

激光与光电子学进展

天然尖晶石和焰熔法合成尖晶石的光谱特征对比研究

何珊珊, 曹盼, 谭红琳, 祖恩东*

昆明理工大学材料科学与工程学院, 云南 昆明 650093

摘要 目前的市场上充斥着大量焰熔法合成的尖晶石,仅通过常规方法不能对合成尖晶石和天然尖晶石进行有效鉴别。为了准确鉴别天然尖晶石和焰熔法合成尖晶石,本文基于傅里叶变换红外光谱、X射线荧光光谱、吸收光谱和激光拉曼光谱,分别对天然尖晶石和焰熔法合成尖晶石进行分子结构、化学成分、致色机理等的研究,并对拉曼光谱在 405 cm^{-1} 位置的谱峰进行洛伦兹拟合,得到半峰全宽值,然后对半峰全宽值进行单因素方差分析。结果表明:天然尖晶石和焰熔法合成尖晶石的常规宝石学特征基本一致,但它们的分子结构、化学成分、致色机理、半峰全宽存在显著差异,可为鉴别天然尖晶石和焰熔法合成尖晶石提供理论依据。

关键词 光谱学; 天然尖晶石; 合成尖晶石; 红外光谱; X射线荧光光谱; 拉曼光谱; 半峰全宽

中图分类号 P575.4

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.0530001

Comparative Study on Spectral Characteristics of Natural and Flame-Melting Synthetic Spinel

He Shanshan, Cao Pan, Tan Honglin, Zu Endong*

Faculty of Material Science and Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650093, China

Abstract Today's market contains large quantities of flame-melting synthetic spinel, which cannot be effectively identified by conventional methods alone. To accurately identify natural and flame-melting synthetic spinels, we used Fourier transform infrared spectroscopy, X-ray fluorescence spectroscopy, absorption spectroscopy, and laser Raman spectroscopy to study the molecular structures, chemical compositions, and color mechanisms of the spinel specimens. The full-width-at-half-maximum (FWHM) was obtained by Lorentz fitting of the 405 cm^{-1} peak in the Raman spectrum and analyzed by one-way ANOVA (analysis of variance). Although the conventional gemological characteristics of natural spinel and flame-melting synthetic spinel were almost identical, there are significant differences in molecular structures, chemical compositions, color mechanisms, and FWHMs. The results provide a theoretical basis for distinguishing natural spinel from flame-melting synthetic spinel.

Key words spectroscopy; natural spinel; synthetic spinel; infrared spectrum; X-ray fluorescence spectrum; Raman spectra; full-width-at-half-maximum

OCIS codes 300.6340; 300.6450; 300.3530

收稿日期: 2020-07-06; 修回日期: 2020-07-31; 录用日期: 2020-08-13

基金项目: 国家自然科学基金(51662023)

*E-Mail: zend88@163.com

1 引言

目前,宝石和黄金消费已成为衡量一个国家经济实力的标志之一^[1]。宝石资源有限,而社会需求量却与日俱增,因此合成宝石应运而生。合成宝石^[1]指的是人们运用现代科学技术的基本原理和方法,用适宜的材料,通过一定的工艺、技术制造出来的材料。随着科学技术的发展,合成宝石的方法越来越多,如合成钻石的高温高压(HTHP)法和化学气相沉积(CVD)法,合成红宝石和尖晶石的焰熔法,合成红宝石和蓝宝石的提拉法,合成红宝石和祖母绿的水热法,合成祖母绿和红宝石的助熔剂法。

尖晶石是目前市场比较活跃的中档宝石,其部分品种价格高昂,而合成尖晶石价格约为天然尖晶石的千分之一。目前,合成尖晶石的方法主要是焰熔法,原料为碳酸镁 $MgCO_3$ 和硫酸铝铵 $(NH_4)_2Al_2(SO_4)_4 \cdot 24H_2O$,合成尖晶石中 Al_2O_3 和 MgO 的质量比为 2.5:1^[2]。目前,人们对尖晶石的研究主要集中在尖晶石的宝石学特征^[3-5]、包裹体成分^[6]、仿冒品鉴别^[7],以及鉴别天然与热处理尖晶石^[8-10]等方面,但研究的重点并未涉及天然尖晶石与焰熔法合成尖晶石的特征对比。鉴于此,本课题组拟基于拉曼光谱的半峰全宽,即声子“寿命”,来鉴别天然宝石与合成宝石^[11-15]。随着科学技术的发展,光谱分析在各个领域被广泛应用^[16-19]。本文主要通过天然尖晶石和焰熔法合成尖晶石的光谱进行系统研究,并结合声子“寿命”,从分子结构、化学成分、致色机理、半峰全宽等方面对比了天然尖晶石和焰熔法合成尖晶石的异同点,为鉴别天然尖晶石和焰熔法合成尖晶石提供一定的理论依据。

