

# 缅甸帕敢区翡翠及其皮壳的宝石学特征研究

戴治高, 廖宝丽, 李东升

桂林理工大学地球科学学院, 广西 桂林

收稿日期: 2023年4月7日; 录用日期: 2023年5月15日; 发布日期: 2023年5月23日

## 摘要

本文在查阅国内外文献的基础上, 采用传统宝石学仪器、红外光谱仪、电子探针对缅甸帕敢区翡翠样品的原生部位和皮壳部位进行了测试与分析。常规宝石学仪器测试数据显示, 缅甸帕敢区翡翠原生部分相对密度为3.33, 皮壳部分相对密度为3.30, 皮壳部分相对密度略小于原生部分。翡翠原生部分的折射率点测为1.665, 皮壳部分为1.67。两个样品在紫外荧光等下均显示为惰性。缅甸帕敢区翡翠原生部分及皮壳部分的红外反射光谱均显示为硬玉的特征峰, 且受类质同像替代影响整体向低波数方向略微偏移, 主要峰值有1064、1049、958、862、668、575、529、475、441  $\text{cm}^{-1}$ 。通过对翡翠原生部分和皮壳部分样品的电子探针显微分析实验数据总结和比较, 可以看出两部分的矿物组成基本相同, 主要成分为硬玉( $\text{NaAl}[\text{Si}_2\text{O}_6]$ ), 除硬玉外还含有少量绿辉石等次要矿物, 同时原生部分的化学成分更接近硬玉的标准值。皮壳部分MgO和CaO的质量分数与原生部分相比略微提高,  $\text{Na}_2\text{O}$ 和 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 的质量分数则相对减少, 这表明皮壳部分在后期受到了溶蚀作用的影响。

## 关键词

帕敢区, 翡翠, 皮壳, 红外光谱, 电子探针

# Gemological Characteristics of Jadeite and Its Crust from Hpakant, Burma

Zhigao Dai, Baoli Liao, Dongsheng Li

Earth Sciences College, Guilin University of Technology, Guilin Guangxi

Received: Apr. 7<sup>th</sup>, 2023; accepted: May 15<sup>th</sup>, 2023; published: May 23<sup>rd</sup>, 2023

## Abstract

On the basis of consulting the literature at home and abroad, this paper uses conventional gemological instruments, infrared spectrometers and electron probes to test and analyze the original

and crust parts of jadeite samples in Pago district, Myanmar. The test data of gemological instruments show that the relative density of the original part of Jadeite is 3.33, the relative density of the crust part is 3.30, and the relative density of the crust part is slightly less than that of the original part. The original part of Jadeite is measured to be 1.665 in refractive index point and 1.67 in the crust part. Both samples were shown to be inert under UV fluorescence *et al.* The infrared reflectance spectra of the original part of jadeite and the crust part of jadeite in Pago district of Myanmar show the characteristic peaks of jadeite, and the whole is slightly shifted to the direction of low wave number due to the homogeneous substitution effect. The main peaks are 1064, 1049, 958, 862, 668, 575, 529, 475, 441  $\text{cm}^{-1}$ . Through the summary and comparison of the electron probe microanalysis experimental data of the original part and the crust part of the jade, it can be seen that the mineral composition of the two parts is basically the same, the main component is jadeite ( $\text{NaAl}[\text{Si}_2\text{O}_6]$ ), besides jadeite also contains a small amount of secondary minerals such as pyroxene, and the chemical composition of the original part is closer to the standard value of jadeite. The mass fractions of MgO and CaO in the crust are slightly higher than those in the original part, while the mass fractions of  $\text{Na}_2\text{O}$  and  $\text{Al}_2\text{O}_3$  are relatively lower, which indicates that the crust is affected by dissolution in the later stage.

## Keywords

Pago District, Jadeite, Crust, Infrared Spectrometer, Electron Probe

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

自古以来, 翡翠在中国文化中就扮演着重要的角色, 它不仅具有玉石特有的属性, 同时也有着珠宝色彩瑰丽的特点。在中国深远的历史中, 以玉为载体的玉文化影响着一代又一代中国人的思想观念。翡翠广受大众所喜爱, 同时也是所有玉石中最为昂贵、最有观赏价值的品种, 有着“玉石之王”的美称。翡翠因其颜色、硬度、不易损伤以及与其他石头相比较为坚韧的特性, 同时也深受国外文化如前西班牙文化的珍视, 并在中美洲各地进行了长达 2000 年的交易[1]。作为世界上最大的翡翠消费国, 中国对翡翠的认知以及利用有着光辉灿烂的文化悠久的历史。加之近年来, 宝石学领域不断地有新的研究技术和新的研究方法引入, 我们对于翡翠的研究也由此而不断加深。

