

# 巴西金刚石的宝石矿物学特征

李雨璇<sup>1</sup>, 黄颖<sup>1,2</sup>, 刘迎新<sup>1</sup>

(1. 中国地质大学(北京) 珠宝学院, 北京 100083; 2. 大连银行股份有限公司北京分行, 北京 100026)

**摘要:**采用常规宝石学测试结合红外光谱、拉曼光谱以及Diamond View™测试,对巴西金刚石开展了常规宝石学、光谱学和荧光特征分析。结果显示,巴西金刚石表面微形貌特征丰富,可见多种形态的生长丘,三角、六边或不规则形态的溶蚀坑以及塑性变形滑移线等特征。巴西金刚石以IaAB型为主(90%以上),N含量在 $400\times10^{-6}$ ~ $1\,700\times10^{-6}$ 范围内,B心转化率介于15%~66%之间,具有高N含量和低-中等N聚集程度的特点。拉曼光谱分析进一步揭示了样品内部均残余应力或者结晶度较差。Diamond View™发光图像显示IaAB型金刚石样品具有蓝色和黄绿色调荧光;IaB型金刚石样品为带有绿色调的蓝色和不均匀的蓝色荧光;IIa型金刚石样品表现为暗橙色和蓝色荧光。

**关键词:**金刚石;宝石学特征;谱学特征;荧光

中图分类号:P575; P578.1<sup>+6</sup>

文献标识码:A

文章编号:1000-6524(2024)03-0685-12

## The gemological and mineralogical characteristics of Brazilian diamond

LI Yu-xuan<sup>1</sup>, HUANG Ying<sup>1,2</sup> and LIU Ying-xin<sup>1</sup>

(1. School of Gemmology, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 2. Dalian Bank Co., Ltd. Beijing Branch 100026, China)

**Abstract:** The Brazilian diamond samples were analyzed by conventional gemological testing instruments combined with Fourier transform infrared spectrometers (FTIR), laser Raman spectroscopy, and Diamond View™. The results revealed that the surface microforms of Brazilian diamonds are extremely diverse, featuring various growth mounds, trigonal, hexagonal, or irregular fusion pits, as well as plastic deformation slip lines. The Brazilian diamond samples are predominantly composed of the IaAB type, accounting for over 90% of the total samples. It exhibits a nitrogen content ranging from  $400\times10^{-6}$ ~ $1\,700\times10^{-6}$  and a B core conversion rate between 15% and 66%. These findings indicate that Brazilian diamond samples are characterized by a high nitrogen content and a low to moderate degree of nitrogen aggregation. Raman spectroscopy analysis shows that there is residual compressive stress or poor crystallinity inside the sample. Diamond View™ luminescence images reveal blue and yellow-green fluorescence is popular in Brazilian IaAB diamonds. Type IaB diamonds exhibit blue fluorescence with green hues and an uneven blue fluorescence. The Type IIa diamond samples exhibit dark orange and blue fluorescence.

**Key words:** diamond; gemological characteristics; spectroscopic characteristics; fluorescence

金刚石是地质学、矿物学和宝石学等领域的研究热点。许多国家和地区都发现了金刚石矿床,其

中巴西是主要的金刚石产出国和出口国,并具有深厚的历史背景(兴江然,2001;黄宣镇,2002;袁姝等,

收稿日期:2024-01-30;接受日期:2024-04-08;编辑:尹淑萍

作者简介:李雨璇(2000- ),女,汉族,硕士研究生,研究方向为宝石矿物学,E-mail:liyuxuan816@163.com;通讯作者:刘迎新(1978- ),女,副教授,主要从事宝石矿物学研究,liuyingxin@cugb.edu.cn。

2011)。自1723年首次发现冲积型金刚石矿床,至19世纪60年代南非发现原生金伯利岩矿床之前,巴西金刚石产量一直稳居全球第一(Svisero, 1995)。

天然金刚石形成于深部地幔,在推动岩石圈地幔、下地幔及在其深部过程的研究方面发挥着不可或缺的重要作用,是地质学研究领域的热点。尽管全球金刚石在晶体形态和表面微形貌上呈现出共性,但具体的形貌比例和组合特征却显著差异。值得注意的是,金刚石内部封存的包裹体在长期的自然历程中维持了相对稳定的状态,既不会因金刚石所处环境的变化而发生改变,也不易受到后期热液作用的改造(赵欣等, 2015)。因此,这些包裹体不仅为揭示金刚石生长时期的地幔环境提供了珍贵线索,还为地质学、地球化学等研究领域提供了独特且宝贵的样本。

巴西金刚石晶形以菱形十二面体为主,辅以不规则形状、聚形以及少量的三角薄片双晶(Kaminsky *et al.*, 2001; Hayman *et al.*, 2005)。其表面微形貌也呈现多样化特征,常见盾形薄层、三角坑(座)、阶梯状生长结构、生长丘、塑性变形滑移线等。此外,多数矿区金刚石表面可见绿色和褐色色斑(Tappert *et al.*, 2006)。巴西金刚石内部常见橄榄石、石榴子石、辉石、硫化物和氧化物等包裹体,还可见方镁石、铁方镁石、钨铁矿和镍、铁镍合金等少见包裹体(Svisero, 1995)。

金刚石是自然界硬度最高的矿物,其中的包裹体极难获取,过往研究多通过机械破坏或燃烧金刚石的方式获取包裹体信息,但这些方法不可避免地导致包裹体受损。本文综合运用宝石显微镜、红外光谱、拉曼光谱以及Diamond View<sup>TM</sup>等技术手段,深入剖析巴西金刚石样品的表面微形貌及其内部包裹体的光谱学特征。通过结合形貌特征与光谱学分析,以及广泛样本的观测,研究巴西金刚石的生长环境,同时为今后金刚石产地的快捷无损鉴定提供实验与数据支持。

## 1 样品及测试

### 1.1 样品及特征

120粒巴西金刚石原石样品购买自钻石商家,总重15.901 ct,将这些样品依次编号为T1至T120。经统计,发现其中53%的样品质量小于0.100 ct。此外,样品中还有2颗产自巴西的花式琢型刻面金刚

石,编号为K1和K2。

肉眼观察和显微镜下放大观察时,大部分巴西金刚石原石样品呈现出无色或深浅不一的黄色、灰色,少数样品则呈现出褐色、绿色或粉色(表1)。这些金刚石的晶形多样,主要以不规则形状、聚形和菱形十二面体为主,部分样品呈现八面体形态。此外,还可见明显的三角薄片双晶和六边形薄片。然而,具有完整原始晶形的样品相对较少,部分样品具有扁平的变形晶形(表1,图1)。值得注意的是,大部分原石样品内部并不纯净,肉眼观察即可发现明显的包裹体。

**表1 巴西金刚石的原石样品颜色、晶形分类与数量统计**  
**Table 1 Color, crystal shape classification, and quantity statistics of Brazilian diamond rough samples**

