

# 天然晶体中常见包裹体及其成因研究

韩怡颖

桂林理工大学, 广西 桂林

收稿日期: 2021年12月8日; 录用日期: 2022年1月6日; 发布日期: 2022年1月13日

## 摘要

随着社会越来越发展, 生活水平愈来愈好, 宝石因为瑰丽、耐久、稀有的特性, 从而受到人们的喜爱。在天然形成的宝石中, 水晶的种类繁多, 有晶体, 非晶体之分, 也有变种的固体矿物。它们形成过程中封闭了许多不同种类的杂质和包裹体, 最后形成更瑰丽的水晶。天然水晶的包裹体也分有很多种类, 但是常见的包裹体有金红石包裹体, 绿泥石包裹体, 还有一些针状、纤维状的固体包裹体。我们可以使用宝石显微镜、偏振光显微镜、拉曼光谱、电子探针等仪器对天然形成的水晶包裹体做一系列系统的光学检测与化学成分的分析, 最后能够确定该固态内含物以及“面包渣”状固体物质的物相组成。研究者们还可以从各种不同的角度观察不同的样品或者相同的样品的各类包裹体的形态、颜色、大小和分布特征, 在此基础上, 进一步讨论了不同来源天然晶体中固体矿物的类型、化学成分、相组成及分布特征。在自然界中, 原材料的质量、水、温度、压力等条件不断变化, 因此晶体的形成将难以达到一定的理想状态, 通常要经过数万次, 甚至数百万次, 才能达到同样的发展。

## 关键词

天然水晶, 包裹体, 成分, 特征

# Study on the Common Inclusions in Natural Crystals and Their Genesis

Yiying Han

Guilin University of Technology, Guilin Guangxi

Received: Dec. 8<sup>th</sup>, 2021; accepted: Jan. 6<sup>th</sup>, 2022; published: Jan. 13<sup>th</sup>, 2022

## Abstract

With the development of society, the living standard is getting better and better. Gemstones are loved by people because of their magnificent, durable and rare characteristics. Among the gem-

stones formed naturally, there are many kinds of crystals, including crystals, amorphous, and various solid minerals. During their formation, many different kinds of impurities and inclusions were sealed, and finally more magnificent crystals were formed. There are many kinds of inclusions in natural crystals, but rutile inclusions, chlorite inclusions and some acicular and fibrous solid inclusions are common inclusions. We can use gem microscopy, polarized light microscopy, Raman spectroscopy, electron probe and other instruments to make a series of systematic optical detection and chemical composition analysis of natural crystal inclusions. Finally, we can determine the phase composition of the solid inclusions and “bread crumb” solid substances. Researchers can also observe the morphology, color, size and distribution characteristics of inclusions in different samples or the same samples from different angles. On this basis, the types, chemical composition, phase composition and distribution characteristics of solid minerals in natural crystals from different sources are further discussed. In nature, the quality of raw materials, water, temperature, pressure and other conditions are constantly changing, so the formation of crystals will be difficult to achieve a certain ideal state, usually through tens of thousands of times, or even millions of times, to achieve the same development.

## Keywords

Rock Crystal, Inclusion, Component, Characteristics

Copyright © 2022 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

现如今，市场上呈现出越来越多不同种类的水晶，但其中有合成的，也有天然生成的水晶，但是一些无良的商家为了眼前的利益，把两种水晶混在一起接着销售出去。水晶中含有差异组分的包裹体也成了我们区分合成水晶和天然水晶的一个依据，而包裹体指的就是宝石的内在特征，它们可以是固体矿物，可以是液体或者是气体物质，是一种封闭在矿物形成过程中或形成后的物质[1]。固体矿物包裹体，如金红石、阳起石、绿泥石、氧化铁及黑电气石等等，这些都是在产生天然水晶过程中被包裹在内部的固体物质，而在天然水晶中被包裹的绿泥石矿物则称为“绿幽灵”[2]。

