

# 改色处理紫红色钻石的光谱学特征及鉴定方法

叶爽<sup>1</sup>, 陈美华<sup>1\*</sup>, 吴改<sup>2</sup>, 何爽<sup>1</sup>

1. 中国地质大学(武汉)珠宝学院, 湖北 武汉 430074

2. 武汉大学动力与机械学院, 湖北 武汉 430072

**摘要** 以市场上销售的国内改色紫红色圆刻面型钻石为研究对象, 通过对其光谱学特征进行分析, 确定了此类紫红色改色处理钻石的鉴定。样品颜色呈现不同饱和度的紫红色, 净水称重法测试比重为 3.52, 放大观察, 样品 DR-2 与 DR-3 的部分刻面光泽较弱, 显示了未被重新抛光的严重烧蚀区域, 石墨化沿内应力断裂明显, 其表面可能经过高温高压处理。365nm 长波紫外下, 均呈现蓝色、橙红色、黄色和绿色混合的白垩状荧光外观, 无磷光现象, 而天然紫红色钻石为蓝色荧光或无荧光。宽频诱导发光图像仪 GV5000 深紫外下均呈现橙红色和蓝色混合荧光, 无磷光现象。红外光谱中红外区均显示集体氮相关的 A 中心和 B 中心, 归类为 IaAB 型, 且具有 H1a 辐照退火相关的特征峰, 红外光谱近红外区均显示 H1b, H1c 辐照退火相关的特征峰与 H<sub>2</sub> 中心的特征峰。紫外可见近红外分光光度计均显示明显的 NV<sup>-</sup> 中心, H<sub>2</sub> 中心和 806 nm 吸收峰, 400~460 和 570 nm 宽带处反射率的变化分别与 N<sub>3</sub> 中心和 NV<sup>0</sup> 中心相关, 明显的 NV<sup>-</sup> 中心在天然紫红色钻石中极少发现, H<sub>2</sub> 中心指示可能经过高温高压处理, 可见光范围内对红光和蓝光的吸收较弱, 所以呈现为紫红色外观。三维荧光光谱和光致发光光谱均显示出 N<sub>3</sub>, H<sub>3</sub>, H<sub>4</sub>, NV<sup>0</sup>, NV<sup>-</sup> 相关的发光中心, N<sub>3</sub> 贡献蓝色荧光, H<sub>3</sub> 和 H<sub>4</sub> 贡献黄绿色荧光, NV<sup>0</sup> 与 NV<sup>-</sup> 贡献橙红色荧光。综合分析, 三颗样品均为天然成因的钻石, 后期经过高温高压, 辐照, 退火等多重处理, 其紫红色主要由 N<sub>3</sub> 中心, NV<sup>0</sup> 中心与 NV<sup>-</sup> 中心共同贡献。

**关键词** 紫红色钻石; 谱学特征; 辐照退火; 高温高压处理; NV 中心

**中图分类号:** P575.4 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2022)01-0191-06

## 引言

钻石被誉为宝石之王, 而彩色钻石更因其绚丽的外观、稀少的产量受到消费者的追捧。20 世纪初, 国外已开始对钻石改色技术进行研究, 目前国外公司如 Lotus Color Inc. 以及 Lucent Jewelers Inc. 已经可以批量生产及销售颜色丰富的彩钻石产品<sup>[1-2]</sup>, 与之相比, 国内钻石改色技术的起步相对较晚, 因此对其相关产品的研究也相对较少。天然粉色-红色系列钻石的颜色主要被认为与塑性变形有关, 而人工处理而成的粉色-红色则主要通过引入 NV 缺陷来使钻石呈色, 通过控制 NV 缺陷的浓度来调整粉色-红色的饱和度。虽然研究人员对人工处理粉色-红色钻石有较为丰富的报道, 但其研究样品均来自于国外公司, 而对国内钻石改色技术的报道相对较少, 因此, 其产品相关的谱学特征研究也不够全

面。本文通过对一批国内公司改色的紫红色钻石进行基础宝石学和光谱学研究, 分析了其改色方法和致色机理, 最终确定了此类紫红色改色处理钻石的鉴定特征, 从而能够对实验室中此类钻石产品的检测提供参考和指示。

## 1 实验部分

### 1.1 样品

测试样品为 3 颗圆刻面型钻石, 均来自国内一家钻石改色公司, 样品编号为 DR-1, DR-2, DR-3, 外观如图 1 所示。样品 DR-1, DR-2 和 DR-3 均为紫红色色调, 明度依次递减而饱和度递增, 密度均为  $3.52 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ , 重量分别为 0.32, 0.14 和 0.15 ct。

