/ cm^{-1}	结构羟基含量/ 10^{-6}	总结构羟基含量/ 10^{-6}	残差
1-1	3 208	0.11	97.94	17.44	80.37	712.11	0.030
	3 324	0.25	50.73	19.69	90.71		
	3 409	0.17	157.55	41.07	189.26		
	3 542	0.71	46.34	51.49	237.28		
	3 589	0.30	52.36	24.84	114.49		
1-2	3 203	0.14	88.46	19.56	90.12	844.01	0.016
	3 324	0.34	50.44	27.20	125.35		
	3 410	0.22	172.40	59.11	272.39		
	3 540	0.77	41.48	50.09	230.84		
	3 585	0.27	64.35	27.19	125.31		
1-3	3 203	0.22	92.97	31.56	145.42	1 071.93	0.014
	3 324	0.55	54.09	46.98	216.50		
	3 396	0.27	97.20	40.97	188.82		
	3 463	0.14	46.99	10.17	46.88		
	3 539	0.96	39.48	59.50	274.21		
	3 581	0.30	93.37	43.42	200.11		
1-4	3 200	0.39	86.96	53.46	246.37	1 783.05	0.022
	3 325	1.04	54.40	88.55	408.07		
	3 396	0.46	93.40	67.75	312.22		
	3 462	0.22	41.86	14.71	67.78		
	3 540	1.61	40.16	101.70	468.67		
	3 589	0.37	105.59	60.75	279.94		
1-5	3 178	0.45	41.10	29.12	134.19	2 782.37	0.040
	3 219	0.41	55.73	36.10	166.37		
	3 325	1.90	53.44	159.46	734.84		
	3 397	0.71	85.82	95.56	440.38		
	3 462	0.38	41.62	25.12	115.78		
	3 533	2.43	27.79	106.29	489.83		
	3 552	1.26	41.98	82.94	382.22		
	3 603	0.51	86.16	69.17	318.76		
1-6	3 178	0.52	41.20	33.85	156.01	3 228.9	0.046
	3 220	0.48	57.15	42.97	198.01		
	3 325	2.25	49.98	176.68	814.17		
	3 395	0.85	90.68	120.83	556.81		
	3 461	0.41	42.76	27.59	127.13		
	3 543	3.80	41.59	248.50	1145.17		
	3 597	0.46	38.45	27.52	126.82		
	3 630	0.36	40.31	22.74	104.77		

续表 2
Continued Table 2

点位	吸收峰位/cm ⁻¹	相对强度/%	宽度/cm ⁻¹	积分面积/cm ⁻¹	结构羟基含量/10 ⁻⁶	总结构羟基含量/10 ⁻⁶	残差
2-1	3 205	0.17	90.19	24.66	113.62	932.67	0.018
	3 324	0.44	54.17	37.65	173.51		
	3 396	0.22	94.15	32.18	148.31		
	3 463	0.11	45.53	7.94	36.60		
	3 541	0.92	42.96	62.36	287.39		
	3 586	0.34	70.10	37.59	173.23		
2-2	3 201	0.25	87.04	34.86	160.66	1 275.47	0.016
	3 325	0.69	54.35	59.26	273.10		
	3 397	0.32	94.49	47.23	217.63		
	3 462	0.16	43.34	10.61	48.91		
	3 540	1.18	39.98	74.26	342.23		
	3 581	0.34	95.77	50.54	232.93		
2-3	3 200	0.41	80.77	52.50	241.93	1 917.42	0.026
	3 324	1.24	52.14	101.55	467.99		
	3 396	0.51	90.39	72.09	332.23		
	3 462	0.24	39.51	15.03	69.25		
	3 540	1.95	39.48	120.66	556.05		
	3 587	0.36	96.42	54.24	249.97		
2-4	3 179	0.47	39.87	29.68	136.79	2 839.72	0.054
	3 219	0.42	53.22	35.23	162.34		
	3 325	2.13	49.54	165.94	764.70		
	3 395	0.74	85.31	99.51	458.55		
	3 460	0.33	33.80	17.53	80.80		
	3 537	2.85	35.44	158.54	730.59		
	3 576	0.74	94.61	109.79	505.96		
2-5	3 178	0.56	43.12	38.06	175.37	3 591.46	0.034
	3 221	0.55	64.82	55.91	257.66		
	3 326	2.69	49.24	208.01	958.59		
	3 399	0.91	89.86	128.16	590.58		
	3 463	0.54	50.54	43.16	198.92		
	3 533	3.07	27.54	132.59	611.03		
	3 548	1.86	27.08	79.10	364.54		
	3 572	0.62	29.76	28.98	133.55		
	3 599	0.58	42.84	39.27	180.97		
	3 632	0.40	41.74	26.09	120.25		
2-6	3 179	0.53	42.32	35.41	163.18	3 715.24	0.049
	3 224	0.53	71.40	59.84	275.76		
	3 325	3.52	35.38	195.88	902.67		
	3 393	1.02	92.90	148.33	683.56		
	3 462	0.52	47.29	38.47	177.27		
	3 540	4.51	33.40	236.49	1 089.84		
	3 578	0.72	35.55	39.93	184.00		
	3 607	0.52	37.27	30.20	139.19		
	3 637	0.38	36.26	21.65	99.78		