包裹体是宝石最重要的特征之一，它可以让我们清楚地了解到宝石内部的特征及所含有的价值。随着自然的变化，天然晶体中的包裹体丰富多彩，从气体、液体到矿物，甚至宝石，都会包含在天然晶体中，它们形成了各种各样的场景。尽管一直以来宝石学家对水晶的颜色成因在做研究工作，但直到现在仍然没有得到完善的结论[3] [4] [5]。本文借助宝石显微镜、偏振光显微镜、拉曼光谱、电子探针等仪器对天然形成的水晶包裹体做一系列系统的光学检测与化学成分的分析，天然晶体中含有许多著名的包裹体，对天然晶体具有重要的价值，同时，为今后的研究者对天然晶体的鉴定和分类提供了方便。

## 2. 天然水晶晶体的基本性质

天然水晶晶体(Rock crystal)是一种以二氧化硅为主要成分的石英晶体。其化学式为  $\text{SiO}_2$ 。市场上的商家通常称他们为水精、水蓝、水玉等。晶体的一些基本性质是晶面玻璃光泽，贝壳状断口呈油脂光泽，折射率在 1.544 到 1.553 之间，透明至半透明的三方体系[6]。发育良好的六方单锥体水晶，一般是簇状聚集体，有时会有和其他矿物晶体共生。水晶晶体的颜色一般为无色透明、白色半透明，而当水晶内部带

有其他矿物时，会出现紫色、粉色、茶色、黄色、绿色等颜色[7]。

## 2.1. 化学成分

晶体矿物之所以被称为石英，是因为水晶的化学组成成分是二氧化硅，它们在矿物学上属于石英[8]。二氧化硅具有很多同质多象变体，比如是鳞石英，方石英和高低温石英，其中，我们最为常见的是 $\alpha$ -石英和 $\beta$ -石英，除了这些之外，晶体内部含有的铬、锰、铜和铁等离子体的原因，使得自然光或者偏振光透过晶体而发生折射，产生不同颜色的石英晶体[9]。这些石英变体的存在条件各种不同， $\alpha$ -石英能够稳定存在温度低于 $573^{\circ}\text{C}$ 的条件下，而 $\beta$ -石英虽然是在常压下形成的，但是它需要的温度是高于在 $573^{\circ}\text{C}$ 低于 $870^{\circ}\text{C}$ 。我们通过前辈们的总结得知当温度条件低于 $573^{\circ}\text{C}$ 时，变体 $\beta$ -石英就会发生转变，成为 $\alpha$ -石英，由此我们可以得知在自然界中，石英变体里最常见的是 $\alpha$ -石英[7]。在晶体形成过程中，周围环境中的铝、铁等杂质元素会进入水晶晶体中，而结合成水晶的两种矿物是46.7%的硅元素和53.3%的氧元素。因为晶体内部进入了各种不同的杂质，所以晶体就含有多种不同的颜色，例如紫色、黄色、粉色、烟色、绿色等，当然，水晶颜色的深浅会随着晶体内部物质元素含量的多少而发生改变[10]。

## 2.2. 天然水晶晶体的特性

水晶是属于中级晶族中三方晶系中的一员，其对称型符号为 $L^33L^2$ ，水晶的晶胞参数为 $a = b = 0.49135 \text{ nm}$ ， $c = 0.5405 \text{ nm}$ ， $z = 3$ ， $\alpha = \beta = 90^{\circ}$ ， $\gamma = 120^{\circ}$  [7]。当水晶两端菱面体同等发育时，晶体可呈假六方双锥状[1]。一般水晶的形成过程中会成群组出现，而且伴有柱面横纹，水晶晶体的柱面为什么会出现横纹？其实也就是因为当六方柱与菱面体的聚形组成六方锥，然后同时生成群组，此时水晶柱面上就会出现横纹。在自然生长的矿物中，水晶晶体中会经常出现双晶现象，而在自然界中最常见的双晶律有道芬双晶、巴西双晶等[8]。

## 2.3. 天然水晶晶体的物理性质

### 2.3.1. 光学性质

1) 颜色：水晶晶体在无吸收现象的可见光状态下，通常是无色状态的，而晶体内部里带有不一样的数目和类别的包裹体，所以水晶晶体的颜色无疑是多种多样的，而紫色、黄色、粉色、绿色及茶色到褐色等等这类颜色经常在珠宝市场上见到的颜色[10]。