	数量/颗	比例/%
颜色		
无色系	28	23
黄色系	31	26
灰色系	35	29
褐色系	13	11
绿色系	10	8
粉色系	3	3
晶形		
不规则形状	39	32.5
菱形十二面体	26	21.7
聚形	22	18.3
八面体	11	9.1
三角薄片	6	5.0
六边薄片	4	3.4
扁平变形晶形	12	10.0

### 1.2 测试及方法

样品的常规宝石学性质、红外光谱和Diamond View<sup>TM</sup>测试均在中国地质大学(北京)宝石学实验教学中心完成。其中放大观察时使用的是国产宝光GI-MP22宝石显微镜。红外光谱使用的是Tensor 27型FTIR傅里叶变换红外光谱仪,扫描范围400~4 000 cm<sup>-1</sup>,扫描次数32次,分辨率为4 cm<sup>-1</sup>。利用英国ⅡDGR生产的钻石紫外荧光仪Diamond View<sup>TM</sup>进行了样品的发光图像观察。

拉曼光谱测试在中国科学院地质与地球物理研究所的红外拉曼实验中心完成,测试使用的是德国WITec生产的Alpha300-RAMAN共焦拉曼光谱仪,激发光源为532 nm,激光功率8 mW。根据原石样品的特点,分别采用透射法或反射法进行测试。同时,为了获得更准确的表征结果,还根据不同样品的特点,选择适当的累计扫描次数和扫描积分时间。所有对比数据均来源于RRUFF拉曼数据库。



图1 巴西金刚石样品的典型晶形特征

Fig. 1 Typical crystal morphology characteristics of Brazilian diamond samples

a—具有部分或完整原始晶形的样品; b—因破碎或溶蚀而难以辨认原始晶形的样品; c—具有薄片双晶及其他扁平板状晶形的样品  
 a—samples with partial or complete original crystal shape; b—samples with fragmentation or corroded crystal form; c—samples with flake twinning and other flat plate shapes

## 2 结果与讨论

### 2.1 表面微形貌特征

巴西金刚石样品的表面微形貌十分丰富。在原生的微形貌中,可以观察到生长丘(图2a、2b、2d)、生长层理(图2e、2f)、叠瓦状蚀象(图2c)、生长晕线(图2g)、各种形态的溶蚀坑(图2h、2i、2j、2k、2l、2o)以及塑性变形滑移线等(图2n)。而次生的微形貌则以黄褐色色斑为主(图3a、3b),绿色色斑相对较少(图3c)。此外,还有一部分样品呈现出多期溶蚀生长的形貌特征(图3d、3e、3f)。

在天然晶体生长过程中,普遍存在着生长与溶蚀或滑移交替进行的过程。在轻度溶蚀的环境中,晶体会优先溶蚀其尖端和棱角,从而形成台阶状生长趋势;而在高度溶蚀的环境中,平面也会受到溶蚀的影响(郑云龙等, 2012; 薄昊楠等, 2019)。本文研究的原石样品中,这两种溶蚀现象均有体现,且比例较高。部分样品同一面上有大小不同且不在一条直线上的三角座,并伴有较深的溶蚀坑(图2i),这表明巴西金刚石经历了多期的溶蚀过程,其中某些阶段的溶蚀程度较为强烈。

巴西金刚石某些样品表面的三角形蚀坑分布稀疏,而较大的六边形凹坑、底面为V字形下凹的密集

针点状凹坑以及三角座群的比例较高。此外,个别样品表现出强烈的溶蚀特征(图2k、2l、2m),进一步指示了它们在形成过程中受到富CO<sub>2</sub>熔体(流体)较大程度的溶蚀影响(严春杰等, 1989; 吕青等, 2020)。

巴西金刚石的次生形貌以黄-红褐色色斑为主,绿色色斑相对较少(图3)。这些褐色色斑表明,巴西金刚石在搬运过程中经历了辐照和加热过程,这一过程可能具有多期性、持续性或涉及较大的空间范围(Vance *et al.*, 1973; 杨明星等, 2002; 王久华等, 2016)。此外,巴西金刚石样品中展现出多期溶蚀和生长的形貌特征,例如在三角凹坑转变为六边形凹坑的过程中,存在部分区域被新生长层覆盖的现象。这一现象不仅表明巴西金刚石的生长具有多期性,同时也反映了其形成过程中环境变化的复杂性。

### 2.2 红外光谱特征

N是金刚石中最为常见的杂质元素,根据其存在形式的差异,可将金刚石划分为IaA型、IaB型和IaAB型。以双原子N(A心)形式存在的金刚石属于IaA型,红外光谱特征具有1282 cm<sup>-1</sup>处的吸收峰; IaB型金刚石中的N以多原子(B心)形式聚集,其红外光谱有特征的1175 cm<sup>-1</sup>处吸收峰;当金刚石中同时存在这两种形式的N时,则属于过渡