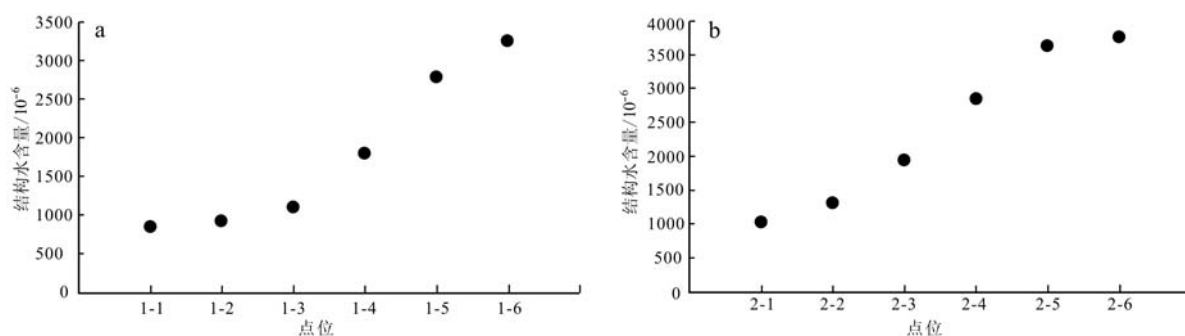


图8 后成合晶冠状体(MJ-1-02)中结构羟基含量变化趋势散点图

Fig. 8 Scatter diagram of variation tendency of structural hydroxyl in symplectitic coronas (MJ-1-02)

征的补丁状结构的后成合晶冠状体(MJ-1-07)(光片厚度为0.092 cm)进行了显微红外面扫描测试。角闪石从外至核部取圈层1至3(图9),每个圈层先按直边计算结构羟基平均含量,再平均各边含量即为各圈层结构羟基含量。结果显示,以结构羟基形式存在的结构水均存在于角闪石中,含量变化范围为

$1.388.38 \times 10^{-6} \sim 1.532.26 \times 10^{-6}$,分布较为均一,由外至内未发生明显的变化(表3)。由此推测结构羟基的变化趋势与后成合晶冠状体的形成环境有关,在后成合晶冠状体的形成过程中未出现较大的动力变质作用,整体形成环境趋于稳定,因此晶粒结构羟基没有明显的溢出和不均一。