2 实验样品与测试方法

2.1 实验样品

本次实验共收集 16 颗样品,其中,天然尖晶石样品 10 颗(N1~N10),焰熔法合成尖晶石样品 6 颗(S1~S6)。

2.2 实验方法

采用德国布鲁克(Bruker) TENSOR27 傅里叶变换红外光谱仪测量分子结构,测试范围为 $400 \sim 6000 \text{ cm}^{-1}$,样品扫描时间为 16 s,扫描频率为 10 kHz,光谱分辨率为 4 cm^{-1} 。在中红外波段采用的测试方法是反射法,在近红外波段采用的测试方

法是透射法。

采用 ARL QUANT'X EDXRF Analyzer 型 X 射线荧光光谱仪进行成分分析,扫描次数为 3 次,扫描时间为 60 s,激发电压为 24 kV。

采用吸收光谱法分析致色机理,选用的仪器为 USB2000+ 光纤光谱仪,积分时间为 $1600 \mu\text{s}$,照明光源为 D65,波长范围为 $380 \sim 750 \text{ nm}$ (间隔为 10 nm)。通过采集样品的漫反射信号,得到反射光谱图。

采用 LabRAM HR Evolution 显微共焦激光拉曼光谱仪对分子振动进行测试分析,激光波长为 532 nm,光斑大小为 $50 \mu\text{m} \times 1000 \mu\text{m}$,激光强度为 100 mW,积分次数为 3~5 次,波数范围为 $400 \sim 2500 \text{ cm}^{-1}$ 。

采用 SPSS 社会科学统计软件进行数据分析,此次实验采用的是单因素方差分析。

$$F = \frac{\frac{S_A}{\sigma^2} / (r-1)}{\frac{S_E}{\sigma^2} / (n-r)} = \frac{S_A / (r-1)}{S_E / (n-r)} \sim F(r-1, n-r), \quad (1)$$

式中: S_E 表示各水平下实验的随机误差,称为误差平方和或组内平方和; S_A 反映因素在不同水平效应间的差异,称为效应平方和或组间平方和; r 为因素水平的个数; n 为全部观测值的个数。 F 统计量的值是根据 F 分布得到的显著性水平(Sig.)。在数理统计中,对于给定的显著性水平 α ,确定临界值为 $F_\alpha(r-1, n-r)$,当 $F > F_\alpha(r-1, n-r)$ 时拒绝原假设,认为因素 A 在各个水平下对实验结果的影响是显著的;而在 SPSS 中,则是以计算显著性概率 P 的值来判断各因素的影响是否显著(当 $P < 0.05$ 时,认为这些因素的影响是显著的,否则认为其影响不显著)。

3 测试结果

3.1 常规宝石学特征

常规宝石学参数如表 1 所示。天然尖晶石和焰熔法合成尖晶石的折射率相近;焰熔法合成尖晶石在短波(SW)下具有蓝白色的荧光,荧光强。在分光镜下观察,部分焰熔法合成尖晶石可看见“Co”谱。部分天然尖晶石可见愈合裂隙发育或无色短柱状晶体包体,部分焰熔法合成尖晶石内部可见弯曲生长纹,但均存在内部干净的样品。因此,对于无“Co”谱、内部干净的样品,常规宝石学仪器无法进行有效区分,需运用大型仪器进行光谱学特征鉴别。

表 1 天然尖晶石与合成尖晶石的常规宝石学参数

Table 1 Conventional gemological parameters of natural and synthetic spinels

No.	Color	Refractive index	Ultraviolet fluorescence	Spectroscope	Morphology
N1	Red	1.718	No	No	Clean inside
N2	Purple	1.718	No	No	Clean inside
N3	Blue	1.712	No	No	Healing fissure
N4	Red	1.718	No	No	Clean inside
N5	Purple	1.71(±)	No	No	Healing fissure
N6	Blue	1.720	No	No	Healing fissure
N7	Pink	1.720	No	No	Colorless short columnar crystal inclusion
N8	Pink	1.720	No	No	Clean inside
N9	Rose	1.720	No	No	Clean inside
N10	Blue	1.712	No	No	Clean inside
S1	Blue	1.728	LW: no; SW: blue and white	Co	Curved growth pattern
S2	Green	1.728	LW: no; SW: blue and white	Co	Curved growth pattern
S3	White	1.728	LW: no; SW: blue and white	No	Curved growth pattern
S4	Green	1.728	LW: no; SW: blue and white	Co	Clean inside
S5	White	1.728	LW: no; SW: blue and white	No	Clean inside
S6	Blue	1.728	LW: no; SW: blue and white	No	Clean inside

Notes: LW and SW represent long and short wavelength, respectively.

