

危地马拉紫色翡翠的矿物组成特征及意义

陈秀英¹ 袁心强¹ 林嵩山²

(1. 中国地质大学, 湖北 武汉 430074; 2. 台湾全球宝石鉴定研习中心, 台湾 桃园 330)

摘要: 通过薄片鉴定、阴极发光、LIBS、LA-ICP-MS等手段, 确定了危地马拉紫色翡翠的矿物组成有硬玉、钠长石、钙铝榴石、榍石与金红石, 这些矿物的结晶顺序为金红石+榍石-白色硬玉-蓝紫色硬玉+钙铝榴石-钠长石, 具有从温度降低的流体中结晶演化的特征。蓝紫色硬玉的Ti含量较高。在外观上, 危地马拉紫色翡翠含有钙铝榴石造成的淡红色团块、含Ti硬玉造成的蓝紫色团块以及伴随这些团块无色透明的钠长石, 与缅甸产的紫色翡翠有较为明显的区别。

关键词: 危地马拉, 紫色翡翠, 组成矿物, 形成条件

中图分类号: P575

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2011)S0-0001-07

Mineral composition of the purple jadeite from Guatemala and its significance

CHEN Xiu-ying¹, YUAN Xin-qiang¹ and LIN Song-shan²

(1. Gemmological Institute, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 2. World Gem Identification and Study Centre, Taiwan 330, China)

Abstract: The Guatemala purple jadeite jade (jadeite) was studied by such means as thin section, cathode luminescence, LIBS and LA-ICP-MS. The results show that the common assemblage includes jadeite, albite, grossular, titanite and rutile, and the sequence of their crystallization is in order of titanite-white jadeite-bluish purple jadeite+ grossular-albite, suggesting the evolution of fluids at decreasing temperature. The blue purple jadeite has higher Ti content. In appearance, the Guatemala purple jadeite shows that the pink purple mass is caused by grossular and the blue purple mass is caused by jadeite with higher Ti content and colorless transparent albite in association with these masses. These characteristics can distinguish Guatemala purple jadeite jade from Myanmar purple jadeite jade.

Key words: Guatemala; purple jadeite; mineral composition; formation condition

世界上除了缅甸产出翡翠外, 中美洲的危地马拉也是翡翠的重要产地。在危地马拉的麦塔高谷地中出产有绿色、黑色、白色、紫色、蓝色等品种的翡翠 (Harlow *et al.*, 2002, 2006; 袁心强, 2009), 且危地马拉是除了缅甸以外的另一个紫色翡翠产地, 俄罗斯、日本等尚未有产出紫色翡翠的报道。近来紫色翡翠的商业价值飞涨, 2010年11月一块重约6 kg

的紫色翡翠在缅甸翡翠公盘上以2 000万欧元成交, 创造了紫色翡翠价值的新纪录。本文研究了危地马拉紫色翡翠的矿物组成, 发现其成分比较复杂, 含有较多的钙铝榴石、金红石、榍石等缅甸紫色翡翠中没有见到的矿物, 而且这些矿物组合也揭示了其特殊的形成条件和产地特征。

1 样品来源与外观特征

供本次研究的危地马拉紫色翡翠样品来自台湾桃园一家玉石厂,是从该厂玉石仓库中的紫色翡翠原石中随手捡出的(图 1a),这些翡翠均是从危地马拉麦塔高河谷地区采集回来的,有些已经制作成首饰(图 1b),也有些运到广东平州翡翠市场销售。

危地马拉紫色翡翠呈微透明-不透明,粗粒结构。在白色的基底上分布蓝紫色、淡红色以及无色透明的团块,团块的大小为 3~10 mm 不等,颜色较深的蓝紫色团块使整块玉石呈现紫色,淡红色团块的颜色虽浅,但是出现的几率大,造成翡翠总体上呈现红紫色的色彩(图 1)。紫色翡翠成品的抛光表面上呈现玻璃光泽,白色石花状颗粒较多,尤其在淡红

色团块处的分布更广,颗粒感明显。淡红色团块与紫色团块不均匀分布,放大镜下观察,多数淡红色斑块或蓝紫色斑块处都分布有钠长石造成的透明小团块。

根据文献资料,危地马拉的翡翠矿床分布在 Es-progreso 的 Manzanal 小镇附近,产于 Motogua 河谷深大断裂的中生代蛇纹岩之中,含翡翠的蛇纹岩受到明显的动力变质作用,发生强裂的片理化。Motogua 河谷深大断裂是一条近于东西向的断裂带。断裂带除有巨大的超基性岩体之外,还广泛分布着蓝闪石-硬柱石、绿辉石-石榴石、榴辉岩和角闪石岩,硬柱石-白云母片麻岩,阳起石片岩等变质岩。翡翠矿床分布在该断裂带的南北两侧,紫色翡翠是危地马拉所产翡翠中较晚(1998 年)发现的翡翠品种(袁心强,2009)。