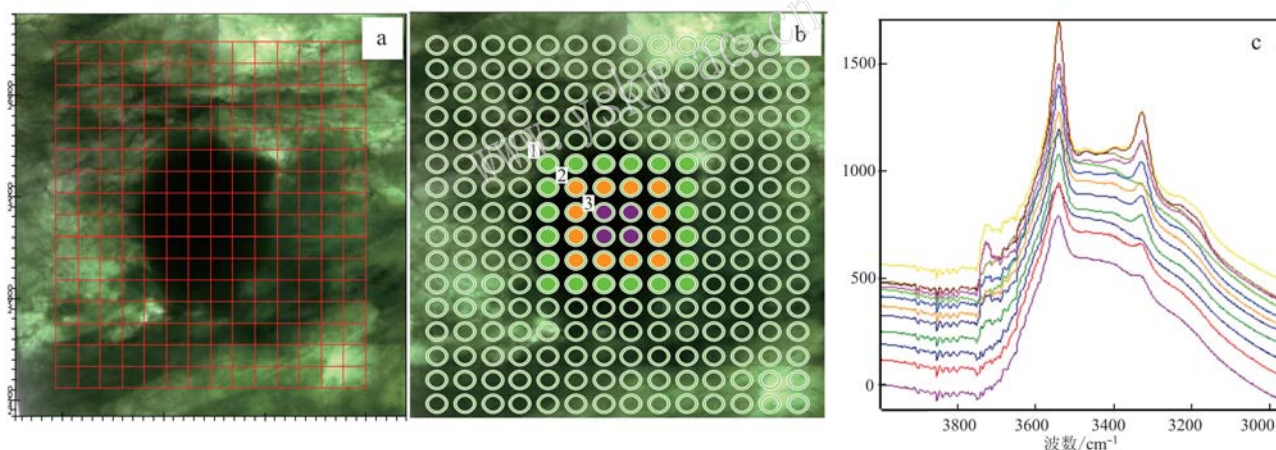


图9 角闪石质硬玉岩中后成合晶冠状体(MJ-1-07)的面扫描区域选点图(a,b)和选点红外光谱图(c)

Fig. 9 Measure-point distribution (a, b) and infrared spectrum with surface scan (c) of symplectitic coronas in amphibolite jadeite (MJ-1-07)

4 讨论

笔者前期选择缅甸、俄罗斯和危地马拉硬玉岩中单个硬玉晶粒进行结构羟基分布特征研究,研究结果(邢莹莹, 2018)显示,硬玉晶粒均表现出结构羟基含量由内至外增加的趋势,但缅甸硬玉岩中硬玉晶粒结构羟基含量递增趋势明显,危地马拉和俄罗斯硬玉岩中硬玉晶粒内结构羟基含量呈缓慢递增趋势。结合各产地硬玉岩产出品质,推测缅甸硬玉

岩的形成经过了较为强烈的动力变质作用,板块俯冲后快速折返导致结构羟基含量不均一性明显,最终产出的硬玉岩产量最大,品质最好,结构致密,宝石级硬玉岩多见;但危地马拉和俄罗斯硬玉岩未经过强烈的动力变质作用,从而硬玉晶粒的结构羟基含量表征较为均一,最终产出硬玉岩在颜色、质地以及透明度等方面都不及缅甸。本次研究对缅甸硬玉岩中具冠状结构(角闪石+铬硬玉+硬玉)的后成合晶冠状体的显微红外光谱分析结果显示,角闪石、铬硬玉以及硬玉中整体含水量从铬硬玉反应环边至硬

表 3 角闪石质硬玉岩中硬玉晶粒 (MJ-1-07) 面扫描结构羟基含量
Table 3 The content of structural hydroxyl of jadeite (MJ-1-07) in amphibolite jadeitite