目前, 市场上有 95% 以上的翡翠主要来源于缅甸。缅甸众多的翡翠矿床是翡翠专家、珠宝专家以及地质学家所普遍感兴趣的问题, 并且在缅甸的各大翡翠矿区之中, 帕敢场区的翡翠产出量最大, 占比达到了 90% 以上[2]。缅甸帕敢场区翡翠矿床位于缅北克钦邦的西侧、坎底城的东南方向, 除了帕敢之外, 主要的矿区还有隆肯、度冒和韦卡, 在此地区, 凡是蛇纹岩化橄榄岩、角闪石橄榄岩均有硬玉产出[3]。目前为止, 专家学者们对于缅甸翡翠的研究虽多, 但具体到帕敢场区出产的翡翠, 以及皮壳的研究却相对较少。同时, 研究翡翠由于风化作用所形成的皮壳的特征, 对于判别翡翠内部质量的状况又有着参考意义。由此, 对帕敢场区翡翠及其皮壳的研究具有重要意义。

为了更进一步研究缅甸帕敢场区翡翠的组成成分和谱学特征, 本文选取了该场区的翡翠样品, 在没有损坏样品的条件下, 利用傅里叶红外光谱仪和电子探针 X 射线显微分析仪对样品的红外光谱特征及矿物的组成特征进行了测试研究, 目的是为了结合样品实验方案测定出的数据, 探讨缅甸帕敢场区翡翠原生部分和皮壳部分的宝石学特征, 同时通过查阅文献, 对该场区翡翠矿床的研究进行总结和概括, 为翡

翠资源的寻找以及缅甸帕敢区翡翠原生部分与皮壳部分的研究提供参考数据。

## 2. 缅甸帕敢区翡翠矿床的地质特征

缅甸帕敢位于缅北密支那市的西北方向，直距约 125 公里，处于缅北中部略偏北，缅甸帕敢区的硬玉岩中，其组分有 80% 属于硬玉，硬玉端元组分可以达到 90% [3]。尽管在世界范围来看硬玉岩属于产出较为稀少的岩类，但在该地区却十分常见。除硬玉外该区硬玉岩的其他矿物多为绿辉石、钠铬辉石、铬硬玉，以及多种钠质或钠钙质闪石。硬玉母岩的岩性为含铬铁矿的蛇纹石化纯橄岩，属于超基性岩，围岩由蓝闪石片岩、大理岩、角闪岩和石英岩等构成。处于缅甸翡翠矿区的蛇纹岩化橄榄岩和角闪石橄榄岩基本都有硬玉产出，其它岩性的超基性岩内则未见硬玉矿体。

作为缅甸北部第二大含矿岩体，帕敢场区超基性岩体的南北跨度约为 38 公里，平均宽度约为 7.5 公里，整体大致为弧形排列。原生硬玉矿体的标准高度为 275~1200 m，主要的翡翠开采厂口凯苏、度冒、铁龙生等矿体位于岩体的中部，高度在 460~610 m。从剖面上看，硬玉矿体各带之间界限不明确，存在垂直分带现象，总体表现为渐变过渡，发育相对完好。此地区出产的翡翠中硬玉颗粒通常存在重结晶细粒化现象，部分已超糜棱化，基质占比较高。尽管如此，仍然有少部分硬玉斑晶残留于细粒硬玉岩中，主要表现为团块状集合体，由孤立的晶体或者多个颗粒所组成的。帕敢以北的岩体中，超基性岩的岩性与硬玉母岩基本一致，顶部有砖红色砂质泥岩发育，厚度在 10 m 或以上。

原生矿床受到热液蚀变的强度和动力变质作用的程度影响，受到变质作用的程度越高、蚀变越强，则硬玉的质量就越好[2]。该地区的硬玉岩岩体通常呈暗灰色，在受到退色作用后会逐渐变为黄白色和浅灰白色，存在明显退色现象的地段产出的硬玉质量相对较好。而剖面简单且岩性单一的岩体，硬玉与围岩的界线清晰无热液蚀变现象，因此硬玉质量较差。此外，硬玉矿体上下界面的钠长石岩越纯净、透明度越好，翡翠的质量也就越好。