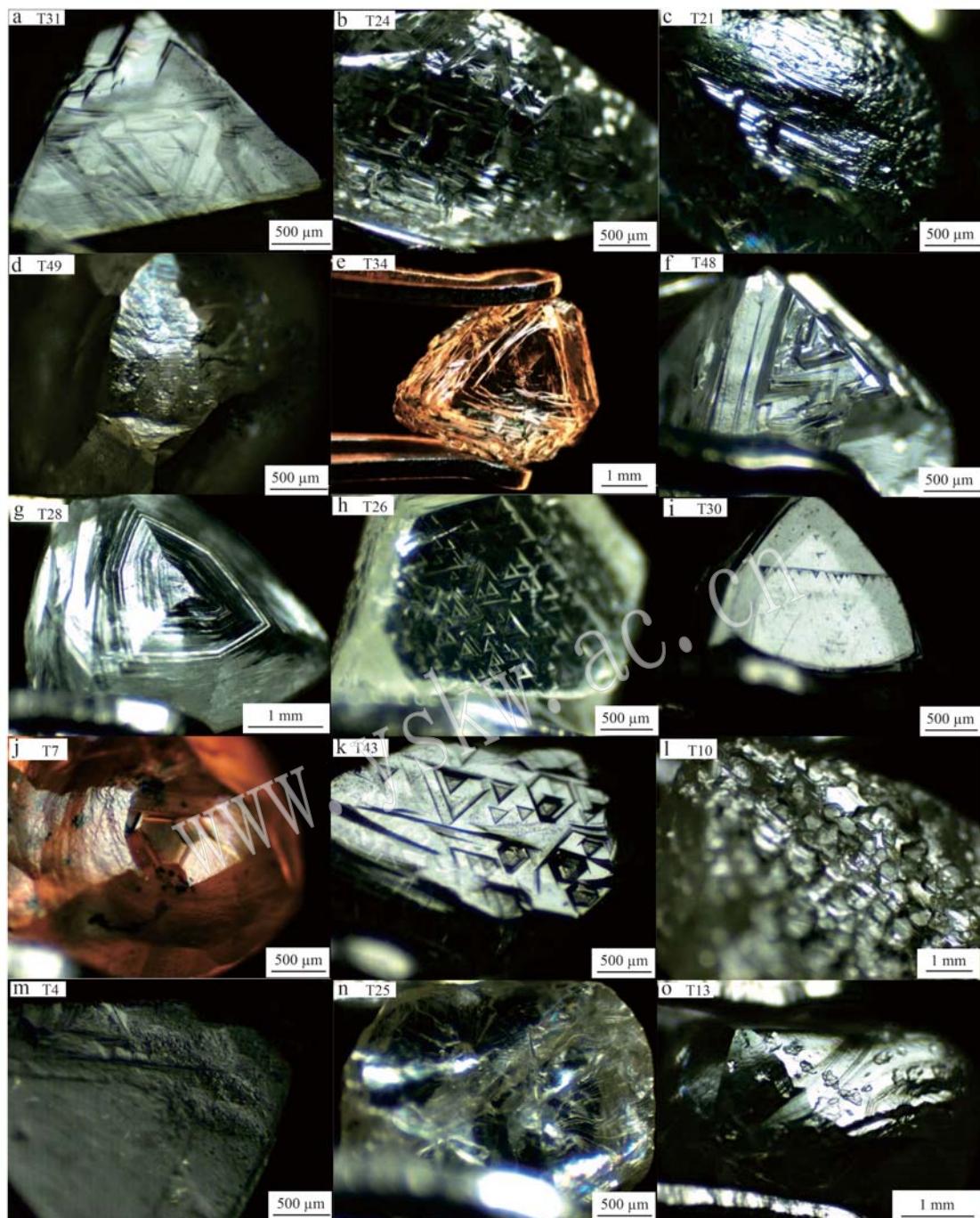


图2 巴西金刚石样品的表面原生微形貌

Fig. 2 Primary surface morphology of Brazilian diamond samples

a—(111)晶面上发育的正三角形生长丘；b—成层出现的三角形生长丘；c—锥形小丘相互叠加而形成的叠瓦状蚀象；d—微观尖锥状或水滴状生长丘；e—重叠呈阶梯状的三角形生长层，角顶等尖锐的部位因溶蚀而钝化；f—八面体(111)晶面上的“盾型”薄层；g—六边形轮廓的闭合晕线；h—定向分布的三角形凹坑；i—沿直线分布的较深三角座；j—单个的六边形凹坑；k—三角座转变为六边形凹坑；l—三角形与溶蚀较深的六边形凹蚀坑相间分布；m—V字形下密集的针点状凹坑；n—滑移线和塑性变形；o—不规则凹蚀坑

a—the regular trigons on the crystal plane (111); b—the regular trigons that appear in layers; c—conical knolls superimposed on each other in a stacked tile erosion pattern; d—cone or droplet knolls; e—the regular trigons superimposed on each other, with sharp parts such as the tops of the corners blunted by corrosion; f—the thin “shield” layer on the crystal plane (111); g—closed halo lines of hexagonal contours; h—triangular dimples with directional distribution; i—triangular dimples distributed along a straight line; j—a single hexagon; k—trigon transforms into hexagon; l—a cluster of deeply fused hexagonal pits interspersed with triangular pits; m—the dense needle-like depressions under V-shaped undercuts; n—slip lines and plastic deformation; o—irregular pits

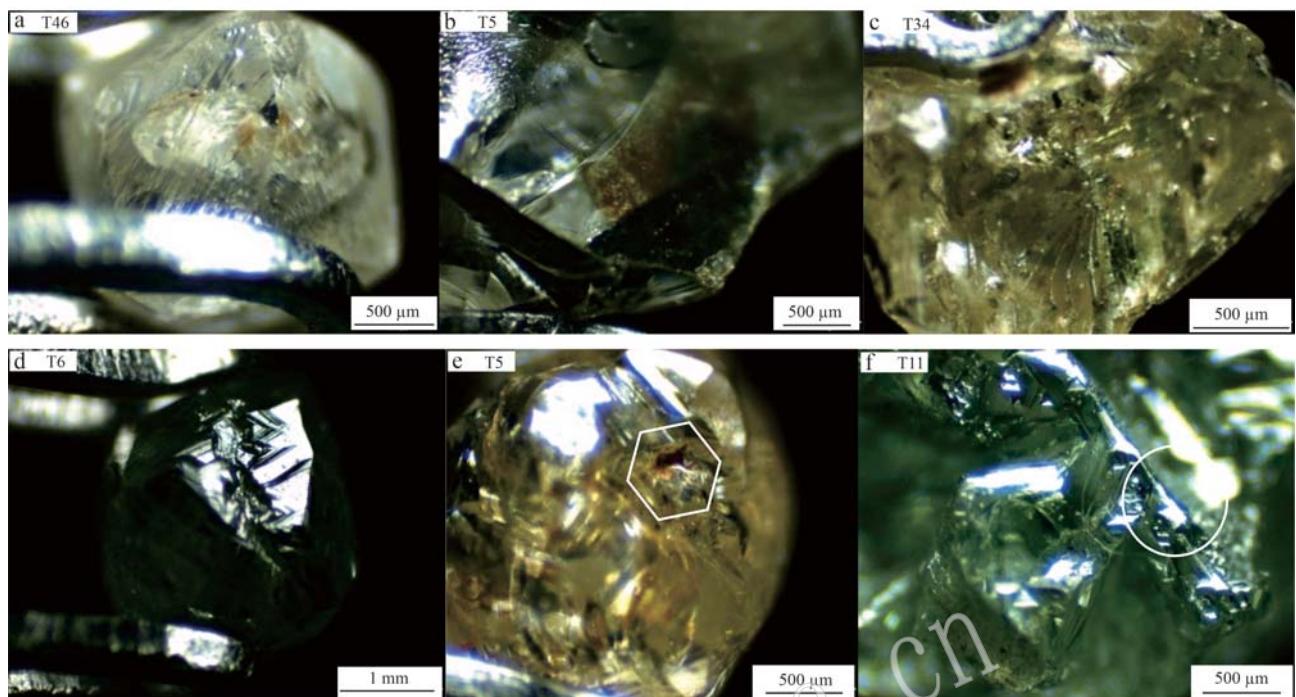


图3 巴西金刚石样品的表面次生形貌及特殊形貌

Fig. 3 Surface secondary and special surface morphology of Brazilian diamond samples

a—表面浅黄褐色色斑; b—表面大片黄褐色色斑; c—表面绿色色斑; d—被不规则长条形蚀坑阻断的三角座; e—一半被生长覆盖的六边形凹坑; f—三角座向六边形转化过程被生长覆盖

a—light yellow-brown stain on the surface; b—large yellow-brown stain on the surface; c—surface green stain; d—trigons which are blocked by irregular elongated corrosion pits; e—half of the hexagonal pits are covered by growth; f—trigons to hexagonal transformation processes covered by growth

形态的 I aAB 型;以孤 N(C 心)形式存在的金刚石属于 Ib 型,其红外光谱特征具有  $1130\text{ cm}^{-1}$  的宽吸收带、 $1344\text{ cm}^{-1}$  的尖锐细峰以及  $2688\text{ cm}^{-1}$  的吸收峰。当金刚石内部不含 N 或含 N 量极低,被划分为 IIa 型金刚石,在  $900\sim1350\text{ cm}^{-1}$  范围内没有显著吸收峰。而当金刚石含有少量 B 元素,B—C 键引起红外光谱上  $2790\text{ cm}^{-1}$  的吸收峰,被划分为 IIb 型金刚石(张蓓莉等,2006)。