点位	吸收峰位/cm ⁻¹	相对强度/%	宽度/cm ⁻¹	积分面积/cm ⁻¹	结构羟基含量/10 ⁻⁶	总结构羟基含量/10 ⁻⁶	残差	每圈层结构羟基含量平均值/10 ⁻⁶
1-1	3 062	0.02	160.64	6.07	27.99	1 322.21	0.016	
	3 212	0.25	162.04	64.90	299.06			
	3 325	0.44	59.35	41.38	190.68			
	3 396	0.31	104.83	50.73	233.79			
	3 466	0.23	78.25	27.87	128.45			
	3 540	0.85	48.09	64.27	296.17			
	3 589	0.26	77.66	31.70	146.07			
1-2	3 215	0.28	207.92	90.35	416.34	1 445.82	0.014	1 388.38
	3 325	0.40	56.83	35.95	165.68			
	3 396	0.33	110.27	56.80	261.75			
	3 466	0.24	82.19	31.60	145.62			
	3 540	0.83	50.73	66.18	304.97			
	3 594	0.25	84.14	32.87	151.46			
1-3	3 213	0.26	183.07	75.33	347.16	1 333.27	0.017	
	3 325	0.44	55.48	38.43	177.09			
	3 396	0.32	106.63	53.21	245.21			
	3 465	0.22	76.10	26.87	123.82			
	3 540	0.86	47.62	64.36	296.58			
	3 594	0.23	84.45	31.12	143.41			
1-4	3 212	0.29	185.43	83.59	385.22	1 452.21	0.017	
	3 325	0.44	59.99	41.72	192.24			
	3 396	0.34	106.48	56.69	261.26			
	3 465	0.25	80.65	32.09	147.89			
	3 540	0.84	50.91	67.07	309.08			
	3 594	0.26	82.58	33.97	156.52			
2-1	3 213	0.22	166.23	57.86	266.65	1 484.56	0.021	
	3 328	0.31	93.28	45.16	208.12			
	3 423	0.41	155.52	99.75	459.68			
	3 547	0.70	108.01	119.37	550.11			
2-2	3 215	0.20	151.81	47.45	218.65	1 424.11	0.021	
	3 324	0.26	67.58	27.18	125.28			
	3 414	0.43	190.33	127.54	587.75			
	3 547	0.67	100.88	106.86	492.43			
2-3	3 219	0.25	253.01	98.42	453.53	1 786.81	0.013	1 532.26
	3 327	0.21	56.25	18.34	84.52			
	3 430	0.52	240.07	196.40	905.09			
	3 542	0.58	56.52	51.30	236.40			
	3 598	0.19	79.79	23.28	107.28			
2-4	3 208	0.20	158.54	49.29	227.14	1 433.55	0.013	
	3 331	0.34	117.55	62.32	287.20			
	3 440	0.43	164.25	111.83	515.36			
	3 543	0.64	68.33	68.58	316.02			
	3 605	0.19	65.25	19.06	87.83			
3	3 215	0.19	188.19	55.16	254.20	1 414.65	0.016	1 414.65
	3 348	0.34	165.00	88.22	406.55			
	3 452	0.36	135.95	76.13	350.82			
	3 545	0.57	82.40	73.42	338.36			
	3 608	0.17	53.98	14.04	64.72			