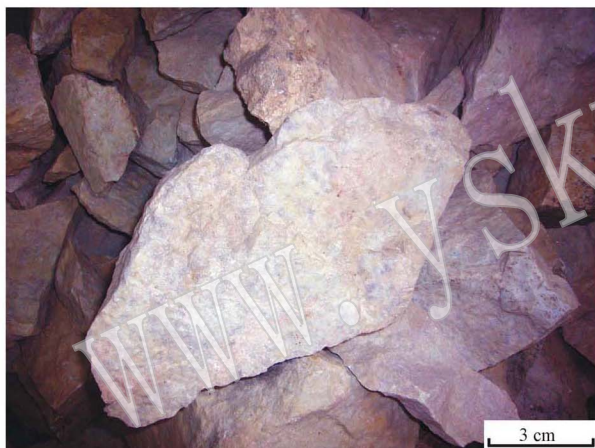


图 1 危地马拉紫色翡翠外观

Fig. 1 Appearance of Guatemala purple jadeite

2 组成矿物特征

危地马拉紫色翡翠的组成矿物以硬玉为主,含有钠长石、钙铝榴石、金红石、榍石等次要矿物。

2.1 硬玉($\text{NaAl}[\text{Si}_2\text{O}_6]$)

镜下研究表明,危地马拉紫色翡翠的硬玉晶体在镜下无色,正中突起,占薄片面积的 80% 左右,依据硬玉晶体的生长特征可以划分出 2 种类型:

(1) 放射状排列的硬玉: 粒径 $0.4 \text{ mm} \times 0.03 \text{ mm}$ 左右,放射状排列,中心位置常见有榍石核心(图 2a、2b),硬玉晶体靠近放射状中心的部分常含有

密集的包裹体,致使这些硬玉的透明度降低,在单偏光下显示暗色的区域(图 2a)。正交偏光下,放射状排列硬玉的干涉色为一级灰白到一级黄(图 2b),消光角约 34° ,化学成分 SiO_2 为 60.1%, Al_2O_3 为 25.4%, Na_2O 为 13.3%,其他杂质成分 1.2%(表 1)。这种硬玉的阴极发光呈蓝白色,或者带有紫色色调的蓝白色,发光强度较弱(图 3d)。其中阴极发光测试条件:加速电压 10 kV,电流 $1400 \mu\text{A}$ 。

(2) 针状硬玉: 大小 $0.05 \text{ mm} \times 0.005 \text{ mm}$ 左右,针状,分布在放射状硬玉的外沿,或环绕钠长石分布,未见明显的包裹体,在单偏光下显得十分干净透明(图 2c)。放射状排列的硬玉(Jd-1)透明度差,

呈圆形团块的暗色区域, 针状硬玉(Jd-2)分布在这些暗色钟乳状团块的外沿, 正交偏光下干涉色多为一二级黄, 部分可以达到二级蓝绿, 化学成分 SiO_2 为 61.0%, Al_2O_3 为 23.3%, Na_2O 为 14.2%, 其他杂质成分 1.1%, Ti 含量可达 0.3%(表 1)。针状硬玉的阴极发光为黄绿色, 并具有环带结构(图 2d), 图中蓝色发光为白色硬玉(Jd-1), 黄绿色发光为紫色的硬玉(Jd-2), 黑色为钠长石。照片显示针状硬玉以蓝白色发光的早期硬玉为生长基向外生长, 钠长石(Ab)则充填在晶洞中, 在手标本上这种针状的硬玉呈蓝紫色, 常出现在伴有透明小团块的蓝紫色色斑的位置。

用激光诱发溶解光谱(LIBS)在样品的蓝紫色区域测得较强的 Ti 的发射峰, 而无色区域没有 Ti 的发射峰, 或者仅见微弱的发射峰, 进一步用 LA-ICP-MS 分别在白色和蓝紫色位置取样分析, 也证实蓝紫色部分的 Ti 含量较高, 白色位置的 Ti 含量低(表 2)。其中电子探针的测试条件为加速电压 15 kV, 电流 20 nA, LA-ICP-MS 的测试条件为剥蚀条件: 193 nm 氟化氩准分子激光器, 能量 50 mJ, 光斑 60 μm , 能量密度 5.0 J/cm^2 ; 高压 24.4 kV; 脉冲 450(平均); 频率 8 Hz; He 流量 300 L/min; ICP 工作气体 Ar, 流量 0.9 L/min。