由于本文金刚石原石样品大小不一、外形多变,最终满足红外光谱测试条件的样品只有 57 颗。这 57 颗样品类型的统计结果表明,属于 I aAB 型的有 52 颗,属于 I aB 型的有 3 颗,还有 2 颗为 IIa 型金刚石(图 4)。

此次收集到的巴西金刚石样品主要为 I aAB 型,占比高达 90% 以上,其次为 IaB 型和 IIa 型。此外,几乎所有样品都有指示与 H 相关的  $3107\text{ cm}^{-1}$  处峰位,且多数样品具有与 Ni 相关缺陷有关的  $1331\text{ cm}^{-1}$  处峰位。利用国际上通用的公式(Taylor *et al.*,

1990; 杨志军等,2012),计算得到了 I aAB 型金刚石样品中的 N 含量(表 2)。表 2 中  $N_A$  和  $N_B$  分别对应金刚石中 A 心、B 心的 N 含量( $w_B/10^{-6}$ ), $N_T$  表示金刚石中的总 N 含量( $w_B/10^{-6}$ )。此外还计算了 B 心的转化率  $N_B/\%$ ,以进一步揭示金刚石中 N 的聚集程度。结果显示,样品的 N 含量在  $400\times10^{-6}\sim1700\times10^{-6}$  之间,平均 N 含量约为  $880\times10^{-6}$ ,B 心的转化率介于 15%~66% 之间,平均占比 45%,具有高 N 含量和中-低 N 聚集程度的特征(邓小芹等,2019)。

### 2.3 拉曼光谱特征

作为分子结构研究的一种分析方法,拉曼光谱不仅可以根据样品的谱峰频率确定其物相组成,还可以利用拉曼峰宽得到样品的晶体质量信息。本文利用拉曼光谱测试巴西金刚石样品的包裹体信息并计算了样品的结晶度。

结果显示,巴西金刚石样品的特征峰位普遍比标准的  $1332\text{ cm}^{-1}$  向高频偏移  $1\sim2\text{ cm}^{-1}$ ,半高宽超

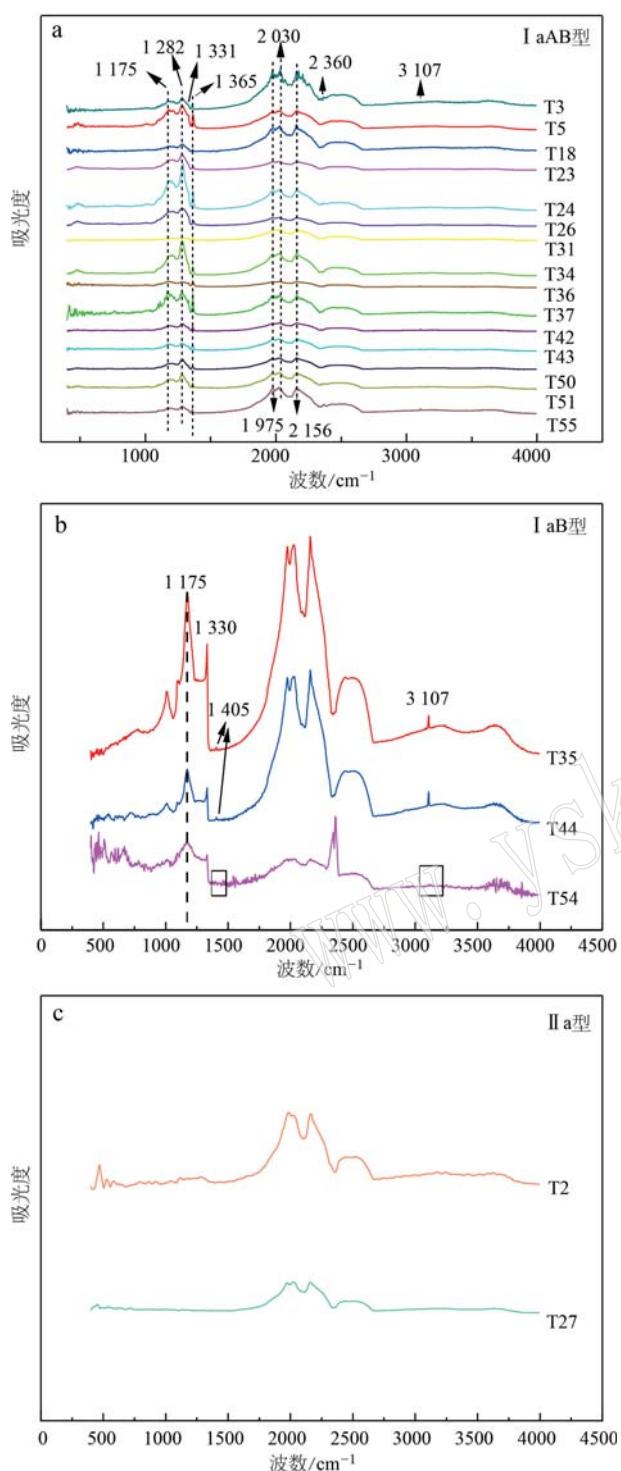


图4 不同类型金刚石样品的红外光谱  
Fig. 4 Infrared spectra of different Brazilian diamond types

过 $11\text{ cm}^{-1}$ ,表明其结晶度较差(图5)。这可能是由于样品后期的结晶环境不稳定,使得其物相中含有较多杂质,例如N杂质含量较高,其 $\text{sp}^3\text{C}-\text{N}$ 键会导致晶格膨胀(李明吉,2006;宋修曦,2018)。与我

表2 IaAB型金刚石样品中的N含量  
Table 2 Nitrogen content in IaAB diamond samples

样品编号	$N_A/10^{-6}$	$N_B/10^{-6}$	$N_T/10^{-6}$	$N_B/\%$
T3	220.75	187.96	408.71	45.99
T5	270.27	224.93	495.21	45.42
T50	227.10	274.94	502.04	54.76
T33	390.30	139.55	529.85	26.34
T55	278.08	277.86	555.93	49.98
T34	525.41	92.91	618.32	15.03
T34	520.75	102.87	623.62	16.50
T36	305.92	400.26	706.18	56.68
T51	418.93	306.40	725.34	42.24
T31	395.44	439.89	835.33	52.66
T32	289.87	575.09	864.96	66.49
T53	609.33	266.05	875.38	30.39
T25	481.62	406.07	887.69	45.75
T30	443.41	459.93	903.34	50.91
T42	639.92	376.24	1016.16	37.03
T43	536.91	611.03	1147.94	53.23
T26	592.09	592.57	1184.66	50.02
T23	677.99	532.68	1210.68	44.00
T18	668.23	721.96	1390.18	51.93
T37	656.28	804.40	1460.68	55.07
T24	792.96	901.52	1694.48	53.20