### 1.2 方法

宝石学常规测试实验在中国地质大学(武汉)珠宝学院完

收稿日期: 2020-12-01, 修订日期: 2021-03-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(62004141)资助

作者简介: 叶爽, 1995 年生, 中国地质大学(武汉)珠宝学院硕士研究生 e-mail: 1010199750@qq.com

\* 通讯作者 e-mail: mhchengp@126.com

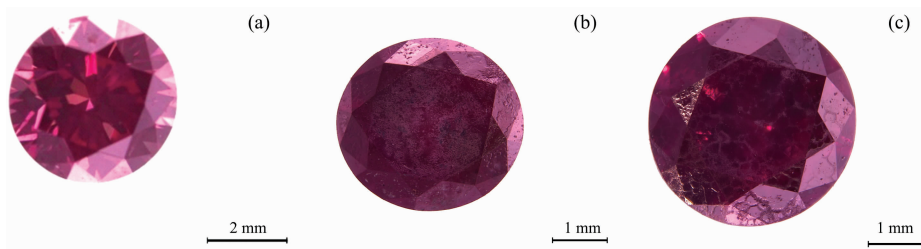


图 1 紫红色钻石样品

(a): 样品 DR-1; (b): DR-2; (c): DR-3

Fig. 1 Samples of purplish red diamond

(a): Sample DR-1; (b): Sample DR-2; (c): Sample ccDR-3

成。深紫外荧光观察使用的是 GV5000 宽频诱导发光图像仪,采集时间 329 ms。显微拍照使用的是 Leica M205A 显微照相系统,曝光 6.0 ms,增益 1.8x,饱和度 0.85,伽马 0.69。红外光谱测试使用的是 Bruker 公司的 Vertex80 型傅里叶变换红外光谱仪,采用反射法分别测试 400~4 000 和 4 000~11 000  $\text{cm}^{-1}$ ,扫描次数 32 次,分辨率 4  $\text{cm}^{-1}$ 。紫外可见近红外吸收光谱使用的是 UV5000X 的紫外可见分光光度计,采用反射法,测试范围 200~1 000 nm,分辨率为 1 nm,纵坐标用 R 表示。三维荧光光谱采用的是 JASCO 公司 FP-8500 型荧光光谱仪测得,模式为 Emission,激发光谱与发射光谱的带宽 5 nm,响应时间为 0.1 s, sensitivity 为 Medium,检测器扫描速度为 2 000  $\text{nm} \cdot \text{min}^{-1}$ ;激发光谱范围为 220~738 nm,数据间隔为 2 nm;发射光谱采集范围为 240~750 nm,数据间隔为 1 nm。光致发光光谱采用的是

HORIBA 公司 LabRAM HR Evolution Sincerity 型激光拉曼光谱仪,分别使用 325 nm 和 532 nm 激光器进行测试。

## 2 结果与讨论

### 2.1 宝石学特征

宝石显微镜下对样品的内外部显微特征进行放大观察,其中 DR-2 和 DR-3 的表面特征显示经高温高压处理的证据,具体见图 2。在样品 DR-2 和 DR-3 的表面,某些刻面显示了未被重新抛光的严重烧蚀区域,呈现出较弱的光泽,部分区域呈沟壑状和突起状,有黑色凹坑,内部有黑色包裹体。此外石墨化沿内应力断裂也很明显,这可能是由应力裂缝的壁转化为石墨时产生的膨胀压力引起的,裂缝也显示了被蚀刻的内表面,这些都是经过高温高压处理的证据<sup>[3-4]</sup>。

