

激光与光电子学进展

“达碧兹”海蓝宝石的谱学特征及结构研究

黄惠臻¹, 罗洁^{1*}, 徐亚兰², 邹训重³, 金嘉炜¹, 黄艺琼¹¹广州城市理工学院珠宝学院, 广东 广州 510800;²梧州学院宝石与艺术设计学院, 广西 梧州 543002;³广东轻工职业技术学院分析测试中心, 广东 广州 510300

摘要 “达碧兹”结构是指由“臂”、“核”和主体部分组成的特殊结构。本文采用多种现代测试手段对“达碧兹”海蓝宝石进行测试, 分析了其光谱学特征, 并对其结构成分进行了研究。结果表明, 其红外光谱符合贫碱结构水型绿柱石特征。拉曼光谱测试表明其“核”、“臂”和主体部分成分一致, 均为绿柱石。紫外-可见光吸收光谱测试表明, Fe^{2+} 同时存在于八面体和隧道中, 八面体中的 Fe^{2+} 是导致样品呈现蓝色的主要原因。成分分析测试结果显示, “达碧兹”结构中六边形“核”的外围及“臂”中的铁含量最高, 蓝色调也最深。“臂”的位置与六方柱晶面位置一致, 属于“类达碧兹型”宝石。显微特征表明“臂”是由大量定向排列的絮状包裹体构成的, 结合晶体层状生长理论可知该包裹体是由晶体层状向外生长过程中所形成的缺陷和平行连生共同导致的。

关键词 光谱学; “达碧兹”海蓝宝石; 拉曼光谱; 吸收光谱; 生长结构

中图分类号 P585

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.0930001

Spectral Characteristics and Structure of Trapiche Aquamarine

Huang Huizhen¹, Luo Jie^{1*}, Xu Yalan², Zou Xunchong³, Jin Jiawei¹, Huang Yiqiong¹¹School of Jewelry, Guangzhou City Institute of Technology, Guangzhou, Guangdong 510800, China;²School of Jewelry, Arts and Design, Wuzhou University, Wuzhou, Guangxi 543002, China;³Analysis and Testing Center, Guangdong Industry Polytechnic, Guangzhou, Guangdong 510300, China

Abstract Trapiche structure refers to a special structure comprising arms, core, and main body. In this study, the spectroscopic characteristics and element, structure are investigated using various modern testing methods. The results showed that the infrared spectrum of beryl agrees with the characteristics of water-type beryl of alkali-deficient structure. The Raman spectra show that the components of the core and arms are consistent with that of the main body, which belongs to beryl. The UV-Vis absorption spectra showed that Fe^{2+} exists in octahedron and tunnel, confirming the reason for the blue color of the sample. The composition analysis shows that high content of Fe^{2+} exists in the periphery and arms of hexagonal, with deeper blue color. The Trapiche arms' position of the aquamarine agrees with the hexagonal columnar plane, which belongs to the Trapiche-like gem. The microscopic characteristics show that the "arm" comprises a large number of directionally arranged flocculent inclusions, which are jointly caused by defects formed in the process of crystal-layered outward growth and parallel concatenation according to the theory of crystal-layered growth.

Key words spectroscopy; Trapiche aquamarine; Raman spectrum; UV-Vis spectrum; growth structure

OCIS codes 300.6170; 300.6340; 300.6550

收稿日期: 2020-09-22; 修回日期: 2020-10-05; 录用日期: 2020-10-14

基金项目: 2020年广西高校中青年提升项目(2020KY17002)、2019年华南理工大学广州学院大学生创新创业项目(JY191401)、2017年梧州学院校级科研项目(2017C015)