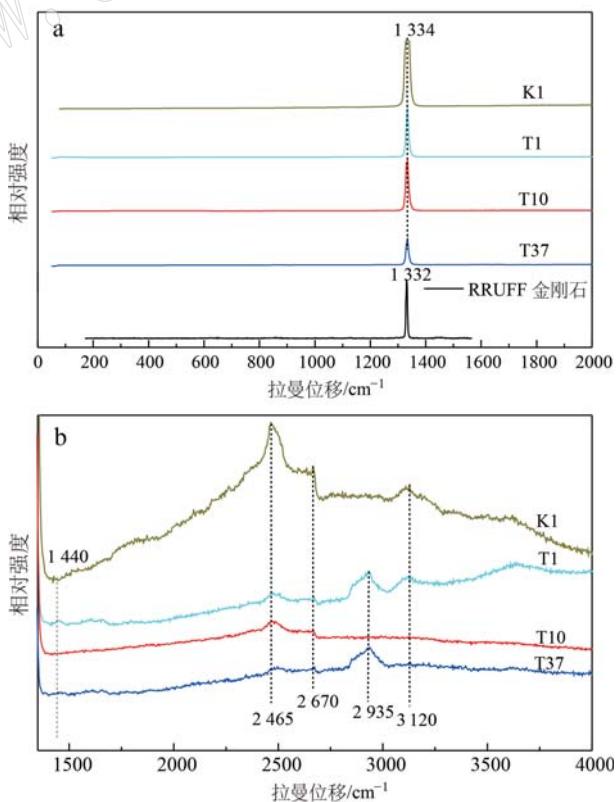


图5 巴西金刚石样品拉曼光谱图及本征峰位信息  
Fig. 5 Raman spectra and intrinsic peak information of Brazilian diamond samples  
a—金刚石样品的拉曼光谱图;b—金刚石样品的二阶拉曼光谱  
a—Raman spectra of diamond samples;b—second-order Raman spectra of diamond samples

国山东、辽宁、湖南等地的金刚石相比,巴西金刚石样品的结晶度更低,这可能表明了其地质环境稳定性相对较差(张健等,2019;吕青等,2020)。此外,个别样品在 $2\ 935\text{ cm}^{-1}$ 及 $3\ 120\text{ cm}^{-1}$ 附近的峰位指示CH<sub>x</sub>拉伸键的存在,表明巴西金刚石在形成后期可能处于充足的N-H氛围中(Bernard *et al.*, 2002; Ghodbane *et al.*, 2006)。

在金刚石样品的拉曼光谱中还检测到方解石、石英、硫酸盐类和碳质矿物等,这些包裹体多分布在样品近表面,部分包裹体赋存在裂隙中(图6)。

通过对比RRUFF数据库的数据,刻面金刚石K2中的暗褐色包裹体初步判定为含杂质离子的方解石(图6a)。付培歌等(2013)曾提出方解石 $713\text{ cm}^{-1}$ 附近的分峰现象可能是由于高温高压环境所导致的,但是本样品中方解石的成因还有待于后续实验的进一步验证。

样品T37表面长条形凹蚀坑内的浅黄褐色物质的拉曼特征峰位置与石膏的特征峰一致(图6c)。样品T9表面,尤其是部分层裂隙或长条形凹坑内,存在一种灰黄-黄褐色的物质(图6d),经对比判断其为硬石膏。无论是硬石膏还是石膏,一般都形成于与化学沉积相关的次生作用(谢长伦等,2015),这可能意味着这些样品被带到近地表后经历了较复杂的迁移过程。

还有一部分样品表面及凹坑或裂隙中含有黑色不透明石墨(图6e), $1\ 365\text{ cm}^{-1}$ 处可指派为与非金刚石碳有关的D带,其强度与缺陷程度成正比; $1\ 580\text{ cm}^{-1}$ 对应着六方碳环双重简并的G带,它往往随压力增大向高频偏移(Sanchez *et al.*, 1996; 曾祥清,2013),进一步表明巴西金刚石最外层结晶度不高,含有无序碳,这与图5a中半峰宽的指示信息相符合,进一步证实巴西金刚石可能形成于亚稳定环境。

巴西金刚石大部分为冲积砂矿型金刚石,其分布主要围绕亚马逊和圣弗朗西斯科克拉通或其边界地区,然而关于其砂矿的具体来源至今尚未明确(殷莉,2008)。根据近表面包裹体测试结果,可以推测巴西金刚石形成过程中可能有晚期热液流体参与,其中方解石、石英等可能是次生包裹体,半镶嵌的石英也可能由岩浆期后的热液灌入裂隙形成,同时,巴西金刚石结晶后期环境不稳定,可能经历了由富硅酸盐、硫化物等复杂流体的搬运过程。环境变化使金刚石外层形成大量石墨(王琦,2020),但碳的来

源是原始碳源还是金刚石中碳转变,目前尚无法明确区分。此外,样品表面的长条形凹坑提供了一个相对封闭的环境,交代作用不强烈,从而使得浅黄色石膏(图6c)得以保存。而位于表面的石膏,则在相对开放的环境中,最终失水转变为硬石膏(图6d)。

## 2.4 Diamond View™ 特征

前人(刘培钧等,2017;严俊等,2017)研究表明,金刚石荧光颜色的差异与其内部色心类型密切相关。例如N3色心在吸收紫外光后可激发出蓝色或蓝白色荧光;H3色心是与双N原子紧密相关的晶格结构缺陷,当其含量较高时,通常使金刚石呈现出鲜艳的黄色、黄绿色或褐色,并使金刚石呈现绿色的荧光。另一方面,孤N对紫外光的吸收则导致金刚石呈现出独特的橙红色或橙黄色荧光。

通过Diamond View™拍摄的荧光图片(图7)可以发现,金刚石样品呈现出丰富多样的荧光颜色特征,如T25、T33和T13样品呈深浅不同单一蓝色色调;T35、T17和T7样品呈有黄绿色的蓝色色调;T2样品呈暗淡的橘黄色色调;T9和T4样品显示黄绿色与蓝色荧光共存。

IaAB型金刚石主要呈现三角或六角板状,或呈变形严重的板块状扁平形。其发光样式均表现为内部均匀,发光较弱或不发光,近表面及表面发光最强(图8a: T30、T8);个别浑圆状聚形样品会出现颜色不均匀,外侧环带发光更明显的特点(图8b: T28、T19;图8c: T36),表明溶蚀发生在含N量比较丰富的时期,且经受溶蚀后还有后期持续生长;此外,不规则梭形样品表面因强烈溶蚀而呈现不均匀蓝色荧光(图8c: T24)。还有一部分IaAB型样品表现出黄绿色调共存的特点,并伴有黑色无荧光斑点(图8d: T4、T18)。该现象可能是由这些样品内部的N聚合程度较高,主要以片氮晶的形式存在,而且是在其成长过程中含有一定的H氛围,荧光颜色的斑驳不均匀性反映了生长前期环境的不稳定性。样品T34外表面呈现出类似于环带的生长模式(图8d),部分区域交替发出蓝色和黄色荧光,此外颜色分带的弯曲和不规则边界表明,晶体可能遭受了溶蚀,并在环境改变后经历了多期生长。

