

基于拉曼光谱技术的红宝石包裹体分析与产地溯源研究

杨振国

PP Elegant Co.,Ltd.

DOI:10.12238/gmsm.v8i3.2178

[摘要] 伴随着红宝石在珠宝市场上的重要性,红宝石的产地溯源也渐渐成为宝石学关注的焦点问题。红宝石包裹体是它在形成过程中的结果,它可以反映宝石所处的地质背景及生长条件。传统产地溯源方法遇到了一些限制,拉曼光谱技术具有高分辨率,非破坏性以及快速分析等优点,是红宝石包裹体研究中的一种重要手段。本次研究以拉曼光谱技术为基础,对红宝石包裹体种类及特征进行了讨论,并将其进一步用于产地溯源。在对红宝石包裹体光谱特征进行分析并结合现有产地特征数据的基础上,本研究构建了系统产地溯源模型。研究结果表明不同来源红宝石包裹体拉曼光谱存在显著差异,将这些差异进行对比可准确判断红宝石来源。通过融合其他如 X 射线荧光(XRF)和电子探针微分析(EPMA)的技术手段,溯源准确性得到了进一步的提升。

[关键词] 拉曼光谱技术; 包裹体; 产地溯源; 光谱特征

中图分类号: TQ164.9 **文献标识码:** A

Ruby inclusion analysis and origin traceability research based on Raman spectroscopy

Zhenguang Yang

PP Elegant Co.,Ltd.

[Abstract] With the importance of ruby in the jewelry market, the origin of ruby has gradually become the focus of gemology. Ruby inclusions are the result of its formation and reflect the geological setting in which the gemstone is located and the conditions under which it grows. Traditional origin tracing methods have encountered some limitations, and Raman spectroscopy is an important method in the study of ruby inclusions due to its high resolution, non-destructive and rapid analysis. In this study, the types and characteristics of ruby inclusions were discussed based on Raman spectroscopy, and further applied to the origin tracing. Based on the analysis of the spectral characteristics of ruby inclusions and the existing origin characteristic data, a systematic origin traceability model was constructed in this study. The results show that there are significant differences in the Raman spectra of ruby inclusions from different sources, and the comparison of these differences can accurately determine the source of rubies. By incorporating other techniques such as X-ray fluorescence (XRF) and electron probe microanalysis (EPMA), the traceability accuracy is further improved.

[Key words] Raman spectroscopy; Inclusions; origin traceability; Spectral features

引言

红宝石作为珠宝中的珍稀品种,因其醒目的红色和巨大的商业潜力,在珠宝市场上始终保持着显著的地位。在红宝石市场日益扩大的情况下,如何确切地确定红宝石的产地及来源已成为宝石学中的一个热点。对红宝石进行产地溯源,不仅有利于评价红宝石质量,建立红宝石市场价值,而且对维护市场公正及防伪也能起到至关重要的作用。尽管传统的红宝石产地追溯方法,例如基于外观特征和化学成分分析,已经取得了一些进展,但在处理复杂的包裹体组合和相似的矿物成分时,这些方法仍然有其局限性。近年来拉曼光谱技术具有高分辨率,非破坏性以及快

速分析等优点,在宝石分析领域中已逐步成为一种重要手段。拉曼光谱可精确揭示红宝石中包裹体种类,组成及结构等特征,为红宝石产地溯源研究提供一种新技术途径。包裹体是红宝石形成的一个重要产物,包裹体的组成及特征能较好地反映红宝石所处地质环境及形成条件,从而成为追溯产地来源的一条至关重要的线索。

1 理论基础

本研究以拉曼光谱技术为基础,建立多维度分析框架,重点研究红宝石包裹体种类及产地溯源。利用拉曼光谱深入剖析红宝石中包裹体组成,形态及分布规律,可揭示出不同产地红宝石

所具有的特殊性质,为追溯其来源提供了强有力的证据。这一分析框架由三大维度构成,包裹体分类及特征分析。通过拉曼光谱分析不同包裹体的光谱特征,明确不同类型包裹体在红宝石中的表现。讨论了不同来源红宝石包裹体特征的差异,尤其是其拉曼光谱特有的峰值与频移模式。结合其他分析技术对拉曼光谱数据进行验证,进一步提高分析结果的准确性。

2 红宝石包裹体的类型与特征

2.1 包裹体的分类

红宝石包裹体为红宝石晶体内发育的自然矿物或者液体包裹体,它们不仅可以提供宝石发育过程中的重要资料,而且对于宝石的识别以及产地溯源都有着重要的意义。基于包裹体的成分和形状,红宝石包裹体可以被分类为几种:首先是矿物包裹体,这类包裹体通常由其他矿物的晶体或粒子组成,如云母、钛矿和绿帘石等。第二种类型是由水、气体或其他液体构成的液体包裹体,这些包裹体通常表现为气泡状或液体泡沫状的结构^[1]。第三种类型是由气体组成的气泡包裹体,这些包裹体通常在高温和高压的条件下生成,并在地质方面具有显著的指示作用。