该地区出产翡翠质量的好坏同样存在一定的垂直与水平的规律性，岩体顶部和上部的翡翠质量最好，中部的翡翠质量明显下降。受到含硬玉岩体的上部剥蚀冲积、沉积的近代冲积型硬玉矿床和第四纪雾露河含硬玉砾石冲积层，硬玉质量最好，其剥蚀前的海拔高度预估在 800 m 以上。根据目前处在海拔高度 460 m 到 610 m 之间的硬玉矿床来看，该地段开采出质量可以达到宝石级别的翡翠较为罕见，原因之一是上部的翡翠受到剥蚀作用的影响较为严重，只留下岩体根部很少的一部分。在水平方向上，帕敢地区出产翡翠的质量总体呈现出北部较好，南部较差的分布规律。帕敢地区以北属于三级地貌，越往北移动地势就越高。该区域产出翡翠的原生矿与次生矿颜色均为黄色、黄白色、灰白色等浅色调，品质最好，品相比较差的灰色与灰黑色皮壳的翡翠则很少产出。这可能是由于该区域的原生矿床形成后受到了强烈的热液蚀变作用和区域动力变质作用。在帕敢以南地区，莫东、韦卡等厂口硬玉矿体高度在 300 m 到 450 m 之间，出产的翡翠其原生部分或皮壳部分的颜色大都呈现出和围岩相近的黑色和灰黑色，且常见不同部位的杂质、透明度的差异很大的现象，难以达到宝石级的要求。尽管该地区第四纪雾露河砾石冲积层内的翡翠质量与残积层内的翡翠质量相比较好，但和帕敢北部的相比仍然有很大的差距。

## 3. 翡翠与其皮壳的基本性质

### 3.1. 翡翠的基本性质

翡翠的主要矿物是硬玉，分子式为  $\text{NaAl}[\text{Si}_2\text{O}_6]$ ，是一种钠铝硅酸盐矿物，摩氏硬度 6.5~7。晶体结构属于单斜晶系的钠铝辉石，同时含少量的钠长石、角闪石、绿辉石和铬铁矿等其他矿物，是辉石家族中的成员[4]。辉石主要产于基性岩或超基性岩中，但大部分辉石族矿物如钙铁辉石、霓石等均为深色矿物，而硬玉却表现为浅色矿物。此外，辉石形成于  $\text{SiO}_2$  含量较低、铁镁质成分较高的地质环境中，而硬

玉的成分中铁镁质的含量并不高,与其他辉石族矿物相比较为不同。但不是所有硬玉都可以称之为翡翠,在珠宝界,翡翠与非翡翠的界限仅仅依靠其岩石学、工艺学的特征和经济价值并不能明确地划分,现在的市场一般对缅甸产出的硬玉岩都统称为翡翠。

由于硬玉是一种在高压和中温条件下(5~11 kbar, 150°C~400°C)形成的矿物[5],所以通常只有在历史上受到过极高压力作用的地区才出现。而缅甸恰好位于印度板块与欧亚板块发生强烈碰撞的地区,有着优越的地质条件。缅甸北部地区的岩石由于地层之间强烈碰撞产生的高压效应,从而发生了变质作用。翡翠矿床在最初形成时晶体粗大且结构疏松,无法满足宝石级别的要求,这个阶段的矿体只能被称作硬玉岩。只有高压作用远不能形成高质量翡翠,因为硬玉呈现的绿色与Cr元素有关,Cr<sup>3+</sup>源于矿体中的黑色捕虏体或超基性岩[6]。因此要想形成可以用于珠宝首饰的宝石级翡翠,还需要在成岩之后受到变质动力的改造以及酸性岩浆侵入带来的Cr离子的交代。所以除了存在高压作用的地质条件外,还必须经过漫长而复杂的地质交代作用,且地层中还必须含有丰富的Cr元素等条件。这也正是翡翠昂贵的原因,即使是作为翡翠主要产地的缅甸,也很少有能开采出优质绿色翡翠的机会。

翡翠成玉阶段的变质作用总的来说可以分静态重结晶、动力变质和交代变质三种,按不同的地质作用翡翠的结构也可以分为变晶结构、交代结构和碎裂结构三类[7]。翡翠矿物中最较为常见的结构类型为变晶结构,又称变斑晶结构。其形成原因是由于原岩在一定的温度压力条件下受到了变质结晶或变质重结晶作用的影响,主要发生于变质岩中。交代结构是由于不同矿物之间或矿物与杂质、外来物质之间的元素置换形成的,并且与流体的交代作用密切相关。大致的顺序为钠长石先形成,后期受到热液作用的影响被硬玉交代,最终又被角闪石所交代。碎裂结构的形成主要是由于动力变质作用的影响,当晶体超过其弹性形变时,晶体颗粒产生裂隙,进而破坏成许多棱角状碎块。碎裂结构也包括碎粒结构、碎斑结构以及糜棱结构。

### 3.2. 翡翠皮壳的基本性质

翡翠原石从矿床中挖掘出来,在未经过任何加工处理时通常会保留有一部分的环境特征。翡翠原石在自然环境中受到风化剥蚀、搬运和沉积等地质作用,会逐渐形成与内部有明显差异的风化壳[8]。没有风化壳的翡翠原石称为原生矿石,而表面存在风化壳的矿石称为次生矿石。这些皮壳颜色丰富,厚薄不一,其特征具有一定的指示意义,可以依据此来对翡翠原石内部原生部分的品质进行估测。具有风化外壳的次生矿石由于其所受地质作用的影响,一般产自于山坡、阶地或现代河床之中。同时,由于受到不同的地质环境以及翡翠的内部矿物、结构等的差异,会导致最终形成不同种类的皮壳。珠宝界根据翡翠原石的产地及皮壳特征的差异将翡翠次生矿石分为了山石、水石、半山半水石和水翻砂石四种。其中水石的皮壳较薄,强光可以透过,比较容易判断内部的情况。