玉也呈明显且规律的递增趋势,但是后成合晶冠状体中的角闪石晶粒结构羟基含量分布相对较为均匀,未出现明显的变化趋势。

NAMs 中的结构羟基是在陆壳物质深俯冲过程中少量流体,即隐性组分的水逐渐地溶解到矿物中形成的 (Peslier and Luhr, 2006; Zheng, 2009)。研究结果显示,压力与含水量呈正相关关系,当压力最高时,NAMs 中的结构羟基可达到最大溶解度,此时含量最高;当压力降低时,矿物中的结构羟基会随着压力减小而从矿物中出溶出来,水含量较少 (Xia *et al.*, 2010; Zheng, 2012)。缅甸硬玉岩的形成主要分为成岩和成玉两个阶段,成岩阶段为硬玉质熔体/热液在相对静态环境下直接结晶,成玉阶段硬玉岩由于变形变质作用具有变形变质结构,结果导致硬玉岩的结构改变和某些致色元素的迁移集聚,这对硬玉岩的形成至关重要 (Harlow and Sorensen, 2005)。缅甸硬玉岩矿区所处的大地构造位置在欧亚板块与印度板块相互碰撞的俯冲带上 (丘志力等, 2008),根据单个硬玉晶粒的结构羟基分布,认为缅甸硬玉岩在形成初期经过了较为强烈的动力地质作用。在板块俯冲过程中蚀变的洋壳玄武岩及其上覆沉积物随着俯冲带温度和压力的升高,能够释放出大量的富水流体,由于俯冲速率较快,少量的含水流体进入了名义上无水矿物硬玉中,这一阶段即为硬玉岩的成岩阶段,俯冲过程导致结构疏松的硬玉岩中硬玉矿物含有相对较多的结构羟基;随即,板块发生折返,由于压力突然降低,含水(H_2O 和 OH^-)的各种矿物发生分解或羟基出溶,这一成岩过程导致硬玉晶粒中结构羟基含量出现较为明显的不均一性。后期成玉及交代过程中地质作用较为和缓,其形成的后成合晶冠状体中结构羟基没有明显的出溶现象,这一过程主要是以复杂流体交代作用为主 (杨晓志等, 2016),在本次研究中角闪石晶粒结构羟基较为均匀的分布规律也印证了这一说法。

5 结论

通过电子探针点分析和波谱面扫描、显微红外光谱等测试方法对缅甸硬玉岩中后成合晶冠状体成分变异环带、结构羟基表征等进行的分析结果显示:

(1) 参与缅甸硬玉岩后成合晶冠状体形成的流体组分较为复杂且形成过程是多阶段的,后成合晶冠状体一般都发育有典型的化学成分环带,即角闪

石+铬硬玉+硬玉;

(2) 缅甸硬玉岩中后成合晶冠状体核部角闪石结构羟基含量较为均一,铬硬玉边缘至硬玉、硬玉晶粒结构羟基含量呈较为规律的递增趋势;

(3) 缅甸硬玉岩中后成合晶冠状体的形成是在多期次流体活动的参与下,矿物通过扩散交代反应作用而成,其形成环境相对稳定,整个形成过程未出现较大规模的动力变质作用。

References

- Chen R X, Zheng Y F and Gong B. 2011. Mineral hydrogen isotopes and water contents in ultrahigh-pressure metabasite and metagranite: Constraints on fluid flow during continental subduction-zone metamorphism[J]. *Chemical Geology*, 281(1~2): 103~124.
- Chen Quanli, Yin Zuwei and Bu Yuewen. 2012. Raman spectroscopy study on the mineral composition of the Guatemalan jade[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 32(9): 2 447~2 451 (in Chinese with English abstract).
- Chen Muzi. 2013. Fast and non-destructive analysis of jadeite by Raman spectra[J]. *Chinese Journal of Spectroscopy Laboratory*, 30(3): 1 234~1 237 (in Chinese with English abstract).
- Fan Jianliang, Guo Shouguo and Liu Xueliang. 2007. Application of raman spectrometer(785 nm) to jadeite test[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 27(10): 2 057~2 060 (in Chinese with English abstract).
- Fan Xiaoyu, Wu Xiuling, Meng Dawei, *et al.* 2007. Water in UHP jadeite-quartzites of Dabie mountains: Evidence from micro-FTIR[J]. *Earth Science*, 32(2): 167~174 (in Chinese with English abstract).
- Harlow G E and Sorensen S S. 2005. Jade (nephrite and jadeite) and serpentinite: Metasomatic connections[J]. *International Geology*, 47(2): 113~146.
- Harlow G E, Tsujimori T and Sorensen S S. 2015. Jadeitites and plate tectonics[J]. *The Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 43: 4. 1~4. 34.
- Liu Weiping. 2018. Analysis and Simulation Calculation Study on Phase Transition and Hydrogen Defects in Ultrahigh-pressure Minerals [D]. Wuhan: China University of Geosciences (in Chinese with English abstract).
- Ouyang Qiumei. 2005. Complete Works of Jadeite[M]. Hong Kong: Hong Kong Tiandi Books (in Chinese).