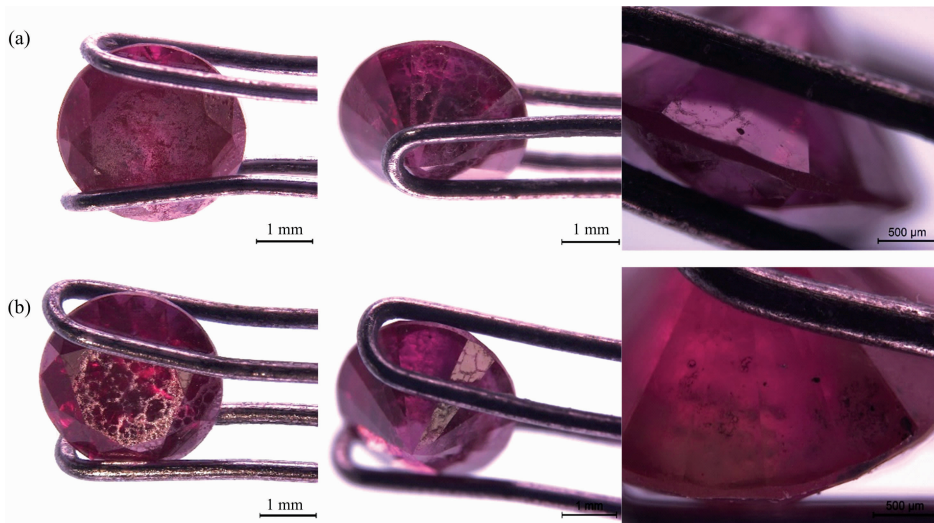


图 2 钻石样品经高温高压处理的证据

(a): 样品 DR-2; (b): 样品 DR-3

Fig. 2 Evidence of HPHT treatment for diamond samples

(a): Sample DR-2; (b): Sample DR-3

采用灯箱拍照,在长波紫外灯(365 nm 波长)的激发下,所有样品均呈现混色荧光颜色的白垩状外观,是由橙色、黄色、绿色和蓝色荧光区组合而成的(见图 3),这种反应在天然颜色成因的粉色和紫红色钻石中未见,天然颜色成因的紫

红色钻石通常为蓝色荧光或无荧光现象<sup>[5]</sup>。

### 2.2 光谱学特征

#### 2.2.1 宽频诱导发光图像

GV5000 宽频诱导发光光谱仪主要由 183~240 nm 宽频

紫外光源、滤光片、显微放大系统、二维平台、CCD 图像传感器和光栅分光系统等组成。所有样品在 GV5000 下都呈现橙红色和蓝色夹杂的荧光，无磷光现象(见图 4)。橙红色的

荧光与 NV 中心相关；而蓝色荧光与 N<sub>3</sub> 中心相关，指示钻石样品很可能为天然成因的钻石，而非合成钻石。

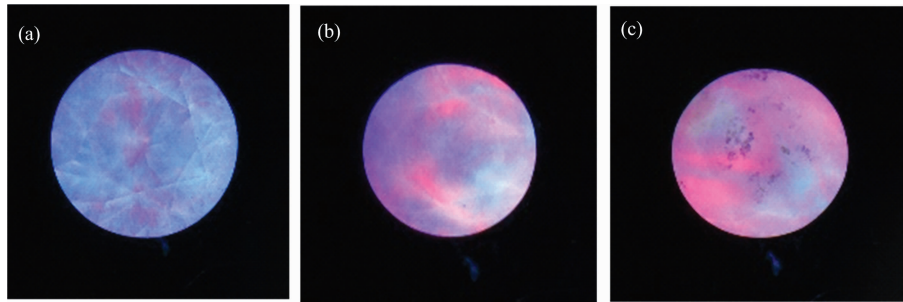


图 3 长波紫外灯下钻石样品的荧光现象

(a): 样品 DR-1; (b): 样品 DR-2; (c): 样品 DR-3

Fig. 3 Fluorescence phenomenon of diamond samples under long-wavelength UV lamp

(a): Sample DR-1; (b): Sample DR-2; (c): Sample DR-3

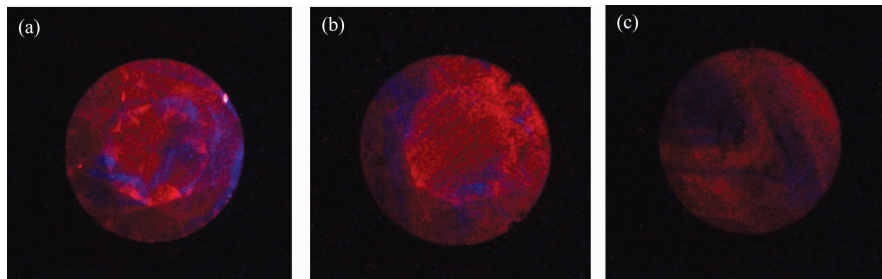


图 4 GV5000 下钻石样品的荧光现象

(a): 样品 DR-1; (b): 样品 DR-2; (c): 样品 DR-3

Fig. 4 Fluorescence phenomenon of diamond samples under GV5000

(a): sample DR-1; (b): sample DR-2; (c): sample DR-3

### 2.2.2 红外光谱

中红外区测试[图 5(a)]结果表明，样品 DR-1, DR-2, DR-3 均为 IaAB 型钻石，均具有 1 010, 1 172, 1 282, 1 330 和 1 450 cm<sup>-1</sup>吸收峰，其中 1 282 cm<sup>-1</sup>为 A 中心的特征吸收峰，1 172 cm<sup>-1</sup>为 B 中心的特征吸收峰<sup>[6]</sup>，1 450 cm<sup>-1</sup>为 H1a 的吸收峰，H1a 指示样品经过辐照和退火处理<sup>[7]</sup>，1 010 与 1 330 cm<sup>-1</sup>均为与{111}面滑移相关的吸收峰，其中 1 010