缅甸产出的翡翠在自然环境中受到的风化作用包括物理风化和化学风化。物理风化作用主要为碎裂和滑落,原石从山上滚落到河床的过程中经过摩擦碰撞逐渐破碎,棱角也逐渐打磨圆滑。处于残积坡矿床的翡翠原石,重力和自然力是其碎裂和滑落动力的主要来源。而在阶地和现代河床砂矿中的原石,河水的浮力和冲力为碎裂的主要动力来源。翡翠原石受到的化学风化作用主要是由于与自然界中的O<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>O和CO<sub>2</sub>之间发生一系列反应。缅甸的翡翠矿区位于热带地区,该区雨量充沛气候炎热,为化学风化作用提供了非常良好的条件。该区域的矿石可以发生包括氧化作用、水合作用、水解作用以及溶解作用等多种方式的化学风化作用[8]。由于翡翠原石中含有的角闪石易被蚀变成硬度更小的绿泥石,同时铁的含量较高,因此翡翠皮壳表面通常会有如点状、槽状和补钉状等不同形态的凹陷,并且部分呈现出Fe离子造成的风化色。此外,在风化作用过程中翡翠中的钠长石同样会受到各种酸的影响发生蚀变。钠长石中致色离子含量较少,通常会形成黏土矿物高岭石,风化产物一般呈现为白色。而高岭石受到进一步的分解,最后会形成同样呈

白色的  $\text{Al}(\text{OH})_3$  和蛋白石等的堆积。翡翠皮壳上所表现出的砂粒感很强的白砂皮则是由此而来。

## 4. 实验部分

### 4.1. 翡翠原生部分与皮壳部分的基本宝石学特征

本次研究的样品为从广西桂林某珠宝公司获取的缅甸帕敢区翡翠。

#### 4.1.1. 样品外观描述



**Figure 1.** Sample of No.1 jadeite  
**图 1.** 1 号翡翠样品



**Figure 2.** Sample of No.2 jadeite  
**图 2.** 2 号翡翠样品



**Figure 3.** Jadeite original part sample (left) and crust part sample (right)  
**图 3.** 翡翠原生部分样品(左)和皮壳部分样品(右)

通过肉眼观察样品外观可以看出样品原生部分颜色均为浅绿色 - 深绿色之间, 黄砂皮样品呈浅黄色 - 黄褐色, 黑砂皮样品呈灰绿色 - 黑色, 触摸均有砂砾感。

经筛选将 1 号标本(图 1)制作翡翠原生部分样品, 2 号标本(图 2)制作皮壳部分样品, 黑色记号笔笔所选定区域为制作样品的部分, 制成的样品如图 3。本章主要通过基本宝石学测试、电子探针、红外光谱等方法对样品进行分析和研究。

#### 4.1.2. 常规宝石学特征

本文选取缅甸帕敢场区翡翠原生部分样品及皮壳部分样品进行宝石学常规实验, 实验均在桂林理工大学地球科学学院进行。

通过初步的肉眼观察, 原生部分样品为浅绿色, 透明度为微透明到不透明, 光泽为玻璃光泽到油脂光泽。光学性质为非均质集合体, 无明显多色性。通过宝石折射仪使用点测法测量翡翠原生部分样品折射率, 得出的折射率为 1.665 符合硬玉的标准值 1.652~1.688。在紫外荧光灯的 L 波与 S 波下观察样品均显示为惰性。采用静水称重法测得翡翠原生部分样品相对密度为 3.33。摩氏硬度根据前人的研究为 6.5~7。

皮壳部分样品为褐黄色, 不透明, 光泽为玻璃光泽到油脂光泽。光学性质为非均质集合体, 无明显多色性。通过宝石折射仪使用点测法测量翡翠皮壳部分样品折射率, 得出的折射率为 1.67。在紫外荧光灯的 L 波与 S 波下观察样品均显示为惰性。采用静水称重法测得翡翠皮壳部分样品相对密度为 3.30。摩氏硬度根据前人的研究为 6.5~7。