- Peslier A H and Luhr J F. 2006. Hydrogen loss from olivines in mantle xenoliths from Simcoe (USA) and Mexico: Mafic alkali magma ascent rates and water budget of the sub-continental lithosphere[J]. *Earth&Planetary Science Letters*, 242(3): 302~319.
- Qi Lijian, Zheng Shu and Pei Jingcheng. 1999. Mechanism for kosmochlor symplectite and compositional variation zoning in jadeitite jade [J]. *Journal of Gems and Gemology*, 1(1): 13~18 (in Chinese with English abstract).
- Qi Min, Shen Kun and Xiang Hua. 2015. Fluid inclusions in the Myanmar jadeitites[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 34(3): 405~417 (in Chinese with English abstract).
- Qiu Zhili, Wu Fuyuan, Yang Shufeng, *et al.* 2008. Zircon U-Pb ages and Hf isotopic constraints on the age and genesis of jadeite from Myanmar [J]. *Science in China*, 53(24): 3 104~3 111 (in Chinese).
- Shi G H. 2006. Jadeitized omphacite from Myanmar jadeite area. Contributions to Mineralogy and Petrology[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(4): 971~976.
- Shi Guanghai and Cui Wenyuan. 2004. Textures and microstructures of Myanmar jadeitite: implications for formation of jaditite[J]. *Journal of Gems and Gemology*, 6(3): 8~11 (in Chinese with English abstract).
- Shi G H, Stockhert and Cui W Y. 2005. Composition and texture of kosmochlor and chromium clinopyroxenes in rocks from the Myanmar jadeitite area[J]. *Mineral*, 69(6): 1 059~1 075.
- Tsujimori T and Harlow G E. 2012. Petrogenetic relationships between jadeitite and associated high-pressure and low-temperature metamorphic rocks in worldwide jadeitite localities: A review[J]. *European Journal of Mineralogy*, 24(2): 371~390.
- Wang Kunlin and Liu Renming. 2011. Application of R-3 000 portable raman spectrometer in identification of jade[J]. *Chinese Journal of Spectroscopy Laboratory*, 28(2): 832~835 (in Chinese with English abstract).
- Wang Jing, Shi Guanghai, Wang Jun, *et al.* 2013. Hydrothermal albitite from the Myanmar jadeite deposit[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 29(4): 1 450~1 460 (in Chinese with English abstract).
- Xia Q K, Hao Y T, Li P, *et al.* 2010. Low water content of the Cenozoic lithospheric mantle beneath the eastern part of the North China Craton[J]. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 115(B7): 1~22.
- Xing Yingying. 2018. The Occurrence State of Water in Jadeite and the Evolution of Symplectitic Coronas in Jadeitite with the Participation of Multi-stage Fluids[D]. Wuhan: China University of Geosciences (in Chinese with English abstract).
- Yang Xiaozhi and Li Yan. 2016. High-*P/T* experimental studies and water in the silicate mantle[J]. *Science China Earth Sciences*, 46(3): 287~300 (in Chinese with English abstract).
- Yi Xiao, Shi Guanghai and He Mingyue. 2006. Jadeitized omphacite from Myanmar jadeite area[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(4): 71~76 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Zeming. 1996. Disequilibrium reactions and kinetics of ultra-high pressure metamorphic rocks from the Dabie mountains[J]. *Earth Science*, 21(5): 501~507 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Zi'ou, Qiao Donghai, Zhang Weice, *et al.* 2017. A study of the distribution of high-grade gemstone and jade deposits in countries of "The Belt and Road" [J]. *Geological Bulletin of China*, 36(8): 1 450~1 461 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Y F. 2009. Fluid regime in continental subduction zones: Petrological insights from ultrahigh-pressure metamorphic rocks[J]. *Journal of the Geological Society*, 166: 763~782.
- Zheng Y F. 2012. Metamorphic chemical geodynamics in continental subduction zones[J]. *Chemical Geology*, 328(7 420): 5~48.
- Zheng Yongfei, Chen Yixiang, Dai Liqun, *et al.* 2015. Developing plate tectonic theory from oceanic subduction zones to collisional orogens [J]. *Science China: Earth Sciences*, 45(6): 711~735.
- Zheng Y F, Gao T S, Wu Y B, *et al.* 2007. Fluid flow during exhumation of deeply subducted continental crust: Zircon U-Pb age and O-isotope studies of a quartz vein within ultrahigh-pressure eclogite [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 25(2): 267~283.
- Zhou Zhengyu, Liao Zongting and Ma Tingting. 2005. The new genesis-model of jadeite in Burma[J]. *Shanghai Geology*, (1): 58~61 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈全莉, 尹作为, 卜玥文. 2012. 拉曼光谱在危地马拉翡翠矿物组成中的应用研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 32(9): 2 447~2 451.
- 陈木子. 2013. 利用拉曼光谱快速无损鉴定翡翠[J]. *光谱实验室*, 30(3): 1 234~1 237.
- 范建良, 郭守国, 刘学良. 2007. 拉曼光谱(785 nm)在翡翠检测中的应用[J]. *光谱学与光谱分析*, 27(10): 2 057~2 060.
- 樊孝玉, 吴秀玲, 孟大维等. 2007. 大别山超高压硬玉石英岩中的水: 来自红外光谱的证据[J]. *地球科学*, 32(2): 167~174.
- 刘卫平. 2018. 超高压矿物相变和含氢缺陷分析及模拟计算研究[D]. 武汉: 中国地质大学.