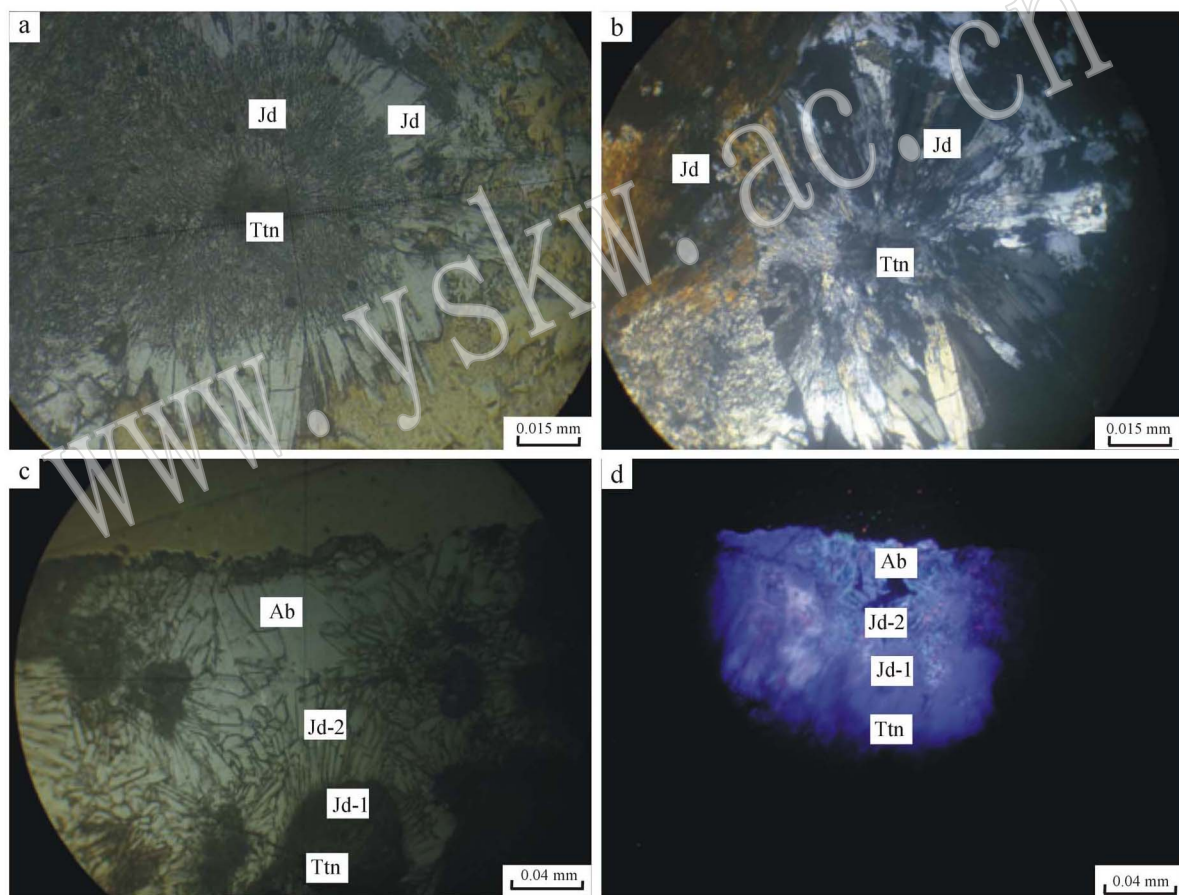


图 2 危地马拉紫色翡翠中的硬玉

Fig. 2 Jadeite in the purple jade from Guatemala

a—单偏光下放射状硬玉(Jb); b—正交偏光下放射状硬玉; c—单偏光下针状硬玉; d—紫色翡翠的阴极发光; Jb—硬玉;

Ttn—榍石; Ab—钠长石

a—radial jadeite, plainlight; b—radial jadeite, crossed nicols; c—long columnar jadeite, plainlight; d—CL of purple jadeite;