#### 4.2. 红外反射光谱分析

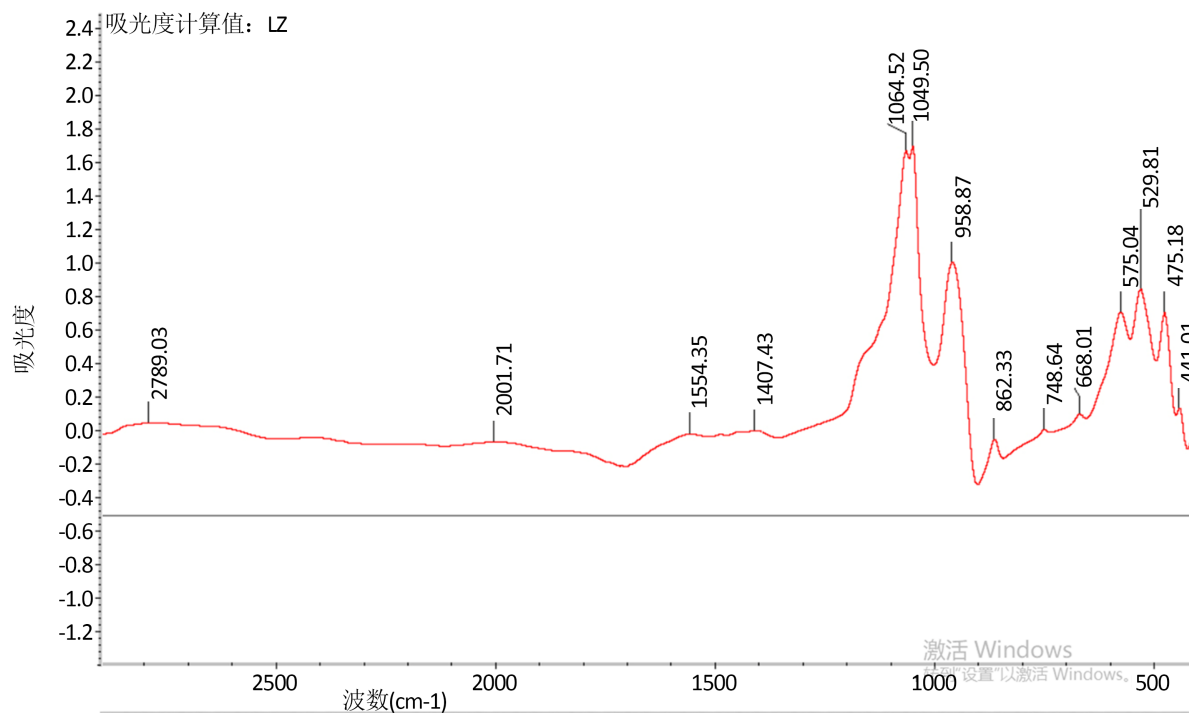
作为广泛运用于珠宝检测的现代技术, 红外光谱在珠宝玉石常规仪器检测技术中起到完善和补充的作用, 近年来这种简便、准确、无损的光谱分析技术越来越受到宝石学家的青睐[9]。根据不同宝石属于不同矿物种, 且具有不同的红外反射透射特征光谱图, 红外光谱检测技术可以依据每种宝石特征的红外吸收谱带的数量, 波数的位置、谱形图以及谱带强度等特征, 有助于对珠宝玉石的红外吸收光谱进行定性表征, 进而达到鉴别和区分的目的[10]。

测定缅甸帕敢区翡翠的原生部分和皮壳部分, 运用红外光谱仪主要使用反射光谱法进行。本文中进行红外光谱测试所使用的测试仪器为 TENSOR 27 傅立叶红外光谱仪, 仪器参数见表 1。