2) 光泽及透明度：水晶晶面通常为玻璃光泽，无解理呈贝壳状断口，其断口为油脂光泽，可见光能够在晶体表面的透过的程度是透明至半透明。可见光能够透过水晶晶体的区间是200~2500毫微米，当然，水晶也能经过红外光线、紫外光线，这些都是在自然状态下可以进行的。我们可以发现在水晶里面所含有的一些物质、内含物，它们都会影响到水晶晶体的可见光透过度，这样就会让水晶的透明度会发生降低现象[9]。

3) 特殊光学效应：因为水晶晶体内部含有平行排列的包裹体，或者是在水晶形成过程时所留下的一些瑕疵都会有可能发生特殊的光学效应。我们可以在发晶中发现猫眼效应，在粉晶中能够出现星光效应，而我们最常见到的特殊光学效应就是六射星光效应，这些都是因为晶体内部的包裹体所引起的现象[11]。

4) 光性：在宝石界里，可分为均质体和非均质体。均质体是指光波进入宝石时，其光波的振动方向不会发生改变；非均质体则是光波进入宝石时，光波的振动方向会发生改变。根据研究学者的记录，水晶是属于一轴晶正光性的非均质体矿物，它在锥光镜下的干涉图就会很特殊，其图形是具有中空特点的黑十字干涉图，所以被研究学者称为“牛眼”干涉图。

5) 多色性: 水晶的多色性会随着颜色的深浅而显示出由弱到强的明显变化, 当水晶的颜色越来越重时, 多色性就变得越来越显著, 而无色水晶则是没有多色性[12]。

6) 物理参数: 因为水晶是属于非均质体的一种宝石, 而非均质体是有两个折射率值的, 根据研究学者的记录, 水晶的折射率在 1.544 到 1.553 之间, 它的折射率值之差, 也就是双折射率为 0.009, 色散值为 0.013。

7) 无特征吸收光谱。

8) 发光性: 水晶放在紫外荧光灯照射下没有明显的光亮。

### 2.3.2. 力学性质

矿物在自然界中, 抵抗外来物质作用的能力时称为硬度。矿物通常采用摩斯硬度, 而水晶的摩斯硬度为 7, 密度为  $2.65 \text{ g/cm}^3$ 。由于晶体内部不具有由晶体结构控制的弱结合面网, 水晶在经过受力后, 并没有规则的裂开, 而是经过不同方向裂开, 所以说水晶不具解理这种性质, 但是水晶在受力后, 以受力点为中心, 沿着受力点向不同方向裂开, 是典型的贝壳状断口。根据前辈们记载, 水晶晶体能够承受来自于垂直光轴方向最大压力是  $27400 \text{ kg/cm}^2$ , 当然也能承受来自于平行光轴方向最大压力是  $28000 \text{ kg/cm}^2$  [13]。

### 2.3.3. 其他性质

水晶不仅仅是具有压电性, 同时还具有方向性。天然水晶在高压条件下, 其单晶晶体的水晶两端会产生电荷, 这就是水晶具有压电性的原理, 所以无色的、纯净的天然水晶能够在科技领域中被广泛应用。现在我们常常佩戴的手表里面还具有石英这种矿物, 是因为石英具有方向性, 所以市场上经常会出现石英手表[14]。水晶不仅仅只有物理性质, 其化学稳定性也是极好的, 通常情况下不溶于酸, 但是会溶于氢氟酸, 也会溶在熔融的  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  中。水晶不仅具有压电性和方向性, 同时还具有导热性, 但是水晶要是与其他具有导热性的矿物相比, 水晶的导热性相对较低一些。水晶是一种在常温常压的条件下, 不溶于水的晶体。水晶沸点在  $2477^\circ\text{C}$ , 属于高沸点, 当温度达到  $1710^\circ\text{C}$  左右时才会开始融化, 在水晶含有包裹体时, 熔点甚至可以降低[15]。

## 3. 天然水晶的包裹体

包裹体是指矿物生长的时间里或形成之后, 封存在晶体内部裂隙中那一部分物质。从地质学角度, 包裹体按其成因差异可分为原生包裹体、次生包裹体和假次生包裹体[4]。原生包裹体是指与天然水晶同时生成, 通常随着矿物的晶面结伴生长; 次生包裹体是指水晶形成之后, 因为环境而被包裹在晶体内部的物质; 假生包裹体是指一些进入水晶之中的物质所形成的包裹体[16]。