3.2 红外光谱特征

红外吸收光谱是宝石分子结构的具体反映。利用红外光谱仪选择中红外的“基频区”和“指纹谱”波段^[20-21]对样品进行红外测试,测试结果如图 1~2 所示。分析后可以发现:天然尖晶石在 544、584、727 cm^{-1} 附近有 3 个吸收峰;焰熔法合成尖晶石在 544、727、845 cm^{-1} 附近有 3 个吸收峰,其中 544 cm^{-1} 和 584 cm^{-1} 处的吸收峰是由 Al—O 伸缩振动引起的,727 cm^{-1} 和 845 cm^{-1} 处的吸收峰是由 Mg—O 的伸缩振动引起的。

天然尖晶石和焰熔法合成尖晶石的近红外光谱如图 3~4 所示。分析后可以发现:天然尖晶石在

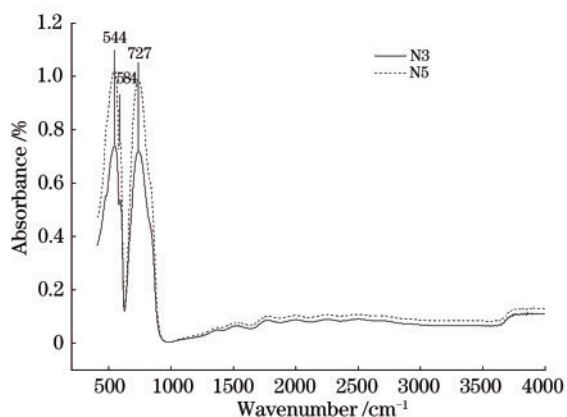


图 1 天然尖晶石的中红外光谱
Fig. 1 Mid infrared spectra of natural spinels

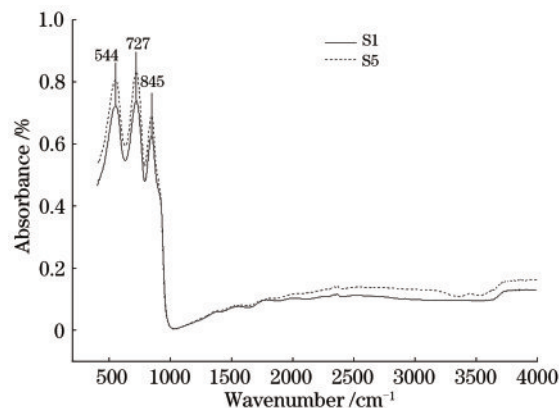


图 2 焰熔法合成尖晶石的中红外光谱
Fig. 2 Mid infrared spectra of flame-melting synthetic spinels

1737、2327、2361、2859、2926、3618 cm^{-1} 附近有 6 个吸收峰;焰熔法合成尖晶石在 2030、2378、2733、2853、2924、3067、3360、3525 cm^{-1} 附近有 8 个吸收峰,其中 1737、2327、2361、2859、2926、2030、2378、2733、2853、2924、3067 cm^{-1} 处的吸收峰是由 Mg—O 晶格振动和金属离子的 M—O 振动引起的,而 3360、3525、3618 cm^{-1} 处的吸收峰是由 O—H 伸缩振动引起的;焰熔法合成的尖晶石在 3360 cm^{-1} 和 3525 cm^{-1} 附近为凹谷吸收肩带,天然尖晶石无此特征。

3.3 X 射线荧光光谱特征

由于合成宝石与天然宝石生长的物化条件、生长环境、致色或杂质元素等存在一定差异,因此,本

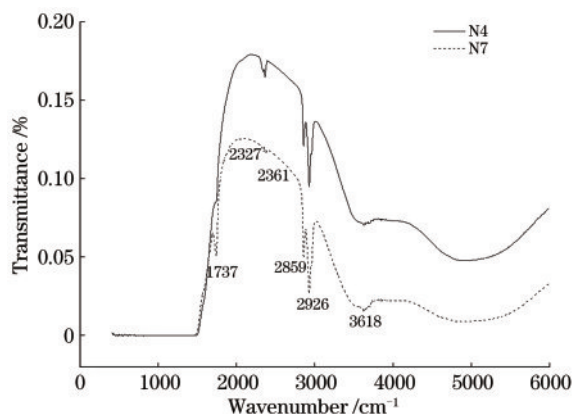


图 3 天然尖晶石的近红外光谱

Fig. 3 Near infrared spectra of natural spinels

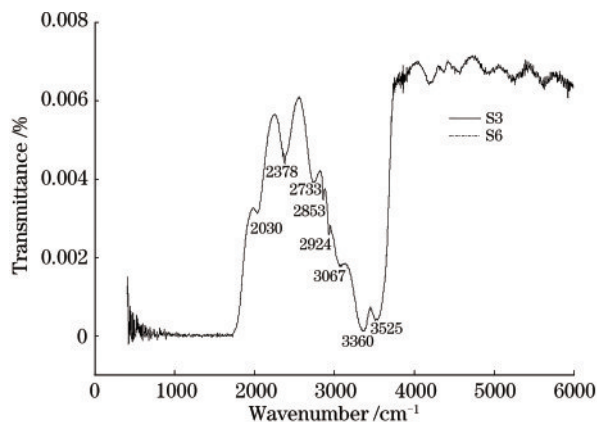


图 4 焰熔法合成尖晶石的近红外光谱

Fig. 4 Near infrared spectra of flame-melting synthetic spinels

文利用 X 射线荧光光谱仪 (XRF) 对样品进行成分分析, 分析结果如图 5~6 所示。分析后可以发现: 天然尖晶石和焰熔法合成尖晶石中所含的元素存在差异, 天然尖晶石中含有 Fe、V、Ca、Cr、Zn 元素, 焰熔法合成尖晶石中含有 Fe、Ti、Co、V、Cr 元素。焰熔法合成尖晶石中所含的 V、Cr、Fe 等元素含量