*E-mail: luojie1717@163.com

1 引言

“达碧兹”是宝石中一种特殊的生长现象,最早发现于哥伦比亚木佐矿区开采的祖母绿中,其“臂”与“核”的组合形态与 16 世纪西班牙人磨制蔗糖的木轱辘极为相似,因此人们便直接采用西班牙语“Trapiche”对其命名。Schmetzer 等^[1]根据“达碧兹”宝石中“臂”的分布方向和组成成分不同,将该现象分为“达碧兹型”和“类达碧兹型”。“达碧兹”祖母绿属于“达碧兹型”,其主体部分为祖母绿单晶体,放射状的“臂”由碳质包裹体构成。除祖母绿外,绿柱石族的海蓝宝石中也出现过“达碧兹”现象,但未被深入研究。鉴于此,本文采用拉曼光谱仪(Raman)、傅里叶红外吸收光谱仪(FTIR)、紫外-可见光吸收光谱仪(UV-Vis)、X 射线荧光光谱仪(XRF)和激光剥蚀-等离子体质谱仪(LA-ICP-MS)等现代测试仪器对“达碧兹”海蓝宝石进行了研究,旨在分析其光谱学特征及生长机制。

2 样品和测试

“达碧兹”海蓝宝石样品通过网络渠道购买,重 400 mg,如图 1 所示,该宝石产自缅甸。

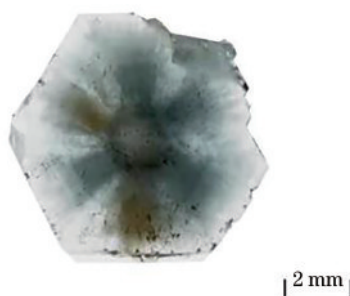


图 1 “达碧兹”海蓝宝石样品
Fig. 1 Trapiche aquamarine sample

使用 Thermo DXR™2xi 型拉曼光谱仪测试样品的拉曼光谱,测试地点为国家玉石金银饰品质量监督检验中心(河南)。测试时的激光波长为 532 nm,光栅为全波段光栅,测试范围为 50~3400 cm^{-1} 。

使用 TENSON 27 傅里叶变换红外光谱仪测试样品的红外光谱,测试在华南理工大学广州学院珠宝学院实验中心完成。测试方法:反射法和直接透射法。测试条件:扫描次数 32 次,分辨率 8 cm^{-1} 。

使用 GEM 3000 紫外-可见光谱仪测试样品垂直于 C 轴与平行于 C 轴方向的吸收光谱,测试地点为华南理工大学广州学院珠宝学院实验中心。测

试方法为反射法,积分时间为 180 ms,平均次数为 20 次,测试波长范围为 200~1000 nm。

利用 EDX 3000 型 X 射线荧光能谱仪对样品中除铍以外的主量元素进行半定量分析,测试在国家玉石金银饰品质量监督检验中心(河南)完成。测试所用的能量分辨率为 165 eV,靶材为铑,电压为 50 kV。

使用 Thermo-Finnigan Element II 高分辨扇形磁场质谱仪(HR-ICP-MS),联用 New Wave UP213 激光剥蚀系统对样品进行部分轻元素和微量元素的测试,测试在国家地质实验测试中心完成。测试条件:激光剥蚀斑束直径为 40 μm ,频率为 10 Hz,输出能量密度约为 15 J/cm^2 ,吹扫气体为氦气。

3 结果与分析

3.1 Raman 光谱分析

对“达碧兹”海蓝宝石的主体部分、六边形“核”及“臂”分别进行测试,测试图谱基本相同,如图 2 所示。1069 cm^{-1} 处的拉曼峰由 Si—O 非桥氧伸缩内振动引起,1005 cm^{-1} 处的拉曼峰由 Be—O 非桥氧伸缩外振动导致,765 cm^{-1} 处的拉曼峰与 Be—O 的振动有关,强度最高的 683 cm^{-1} 处的拉曼峰由 Si—O—Si 变形内振动产生,440 cm^{-1} 和 413 cm^{-1} 两处的拉曼峰归因于 O—Be—O 弯曲外振动,392 cm^{-1} 处较强的拉曼峰为 Al—O 变形外振动所致,321 cm^{-1} 处的拉曼峰为 Al—O 弯曲外振动所致^[2],1240 cm^{-1} 处的拉曼峰为宝石结构通道内的 CO_2 导致^[3]。样品各部分的拉曼光谱均与绿柱石相符,证明样品为“类达碧兹型”宝石。