当然“全包裹体”、“半包裹体”、“皮景”这三种包裹体的特点决定了水晶能不能观赏石的重要依据。全包裹体是指在水晶时把固体物质包裹在晶体之中形成各种景象, 经过很长的时间不受到大自然的影响, 依然保持原状。半包裹体是指受到应力作用的影响, 水晶结晶后会产生裂隙, 而晶体外的一些物质进入内部形成半包裹体的一种现象[17]。皮景是指一些与水晶共生的物质依附在晶体表面, 受到自然环境的影响, 侵蚀水晶表面形成一些山林鸟兽的自然景观的现象, 而形成一些景观存在于水晶表面的包裹体称为皮景。

## 4. 水晶包裹体的概念与分类

包裹体在地质学的概念与宝石学中的概念有所差别, 在地质学中, 包裹体通常被称为矿物形成或者形成之后被抓捕于晶体之中的物质, 而宝石学中定义为天然宝石内部包含的自然界产生的物质等

[17]。水晶中的包裹体是指天然水晶形成过程中晶体中包裹着一些固体、液体或者是气体形态的物质，最常见到的矿物有金红石、石榴石、绿泥石、电气石、针铁矿、磁铁矿等。与其他宝石相比，水晶中的包裹体占位空间较大，使用宝石显微镜观察，就更加精确观察到其形态、分布情况。这对于确定后期微构造、判断主矿物与包裹体的相对捕获时间是很重要的证据[5]。包裹体在水晶内部呈散状、羽雾状、平行条带线状等分布，不仅仅是这样的一些包裹体存在，还有一些不规整的固体物质存在于水晶晶体中[16]。

#### 4.1. 不同类型水晶的特征包裹体

1) 粉晶：水晶能够变成粉色的水晶是因为在水晶生长的过程中包含了大量的针状蓝线石，由于光线的自然反射、散射使水晶变成了粉色。大量的赤铁矿矿物存在于晶体内部，而这些单晶片组合成不规整的排列方式，形成了亮红色，如草莓般的颜色，所以世人称之为“草莓”水晶[17] (图 1)。



Figure 1. Microscopic acicular inclusions

图 1. 显微镜下的针状包裹体

2) 烟晶：显微镜下，烟晶的包裹体呈散状、雾状呈无色或是浅棕色的一种状态，而在肉眼可见的状态下，我们见到的是呈条带状分布的，浅褐色的一种晶体[18]。

3) 发晶：我们常见的发晶包裹体颜色有黑色、黄色、棕色呈针状、发丝状或放射状集合体。阳起石发晶(图 2(a))绿泥石发晶(图 2(b))。



(a) 阳起石包裹体



(b) 绿泥石包裹体

Figure 2. Inclusions in natural crystals

图 2. 天然水晶中的包裹体



4) 幽灵水晶：以绿泥石为主的包裹体是被人们所喜爱的绿幽灵，而绿泥石内含物在显微镜的观察下呈现的是绿色的鳞片状的包裹体，当包裹体含铁元素越高，幽灵水晶的颜色越深。幽灵水晶的内含物在颜色和形态上各不相同，所以常常被直接用作观赏石。

5) 水晶：这类水晶多数为无色至白色，透明度极高，在晶体内部拥有比较大的一个液态内含物，造型类似“水胆”，则被称水胆水晶[19]。市场上水胆水晶的产量稀少，相比较于其他水晶，它更具有艺术价值。

## 4.2. 水晶中包裹体的成分分析

天然水晶中含有大量内含物，其中尤以金红石矿物、赤铁矿矿物、绿泥石矿物、黑云母矿物常见，这些矿物常呈针状，片状，放射状集合体出现被包裹于水晶矿物晶格中。珠宝市场上也能见到黄色，红色等发晶挂件或是手链等等，而这些都是金红石固态包裹体存在晶体中，其光泽为金属光泽，透明度在透明至半透明的，是一种硬度较大的固体矿物[19]。

### 4.2.1. 显微激光拉曼光谱分析

显微激光拉曼技术是在光的散射后而发生频率之间的变化基础上，经过定量分析物质的成分一个光学物理技术[20]。激光拉曼的测试是一个具有功能比较全面的特点，所以这种技术方法可以应用在许多领域，它能够快速、无损地分析物质；这种能力使它在半导体研究、薄膜技术、聚合物研究、生物医药应用、以及生产加工线等领域更加出色。