与天然尖晶石中的不同, 从而导致其与天然尖晶石的颜色存在差异, 而且焰熔法合成尖晶石中 Ti、V、Cr、Co、Fe 等元素的含量也不相同, 因此各样品的颜色也不相同。天然尖晶石样品中含有 Zn 和 Ca 元素, 而焰熔法合成尖晶石样品中均未检测到 Zn 和 Ca 元素。

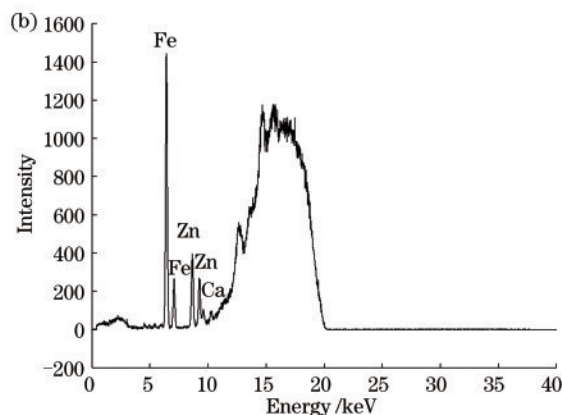
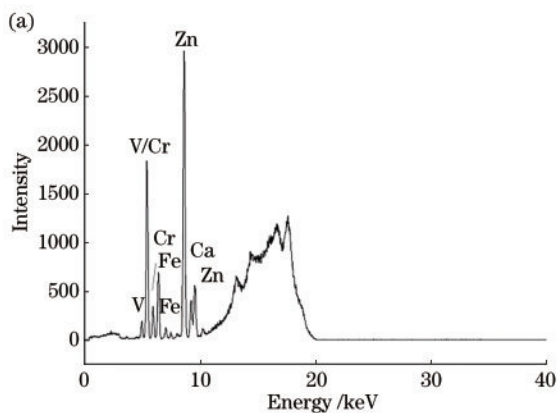


图 5 天然尖晶石的 XRF 光谱。(a) N9 样品; (b) N5 样品

Fig. 5 XRF spectra of natural spinels. (a) Sample N9; (b) sample N5

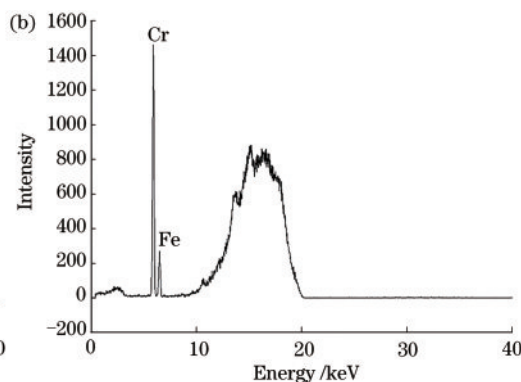
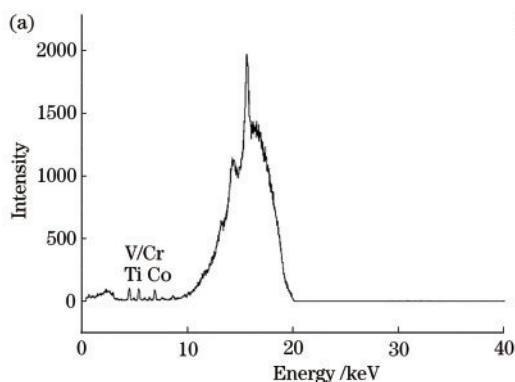


图 6 焰熔法合成尖晶石的 XRF 光谱。(a) S1 样品; (b) S4 样品

Fig. 6 XRF spectra of flame-melting synthetic spinels. (a) Sample S1; (b) sample S4