IaB型样品(图9:T35、T44)的荧光均匀分布,并呈现带有绿色调的蓝色荧光,T54则表现为不均匀的蓝色荧光(图9:T54)。该类型样品的荧光往往与H3、H4色心有关(严俊等,2015;邱健荣等,2019)。

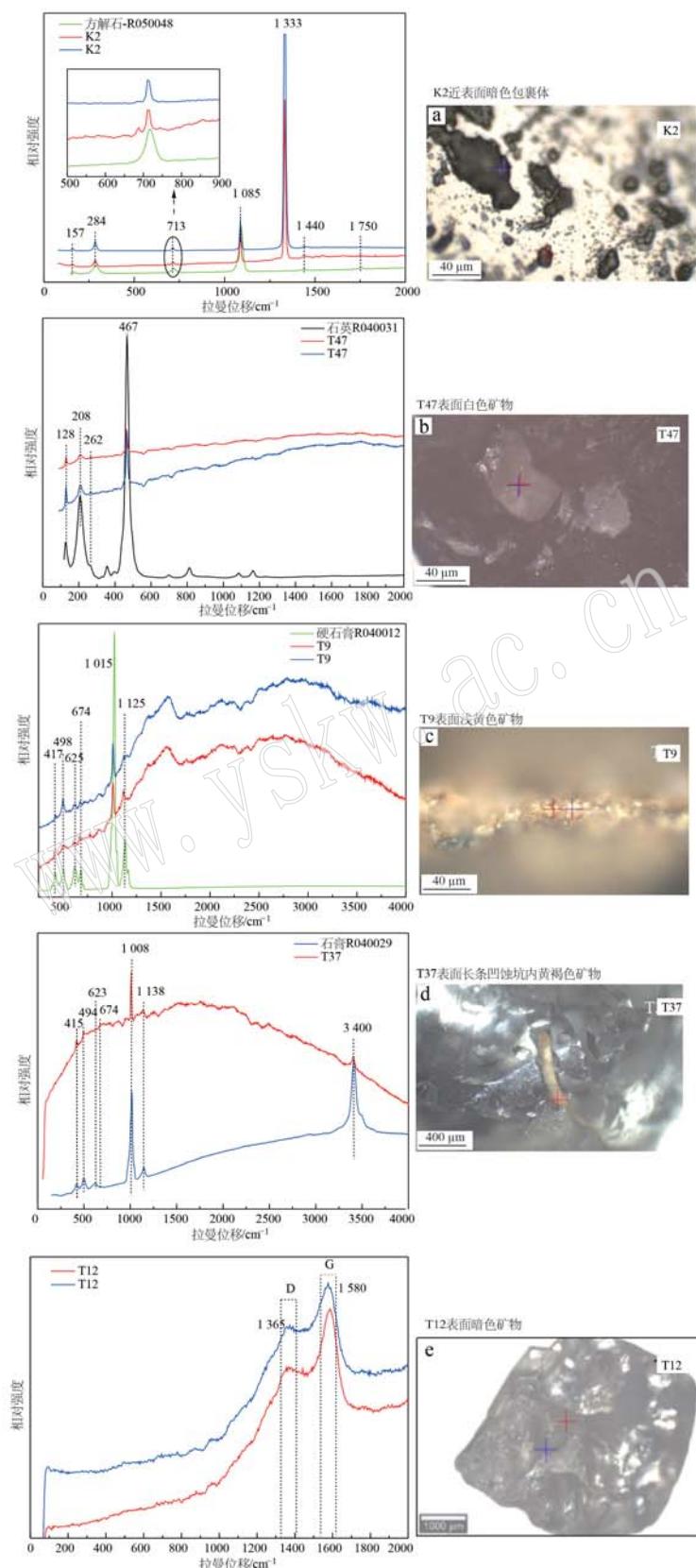


图 6 巴西金刚石样品内部包裹体及表面矿物拉曼光谱图

Fig. 6 Raman spectra of internal inclusions and surface minerals in Brazilian diamond samples