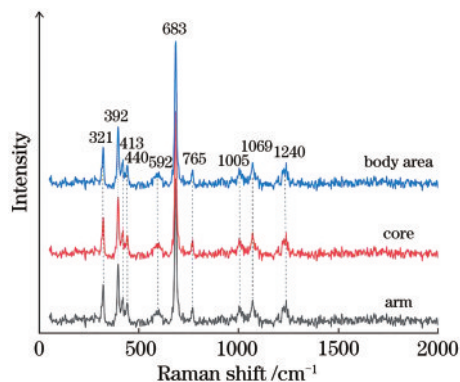


图 2 “达碧兹”海蓝宝石样品的拉曼光谱
Fig. 2 Raman spectra of Trapiche aquamarine sample

3.2 傅里叶红外吸收光谱分析

图 3 所示的中红外反射测试结果表明,1228、1022、967 cm^{-1} 处的谱峰归因于 Si—O 的伸缩振动,

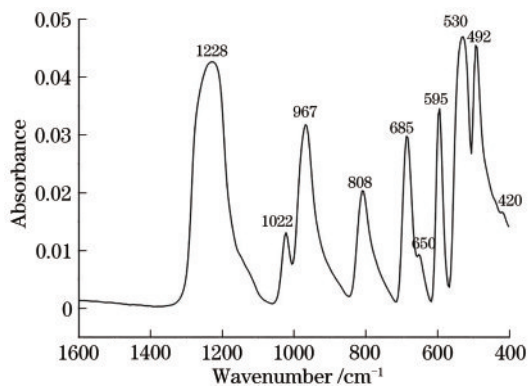


图 3 “达碧兹”海蓝宝石样品的中红外光谱图(指纹区)
Fig. 3 Mid-infrared spectrum (fingerprint area) of Trapiche aquamarine sample

808 cm^{-1} 和 685 cm^{-1} 处的谱峰归因于 Be—O 的伸缩振动, 650 cm^{-1} 和 595 cm^{-1} 处的谱峰属于环状硅酸盐的特征谱峰, 530 cm^{-1} 和 492 cm^{-1} 处的谱峰由 Al—O 的伸缩振动引起, 420 cm^{-1} 处的谱峰与 SiO_4 的伸缩振动有关^[4]。

在图 4 中, 2930 cm^{-1} 和 2856 cm^{-1} 处的谱峰为油或树脂类有机物的吸收峰(说明样品经过一定充填), 3159 cm^{-1} 处的谱峰是由水分子质子 H 与 C2 位少量 Na^+ 结合而成的 Na—H 键导致的, 3110 cm^{-1} 处的谱峰与 C2 位大分子和 II 型水结合成的 M—OH 键有关, 2477 cm^{-1} 处的谱峰是由 Cl^- 导致的吸收峰^[5]。

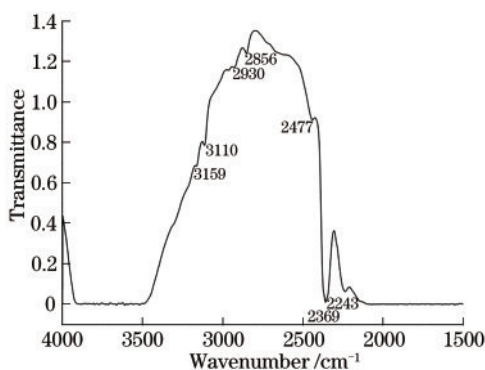


图 4 “达碧兹”海蓝宝石样品的中红外光谱图(官能团区)
Fig. 4 Mid-infrared spectrum (functional group area) of Trapiche aquamarine sample

由图 5 所示的近红外透射测试结果可以发现, I 型水峰位于 7323、7143、6822、5446、5272、5108 cm^{-1} 处, II 型水峰位于 7099、5204 cm^{-1} 处。其中: 7323 cm^{-1} 处的吸收峰强度中等, 归属于晶体结构中结晶水的倍频振动; 7143 cm^{-1} 处的吸收峰由 I 型水的非对称伸缩振动引起, 其峰强高于 II 型水