显微激光拉曼技术相比于其他技术对于矿物包裹体的研究的确具有较好的可应用性。第一，它对样品的要求比较简单，二，它对样品的测试较为快速，几分钟即可出结果。第三，由于激光拉曼光谱技术是对矿物整体成分的测试，但是这种技术测试的结果与矿物的结构有关，所以相比于元素测试，分析过程更为简便也更为准确。显微激光拉曼技术在对水晶包裹体的研究中也具有一定的局限性。第一，并不是所有的矿物包裹体水晶样品中的包裹体都在样品表面附近，有些聚集分布在水晶内部，对于这类样品只能对样品进行切割打磨等破坏性的测试。其次，由于激光拉曼技术对样品的测试是一些部分的测试，所以所测成分可能会具有局限性[21]。

金红石的拉曼图谱中最显著特征峰的位置在  $445\text{ cm}^{-1}$ 、 $600\text{ cm}^{-1}$  左右，在  $140\text{ cm}^{-1}$ 、 $235\text{ cm}^{-1}$  左右也可有特征峰(图 3)。电气石的特征峰值在  $150\text{ cm}^{-1}$ 、 $230\text{ cm}^{-1}$ 、 $365\text{ cm}^{-1}$ 、 $490\text{ cm}^{-1}$ 、 $690\text{ cm}^{-1}$ 、 $690\text{ cm}^{-1}$ 、 $750\text{ cm}^{-1}$ 、 $1030\text{ cm}^{-1}$  附近(图 4)。赤铁矿拉曼图谱中特征峰的位置大致在  $225\text{ cm}^{-1}$ 、 $300\text{ cm}^{-1}$ 、 $390\text{ cm}^{-1}$ 、 $410\text{ cm}^{-1}$ 、 $460\text{ cm}^{-1}$ 、 $610\text{ cm}^{-1}$  (图 5)。纤铁矿拉曼图谱中特征峰的位置在  $150\text{ cm}^{-1}$ 、 $225\text{ cm}^{-1}$ 、 $390\text{ cm}^{-1}$ 、 $500\text{ cm}^{-1}$ 、 $600\text{ cm}^{-1}$ ，其中最明显的峰值在  $230\text{ cm}^{-1}$  左右。而赤铁矿，纤铁矿会有可能同时出现，所以它们的图谱有时是混合呈现的(图 6)。