**Table 1.** Experimental parameters of the TENSOR 27 Infrared spectrometer  
**表 1.** TENSOR 27 红外光谱仪实验参数

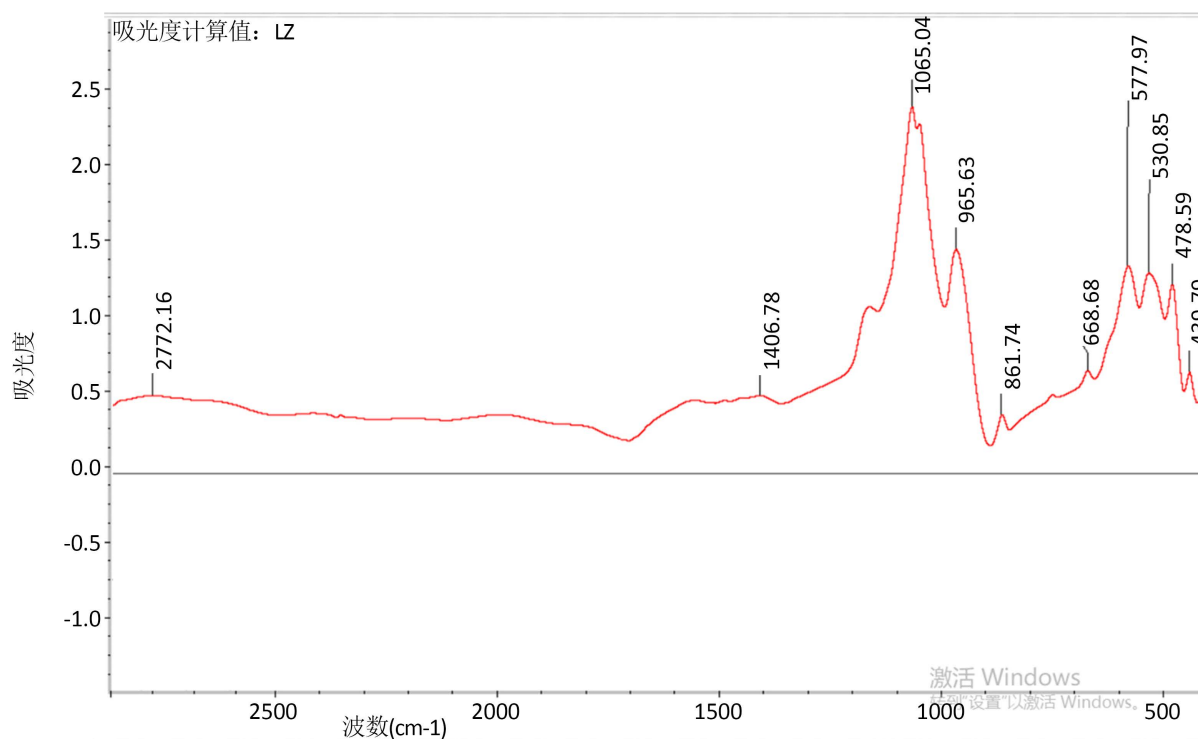
项目	参数
温度范围	18℃~35℃
湿度范围	小于 70 %
工作电压	85~265 v
频率	47~65 Hz
分析范围	400~4000 cm <sup>-1</sup>
分辨率	8 cm <sup>-1</sup>

由于样品的透明度较差, 红外光谱测试无法使用透射法, 因此本次研究决定使用反射法对两个样品的抛光面进行测试, 得出两部分样品的红外光谱图后对比结合前人的研究成果进行分析。反射法红外光谱是一种快速的鉴别样品矿物组成的实验方法, 主要是在无损的条件下对手标本进行主要成分的初步鉴定, 也为后续的实验奠定基础。同时反射光谱不仅仅依赖于反射材料的化学成分, 而且依赖于材料表面



**Figure 4.** Infrared reflection map of original part sample

**图 4.** 原生部分样品红外反射图谱



**Figure 5.** Infrared reflection map of crust part sample

**图 5.** 皮壳部分样品红外反射图谱

的反射系数和透射系数，这些都有可能導致吸收峰的輕微偏移[11]。因此本次實驗為保證實驗數據準確，

取样品的光滑平面进行实验, 谱图主要分析范围在  $400\sim 1300\text{ cm}^{-1}$  波数内的吸收峰, 该波数段的峰也被称为矿物的指纹区。翡翠原生部分样品的红外光谱如图 4, 皮壳部分如图 5。

翡翠原生部分样品的红外反射光谱位于  $1064$ 、 $1049$ 、 $958$ 、 $862$ 、 $668$ 、 $575$ 、 $529$ 、 $475$ 、 $441\text{ cm}^{-1}$ , 该吸收谱带是组成翡翠的主要矿物的伸缩和弯曲振动, 与标准硬玉的特征吸收峰大致相同但稍向低频区偏移。 $1049$ 、 $1064\text{ cm}^{-1}$  属于 Si-O-Si 的非对称伸缩振动,  $958\text{ cm}^{-1}$  属于 O-Si-O 的非对称伸缩振动,  $862\text{ cm}^{-1}$  属于 O-Si-O 的对称伸缩振动,  $575$ 、 $668\text{ cm}^{-1}$  属于 Si-O-Si 的对称伸缩振动,  $475$ 、 $529\text{ cm}^{-1}$  属于 Si-O 的弯曲振动,  $441\text{ cm}^{-1}$  属于 Na-O 的弯曲振动[12]。

皮壳部分的红外光谱同样显示为硬玉的特征吸收峰。其特征吸收峰位于  $1065$ 、 $1049$ 、 $965$ 、 $861$ 、 $668$ 、 $577$ 、 $530$ 、 $478$ 、 $439\text{ cm}^{-1}$ , 与原生部分基本一致。

### 4.3. 电子探针分析

电子探针 X 射线显微分析仪, 又名微区 X 射线谱分析仪, 可用于对样品进行微小区域成分分析是一种广泛应用在地质、材料、医学等领域的大型精密物理分析测试仪器[13]。它具有分析样品的表面形态, 测定样品的物质组分和含量占比的作用。可以分析的元素从原子序数 3 (锂)到 92 (铀)。由于其能做到微区、微量、无损检测等的优势, 在宝玉石的鉴别中同样可以起到显著的效果。