3.4 吸收光谱特征

对样品进行致色机理研究, 研究结果表明: 不同色系样品的反射光谱存在显著差异, 结果如图 7~8 所示。对图 7~8 进行分析后发现: 天然红色系列尖晶石在 470、677、687、698、707、718 nm 附近产生了吸收, 天然紫色系列尖晶石在 435 nm 和 485 nm 附近有弱吸收, 天然蓝色系列尖晶石在 470 nm 附近有弱吸收, 焰熔法合成的蓝色系列尖晶石在 494、550、610、691 nm 附近有吸收峰, 焰熔法合成的绿色系列尖晶石在 432、466、515 nm 附近有吸收峰, 其中 677、687、691、698、707、718 nm 处吸收峰对应的光子能量分别为 1.84、1.81、1.80、1.78、1.75、1.73 eV。产生吸收的原因如下: Cr^{3+} 从 ${}^4\text{A}_2$ (基态) 跃迁到 ${}^2\text{E}$, 550 nm 和 610 nm 处的吸收峰对应的光子能量分别为 2.26 eV 和 2.00 eV, 这两处吸收峰是 Co^{2+} 从 $\text{T}_{1g}(\text{E})$ 跃迁到 $4\text{T}_{1g}(\text{P})$ 产生的弱吸收宽带; 466、470、485、494 nm 吸收峰对应的光子能量分别为 2.66、2.64、2.56、2.54 eV, 蓝区吸收带是由 Fe^{3+} 外层电子从 ${}^6\text{A}_{1g}$ 跃迁到

${}^4\text{A}_{1g}$ 引起的; 432 nm 和 435 nm 处吸收峰对应的光子能量分别为 2.88 eV 和 2.86 eV, 这两处吸收峰是 V^{3+} 从 ${}^3\text{T}_{1g}$ 跃迁到 ${}^3\text{T}_{1g}({}^3\text{P})$ 产生的紫区吸收峰。分析后可以得出, 天然红色系列尖晶石的致色原因与元素 Cr、Fe、V 相关, 天然蓝色系列、紫色系列尖晶石的致色原因都与元素 Fe 相关, 合成绿色系列、蓝色系列尖晶石的致色原因都与元素 Fe 和 Co 相关。此外, 合成蓝色系列尖晶石的致色原因还与元素 Cr 相关, 致色元素分析结果与成分分析结果一致。

3.5 拉曼光谱特征

尖晶石含有 Cr、Mg、Fe、Zn、Mn 等元素, 其化学式为 MgAl_2O_4 , 为等轴晶系, 空间群为 $\text{O}_h^7 - \text{Fd}3\text{m}$, 其简正振动模式为 $T_g = \text{A}_{1g} + 2\text{A}_{2u} + \text{E}_g + \text{F}_{1g} + 3\text{F}_{2g} + 4\text{F}_{1u} + 2\text{F}_{2u}$, 其中 A_{1g} 、 E_g 、 F_{2g} 为拉曼活性振动模式^[22]。每个样品测试 2~4 个点, 共收集 44 张拉曼图谱。天然尖晶石和焰熔法合成尖晶石的拉曼光谱如图 9~10 所示, 可以看出: 天然尖晶石的拉曼位移