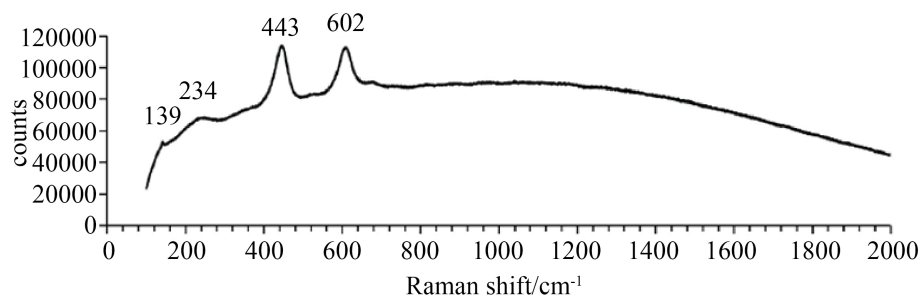


Figure 3. Laser Raman spectra of rutile inclusions

图 3. 金红石包裹体的激光拉曼光谱

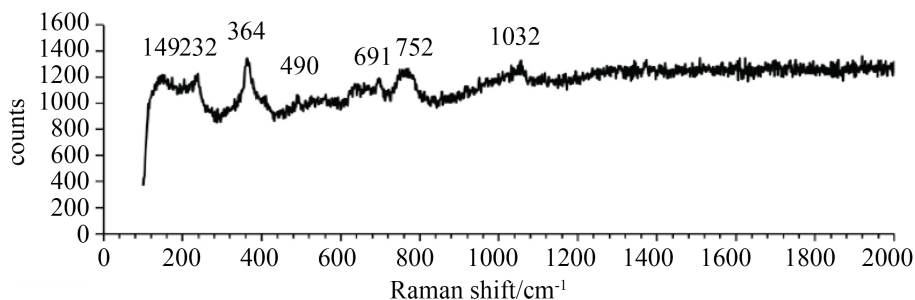


Figure 4. Laser Raman spectra of tourmaline inclusions

图 4. 电气石包裹体激光拉曼光谱

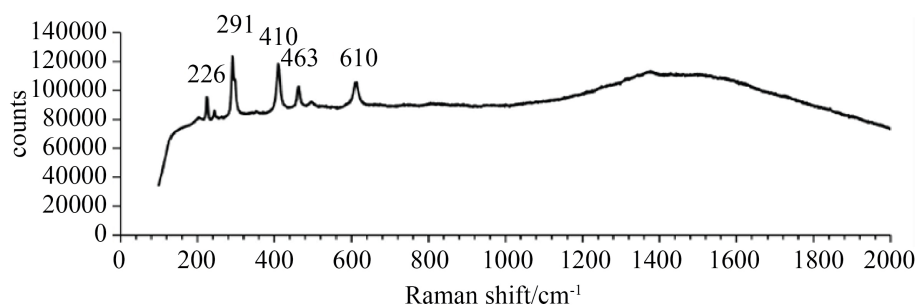


Figure 5. Laser Raman spectra of hematite inclusions

图 5. 赤铁矿包裹体激光拉曼光谱

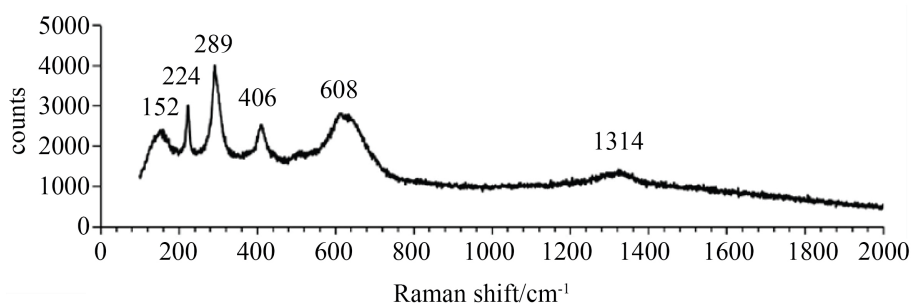


Figure 6. Laser Raman spectra of hematite and fibrite inclusions

图 6. 赤铁矿 - 纤铁矿包裹体激光拉曼光谱

阳起石(Actinolite)和透闪石(Tremolite)互为类质同象体,它们组分中Mg离子和Fe离子形成类质同像,成分中可有少量的K、Mn、Na与Ca进行替代,也可由少量Cl、F与(OH)进行替代。阳起石的拉曼图谱特征峰的位置在 $150\sim 230\text{ cm}^{-1}$ ,  $285\sim 675\text{ cm}^{-1}$ 之间有多个峰,在 $920\sim 1065\text{ cm}^{-1}$ 之间也有多个特征峰,在 $530\text{ cm}^{-1}$ 、 $670\text{ cm}^{-1}$ 的位置有两个较明显的特征峰,其中最为明显的峰值在 $670\text{ cm}^{-1}$ (图7)。绿泥石的拉曼图谱特征峰的位置大致在 $145\text{ cm}^{-1}$ 、 $410\text{ cm}^{-1}$ 、 $510\text{ cm}^{-1}$ 、 $670\text{ cm}^{-1}$ 、 $780\text{ cm}^{-1}$ (图8)。

最终发现,市场上的金色发晶和银色发晶的内部物质包裹体的矿物成分是金红石。我们通过市场调查发现,市场上将含金黄色、红棕色的针状、发丝状、纤维状金红石包裹体的水晶称为金发晶,将含板状金红石包裹体的发晶称为钛晶。而市场上的紫发晶内部包裹体则是紫红色絮状和长片状赤铁矿、针铁矿和纤铁矿的固体混合物。绿发晶内部包裹体而呈现的绿色纤维状和细针状的阳起石和绿色针状、柱状的绿帘石的一些矿物[20]。黑发晶内部的包裹体更多是黑色针状、柱状电气石。蓝发晶内部的包裹体则是蓝色针状、柱状,有时也会呈现束状分布的蓝线石。但是内含绿色粒状、泥状,蠕虫状的绿泥石的水晶