本次电子探针实验在桂林理工大学电子探针实验室进行, 使用的仪器型号为 JXA-8230, 结合样品红外光谱分析的结果, 选定标记元素为 Na、Al、Mg、Ca、Cr、Fe、K、Si、Ti、Mn 十个元素, 样品做喷碳处理。仪器具体参数如表 2。

**Table 2.** Experimental parameters of JXA-8230 electron probe

**表 2.** JXA-8230 电子探针实验参数

项目	参数
仪器工作环境温度	$20^{\circ}\text{C}\sim 23^{\circ}\text{C}$
检测元素范围	B~U
加速电压	$0.2\sim 30\text{ kV}$
束流电流范围	$\leq \pm 0.05\%/h$
二次电子像	6 nm
背散射电子像	$\leq 20\text{ nm}$ (15 keV)
扫描倍率	$40\times\sim 300.000\times$

通过对原生部分样品进行电子探针测试, 得到其化学成分表如表 3 所示。缅甸翡翠中  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$  的含量接近硬玉理论值:  $59.44\%$ 、 $25.22\%$ 、 $15.34\%$  [14], 原生部分样品的电子探针测试数据平均值为  $\text{SiO}_2$   $59.018\%$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$   $24.924\%$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$   $14.962\%$ , 与理论值相差不大, 推测其中含有少量绿辉石。根据阳离子数计算各元素平均含量, 主要元素 Na、Al、Si 的平均含量分别为  $24.449\%$ 、 $24.756\%$ 、 $49.733\%$ , 次要元素 Ca、Fe、Mg 的平均含量分别为  $0.345\%$ 、 $0.309\%$ 、 $0.363\%$ , 都比标准硬玉高, 原因是  $\text{K}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Fe}^{2+}$  可以替代  $\text{Na}^+$ 。

通过对皮壳部分样品进行电子探针测试, 得到其化学成分表如表 4 所示。主要成分的平均值为  $\text{SiO}_2$   $58.947\%$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$   $24.224\%$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$   $14.645\%$ , 与理论值相差不大。根据阳离子数计算各元素平均含量, 主要元素 Na、Al、Si 的平均含量分别为  $24.135\%$ 、 $24.272\%$ 、 $50.108\%$ , 次要元素 Ca、Fe、Mg 的平均含量分别为  $0.660\%$ 、 $0.228\%$ 、 $0.569\%$ 。皮壳部分  $\text{Al}_2\text{O}_3$  和  $\text{Na}_2\text{O}$  略小于原生部分; 而在 MgO 和 CaO 的含量上皮壳部分则大于原生部分。



**Table 3.** Electron probe data of the original part sample  
**表 3.** 原生部分样品电子探针数据

Comment	Na <sub>2</sub> O	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	K <sub>2</sub> O	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	MnO	Total
F1-01	15.247	25.25	0.01	0.156	0	0.051	0.007	58.596	0.017	0	99.334
F1-02	15.258	25.231	0	0.065	0	0.027	0	60.221	0	0.02	100.822
F1-03	15.001	25.66	0.096	0.182	0	0.018	0.006	59.564	0	0.011	100.538
F1-04	15.483	25.363	0.011	0.094	0	0.167	0.002	58.678	0.042	0.006	99.846
F1-05	14.759	24.719	0.464	0.551	0.034	0.239	0.009	59.557	0.035	0.004	100.371
F1-06	15.239	25.361	0.038	0.109	0	0.173	0	58.779	0	0.024	99.723
F1-07	14.383	24.214	0.825	0.909	0.005	1.508	0.002	58.352	0.211	0	100.409
F1-08	14.672	23.656	0.739	0.817	0.048	1.462	0.002	57.846	0.123	0	99.365
F1-09	14.624	24.87	0.407	0.544	0	0.289	0.003	59.569	0	0	100.306

**Table 4.** Electron probe data of the crust part sample  
**表 4.** 皮壳部分样品电子探针数据

Comment	Na <sub>2</sub> O	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	K <sub>2</sub> O	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	MnO	Total
F1-10	14.816	24.468	0.19	0.302	0.063	0.281	0	59.319	0.023	0	99.462
F1-11	14.918	24.947	0	0.175	0	0.057	0	59.567	0.006	0.001	99.671
F1-12	15.35	24.873	0.007	0.16	0.039	0.051	0	59.781	0	0.017	100.278
F1-13	13.882	22.438	1.212	1.715	0.01	0.657	0.003	59.534	0.023	0	99.474
F1-14	14.257	24.395	0.82	1.248	0	0.552	0.003	56.533	0.019	0	97.827

结合分析上述电子探针显微分析实验结果, 翡翠皮壳部分与原生部分的主要矿物都是硬玉, 且原生部分的硬玉矿物较为纯净。和原生部分相比, 皮壳部分中的 Na<sub>2</sub>O、SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量减少, MgO 和 CaO 含量则相对有所增加, 这可能是由于皮壳部分的硬玉受到溶蚀作用的影响[15]。