表1 红宝石包裹体分类

包裹体类型	成分与特点	形成条件	研究意义
矿物包裹体	其他矿物晶体或粒子 (如云母、钛矿、绿帘石)	红宝石形成过程中夹杂的矿物	提供宝石发育过程资料、鉴定用途
液体包裹体	水、气体或其他液体	高温高压条件下形成	溯源宝石产地、反映红宝石生长环境
气泡包裹体	由气体组成的气泡	高温高压条件下形成	指示地质条件、反映红宝石生长环境

2.2 常见包裹体的光谱特征

红宝石包裹体光谱特征特别是拉曼光谱特征是判别不同包裹体类型的一个重要手段。不同种类包裹体拉曼光谱显示其独特的特征峰。如矿物包裹体拉曼光谱中一般都有明显矿物特征峰反映矿物分子振动频率等。钛矿包裹体可呈现特定波长拉曼峰,其特征峰与其晶格振动相关。液体包裹体则在拉曼光谱中表现出与水或其他液体相关的特征,如水分子的弯曲振动峰(约1600 cm^{-1})。气泡包裹体的光谱特性相当复杂,这可能涉及到气体分子的振动频率,如二氧化碳或氮气的特定峰值。研究人员通过分析这些光谱特征,可进一步识别包裹体种类,组成及形成环境等,进而提供红宝石地质背景线索。

2.3 包裹体在产地溯源中的应用

红宝石包裹体用于产地溯源有现实意义。由于各产地地质条件不一,所形成的红宝石在温度、压力和化学环境方面都存在差异,所以各产地红宝石包裹体都有其地域性特点。应用拉曼光谱技术分析红宝石包裹体组成可揭示包裹体矿物组成及形成条件,为产地溯源奠定了重要基础。比如一些产地红宝石包裹体中可能包含绿色帘石或者云母等特定矿物,它们的出现可能表明宝石的成因。通过与不同来源红宝石包裹体光谱特征的比对,研究者可以判断红宝石来源,即使在一定条件下也可以推测出

红宝石生成的地质环境^[2]。

3 拉曼光谱技术在红宝石分析中的应用

3.1 拉曼光谱的基本原理

拉曼光谱技术是建立在拉曼效应基础之上的,它的基本原理就是光线在作用于物质之后某些光波长会发生改变的一种现象。单色光入射样品后,绝大多数光都被弹性散射掉了,也就是说光波长是恒定的。但也有少数光产生非弹性散射而引起光的波长移位,这就是拉曼散射现象。拉曼散射波长位移和材料的分子振动模式紧密相关,不同材料振动模式不一样,所以其拉曼光谱特征峰位不一样。

3.2 拉曼光谱对红宝石包裹体的分析

对红宝石进行分析时,拉曼光谱可以有效揭示宝石内部包裹体组成及结构特征。红宝石包裹体一般以矿物,气泡或者液体为主要成分,每一种包裹体都会在拉曼光谱上显示出具体的振动峰从而可根据光谱特征将包裹体归类。如钛矿,绿帘石和云母中矿物包裹体拉曼光谱特征峰显著,可为包裹体鉴定奠定基础。在拉曼光谱分析中,液体包裹体呈现出与水或气体有关的特定特征峰,例如水的弯曲振动峰或气体分子的振动峰。气泡包裹体通常含有如二氧化碳这样的气体,并展现出独特的拉曼峰特征。通过分析这些包裹体光谱特征,研究者可以确定包裹体种类,组成及其形成条件。拉曼光谱可以提供包裹体微观结构信息如包裹体形态,分布及其与红宝石晶体之间的相互关系等,从而对红宝石形成提供重要线索^[3]。

3.3 拉曼光谱在产地溯源中的作用与优势

拉曼光谱技术用于红宝石产地溯源有显著优点。由于红宝石形成过程受到地质环境等因素的制约,不同来源红宝石包裹体往往呈现出特定的矿物成分及光谱特征,这就成为追溯红宝石来源的重要基础。通过分析红宝石中包裹体拉曼光谱,研究者能够揭示出包裹体类型及组成,并在此基础上推测出它们的来源。在一些产地红宝石包裹体中可能有绿色帘石或者钛矿等特定矿物,它们的出现与当地地质特征密切相关^[4]。对比不同来源红宝石拉曼光谱数据可以构建基于包裹体特征来源溯源模型。

4 红宝石产地溯源的方法与技术

4.1 传统产地溯源方法

红宝石产地溯源,一直以来都是依靠一系列常规物理,化学分析手段。传统的溯源方法涵盖了光学显微镜的观察、紫外-可见光(UV-Vis)的光谱分析、X射线荧光技术(XRF)以及电子探针的微观分析(EPMA)等技术。利用光学显微镜进行观测,研究者可以鉴别红宝石包裹体的种类及数量,并推测包裹体形成的环境及地质条件。UV-Vis光谱是通过测量宝石的吸收光谱来辅助确定红宝石的化学组成,特别是着色元素对其的影响。另外,XRF及EPMA技术可为红宝石的元素定量分析提供依据,并进一步佐证了产地推测的正确性。但传统方法通常只限于红宝石表面或者微小样本分析,在复杂包裹体结合情况下识别与判读精度有限。尽管这些方法在一定程度上为产地溯源提供了依据,但它们