cm<sup>-1</sup>与金刚石晶格中平行于{111}面上的位错环[N<sub>s</sub>(111)，称 B1 心]有关<sup>[8]</sup>。此外，DR-1 和 DR-2 测出 1 405 和 3 107 cm<sup>-1</sup>与氢相关的吸收峰，其中 1 405 cm<sup>-1</sup>为 C—H 弯曲振动峰，3 107 cm<sup>-1</sup>归属于 C—H 伸缩振动峰<sup>[8]</sup>，也有学者认为是 VN<sub>3</sub>H 引起的<sup>[9]</sup>；而 DR-3 只测出 1 405 cm<sup>-1</sup>与氢相关的吸收峰。

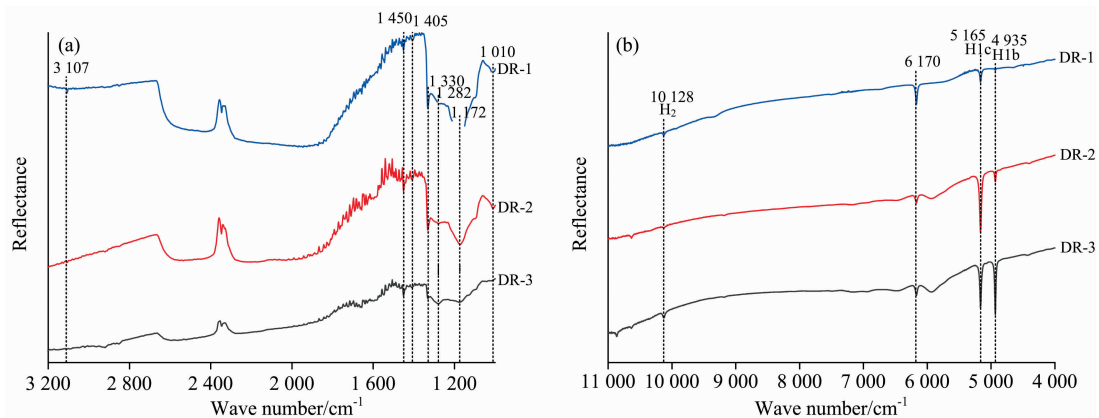


图 5 钻石样品的中红外(a)与近红外(b)光谱(为清晰起见，光谱垂直偏移)

Fig. 5 Mid-infrared (a) and near-infrared (b) spectra of diamond samples (The spectra are offset vertically for clarity)

近红外测试[图 5(b)]结果表明, 样品 DR-1, DR-2, DR-3 均具有  $4\ 935$ ,  $5\ 165$ ,  $6\ 170$  和  $10\ 128\ \text{cm}^{-1}$  吸收峰。 $4\ 935\ \text{cm}^{-1}$  为 H1b 的吸收峰,  $5\ 165\ \text{cm}^{-1}$  为 H1c 的吸收峰, H1b 和 H1c 均与辐照退火处理有关<sup>[5]</sup>。而  $6\ 170\ \text{cm}^{-1}$  吸收峰前人也有报道过<sup>[10]</sup>, 具体归属尚未确定。 $10\ 128\ \text{cm}^{-1}$  为  $\text{H}_2$  中心的吸收峰,  $\text{H}_2$  中心可能与高温高压处理有关<sup>[11]</sup>。

通过中红外与近红外的测试结果, 分析可知三颗样品均为 IaAB 型钻石, 可能经过高温高压, 辐照, 退火多重联合处理。

### 2.2.3 紫外可见近红外光谱

紫外可见近红外光谱结果如图 6 所示, 所有钻石样品的光谱谱峰位置和峰型基本一致, 均可见明显的  $637\ \text{nm}$  处  $\text{NV}^-$  中心,  $986\ \text{nm}$  处  $\text{H}_2$  中心,  $806\ \text{nm}$  处吸收峰。 $400\sim 460\ \text{nm}$  处的反射率变化主要是由  $\text{N}_3$  中心导致,  $\text{N}_3$  中心吸收蓝色光和紫色光,  $570\ \text{nm}$  宽带处反射率的变化主要是由  $\text{NV}^0$  中心导致。钻石样品的颜色主要与  $\text{N}_3$  中心,  $\text{NV}^0$  中心和  $\text{NV}^-$  中心相关, 可见光范围内, 钻石样品在红光区域和蓝光区域反射率高, 而对红光和蓝光的吸收较低, 混合呈现为紫红色外观。明显的  $\text{NV}^0$  中心和  $\text{NV}^-$  中心在天然颜色成因的紫红色钻石中极少发现<sup>[5]</sup>, 而对天然钻石和合成钻石的改色实验研究中也发现, 通过辐照后退火等方法可以使钻石产生  $\text{NV}$  中心, 通过调节实验参数可以控制  $\text{NV}$  中心的浓度, 进而控制粉色-红色的饱和度。此外, 存在  $\text{H}_2$  中心指示样品可能经过高温高压处理。