两组数据均表现出 Fe 离子含量较多的情况, 这可能是由于外界和硬玉所析出的部分 Fe<sup>2+</sup>氧化为 Fe<sup>3+</sup>并且以胶体的形式存在, 充填在硬玉的粒间空隙中致色。翡翠中的绿色主要是由于 Cr 离子的影响, Fe<sup>2+</sup>控制绿色的深浅, 其含量越高, 翡翠的绿色就越深。除此之外, 翡翠的皮壳部分样品仍然可以检测到存在有 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 含量约为 0.01%~0.3%。

## 5. 结论

本文对缅甸帕敢场区翡翠的原生部分与皮壳部分进行了研究, 借助宝石学常规实验仪器测试和现代测试技术进行分析, 同时结合前人的研究成果, 探讨了其宝石学特征, 得出的结论如下:

1) 宝石学常规仪器测试数据表明, 缅甸帕敢区翡翠原生部分相对密度为 3.33, 皮壳部分相对密度为 3.30, 皮壳部分相对密度略小于原生部分。翡翠原生部分的折射率点测为 1.665, 皮壳部分为 1.67。两个样品在紫外荧光等下均显示为惰性。

2) 缅甸帕敢区翡翠原生部分及皮壳部分的红外反射光谱均显示为硬玉的特征峰, 且受类质同像替代影响整体向低波数方向略微偏移, 主要峰值有 1064、1049、958、862、668、575、529、475、441 cm<sup>-1</sup>。

3) 通过对翡翠原生部分和皮壳部分样品的电子探针显微分析实验数据总结和比较, 可以看出两部分的矿物组成基本相同, 主要成分为硬玉(NaAl[Si<sub>2</sub>O<sub>6</sub>]), 除硬玉外还含有少量绿辉石等次要矿物, 同时原

生部分的化学成分更接近硬玉的标准值。皮壳部分 MgO 和 CaO 的质量分数与原生部分相比略微提高, Na<sub>2</sub>O 和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的质量分数则相对减少, 这表明皮壳部分在后期受到了溶蚀作用的影响。

## 参考文献

- [1] Roca Cogordan, M. (2012) Piedras del Cielo. Civilizaciones del Jade. Conaculta/Inah, Mexico City.
- [2] 摩伏. 缅甸帕敢硬玉矿床[J]. 宝石和宝石学杂志, 2002, 4(3): 5-7.
- [3] 黄文清. 硬玉成矿理论综述[J]. 安徽地质, 2012, 22(4): 278-280.
- [4] 张位及. 缅甸北部帕敢地区翡翠矿床地质[J]. 云南地质, 2002(4): 378-390.
- [5] Johnson, C.A. and Harlow, G.E. (1999) Guatemala Jadeitites and Albitites Were Formed by Deuterium-Rich Serpentinizing Fluids Deep within a Subduction Zone. *Geology*, **27**, 629-632. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1999\)027<0629:GJAAWF>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1999)027<0629:GJAAWF>2.3.CO;2)
- [6] Tan, T.L., Ng, L.L. and Lim, L.C. (2013) Studies on Nephrite and Jadeite Jades by Fourier Transform Infrared (ftir) and Raman Spectroscopic Techniques. *Cosmos*, **9**, 47-56. <https://doi.org/10.1142/S0219607713500031>
- [7] 徐志. 翡翠的岩矿特征在商业分级评价中的应用研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 成都理工大学, 2005.
- [8] 杨昕. 危地马拉蓝绿色翡翠“皮”和“肉”的宝石矿物学研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国地质大学, 2019.
- [9] 张良钜. 缅甸帕敢隐伏原生翡翠矿体颜色的地质产出特征与研究[C]//玉石学国际学术研讨会. 玉石学国际学术研讨会论文集. 北京: 地质出版社, 2011.
- [10] 申晓萍, 李新岭, 魏薇, 等. 常见黑色玉石的红外反射光谱测试及鉴定[J]. 分析试验室, 2009, 28(Z1): 278-281.
- [11] 孙访策, 赵虹霞, 干福熹. 翡翠成分、结构和矿物组成的无损分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2011, 31(11): 3134-3139.
- [12] 陈克樵. 翡翠的电子探针分析[J]. 矿床地质, 1996, 15(S1): 139-141.
- [13] 林劲畅, 李继红. 黑色翡翠及相似玉石的红外光谱学特征研究[J]. 科技信息, 2013(011): 66-67, 121.
- [14] 邹好, 梁雨薇, 刘奕町, 等. 缅甸、哈萨克斯坦和俄罗斯翡翠矿物化学组成及结构特征[J]. 硅酸盐通报, 2017, 36(S1): 144-152.
- [15] 范婧. 翡翠原石皮壳的宝石学特征研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国地质大学, 2015.