也较为常见，它们在市场上被称为绿幽灵。在水晶中有的散落分布、有的在相交的两个平面上分布，有的集中分布在水晶一侧的，还有的沿着水晶的生长方向成层分布，跟绿幽灵形态相似的还有红幽灵和黄幽灵；红幽灵内部包裹的是紫红色为主粒状和粉末状赤铁矿和纤铁矿；黄幽灵内部包裹的是黄色粉末状针铁矿。

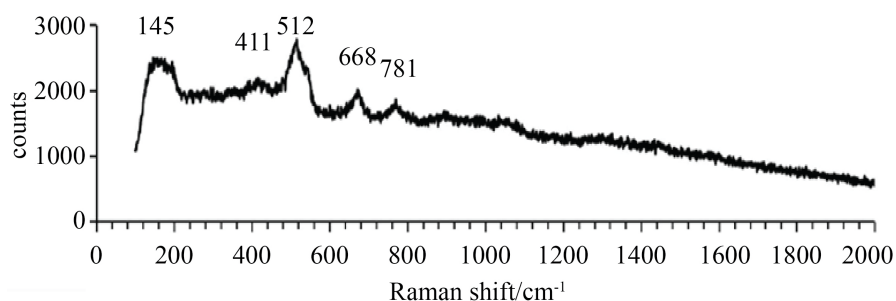


Figure 7. Laser Raman spectra of actinolite inclusions

图 7. 阳起石包裹体激光拉曼光谱

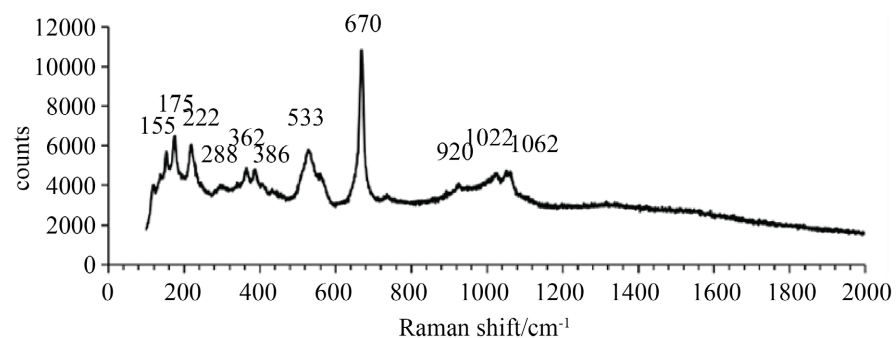


Figure 8. Laser Raman spectra of chlorite inclusions

图 8. 绿泥石包裹体激光拉曼光谱

#### 4.2.2. 气液包裹体分析

矿物形成的时候通常会抓捕一些成矿的物质，而这些物质可以分有原生包体、次生包体、假次生包体。成矿溶液中生长着矿物，此时同时生长的物质和矿物的晶体结构形态相似，常常成群出现、或呈单个地分布，颜色通常是无色或有些灰色的是原生包体[22]。

水晶矿物晶体形成之后，会因为一些原因而产生裂隙或由于地球张力的原因不规则方向生长的断口进入一些溶液或气相包体，但是并不是确定的数值，通常是不具有固体数值的次生包体[23]。

#### 4.2.3. 流体包裹体分析

流体包裹体课程研究是一科具有百年历史的地球学科领域的独立分支课程，是具有一百多年历史的一个学科[13]。根据包裹体的成因学说，在岩浆中结晶出来的斑晶矿物所捕捉的包裹体理应以岩浆熔体包裹体或者熔体-流体包裹体为主。在与成矿有关的一系列斑岩体斑晶石英(或者斑晶磷灰石)中发现大量的流体包裹体，而熔体包裹体却很少出现[24]。

## 5. 结语

矿物中的包裹体是在主宝石矿物的生长过程中被捕获的气体、液体或固体内含物，所以它比宝石形成时间早，当然还有的内含物与主宝石同时生成，但主要指的是流体和熔体包裹体以及宝石中的生长结