的局限性使得在宝石学领域寻找更加高效、精准的技术成为迫切需求^[5]。

4.2 拉曼光谱技术与其他技术的结合

随着科技的进步,拉曼光谱技术已经成为红宝石产地溯源过程中的一种重要手段。与传统方法相比较,拉曼光谱技术以非破坏性,分辨率高和分析速度快为其显著优点,可以提供准确的成分分析而不会对样品造成破坏。拉曼光谱可定性定量分析红宝石内包裹体,确定包裹体矿物成分,气泡及液体成分等,并由此推测包裹体形成地质环境及来源。但仅靠拉曼光谱分析还不足以给出产地溯源的完整信息。在最近的几年中,科研人员开始尝试将拉曼光谱技术与其他方法相结合。例如利用X射线衍射(XRD)这一技术能够更为精确地鉴定矿物包裹体的晶体构造。结合电子探针微分析(EPMA)技术,更深入地研究红宝石的化学构成,从而增强分析的全面性和精确度。通过这一多技术结合,能够更加完整的揭示红宝石内在特征,提高产地溯源可信度。

4.3 产地溯源模型的构建与验证

在现代红宝石产地溯源研究中,构建可靠的溯源模型对于提高分析精度具有重要意义。产地溯源模型通常将红宝石的光谱特征,尤其是拉曼光谱数据作为研究目标,并结合统计学和数据挖掘的方法,建立了不同产地红宝石的特征数据库。通过对比分析不同产地红宝石的光谱特征,研究者可识别出特定产地宝石的特殊光谱模式,据此可构建产地溯源数学模型。这些规律不仅依赖于包裹体的种类、数量、形态和分布的特点,而且还考虑了宝石成分的多样性和形成的环境。为了验证溯源模型的可靠性,研究人员通常会利用已知产地的样本进行交叉验证,确保模型能够在实际应用中准确鉴别红宝石产地。通过不断优化模型,结合更多的样本数据,建立一个稳定且被广泛使用的红宝石产地溯源框架。这一模式的构建和验证既有助于宝石学深入研究,也为市场红宝石鉴定、保护和交易提供了科学依据^[6]。

5 结论

本研究以拉曼光谱技术为基础对红宝石包裹体进行分析和产地溯源,讨论红宝石包裹体种类,特征及其产地溯源应用。本文根据红宝石包裹体光谱分析结果,揭示出不同种类包裹体拉

曼光谱存在显著差异,同时通过比较不同来源红宝石包裹体谱特征,根据拉曼光谱成功地构建红宝石产地溯源模型。本研究表明拉曼光谱技术用于红宝石分析有其独特优势,能高效准确鉴定包裹体组成和结构,并进一步推测红宝石来源。通过融合X射线荧光(XRF)与电子探针微分析(EPMA)等先进技术,进一步提高了溯源分析的精确度和稳定性。该研究结果为红宝石产地溯源工作提供新技术路径,有利于提高红宝石鉴别的科学性与准确性,特别是对国际市场上的防伪与价值评估起到强有力的支撑作用。拉曼光谱技术的运用不仅为其他宝石和矿物的分析开辟了新的途径和手段,而且具有很高的推广潜力。今后研究可通过扩充样本库、优化分析模型等方式进一步提高溯源技术普适性与精确度。

[参考文献]

- [1]魏家秀,王立华,陈克樵.流体包裹体的激光拉曼探针研究与宝玉石成分检测[C]//第二届全国宝玉石玉石学术讨论会,1996,8(11):92-97.
- [2]李波,唐慧,罗丽萍,等.四川拉拉铜矿流体包裹体拉曼光谱特征及其地质意义[J].Multipurpose Utilization of Mineral Resources / Kuangchan Zonghe Liyong,2023(1):88-96.
- [3]黄甜甜,郗玉杰,孙雪莹,等.阿扎德克什米尔蓝宝石的包裹体拉曼光谱研究[J].宝石和宝石学杂志(中英文),2022,24(5):101-108.
- [4]Chang B,Huang J,Xie Q,et al.Identification, Geographical Traceability, and Thermal Oxidation and Photodegradation Studies of Camellia Oil Based on Raman Spectroscopy[J].Molecules,2025,30(11):2473-2473.
- [5]韩怡颖.天然晶体中常见包裹体及其成因研究[J].Advances in Geosciences,2022,12(8):6-9.
- [6]李凤春,兰延,董固元.低铁、高铁红宝石的特征及其对产地鉴别的指示意义[J].超硬材料工程,2024,36(01):62-67.

作者简介:

杨振国(1981--),男,北京人,珠宝鉴定师,毕业于中国地质大学宝石及材料工艺学专业。