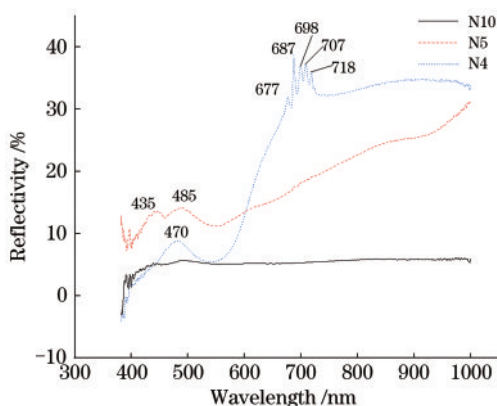


图 7 天然尖晶石的反射光谱

Fig. 7 Reflection spectra of natural spinels

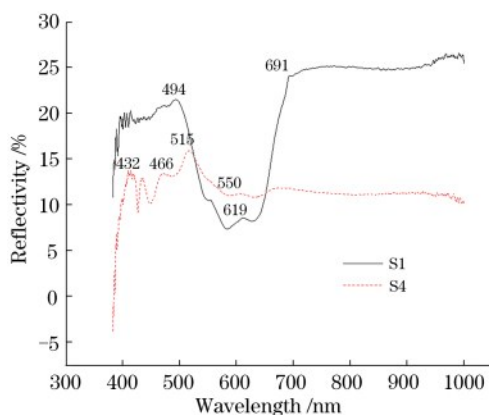


图 8 焰熔法合成尖晶石的反射光谱

Fig. 8 Reflection spectra of flame-melting synthetic spinels

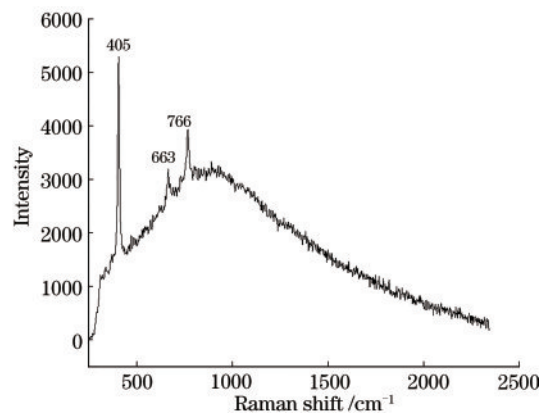


图 9 天然尖晶石的拉曼光谱

Fig. 9 Raman spectrum of natural spinel

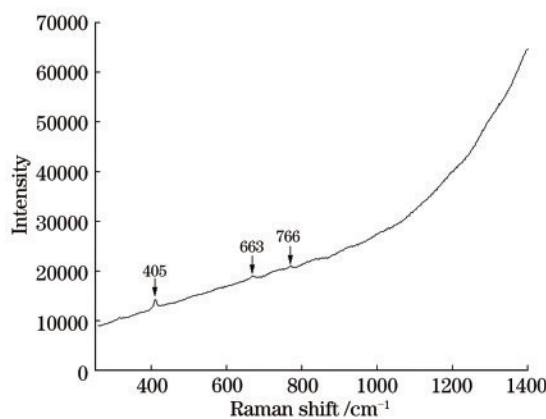


图 10 焰熔法合成尖晶石的拉曼光谱

Fig. 10 Raman spectrum of flame-melting synthetic spinel

主要在 405、663、766 cm^{-1} 附近,其中 405 cm^{-1} 处的拉曼谱峰属于 F_{1u} 振动,663 cm^{-1} 处的拉曼谱峰属于 E_g 振动模式,766 cm^{-1} 处的拉曼谱峰属于 A_{1g} 振动模式,Al—O 弯曲振动为尖晶石特征拉曼谱峰^[18];焰熔法合成尖晶石的拉曼位移主要在 405、663、766 cm^{-1} 附近,与天然尖晶石的拉曼位移一致。由于受到荧光的干扰,焰熔法合成尖晶石的拉曼谱峰强度较低,相对于天然尖晶石而言极不明显。

3.6 半峰全宽

半峰全宽值与实验样品的结晶度、生长环境和晶格内应力有关。合成尖晶石的温压条件比自然环境下生长的天然尖晶石的温压条件更理想,晶格应力较小,相应的声子寿命较长,半峰全宽的变化范围较大。采用 Origin 软件对拉曼光谱 Al—O 弯曲振动产生的谱峰(位于 405 cm^{-1})进行洛伦兹拟合,拟合结果如图 11~12 所示,拟合结果的误差 R 控制在 $R < 0.5$ 范围内。

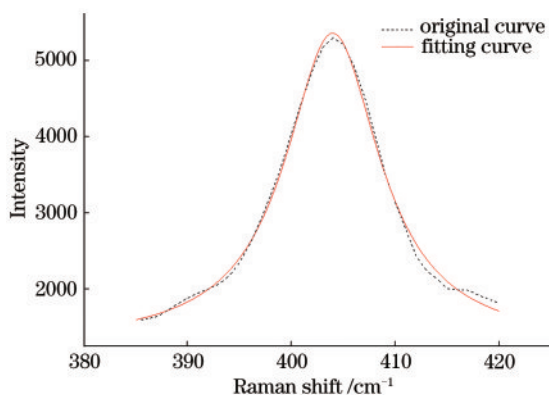


图 11 天然尖晶石的拟合曲线

Fig. 11 Fitting curve of flame-melting natural spinel

天然尖晶石和焰熔法合成尖晶石的半峰全宽(FWHM)如表 2 所示。采用社会科学统计软件 SPSS 对半峰全宽值进行单因素方差分析,结果保留三位小数,方差分析结果如表 3~4 所示。分析后发现,天然尖晶石半峰全宽的平均值高于焰熔法合成尖晶石,其显著性概率为 $0 (< 0.05)$,说明天然尖

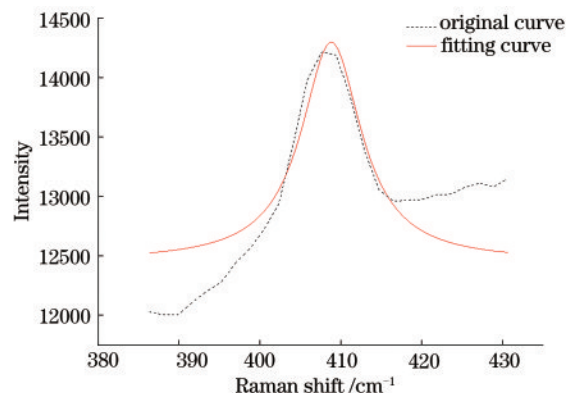


图 12 焰熔法合成尖晶石的拟合曲线

Fig. 12 Fitting curve of flame-melting synthetic spinel

表 2 尖晶石的半峰全宽

Table 2 FWHM of spinels

Sample No.	FWHM/ cm^{-1}
N1	13.8, 12.5
N2	11.3, 11.3
N3	12.0, 13.4
N4	10.7, 10.0
N5	11.4, 10.8, 11.9
N6	10.7, 11.7
N7	10.4, 10.8
N8	10.4, 12.0, 11.6
N9	13.3, 14.3
N10	10.6, 11.9
S1	13.9, 7.4, 7.7, 2.8
S2	2.9, 3.7, 5.3
S3	6.9, 3.0, 8.8, 6.8
S4	5.5, 3.5, 4.3, 4.0
S5	1.3, 4.6, 3.9
S6	5.0, 2.1, 3.8, 7.7