Jb—jadeite; Ttn—titanite; Ab—albite

表 1 危地马拉紫色翡翠组成矿物的化学成分

$w_B/\%$

| | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Na ₂ O | CaO | MgO | FeO | Cr ₂ O ₃ | MnO | TiO ₂ | 总计 |
|-------|------------------|--------------------------------|-------------------|-------|------|------|--------------------------------|-------|------------------|--------|
| 白色硬玉 | 60.1 | 25.4 | 13.3 | 0.20 | 0.72 | 0.23 | 0.000 | 0.002 | 0.003 | 99.955 |
| 蓝紫色硬玉 | 61.0 | 23.3 | 14.2 | 0.64 | 0.44 | 0.06 | 0.000 | 0.000 | 0.280 | 99.92 |
| 钠长石 | 69.51 | 19.48 | 11.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 99.99 |
| 钙铝榴石 | 38.21 | 21.95 | 0.004 | 36.78 | 0.00 | 0.00 | 0.000 | 0.000 | 1.660 | 98.604 |
| 榍石 | 30.42 | 0.95 | 0.000 | 27.92 | 0.00 | 0.00 | 0.036 | 0.000 | 39.55 | 98.826 |
| 金红石 | 0.43 | 0.15 | 0.000 | 0.38 | 0.00 | 0.00 | 0.000 | 0.00 | 99.09 | 100.05 |

表 2 不同颜色硬玉的部分微量元素

| | $w_B/\%$ | | | $w_B/10^{-6}$ | | | | |
|----|----------|-------|-------|---------------|------|------|------|------|
| | Ti | Mn | Fe | Co | Cu | V | Cr | Ni |
| 紫色 | 0.283 | 0.001 | 0.010 | 0.19 | 5.42 | 0.72 | 2.51 | 0.00 |
| 白色 | 0.049 | 0.073 | 0.049 | 0.14 | 2.12 | 0.52 | 0.00 | 1.04 |

2.2 钠长石(Na[AlSi₃O₈])

危地马拉紫色翡翠中的钠长石外观上呈灰色透明的团块。在薄片 中钠长石无色透明,负低突起,一般为他形,中粗粒,粒径 1~15 mm,变化较大。正交偏光下干涉色为一级灰白,极少为一级黄,斜消光,双晶发育,常以充填孔洞或者裂隙的方式出现(图 3)。在标本中约占 8%~12%。钠长石的化学成分纯净,仅含有极少量的 K₂O(表 1)。

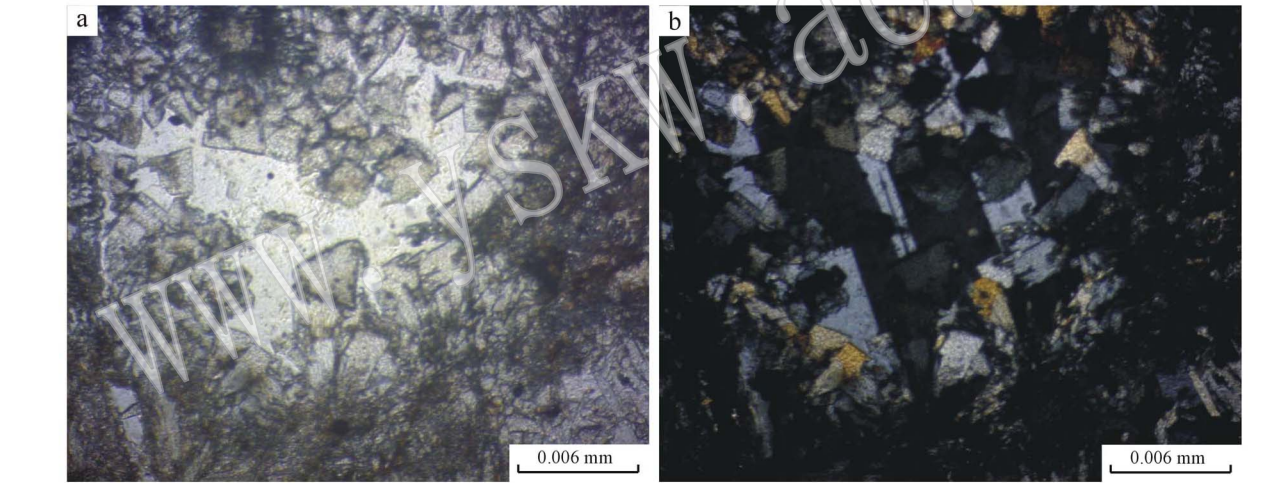


图 3 呈现晶洞充填特征的钠长石
Fig. 3 Albite characterized by vuggy filling
a—单偏光; b—正交偏光
a—plainlight; b—crossed nicols