构和现象,也可以是固相以及出溶体。还有一些包裹体是在主宝石矿物结晶以后发生裂隙,宝石周围的物质沿裂隙进入到宝石形成的包裹体,系为裂隙充填的包裹体。

根据天然水晶内部存在的不同形态、颜色的包裹体,区分为不同种类的包裹体。甚至可以根据包裹体的颜色和形态的这些信息来确定水晶的成因和鉴定。同时也因为水晶中包裹体的存在而破坏水晶结构的均一性,同时也影响了水晶的质量。研究天然水晶包裹体的形成,其更重要的是补充了地质意义,在市场上也提供了一个五彩缤纷的宝石,不再是单一而枯燥的、一成不变的水晶。

## 参考文献

- [1] 李辰昊. 水晶内含物的类型及成因分析[D]: [硕士学位论文]. 成都: 成都理工大学, 2017.
- [2] 张蓓莉. 系统宝石学[M]. 北京: 地质出版社, 1997.
- [3] 范筠. 水晶中固体包裹体的特征及其内含金红石的地球化学分析[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国地质大学(北京), 2014.
- [4] 赵淑霞, 张良钜, 林杰. 水晶包裹体的类型及成因综述[J]. 矿产与地质, 2002, 16(6): 349-352.
- [5] Nickel, E. (1978) The Present Status of Cathode Luminescence as a Tool in Sedimentology. *Minerals Science and Engineering*, **10**, 73-100.
- [6] 张树林. 某水晶矿床成矿溶液研究及矿床成因[J]. 地球化学, 1979(1): 28-43+89-91.
- [7] 柴建平, 姜宏远, 吕秀莲. “草莓水晶”包裹体特征研究[J]. 西部资源, 2012(2): 160-162.
- [8] 林维峰, 邹耀辛, 迟广成, 徐万臣. 深色天然烟晶中内含物的成因及其鉴定意义[J]. 岩矿测试, 2005, 24(1): 62-64.
- [9] 严奉林. 罕见的含金包裹体水晶饰品[J]. 江苏地质, 2006(3): F0004.
- [10] 林慧. 激光拉曼光谱技术对水晶矿物包裹体的研究[D]: [硕士学位论文]. 石家庄: 河北地质大学, 2016.
- [11] 卢焕章, 喻茨玫, 施继锡. 华东某含水晶石英脉中气液包裹体特征及形成温度的研究[J]. 地球化学, 1975(4): 273-278.
- [12] 倪培, 范宏瑞, 丁俊英. 流体包裹体研究进展[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2014, 33(1): 1-5.
- [13] 王蝶, 毕献武. 斑岩铜矿石英中的流体包裹体成因及其对成矿的指示意义[J]. 矿床地质, 2012, 31(S1): 679-680.
- [14] 杨丹, 徐文艺. 常见氯盐溶液水的拉曼包络线高斯-洛仑兹去卷积积分峰定量研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2013, 33(2): 376-382.
- [15] 杨丹, 徐文艺. 激光拉曼光谱测定流体包裹体成分研究进展[J]. 光谱学与光谱分析, 2014(4): 874-878.
- [16] 林维峰, 邹耀辛, 迟广成. 天然水晶片中双晶纹的成因及其鉴定意义[J]. 岩矿测试, 2002, 21(1): 66-67+70.
- [17] 燕守勋, 张兵, 赵永超, 郑兰芬, 童庆禧, 杨凯. 矿物与岩石的可见—近红外光谱特性综述[J]. 遥感技术与应用, 2003, 18(4): 191-201.
- [18] 郑大中, 郑若锋. 论天然水晶形成机制[J]. 云南地质, 2005, 24(1): 22-31.
- [19] 张梓华. 水晶红、绿包裹体形成机理小议[J]. 中国宝玉石, 1998(3): 36.
- [20] 李海负. 含固相内含物水晶的分类与鉴赏[J]. 珠宝科技, 1997(2): 53-55.
- [21] 刘世敏. 现代测试技术在宝玉石检测中的应用现状及前景[J]. 岩矿测试, 2006, 25(1): 68-70+73.
- [22] 吕新彪. 天然宝石人工改善及检测的原理与方法[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1995.
- [23] 施尔畏, 仲维卓, 华素坤, 路治平, 赵天德, 栾怀顺. 水热法紫色水晶的生长[J]. 硅酸盐学报, 1993, 21(4): 319-325.
- [24] 鍾华邦. 我国的水晶资源[J]. 中国宝玉石, 1995(3): 30-31.