晶石和焰熔法合成尖晶石的半峰全宽值存在显著差异。天然尖晶石的半峰全宽均在 10.0 cm^{-1} 以上,焰熔法合成尖晶石的半峰全宽在 10.0 cm^{-1} 以下,可为鉴别天然尖晶石和焰熔法合成尖晶石提供依据。

表 3 天然尖晶石和焰熔法合成尖晶石的描述统计量

Table 3 Descriptive statistics of natural spinel and flame-melting synthetic spinel

Item	Number of FWHM point	Average of FWHM	Bias of FWHM	Error of FWHM	Confidence interval		Minimum of FWHM	Maximum of FWHM
					Lower limit	Upper limit		
Natural spinel	22	11.673	1.176	0.251	11.152	12.194	10.00	14.30
Synthetic spinel	22	5.223	2.792	0.595	3.985	6.461	1.30	13.90
Total	44	8.448	3.889	0.586	7.265	9.630	1.30	14.30

表 4 天然尖晶石和焰熔法合成尖晶石的方差分析
Table 4 ANOVA of natural spinel and flame-melting synthetic spinel

Item	Sum of squares	Degree of freedom	Mean square	F	Sig.
Interblock	457.628	1	457.628	99.741	0
Group	192.702	42	4.588		
Total	650.330	43			

4 结 论

本文以天然尖晶石和焰熔法合成尖晶石为研究对象,通过常规宝石学测试以及傅里叶变换红外光谱、X射线荧光光谱、吸收光谱和激光拉曼光谱系统研究了尖晶石的分子结构、化学成分、致色机理,得出的结论如下:

1)焰熔法合成尖晶石的常规宝石学分析结果与天然尖晶石的基本一致;

2)焰熔法合成尖晶石在 3360 cm^{-1} 和 3525 cm^{-1} 处有凹谷吸收肩带,天然尖晶石无此特征;

3)天然尖晶石样品中均存在 Zn 和 Ca 元素,焰熔法合成尖晶石样品中均未检测到 Zn 和 Ca 元素;

4)天然红色系列尖晶石的致色原因与元素 Cr、Fe、V 相关,天然蓝色系列、紫色系列尖晶石的致色原因都与元素 Fe 相关,合成绿色系列、蓝色系列尖晶石的致色原因都与元素 Fe 和 Co 相关,此外,合成蓝色系列尖晶石的致色原因还与元素 Cr 相关;

5)天然尖晶石和焰熔法合成尖晶石的拉曼位移一致,但由于受到荧光的干扰,焰熔法合成尖晶石的拉曼谱强度较低,相对于天然尖晶石而言极不明显;

6)天然尖晶石的半峰全宽均在 10.0 cm^{-1} 以上,焰熔法合成尖晶石的半峰全宽在 10.0 cm^{-1} 以下。

总之,光谱特征可以用于鉴别天然尖晶石和焰熔法合成尖晶石,该方法客观直接且简单无损。

参 考 文 献

[1] Li Y L, Xue Q F, Li L P, et al. Gemology course [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2011.
李娅莉,薛秦芳,李立平,等.宝石学教程[M].武汉:中国地质大学出版社,2011.

[2] He X M, Shen C Q. Synthetic technology of gemstones[M]. 2nd ed. Beijing: Chemical Industry Press, 2010.
何雪梅,沈才卿.宝石人工合成技术[M].2版.北京:化学工业出版社,2010.

[3] Xie Y H. Gemological character and analysis on composition of spinel with different colors from Burma[J]. Jewellery Science and Technology, 2003, 15(1): 56-57
谢意红.不同颜色缅甸尖晶石的宝石学特征及其成分分析[J].珠宝科技,2003,15(1):56-57

[4] Yang Y. Gemological characteristics of red spinels [J]. Shanxi Science and Technology, 2011, 26(1): 92-93.
杨云.红色尖晶石的宝石学特征研究[J].山西科技,2011,26(1):92-93.

[5] Zhang S Y, Shen X T. Characteristic of natural cobalt blue spinel[J]. Journal of Gems & Gemmology, 2018, 20(S1): 24-26.
张舒妍,沈锡田.天然钴尖晶石的宝石学和光谱学特征[J].宝石和宝石学杂志,2018,20(S1):24-26.

[6] Zhu J R, Yu X Y. Inclusions of spinel from Burma [J]. Journal of Gems & Gemmology, 2018, 20 (S1): 18-23.
朱静然,余晓艳.缅甸尖晶石的包裹体成分[J].宝石和宝石学杂志,2018,20(S1):18-23.