2.3 榍石(CaTi[SiO₄]O)与金红石(TiO₂)

危地马拉紫色翡翠中的榍石与金红石在手标本上表现为褐色或绿色的斑点,显微镜下榍石呈他形粒状,粒径 0.2~0.5 mm,含量 1%~3%,单偏光下为褐色,正极高突起。正交偏光下正常消光,由于受体色影响,无法辨认高级白的干涉色,整体为褐黄色(图 4)。

金红石几乎没有例外地被包裹在榍石中,他形粒状,粒径 0.04~0.2 mm,单偏光下颜色比榍石深,聚光透射下颜色为深褐黄色,正极高突起(图 4)。榍

石与金红石的化学成分参见表 1。

2.4 钙铝榴石(Ca₃Al₂[SiO₄]₃)

钙铝榴石在危地马拉紫色翡翠中表现为粉色团块,团块的平均直径为 5 mm 左右,含量约 10%。镜下呈自形粒状,粒径约 0.2~0.4 mm,无色,正极高突起,正交偏光下出现异常的一级灰白干涉色,部分有扇形消光现象。钙铝榴石化学成分比较纯净,杂质成分仅有少量的 Ti(参见表 1),粉末 XRD 衍射结果与标准钙铝榴石的峰值位完全重合(图 5)。

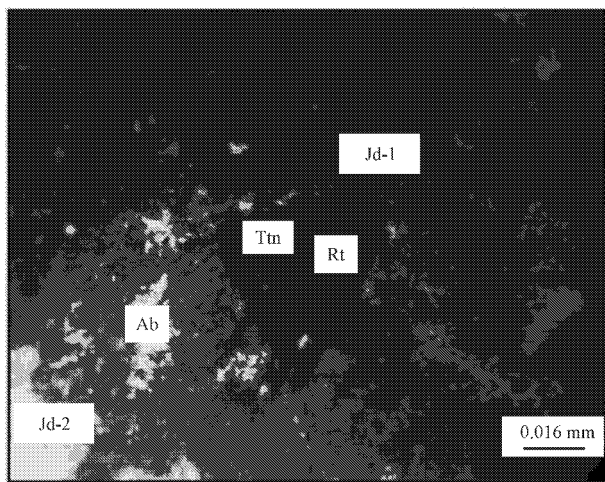


图4 榍石与金红石(单偏光)

Fig. 4 Titanite and rutile (plainlight)

Jb—硬玉; Ttn—榍石; Ab—钠长石; Grs—钙铝榴石; Rt—金红石
Jb—jadeite; Ttn—titanite; Ab—albite; Grs—grossular; Rt—rutile

3 讨论

3.1 组成矿物的结晶顺序

镜下观察表明,金红石总是包裹在榍石中,大部分的榍石总是被放射状的硬玉环绕,成为硬玉的结晶生长中心。这部分硬玉大多含有大量的包裹体,造成透明度下降,在单偏光下呈现颜色较暗的钟乳状团块,这些暗色团块的外围生长着针状的硬玉,针状硬玉在单偏光下显得干净透明(图6a)。在12 kV电压、1 400 μ A电流的阴极射线下,翡翠组成矿物的结构特征显得更为清楚,褐黄色和褐绿色为钙铝榴石,蓝色为白色硬玉,黄绿色为紫色硬玉,黑色为钠长石。其中黄绿色发光的针状硬玉分布在发蓝色及紫色荧光的呈钟乳状团块的硬玉的外围,钙铝榴石和针状硬玉晶体都具有很好的晶形和完整的生长环带,并组成完美的微观晶洞,钠长石则充填在晶洞中(图6b)。根据这些矿物的相互关系确定形成先后顺序为:金红石+榍石-白色硬玉-蓝紫色硬玉+钙铝榴石(淡红色)-钠长石。

这些结构构造现象表明危地马拉紫色翡翠的形成具有流体结晶演化的特征,异于原位交代作用的结构构造。

3.2 组成矿物的形成条件

榍石的Zr含量与温度、压力之间存在系统的变化,可以作为温度压力计估算榍石形成的温度和压力(向华等,2007),计算公式为: $\log(Zr_{Ttn}) = 11.697$

$-9049/T - 0.83p$ 。其中 Zr_{Ttn} 为榍石中的Zr含量($w_B/10^{-6}$), T 为绝对温度(K), p 为压力(GPa)。

本次研究的危地马拉紫色翡翠中的榍石Zr含量为 364.16×10^{-6} (表3),用硬玉稳定相估计压力(图7),取值下限0.45、上限1.5 GPa,得到的榍石形成温度的区间在757~1 003℃。