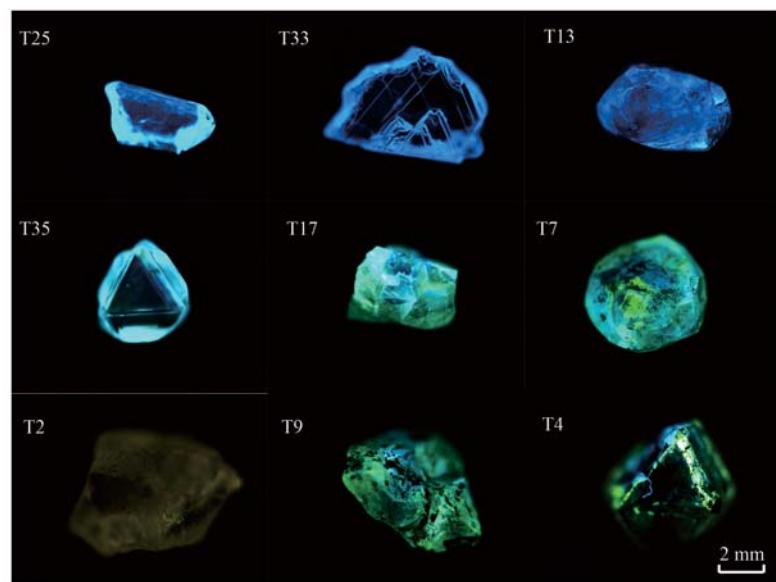


图 7 巴西金刚石样品的发光图像

Fig. 7 Luminescence image of Brazilian diamond samples

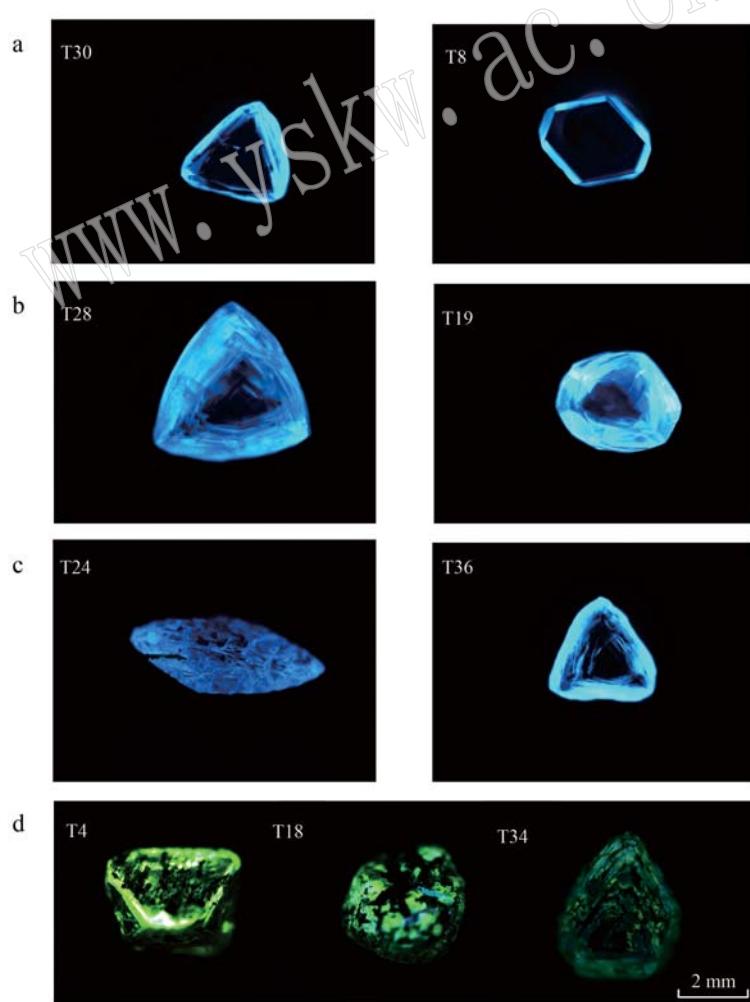


图 8 巴西金刚石 I aAB 型样品发光图像

Fig. 8 Luminescence image of Brazilian diamond I aAB type samples

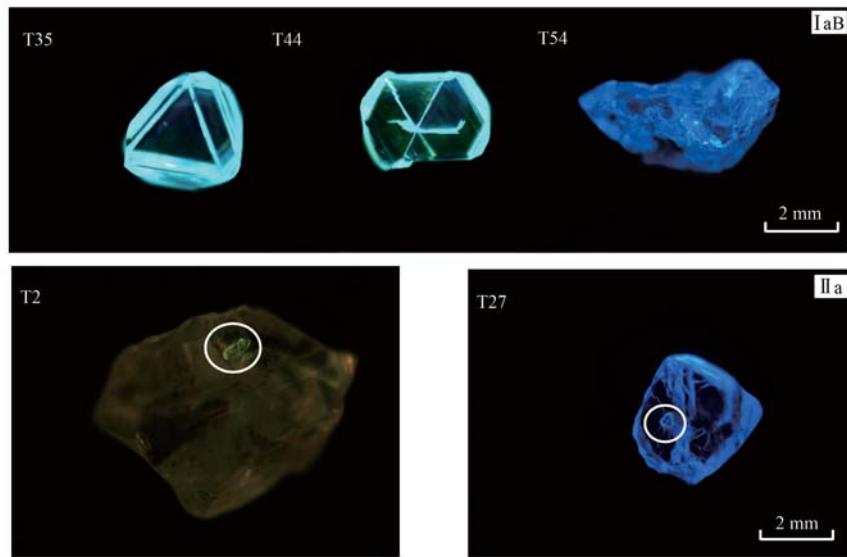


图9 巴西金刚石IaB型和IIa型样品发光图像

Fig. 9 Luminescence image of Brazilian diamond IaB and IIa type samples

由图9可知,Ⅱa型金刚石样品(图9:T2、T27)内部均包含金刚石包裹体,其中T2样品中的金刚石包裹体呈现与T2差异显著的荧光现象,即T2样品以暗淡的橘黄色调为主,而其内部的包裹体呈鲜艳的黄绿色,这说明包裹体的类型明显不同于宿主金刚石,暗示金刚石形成过程中环境多变,可能是在其结晶过程中形成的缺陷类型不同而导致的。对于T27样品,尽管其红外光谱未检测到与N相关的峰位或吸收,符合Ⅱa型金刚石的典型谱图特征,但在Diamond View<sup>TM</sup>下却展现出明亮的蓝色荧光。这表明N<sub>3</sub>色心并非金刚石呈现蓝色荧光的唯一原因。因此,推测在Ⅱa型金刚石中,N杂质可能以传统A心、B心、C心的形式存在,但由于其浓度低于检测限,导致T27样品的红外光谱呈现出Ⅱa型金刚石的特征,同时仍能形成蓝色荧光。

### 3 结论

(1) 巴西金刚石表面微形貌十分丰富,可见生长丘、生长层理、生长阶梯以及各种形态的溶蚀坑,部分样品表面可见黄褐色和绿色色斑,个别样品中具有多期溶蚀和生长的形貌特征。拉曼光谱测试发现样品表面含有方解石族的碳酸盐类包裹体和石英,属于次生包裹体,样品表面还可检测到石墨、次生的石膏、硬石膏等硫酸盐类矿物,表明巴西金刚石结晶后经历了复杂多样的迁移环境。

(2) 巴西金刚石样品主要为IaAB型,占比90%以上,IaB型和Ⅱa型含量较少,约为3%,具有高N含量和低-中等N聚集程度的特点。

(3) 巴西IaAB型金刚石显示蓝色荧光,部分显示黄绿色调共存并带有黑色无荧光斑点;IaB型样品表现为带有绿色调的蓝色荧光和不均匀的蓝色荧光;Ⅱa型金刚石样品表现为暗橙色荧光和蓝色荧光,同时印证天然金刚石中N<sub>3</sub>色心并不是蓝色荧光产生的唯一原因。

### References

- Bernard M, Deneuville A and Bustarret E. 2002. Detection of CH<sub>x</sub> bonds from micro Raman spectroscopy on polycrystalline boron doped diamond electrodes[J]. Diamond & Related Materials, 11(3~6): 662~666.
- Bo Haonan, Qiu Zhili, Lu Taijin, et al. 2019. The type and morphologic characteristics of Yuanshui river placer diamonds in Hunan and their significance in revealing origin [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 58(2): 45~57 (in Chinese with English abstract).
- Deng Xiaoqin, Qiu Zhili, Ma Ying, et al. 2019. FTIR spectrometry characteristics of diamonds from the Modern River Placer in Hunan and their origin implication[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 39(12): 3 833~3 838 (in Chinese with English abstract).
- Fu Peige and Zheng Haifei. 2013. Raman spectra of aragonite and calcite