[7] Liu X, Qin Y. Identification of natural blue spinel and its imitations [J]. Hunan Nonferrous Metals, 2020, 36(3): 77-80.
刘欣,秦毅.天然蓝色尖晶石及其仿冒品的鉴别[J].湖南有色金属,2020,36(3):77-80.

[8] D'Ippolito V, Andreozzi G B, Hålenius U, et al. Color mechanisms in spinel: cobalt and iron interplay for the blue color [J]. Physics and Chemistry of Minerals, 2015, 42(6): 431-439.

[9] Bersani D, Lottici P P. Applications of Raman spectroscopy to gemology[J]. Analytical and Bioanalytical Chemistry, 2010, 397(7): 2631-2646.

[10] D'Ippolito V. Linking crystal chemistry and physical properties of natural and synthetic spinels: an UV-Vis-NIR and Raman study [D]. Roma: Sapienza University, 2013.

[11] Zu E D, Sun Y D, Zhang P X. The analysis of natural and synthetic ruby by Raman spectra[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2010, 30(8): 2164-2166.
祖恩东,孙一丹,张鹏翔.天然、合成红宝石的拉曼

- 光谱分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2010, 30(8): 2164-2166.
- [12] Kang Y N, Tian Y H, Zu E D. Analysis of natural and synthetic sapphire by Raman spectra[J]. Journal of Kunming University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2015, 40(6): 20-22,49. 康亚楠, 田云辉, 祖恩东. 天然蓝宝石与合成蓝宝石的拉曼光谱研究[J]. 昆明理工大学学报(自然科学版), 2015, 40(6): 20-22,49.
- [13] Cao P, Zu E D. Infrared and Raman spectrum analysis of natural alexandrite and synthetic alexandrite by pulling method [J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 2016, 36(1): 8-11. 曹盼, 祖恩东. 天然变石和提拉法合成变石的红外-拉曼光谱分析[J]. 矿物岩石, 2016, 36(1): 8-11.
- [14] Cao P, Kang Y N, Zu E D. Study on Raman spectrum of natural emerald and synthetic emerald by hydrothermal method [J]. The Journal of Light Scattering, 2016, 28(1): 42-44. 曹盼, 康亚楠, 祖恩东. 天然祖母绿和水热法合成祖母绿的拉曼光谱分析[J]. 光散射学报, 2016, 28(1): 42-44.
- [15] Cao P, Yu L, Zu E D. Study on Raman spectrum of natural crystal and synthetic crystal by hydrothermal method [J]. The Journal of Light Scattering, 2017, 29(1): 50-53. 曹盼, 虞澜, 祖恩东. 天然水晶和水热法合成水晶的拉曼光谱分析[J]. 光散射学报, 2017, 29(1): 50-53.
- [16] Zhou Y Y, Xiao Y C, Sun L J, et al. Optical-fiber fluorescent probes [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(1): 010003. 周艳焰, 肖永川, 孙力军, 等. 光纤荧光探针[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(1): 010003.
- [17] Xu L, Zhang Z R, Dong F Z, et al. Analytical method of spectral overlapping interference using laser absorption spectroscopy [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(19): 193003. 许丽, 张志荣, 董凤忠, 等. 激光吸收光谱中谱线重叠干扰的解析方法[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(19): 193003.
- [18] Wang H, Zhao D P, Liu R H, et al. Compatible stealth photonic crystal for visible-light, far-infrared, and multi-wavelength lasers [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(18): 181602. 王航, 赵大鹏, 刘瑞煌, 等. 可见光、远红外与多种激光兼容的隐身光子晶体[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(18): 181602.
- [19] Liu J, Li J X, Bai C X, et al. Theory and method of Fourier transform hyperspectral Mueller matrix imaging [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(7): 0711004. 刘杰, 李建欣, 柏财勋, 等. 傅里叶变换高光谱 Mueller 矩阵成像理论与方法[J]. 光学学报, 2020, 40(7): 0711004.
- [20] Qi L J, Yuan X Q, Cao S. Representation and application of infrared reflection spectra of gems [J]. Journal of Gems & Gemmology, 2005, 7(4): 21-25. 亓利剑, 袁心强, 曹姝. 宝石的红外反射光谱表征及其应用[J]. 宝石和宝石学杂志, 2005, 7(4): 21-25.
- [21] Li S. Application of Fourier transform infrared spectroscopy and Raman spectroscopy in gemstone identification [J]. Rock Mineralogy, 2002, 21(S1): 154-156. 李胜. 傅立叶红外光谱及拉曼光谱技术在宝玉石鉴定方面的应用[J]. 岩石矿物学, 2002, 21(S1): 154-156.
- [22] Xu P C, Li R B. Raman spectroscopy in geosciences [M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 1996. 徐培苍, 李如璧, 等. 地学中的拉曼光谱[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1996.