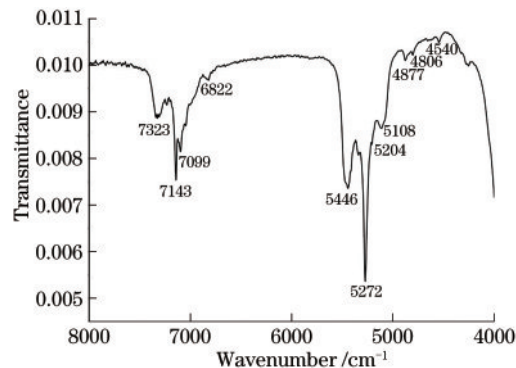


图 5 “达碧兹”海蓝宝石样品的近红外光谱图(官能团区)
Fig. 5 Near-infrared spectrum of Trapiche aquamarine sample

在 7099 cm^{-1} 处的峰强; 6822 cm^{-1} 处为一弱吸收峰, 归因于 I 型水的倍频振动; I 型水的弯曲振动和非对称伸缩振动导致 5272 cm^{-1} 处呈现峰深而窄的吸收峰, 5446 cm^{-1} 和 5108 cm^{-1} 处为该吸收峰的两处肩峰。此外, 样品在 5204、4877、4806、4540 cm^{-1} 处存在弱吸收峰, 均与贫碱结构水型绿柱石的近红外光谱相符^[5]。

综上所述, 样品经过了充填处理, 并同时含有 I 型水和 II 型水, 且以 I 型水为主, 属于贫碱型绿柱石。

3.3 紫外-可见光吸收光谱分析

图 6 所示的测试结果表明, 样品在垂直于 C 轴 ($\perp C$) 轴和平行于 C 轴 ($\parallel C$ 轴) 两个方向的吸收光谱基本一致, 均存在 323、373、395、425、835 nm 附近的吸收峰, 唯一的区别是垂直于 C 轴方向多了 952 nm 的吸收峰。在 $\parallel C$ 轴方向上, 存在于海蓝宝石结构隧道中的 Fe^{2+} 导致了 835 nm 处的吸收峰, 395 nm 处的吸收峰归因于八面体位置的 Fe^{3+} , 373 nm 处的吸收由 Fe^{3+} 置换 $[\text{SiO}_4]$ 四面体内的 Si^{4+} 产生。在 $\perp C$ 轴方向上, 835 nm 吸收峰归因于 $[\text{AlO}_6]$ 八面体中 Fe^{2+} 对 Al^{3+} 的置换, 952 nm 和

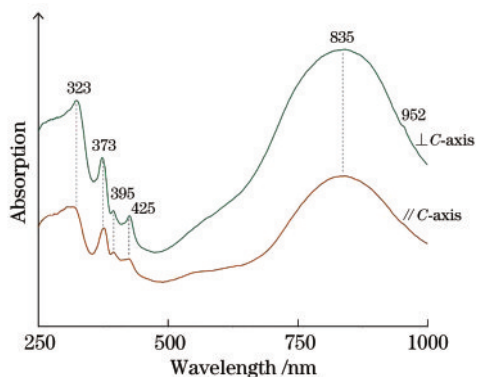


图 6 “达碧兹”海蓝宝石样品的紫外-可见光吸收光谱
Fig. 6 UV-Vis spectra of Trapiche aquamarine sample

425 nm 两处的吸收由 Fe^{2+} 替代八面体中的 Al^{3+} 导致, 425 nm 吸收峰位于可见光区域, 存在于八面体中的 Fe^{2+} 杂质是导致样品呈色的主要因素^[6-7]。

3.4 成分分析

联合 X 射线荧光光谱仪及激光剥蚀-等离子体质谱仪对样品的成分进行分析。采用 X 射线荧光光谱

仪测试时选取 7 个点(X1、X2、X3、X4、X5、X6、X7), 采用激光剥蚀-等离子体质谱仪测试时选取 6 个点(L1、L2、L3、L4、L5、L6)。测试点分别位于“核”内部浅黄色区(X1、X2、L1)、“核”边缘六边形深蓝色区(X3、X4、L2)、深蓝色“臂”区(X5、X6、L3、L4、L5)和浅蓝色主体生长区(X7、L6), 如图 7(a)、(b)所示。