由于榍石作为硬玉结晶的生长点,榍石的形成温度代表成矿流体的早期温度。借助Harlow等(2002)使用的相图,估算生成时间较晚的针状硬玉、钙铝榴石、钠长石的矿物组合相的温压条件是:350~500℃,0.42~0.83 GPa,低于榍石形成温度,高于榍石消失的温压线(向华等,2007),从另一个角度验证了金红石+榍石-白色硬玉-紫色硬玉+钙铝榴石-钠长石的结晶顺序符合流体演化的降温过程。同时,榍石的存在表明危地马拉紫色翡翠是在高温高压的条件下形成的,并且高于其他研究者对缅甸翡翠形成温度(650℃)的估算(施光海等,2000)。

3.3 化学成分的特征

虽然含有金红石、榍石,危地马拉紫色翡翠的成矿流体明显富含Ti元素,但是并没有造成所有的硬玉Ti含量都高,只有结晶较晚的硬玉含有较高的Ti。Harlow等(2002)提到在危地马拉Motogua河谷深大断裂南侧的硬玉岩中有多期次绿辉石,其中最晚期的绿辉石是富Ti的蓝色绿辉石。Ti在翡翠的成矿流体中具有晚期富集的规律。

危地马拉紫色翡翠中大多数的白色硬玉的化学成分相当纯净,Ca、Mg、Fe的总量1%左右,但是都在较低的水平,与缅甸紫色翡翠中的白色硬玉差别不大。不同的是,危地马拉蓝紫色硬玉的Ti含量明显较高,而缅甸的紫色或者蓝紫色硬玉都很少测到含有显著的Ti。危地马拉紫色翡翠中的蓝紫色硬玉与缅甸翡翠中蓝紫色硬玉的异同还待深究。

4 结论

(1)危地马拉紫色翡翠中的矿物组成包括硬玉(80%)、钠长石(5%~10%)、钙铝榴石(5%)、金红石和榍石(5%)。其中硬玉有2个世代,早期的硬玉含有大量的包裹体、放射状排列,含Ti低,呈白色,晚期的硬玉粒度小,含Ti高,呈蓝紫色。