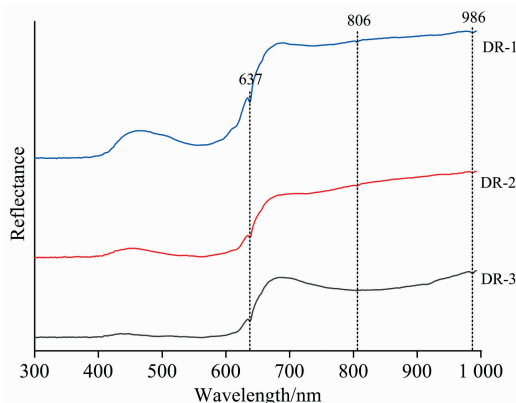


图 6 钻石样品的紫外可见近红外反射光谱 (为清晰起见, 光谱垂直偏移)

Fig. 6 UV-VIS-NIR reflectance spectra of diamond samples (The spectra are offset vertically for clarity)

### 2.2.4 三维荧光光谱

三维荧光光谱测试分析结果见图 7。三维荧光光谱中出现了与多种类型缺陷相关的荧光峰。其中  $416$ ,  $429$ ,  $439$  和  $450\ \text{nm}$  的谱峰与  $\text{N}_3$  中心相关,  $496$  和  $512\ \text{nm}$  的谱峰与  $\text{H}_4$  中心相关<sup>[11]</sup>,  $503$  和  $520\ \text{nm}$  的谱峰与  $\text{H}_3$  中心相关<sup>[12]</sup>,  $575$  与  $637\ \text{nm}$  的谱峰分别为  $\text{NV}^0$  中心与  $\text{NV}^-$  中心相关<sup>[13]</sup>。

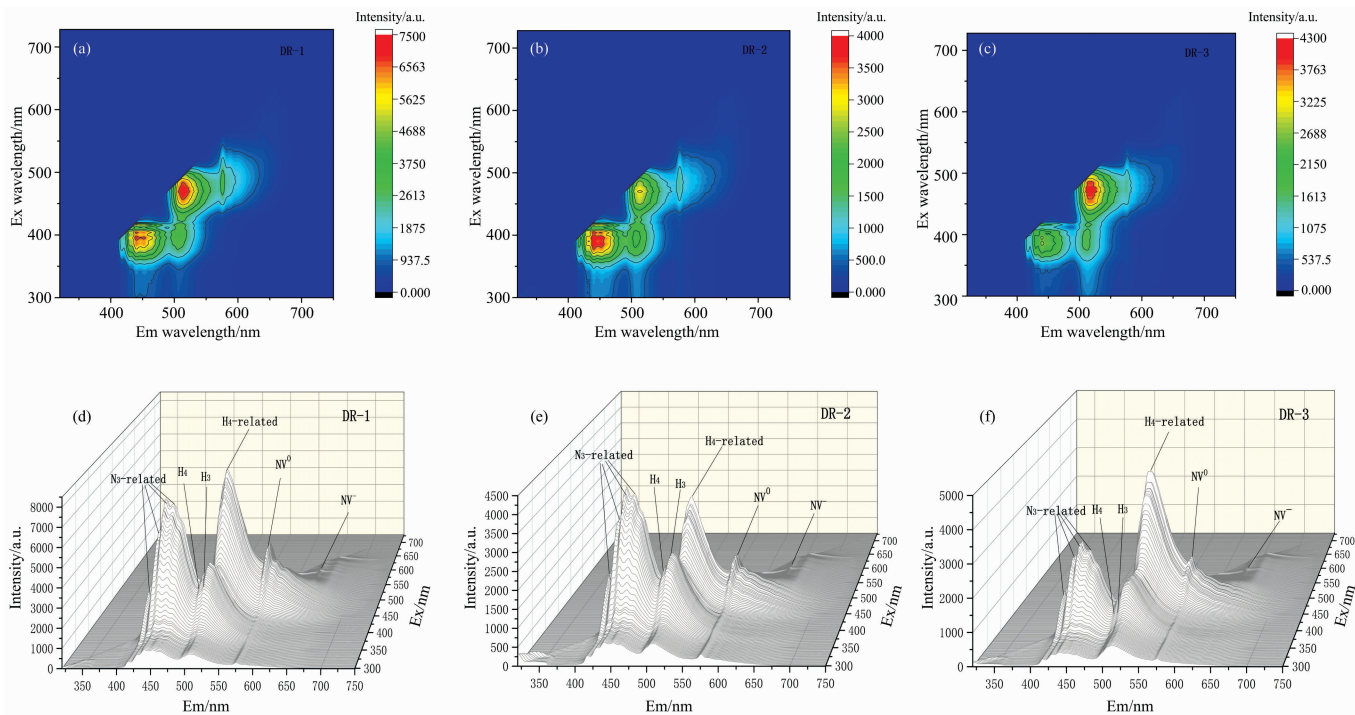


图 7 钻石样品的荧光等高线图(a, b, c)与三维荧光立体图(d, e, f)