- 欧阳秋眉. 2005. 翡翠全集[M]. 香港: 香港天地图书.
- 亓利剑, 郑曙, 裴景成. 1999. 翡翠中钠铬辉石后成合晶与成分变异环带机理[J]. 宝石和宝石学杂志, 1(1): 13~18.
- 祁敏, 沈昆, 向华. 2015. 缅甸硬玉岩中的流体包裹体[J]. 岩石矿物学杂志, 34(3): 405~417.
- 丘志力, 吴福元, 杨树锋, 等. 2008. 缅甸翡翠形成时代和成因的锆石 U-Pb 年龄与 Hf 同位素制约[J]. 科学通报, 53(24): 3 104~3 111.
- 施光海, 崔文元. 2004. 缅甸硬玉岩的结构与显微构造: 硬玉质翡翠的成因意义[J]. 宝石和宝石学杂志, 6(3): 8~11.
- 王昆林, 刘仁明. 2011. R-3 000 便携式拉曼光谱仪在翡翠鉴定中的应用[J]. 光谱实验室, 28(2): 832~835.
- 王静, 施光海, 王君. 2013. 缅甸硬玉岩地区的热液型钠长石岩[J]. 岩石学报, 29(4): 1 450~1 460.
- 邢莹莹. 2018. 多期次流体参与下硬玉岩中硬玉内水的赋存状态及后成合晶冠状体演化规律[D]. 武汉: 中国地质大学.
- 杨晓志, 李岩. 2016. 高温高压实验和硅酸盐地幔中的水[J]. 中国科学: 地球科学, 46(3): 287~300.
- 易晓, 施光海, 何明跃. 2006. 缅甸硬玉岩区的硬玉化绿辉石岩[J]. 岩石学报, 22(4): 71~76.
- 张泽明. 1996. 大别山地区超高压变质岩的不平衡退变质反应及动力学[J]. 地球科学, 21(5): 501~507.
- 赵子欧, 乔东海, 张维策, 等. 2017. “一带一路”地区高级宝玉石矿床分布规律[J]. 地质通报, 36(8): 1 450~1 461.
- 郑永飞, 陈伊翔, 戴立群, 等. 2015. 发展板块构造理论: 从洋壳俯冲带到碰撞造山带[J]. 中国科学: 地球科学, 45(6): 711~735.
- 周征宇, 廖宗廷, 马婷婷. 2005. 缅甸翡翠原生矿床成因机制新探[J]. 上海地质, (1): 58~61.