(2)这些矿物结构构造表现出具有流体随温度降低结晶演化的特征,其中金红石、榍石最早结晶,并成为放射状排列的白色硬玉的生长中心,随后是

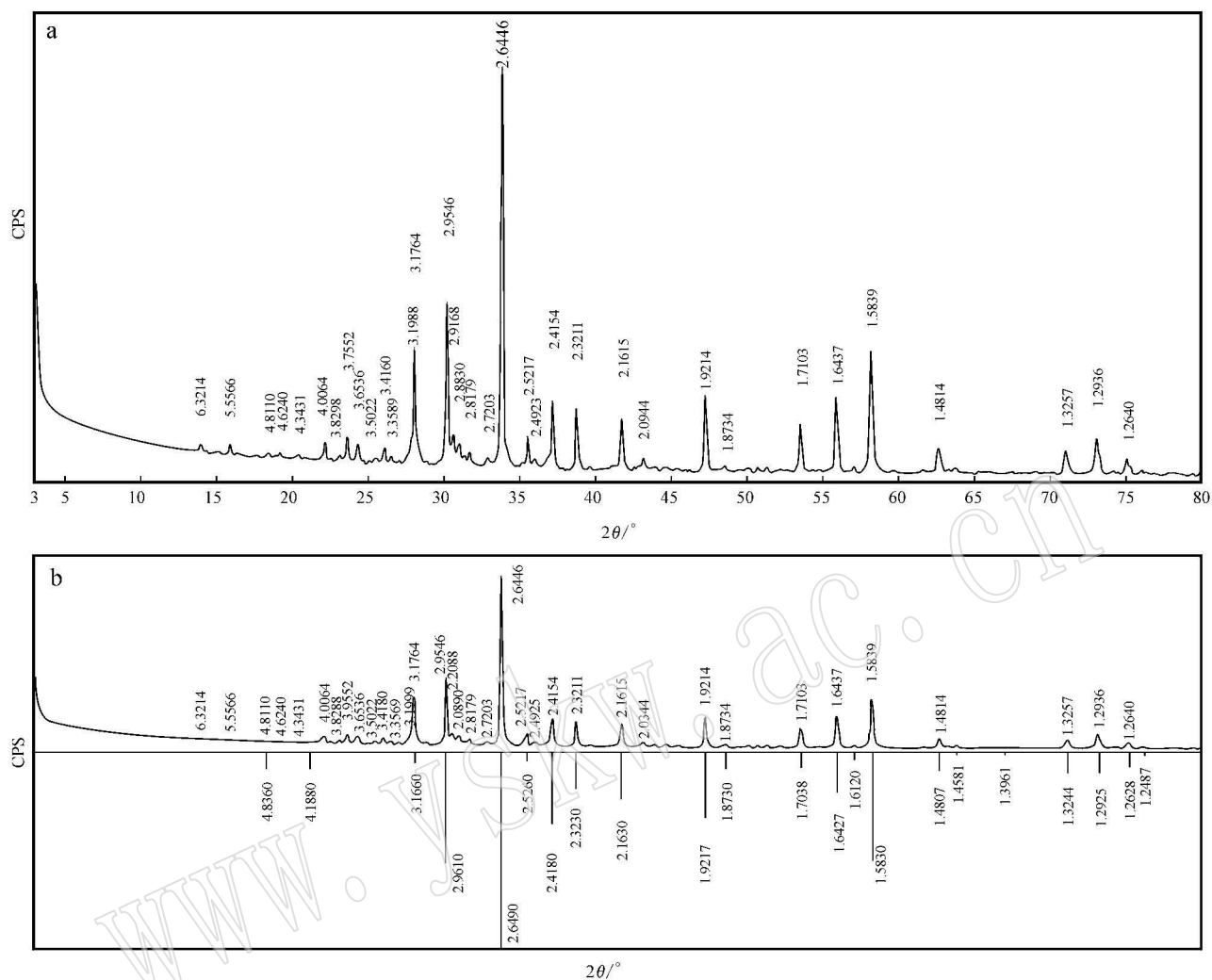


图 5 钙铝榴石的 X 射线粉末衍射图

Fig. 5 X-ray powder diffraction patterns of grossular

a—样品的 XRD 衍射图; b—与标准钙铝榴石的对比图

a—X-ray powder diffraction patterns of the sample; b—comparison between the sample and standard grossular

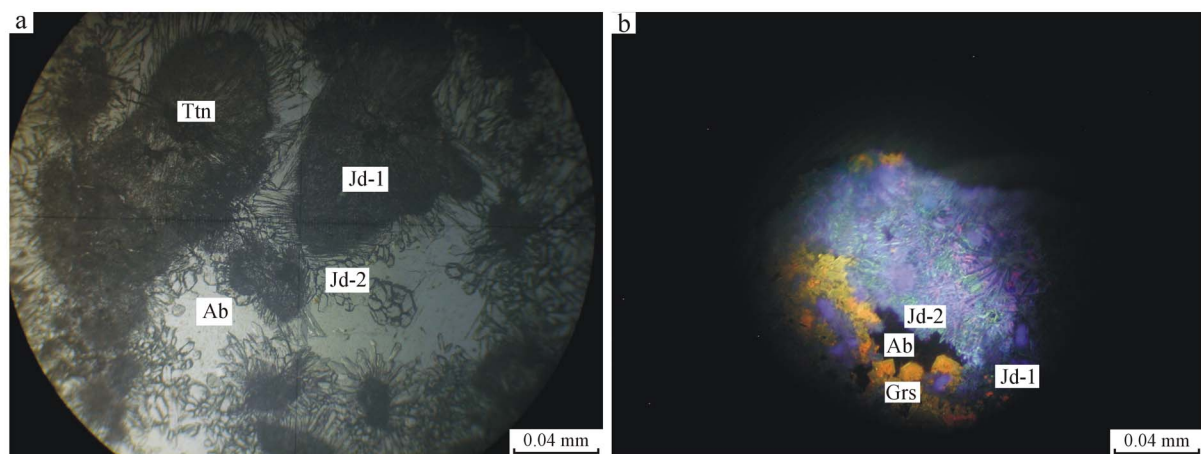


图 6 单偏光下危地马拉紫色翡翠结构构造(a)及紫色翡翠的阴极发光(b)

Fig. 6 Texture and structure of purple jadeite from Guatemala under plainlight (a), CL of purple jadeite (b)

表 3 榍石中的部分化学成分

Table 3 Parts of chemical elements in titanite

| | $w_B/\%$ | | | $w_B/10^{-6}$ | | | | |
|----|------------------|--------|------------------|---------------|-------|-------|-------|-------|
| | SiO ₂ | CaO | TiO ₂ | Zr | Ni | Rb | Mo | Sn |
| 榍石 | 29.862 | 28.886 | 37.859 | 364.161 | 0.035 | 0.234 | 0.313 | 2.564 |