(a), (d): 样品 DR-1; (b), (e): 样品 DR-2; (c), (f): 样品 DR-3

Fig. 7 Fluorescence spectra of Contour map (a, b, c) and 3D stereogram (d, e, f) for samples

(a, d): Sample DR-1; (b, e): Sample DR-2; (c, f): Sample DR-3

$\text{N}_3$  中心相关发射在激发波长为  $395\ \text{nm}$  时达到最大值, 激发波长大于  $430\ \text{nm}$  对其几乎没有激发。 $\text{N}_3$  中心的识别发

射出现在  $416\ \text{nm}$ 。这条线以及在  $429$ ,  $439$  和  $450\ \text{nm}$  处具有主峰的宽带发射导致天然钻石典型的蓝色荧光<sup>[11]</sup>。 $\text{H}_4$  中心



由被两个空位隔开的四个氮原子组成(4N+2V), 496 nm 发射峰和 512 nm 宽的发射带, 均在 470 nm 激发时达到最大值, 由此 H<sub>4</sub> 中心导致绿色荧光。H<sub>3</sub> 中心是由被一个空位分开的两个氮原子组成的不带电荷的缺陷(N-V-N)<sup>0</sup>, 503 nm 发射峰和 520 nm 宽的发射带, 在 470 nm 激发时达到最大值, 相比于 H<sub>4</sub> 中心, H<sub>3</sub> 中心的荧光峰向长波侧移动, 并且向长波方向具有更宽的尾部, 因此导致黄绿色荧光而不是 H<sub>4</sub> 中心的绿色荧光<sup>[14]</sup>。575 nm 在 475 nm 激发时达到最大值, 637 nm 在 500 nm 激发时达到最大值, NV<sup>0</sup> 中心和 NV<sup>-</sup> 中心共同导致橙红色荧光。

### 2.2.5 光致发光光谱

分别用 325 和 532 nm 激光器对样品进行光致发光光谱

的采集。在 325 nm 激发下, 测试结果见图 8(a, b, c), 所有样品均显示强烈的 415, 496 和 503 nm 发光峰, 分别为 N<sub>3</sub> 中心, H<sub>4</sub> 中心和 H<sub>3</sub> 中心的零声子线<sup>[14]</sup>; 在 532 nm 激发下, 测试结果见图 8(d, e, f), 所有样品均显示强烈的 575 与 637 nm 发光峰, 分别为 NV<sup>0</sup> 中心与 NV<sup>-</sup> 中心的零声子线, NV<sup>0</sup> 中心和 NV<sup>-</sup> 中心的发光强度没有明显统一的规律。此外, 还出现一些比较弱的发光峰: 429, 439, 512, 520, 588 和 659 nm。429 与 439 nm 也是 N<sub>3</sub> 中心的特征峰, 512 nm 与 H<sub>4</sub> 相关, 520 nm 与 H<sub>3</sub> 相关, 588 nm 通常叠加在 575 nm 的边带上, 可能与 NV<sup>0</sup> 中心有关, 659 nm 可能与 NV<sup>-</sup> 中心相关联<sup>[13]</sup>。