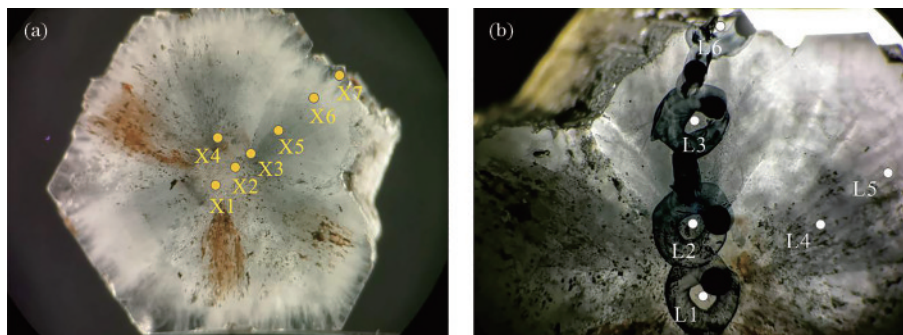


图 7 成分分析测试点。(a)X 射线荧光光谱测试时选取的测试点;(b)激光剥蚀-等离子体质谱测试时选取的测试点

Fig. 7 Test points for component analysis. (a) Test points of XRF; (b) test points of LA-ICP-MS

X 射线荧光光谱测试结果表明, 样品的主量元素为硅和铝, 接近绿柱石的理论数据 [$W(SiO_2) = 67.07\%$, $W(Al_2O_3) = 18.97\%$]^[8]。样品中不同部位处的铁元素含量不同, “核”内部浅黄色区的铁含量最低, 浅蓝色主体生长区的铁含量略高, “核”边缘深蓝色区和深蓝色“臂”区的含量最高。

表 1 所示激光剥蚀-等离子体质谱的微量元素

表 1 样品的激光剥蚀-等离子体质谱测试数据

Table 1 LA-ICP-MS test data of the sample

Element	Mass fraction / %					
	L1	L2	L3	L4	L5	L6
Li	0.0243	0.0167	0.0189	0.0169	0.0133	0.0132
Be	5.5829	5.8253	5.3488	6.0273	6.0278	5.7439
Na	0.4981	0.4616	0.3772	0.0747	0.1930	0.1542
Mg	0.2215	0.1834	0.1633	0.0959	0.0870	0.0713
P	0.0239	0.0163	0.0150	0.0096	0.0097	0.0072
K	0.0850	0.0147	0.0237	0.0145	0.0133	0.0099
Ca	0.1065	0.0475	0.0385	1.0413	0.0257	0.0402
Sc	0.0025	0.0118	0.0109	0.0061	0.0051	0.0048
Ti	0.0380	0.1329	0.1474	0.0611	0.0171	0.0297
V	0.0006	0.0007	0.0007	0.0005	0.0005	0.0004
Cr	0.0007	0.0010	0.0009	0.0017	0.0009	0.0011
Mn	0.0646	0.0062	0.0074	0.0052	0.0079	0.0049
Fe	0.7376	1.5426	1.5091	1.1325	1.0159	0.8633
Zn	0.0356	0.0127	0.0115	0.0084	0.0088	0.0085
Ga	0.0031	0.0044	0.0045	0.0035	0.0043	0.0042
Rb	0.0083	0.0074	0.0081	0.0044	0.0044	0.0037
Cs	0.0767	0.1648	0.1630	0.0948	0.1055	0.0991

测试结果显示, 样品“核”内部浅黄色区铁的质量分数为 0.7376%, “核”边缘深蓝色区铁的质量分数为 1.5426%, 深蓝色“臂”区铁的质量分数为 1.0159%~1.5091%, 浅蓝色扇形生长区铁的质量分数为 0.8633%, 与 X 射线荧光光谱测试结果一致。测试结果表明, 样品中铁元素的含量直接影响了宝石的呈色, 铁元素含量越高, 宝石的蓝色调越深。另外, 样品中还含有少量锂(Li)、钠(Na)、钾(K)、铷(Rb)、铯(Cs)等碱金属元素, 锂的质量分数为 0.0132%~0.0243%, 铷的质量分数为 0.0037%~0.0083%, 钠、钾、铯的质量分数共计为 0.1840%~0.6598%。该样品属于贫碱型绿柱石^[9], 与红外光谱的测试结果一致。