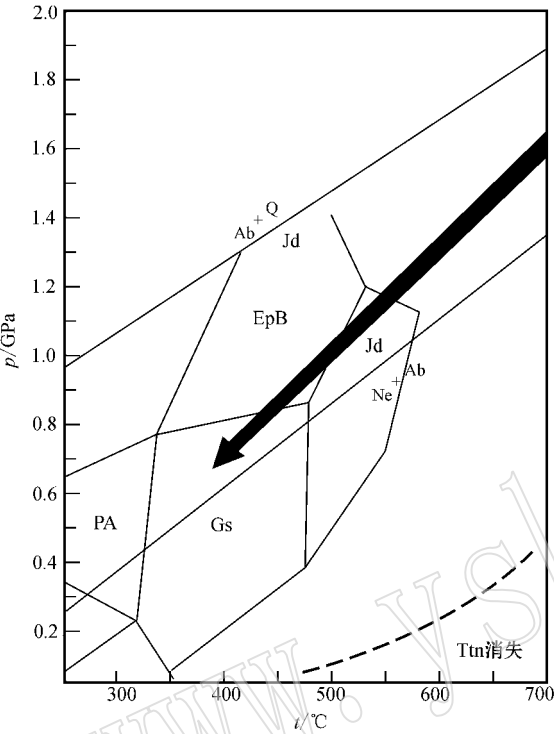


图 7 组成矿物形成温压条件及演化 (引自 Harlow 等 2002)

Fig. 7 Pressure-temperature diagram of Guatemala rocks (from Harlow *et al.*, 2002)

Ttn—榍石；Jb—硬玉；Ab—钠长石；Gs—钙铝榴石；
Q—石英；Ne—霞石；PA—钠云母；EpB—绿帘石蓝片岩
Ttn—titanite；Jb—jadeite；Ab—albite；Gs—grossular；
Q—quartz；Ne—nepheline；PA—paragonite；EpB—epidote
blue schist

含 Ti 高的细柱状蓝紫色硬玉与钙铝榴石结晶，钠长石则最后充填在蓝紫色硬玉及钙铝榴石围成的晶洞

中。这些特征更符合翡翠的流体(岩浆)成因说。

(3) 根据榍石、硬玉、钙铝榴石、钠长石的结晶演化顺序以及这些矿物的稳定相图推测，危地马拉紫色翡翠成矿流体早期的温度可高达 757℃ 以上，结晶晚期的温度为 350~500℃。

(4) 危地马拉紫色翡翠含有钙铝榴石造成的淡红色团块、含 Ti 硬玉造成的蓝紫色团块、伴随这些团块无色透明的钠长石、整体的相对密度偏小，这些特征与缅甸产的紫色翡翠有显著的区别。

References

Harlow G E, Sisson V B, *et al.* 2002. High-pressure, metasomatic rocks along the Motagua Fault Zone, Guatemala [J]. IGCP 433 Workshop and 2nd Italian-Latin American Geological Meeting.

Harlow G E, Sorensen S S, Sisson V B, *et al.* 2006. Jadeite jade from Guatemala: Distinctions among multiple deposits [J]. GIA Gemological Research Conference, Aug, 26~27, San Diego, CA.

Shi Guanghai, Cui Wenyuan, Wang Changqiu, *et al.* 2000. Fluid inclusion in jadeite rocks from Parkhan, Myanmar [J]. Chinese Science Bulletin, 45(13) (in Chinese with English abstract).

Xiang Hua, Zhang Li, Zhong Zengqiu, *et al.* 2007. Titanite: U-Pb dating and applications on defining P-T-t path of metamorphic rocks [J]. Advances in Earth Science, 22(12): 1258~1267 (in Chinese with English abstract).

Yuan Xinqiang. 2009. Applied Gemological of Jade [M]. Wuhan: China University of Geoscience Press, 78 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

施光海, 崔文元, 王长秋, 等. 2000. 缅甸帕敢地区硬玉岩中流体包裹体 [J]. 科学通报, 45(13).

向华, 张利, 钟增球, 等. 2007. 榍石: U-Pb 定年及变质 P-T-t 轨迹的建立 [J]. 地球科学进展, 12(12): 1258~1267.

袁心强. 2009. 应用翡翠宝石学 [M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 78.