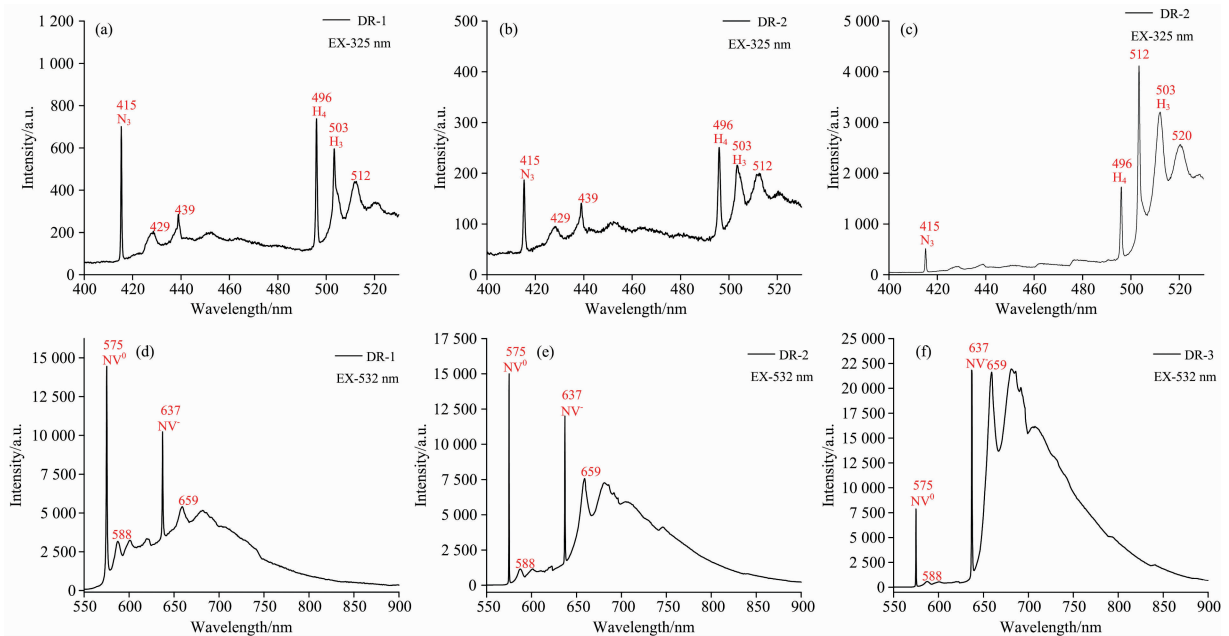


图 8 钻石样品的光致发光光谱(325 nm 激发和 532 nm 激发)

(a): 样品 DR-1, EX 325 nm; (b): 样品 DR-2, EX 325 nm; (c) 样品 DR-3, EX 325 nm;

(d): 样品 DR-1, EX 532 nm; (e): 样品 DR-2, EX 532 nm; (f) 样品 DR-3, EX 532 nm

Fig. 8 Photoluminescence spectra of diamond samples (EX 325 nm and EX 532 nm)

(a): Sample DR-1, EX 325 nm; (b): Sample DR-2, EX 325 nm; (c): Sample DR-3, EX 325 nm;

(d): Sample DR-1, EX 532 nm; (e): Sample DR-2, EX 532 nm; (f): Sample DR-3, EX 532 nm

## 3 结 论

对国内改色的紫红色钻石样品进行一系列的仪器观察与测试, 分析了其改色方法和致色机理, 确定了此类紫红色改色处理钻石的鉴定, 得出以下 4 点结论:

(1) 表面烧蚀和石墨化都指示了钻石样品经过高温高压处理。长波紫外光下呈现白垩状外观, 为蓝色、橙红色与黄绿色的荧光组合, GV5000 下呈现橙红色和蓝色的荧光组合, 均指示其存在多种发光中心。

(2) 红外光谱显示钻石类型为 IaAB 型, 指示经过辐照后退火处理, 并可能经过高温高压处理。紫外可见近红外光谱

显示明显的 NV<sup>-</sup> 中心, H<sub>2</sub> 中心, 806 nm 吸收峰, 400~460 和 570 nm 宽带处反射率的变化分别与 N<sub>3</sub> 和 NV<sup>0</sup> 相关, 紫红色外观主要由 N<sub>3</sub>, NV<sup>0</sup> 与 NV<sup>-</sup> 中心共同贡献。光致发光与三维荧光光谱均显示 N<sub>3</sub>, H<sub>3</sub>, H<sub>4</sub>, NV<sup>0</sup> 和 NV<sup>-</sup> 中心。

(3) 室温条件下使用三维荧光光谱再通过改变激发波长, 就可获得钻石样品激发、发射和荧光强度的三维扫描数据, 快速准确地观察到了 N<sub>3</sub>, H<sub>3</sub>, H<sub>4</sub>, NV<sup>0</sup>, NV<sup>-</sup> 缺陷中心的荧光性质以及荧光最大值和变化情况。

(4) 通过放大观察样品是否存在表面烧蚀损伤和部分钻石相的石墨化现象, 结合红外光谱, 紫外可见近红外光谱, 三维荧光光谱和光致发光光谱的特征, 可以准确地鉴别出此类紫红色改色处理钻石样品。