4 “达碧兹”结构成因的探讨

4.1 显微特征

显微特征显示, “达碧兹”海蓝宝石颜色分布不均匀, “核”的中心区域呈浅黄色, “核”的六边形轮廓以及六条向外的放射状“臂”呈深蓝色, 有两条“臂”因后期浸染而在近表面处呈现褐黄色外观, 如图 8(a)所示。“臂”由大量定向排列的絮状包裹体组成, 与六方柱晶面垂直, 如图 8(b)所示, 因此“达碧兹”海蓝宝石为“类达碧兹型”^[1]宝石, 与拉曼光谱测试结果一致。样品的柱面并非平直的光滑面, 而是呈现由许多细小六方柱平行连生形成的阶梯状外观, 如图 8(c)所示, 晶体内部可见大量平行于 C 轴方向的小薄层, 如图 8(d)所示, 推测为平行连生的

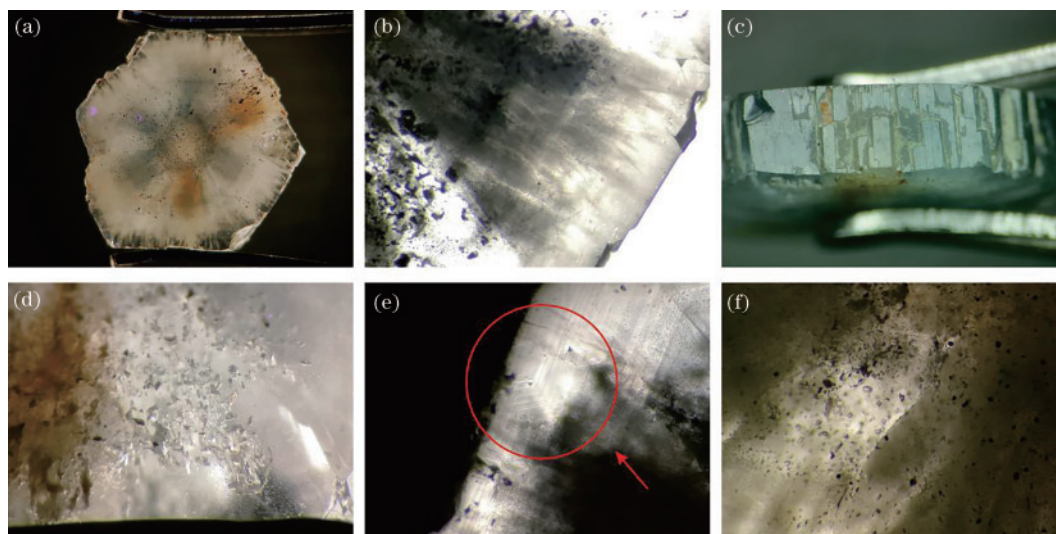


图8 “达碧兹”海蓝宝石的显微特征。(a)镜下宏观特征;(b)由定向絮状包裹体组成的“臂”;(c)平行连生阶梯;(d)晶体连生形成的空层;(e)平行连生生长痕迹;(f)大量气液包裹体

Fig. 8 Microscopic feature of Trapiche aquamarine sample. (a) Macroscopic feature; (b) arm composed of directional flocculent inclusion; (c) ladder caused by parallel connection; (d) empty layer formed by parallel connection; (e) parallel growth trace; (f) a large number of gas-liquid inclusions

六方柱晶体间的细小缝隙。在靠近六方柱晶面的生长环带附近发现了平行连生的生长痕迹,如图8(e)所示,证实了“达碧兹”海蓝宝石晶体为平行连晶。另外,晶体内部还存在大量气液包裹体,如图8(f)所示。

4.2 成因分析

前人已对几种“类达碧兹型”宝石进行了研究。宋晶晶等^[10]认为形成蓝宝石“达碧兹”结构的原因是晶体的“枝晶生长”,而李盈青^[11]则认为是晶体缺陷引起的空管所致。此外,陈竹^[12]发现内蒙古黄梁岗水晶的“达碧兹”现象是致色元素沿一定结晶学方向规律分布形成的,而内蒙古东乌旗水晶的“达碧兹”结构则是由平行连生导致的。

海蓝宝石的“达碧兹”结构由六边形“核”及六条“臂”组成,“核”的生长面平行于六方柱 $\{10\bar{1}0\}$,“臂”的生长方向垂直于六方柱面,如图9(a)所示。根据生长现象,可以将“达碧兹”海蓝宝石的生长分为两个阶段:一是“核”区生长阶段,二是“臂”区形成阶段。

样品的成核初期可视为黄色绿柱石的生长,直至某一时期成矿溶液的组分发生了较大变化。杂质元素铁的含量增加会导致深蓝色六边形色带的形成,勾勒出“核”的外轮廓,自这一时期起,样品开始呈现蓝色调。同期,大量杂质元素或是与 $[\text{BeO}_4]$ 四面体中的 Be^+ 或 $[\text{AlO}_6]$ 八面体中的 Al^{3+} 发生置换

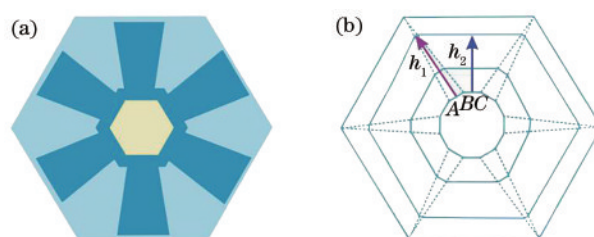


图9 “达碧兹”海蓝宝石的生长结构图^[11]。(a)“达碧兹”结构的组成;(b)垂直于C轴方向的面网发育示意图

Fig. 9 Growth structure of Trapiche aquamarine^[11]. (a) Composition of Trapiche structure; (b) sketch map of development of plane net perpendicular to C-axis direction

进入配位体,或者以机械混入物的形式进入晶格内部,在这一过程中局部质点可能会偏移格子构造规律,形成多种形式的晶体缺陷,为晶体生长进一步提供驱动力。根据布拉维法则,海蓝宝石六方柱面方向的面网 BC 的密度大,面网间距 h_2 也大,生长速度慢,为一组低指数密排晶面。当生长驱动力达到一定限度时,沿面网 BC 可以形成一种二维晶核,若成核速率很大,结晶界面将密布新的结晶核,晶体开始连续生长^[13],“臂”区的生长与晶体的平行连生开始发生。随着晶体层层向外生长,六方柱面面积不断增加,导致缺陷遗传和平行连生持续发生,沿柱面生长方向形成大量拉长的絮状包裹体,即“达碧兹”海蓝宝石的“臂”。在“臂”形成初期,柱面生

长方向的界面粗糙程度增加,杂质离子 Fe^{2+} 更容易在该方向上聚集^[10],导致“臂”区蓝色富集。

5 结 论

“达碧兹”海蓝宝石样品的“臂”、“核”和主体区域均显示绿柱石的特征拉曼光谱,三者具有相同的分子结构。红外光谱测试结果也符合绿柱石的特征吸收峰,同时样品中既有 I 型水又有 II 型水,但以 I 型水为主,属于贫碱型绿柱石。紫外-可见光吸收光谱测试结果表明,存在于八面体中的杂质 Fe^{2+} 替代八面体中的 Al^{3+} 所产生的 425 nm 处的吸收是导致样品呈蓝色的主要原因。成分测试结果显示,样品经历了不同的生长阶段,铁元素的含量越高,样品的蓝色调越深。

“达碧兹”海蓝宝石的“臂”由大量定向排列的絮状包裹体构成,位置与六方柱晶面的位置一致,说明本文样品为“类达碧兹型”宝石。晶体缺陷是“达碧兹”海蓝宝石“臂”产生的主要驱动力,当驱动力达到一定程度时,沿六方柱 $\{10\bar{1}0\}$ 产生新的二维结晶核,为“臂”区生长提供台阶源。伴随着平行连生的发生,晶体开始连续生长,导致六方柱方向产生大量的絮状包裹体,组成“达碧兹”海蓝宝石的“臂”,同时“臂”区粗糙的界面对铁元素具有富集作用,从而最终导致了蓝色“臂”的形成。

致谢 国家地质实验测试中心的赵令浩老师在激光剥蚀-等离子体质谱测试中提供了帮助,河南省产品质量监督检验院-国家玉石金银饰品质量监督检验中心的王小迪老师、张立新老师在 X 射线荧光光谱和拉曼光谱测试中提供了帮助,在此一并致以诚挚的谢意!