## References

- [ 1 ] Johnson P, Breeding C M. News from Research, [http://www.gia.edu/research\\_resources/news-from-research/](http://www.gia.edu/research_resources/news-from-research/), 2009-06.
- [ 2 ] Wang W, Smith C P, Hall M S, et al. *Gems & Gemology*, 2005, 41(1): 6.
- [ 3 ] Vins V G, Eliseev A P. *Inorganic Materials: Applied Research*, 2010, 1(4): 303.
- [ 4 ] Shigley J E. *Elements*, 2005, 1(2): 101.
- [ 5 ] QU Meng-wen, SHEN Xi-tian(屈孟雯, 沈锡田). *Journal of Gems & Gemmology(宝石和宝石学杂志)*, 2019, 21(2): 17.
- [ 6 ] Breeding C M, Shigley J E. *Gems & Gemology*, 2009, 45(2): 96.
- [ 7 ] TANG Hong-yun, TU Cai, LU Xiao-ying, et al(汤红云, 涂彩, 陆晓颖, 等). *Shanghai Measurement and Testing(上海计量测试)*, 2013, 40(1): 2.
- [ 8 ] YUAN Zhi-zhong, PENG Ming-sheng, MENG Yu-fei(苑执中, 彭明生, 蒙宇飞). *Acta Mineralogica Sinica(矿物学报)*, 2006, (1): 73.
- [ 9 ] Goss J P, Briddon P R, Hill V, et al. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 2014, 26(14): 145801.
- [10] Collins A T. *The Journal of Gemmology*, 1982, 18(1): 37.
- [11] Luo Y, Breeding C M. *Gems & Gemology*, 2013, 49(2): 82.
- [12] Dobrinets I A. *Springer Series in Materials Science*, 2013, 181(4): 511.
- [13] Shigley J E, Breeding C M. *Gems & Gemology*, 2013, 49(2): 107.
- [14] LI Jian-jun, FAN Cheng-xing, FAN Chun-li(李建军, 范澄兴, 范春丽). *China Gems and Jewelry Academic Conference(中国国际珠宝首饰学术交流会论文集)*, 2017, 338.

## Spectroscopic Characteristics and Identification Methods of Color-Treated Purplish Red Diamonds

YE Shuang<sup>1</sup>, CHEN Mei-hua<sup>1\*</sup>, WU Gai<sup>2</sup>, HE Shuang<sup>1</sup>

1. Gemmological Institute, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China

2. School of Power and Mechanical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China

**Abstract** Based on the analysis of the spectral characteristics of round faceted color-treated purplish-red diamonds from the domestic market, the identification of this kind of diamonds is confirmed. The sample diamonds are purplish-red with different saturation, and the specific gravity of the hydrostatic weighing method is 3.52. Magnification observation shows that partial facets with the weaker luster of DR-2 and DR-3 have ablative areas that are not re-polished, and graphitization is also obvious along with internal stress fracture, both indicating that samples have been treated with high temperature and high pressure. Under the long-wavelength ultraviolet of 365 nm, the chalky fluorescence appearance of blue, orange-red, yellow and green is mixed, and the phosphorescence phenomenon is absent, which is different from the blue fluorescence or no fluorescence phenomenon of nature-colored purplish-red diamonds. Under GV5000, orange-red and blue mixed fluorescence is observed, and the phosphorescence phenomenon is absent. In the mid-infrared spectra, A center and B center, which show aggregation nitrogen correlation, are classified into IaAB type and have characteristic peaks related to H1a radiation annealing, while in the near-infrared spectra, characteristic peaks of H1b, H1c related to irradiation annealing and characteristic peaks of H<sub>2</sub> center are shown. UV-VIS-NIR spectra shows obvious NV<sup>-</sup>, H<sub>2</sub> and 806 nm absorption peak; 400 ~ 460 and 570 nm broadband reflectivity changes are associated with N<sub>3</sub> and NV<sup>0</sup> respectively. Obvious NV<sup>-</sup> is rarely found in natural purplish-red diamonds and H<sub>2</sub> indicates diamonds may be treated with high temperature and high pressure. Furthermore, the low absorption of red light and blue light results in purplish-red appearance. Three-dimension fluorescence spectra and photoluminescence spectra show that N<sub>3</sub>, H<sub>3</sub>, H<sub>4</sub>, NV<sup>0</sup> and NV<sup>-</sup> luminescence centers. N<sub>3</sub> contributes blue fluorescence, H<sub>3</sub> and H<sub>4</sub> contribute yellow-green fluorescence, and NV<sup>0</sup> and NV<sup>-</sup> contribute orange-red fluorescence. According to the comprehensive analysis, the three samples are all diamonds of natural origin that have undergone multiple treatments such as high temperature and high pressure, irradiation and annealing, etc., and the purplish-red color is mainly due to the joint contribution of N<sub>3</sub>, NV<sup>0</sup> and NV<sup>-</sup>.

**Keywords** Purplish red diamond; Spectroscopic characteristic; Irradiation and annealing; High temperature and high pressure treatment; NV center

\* Corresponding author