参 考 文 献

- [1] Schmetzer K, Bernhardt H J, Hainschwang T, et al. Chemical and growth zoning in trapiche tourmaline from Zambia; a re-evaluation [J]. *The Journal of Gemmology*, 2011, 32(5): 151-173.
- [2] Qi L J, Ye S, Xiang C J, et al. Vibration spectrum and irradiation splitting of mixture in beryl channels [J]. *Geological Science and Technology Information*, 2001, 20(3): 59-64.
亓利剑, 叶松, 向长金, 等. 绿柱石通道中配合物的振动光谱和辐照裂解 [J]. *地质科技情报*, 2001, 20(3): 59-64.
- [3] Łodziński M, Sitarz M, Stec K, et al. ICP, IR, Raman, NMR investigations of beryls from pegmatites of the Sudety Mts [J]. *Journal of Molecular Structure*, 2005, 744/745/746/747: 1005-1015.
- [4] Liu J, Liu F L, Wang Y M, et al. Spectral characteristic of beryl containing hematite inclusion [J]. *Journal of Gems & Gemmology*, 2019, 21(4): 19-24.
刘佳, 刘芳丽, 王雅玫, 等. 一种含赤铁矿包裹体绿柱石的谱学特征 [J]. *宝石和宝石学杂志*, 2019, 21(4): 19-24.
- [5] Qiao X, Zhou Z Y, Nong P Z, et al. Study on the infrared spectral characteristics of H_2O I-type emerald and the controlling factors [J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2019, 38(2): 169-178.
乔鑫, 周征宇, 农佩臻, 等. 贫碱结构水类型祖母绿红外光谱特征及其控制因素探究 [J]. *岩矿测试*, 2019, 38(2): 169-178.
- [6] Qu M. Mineralogical and gemological study of aquamarine from keketuohai in Aletai of Xinjiang [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2014: 20-13.
曲梦. 新疆阿尔泰可可托海海蓝宝石的宝石矿物学研究 [D]. 北京: 中国地质大学, 2014: 20-13.
- [7] Ding P. Study on mineralogical characteristic and fluid inclusions of aquamarine from Fugong, Yunnan Province [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2012: 40-46.
丁佩. 云南福贡海蓝宝石的矿物学特征及流体包裹体研究 [D]. 北京: 中国地质大学, 2012: 40-46.
- [8] Zhao S R. Crystallography and mineralogy [M]. 3rd ed. Beijing: Higher Education Press, 2017: 341-342.
赵珊茸. 结晶学及矿物学 [M]. 3 版. 北京: 高等教育出版社, 2017: 341-342.
- [9] Huang L T T, Häger T. On some controversially-discussed Raman and IR bands of beryl [J]. *VNU Journal of Science, Earth Sciences*. 2010, 26(1) : 32-41.
- [10] Song J J, Guo S G. Texture formation and spectroscopy study of element partitioning in trapiche sapphire [J]. *Applied Laser*, 2009, 29(1) : 64-67.
宋晶晶, 郭守国. “达碧兹”蓝宝石结构及其痕量元素分布的光谱学研究 [J]. *应用激光*, 2009, 29(1) : 64-67.
- [11] Li Y Q. Gemological characteristic of "trapiche" ruby and sapphire [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2016: 68-72.

- 李盈青. “达碧兹”红宝石和蓝宝石的宝石学特征研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2016: 68-72.
- [12] Chen Z. Gemmological and mineralogical study on trapiche-like quartz in inner mongolia [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2019: 54-58.
陈竹. 内蒙古类达碧兹水晶的宝石矿物学研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2019: 54-58.
- [13] Jie W Q. Principle and technology of crystal growth [M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2019: 126-127.
介万奇. 晶体生长原理与技术[M]. 2版. 北京: 科学出版社, 2019: 126-127.