- at high temperature and high pressure[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 33(6): 1 557~1 561 (in Chinese with English abstract).
- Ghodbane S, Deneuville A, Tromson D, et al. 2006. Nanostructures, thin films, surfaces and interfaces: Sensitivity of raman spectra excited at 325 nm to surface treatments of undoped polycrystalline diamond films[J]. Physica Status Solidi, 203(10): 2 397~2 402.
- Hayman P C, Kopylova M G and Kaminsky F V. 2005. Lower mantle diamonds from Rio Soriso (Juina area, Mato Grosso, Brazil) [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 149(4): 430~445.
- Huang Xuanzhen. 2002. Overview of world diamond mineral distribution[J]. China Non-metallic Minerals Industry, (6): 29~31 (in Chinese).
- Kaminsky F, Zakharchenko O, Davies R, et al. 2001. Superdeep diamonds from the Juina area, Mato Grosso State, Brazil[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 140(6): 734~753.
- Li Mingji. 2006. Preparation of Large-sized High-quality Diamond Thick Films, and Influence of Nitrogen Doping on the Growth of Diamond Films[D]. Jilin: Jilin University (in Chinese with English abstract).
- Liu Peijun, Wang Ju'an, Xu Liqiang, et al. 2017. FTIR spectral characteristics of natural diamonds with yellow fluorescence under Diamond View<sup>TM</sup>[J]. Journal of Anqing Normal University (Natural Science Edition), 23(4): 30~35 (in Chinese with English abstract).
- Lü Qing, Ge Yuejin, Xiao Bingjian, et al. 2020. Study of diamond characteristics and its inclusions in diamonds from the Tancheng placer, Shandong Province[J]. Acta Geologica Sinica, 94(9): 2 687~2 697 (in Chinese with English abstract).
- Qiu Jianrong, Du Jinghong and Zeng Wei. 2019. Preliminary study on the cause of green fluorescence of a colorless diamond[J]. China Gems & Jades, (6): 112~115 (in Chinese).
- Sanchez G, Servat J, Gorostiza P, et al. 1996. Atomic force microscopy observation of the first stages of diamond growth on silicon[J]. Diamond and Related Materials, 5(6): 592~597.
- Song Xiuxi. 2018. Research on the Stress of Homoepitaxial Grown of the Single Crystal Diamond [D]. Wuhan: Wuhan Institute of Technology (in Chinese with English abstract).
- Svisero D P. 1995. Distribution and origin of diamonds in Brazil: An overview[J]. Journal of Geodynamics, 20(4): 493~514.
- Tappert R, Stachel T, Harris J W, et al. 2006. Placer diamonds from Brazil: Indicators of the composition of the Earth's mantle and the distance to their kimberlitic sources[J]. Society of Economic Geologists, 101(2): 453~470.
- Taylor W R, Jaques A L and Ridd M. 1990. Nitrogen-defect aggregation characteristics of some Australasian diamonds; time-temperature constraints on the source regions of pipe and alluvial diamonds[J]. American Mineralogist, 75(11~12): 1 290~1 310.
- Vance E R, Harris J W and Milledge H J. 1973. Possible origins of  $\alpha$ -damage in diamonds from kimberlite and alluvial sources[J]. Mineralogical Magazine, 39(303): 349~360.
- Wang Jiuhua and Wang Yangming. 2016. Features and gemological significance of green diamond from Baiyan, Shandong Province [J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 35(S1): 182~184 (in Chinese with English abstract).
- Wang Qi. 2020. Origin information and indications of inclusions in alluvial diamonds from Hunan[J]. Science & Technology Vision, (14): 231~232 (in Chinese).
- Xie Changlun, Wu Chengguo and Su Yongrong. 2015. Genetic types, sedimentary environment and ore-forming pattern of rocks and minerals of anhydrite in Hexian and Hanshan[J]. Geology of Anhui, 25(1): 28~34 (in Chinese with English abstract).
- Xing Jiangran. 2001. Overview of diamond and kimberlite production areas in the world (serial I)[J]. Scientific and Technological Management of Land and Resources, (1): 36~39 (in Chinese).
- Yan Chunjie and Zheng Jianping. 1989. Micromorphological characteristics of diamonds from Fuxian, Liaoning[J]. Geological Laboratory, 5(5): 307~309 (in Chinese).
- Yan Jun, Shao Huiping, Huang Xuebing, et al. 2017. Study on the spectral and fluorescent characteristics of natural colorless and near-colorless diamonds with or without N<sub>3</sub>[J]. China Measurement & Test, 43(9): 53~58.
- Yan Jun, Wang Xiaoxiang, Tao Jinbo, et al. 2015. Preliminary study on the unique spectroscopic characteristics of natural and synthetic diamonds[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 35(10): 2 723~2 729 (in Chinese with English abstract).
- Yang Mingxing and Gao Yan. 2002. Characters of brown spot on diamond from Hunan Province and its implication[J]. Journal of Gems & Gemmology, (4): 15~19 (in Chinese with English abstract).
- Yang Zhijun, Liang Rong, Zeng Xiangqing, et al. 2012. Study on the micro-infrared spectra and origin of polycrystalline diamonds from Mengyin kimberlite pipes[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 32(6): 1 512~1 518 (in Chinese with English abstract).
- Yin Li. 2008. The Characters and Significance of Diamond Inclusions in the North China Craton-Taking Shandong Mengyin as an Example [D]. Wuhan: China University of Geosciences (Wuhan) (in Chinese with English abstract).
- Yuan Shu, Qiu Zhili, Zhou Yongzhe, et al. 2011. Analysis of Current Dia-

- mond Mining in World's Major Diamond-Producing Countries [C]// Gemology & Technology-Proceedings of China Gemology Academic Conference (2011). 58~67 (in Chinese with English abstract).
- Zeng Xiangqing, Zheng Yunlong, Yang Zhijun, et al. 2013. Study on the micro-FTIR and Raman spectra of the alluvial diamonds from Yangtze craton and their geological significances [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 33(10): 2 694~2 699 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Beili, Wang Manjun, Li Jingzhi, et al. 2006. Systematic Gemology (Second Edition) [M]. Beijing: Geological Publishing House, 113~128 (in Chinese).
- Zhang Jian, Chen Hua, Lu Taijin, et al. 2019. Crystallinity of Diamonds from Three Deposits in China [C]// Gemology & Technology-Proceedings of China Gemology Academic Conference (2019). 22~24 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Xin, Shi Guanghai and Zhang Ji. 2015. Review of lithospheric diamonds and their mineral inclusions [J]. Advances in Earth Science, 30(3): 310~322 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Yunlong, Yang Zhijun, Zeng Xiangqing, et al. 2012. Formation and environmental significance of typical surface morphology of diamond [J]. Acta Mineralogica Sinica, 32(S1): 76~77 (in Chinese).
- 附中文参考文献**
- 薄昊楠, 丘志力, 陆太进, 等. 2019. 湖南沅水砂矿金刚石类型、形貌学特征及其对形成过程的指示 [J]. 中山大学学报(自然科学版), 58(2): 45~57.
- 邓小芹, 丘志力, 马瑛, 等. 2019. 湖南现代河流砂矿金刚石的红外光谱测定及其源区指示 [J]. 光谱学与光谱分析, 39(12): 3 833~3 838.
- 付培歌, 郑海飞. 2013. 高温高压下文石和方解石的拉曼光谱研究 [J]. 光谱学与光谱分析, 33(6): 1 557~1 561.
- 黄宣镇. 2002. 世界金刚石矿产分布概况 [J]. 中国非金属矿工业导刊, (6): 29~31.
- 李明吉. 2006. 大尺寸高质量金刚石厚膜制备及氮掺杂对金刚石膜生长的影响研究 [D]. 吉林: 吉林大学.
- 刘培钧, 王巨安, 徐利强, 等. 2017. Diamond View<sup>TM</sup> 下呈黄色荧光的天然钻石的 FTIR 光谱特征 [J]. 安庆师范大学学报(自然科学版), 23(4): 30~35.
- 吕青, 葛跃进, 肖丙建, 等. 2020. 山东郯城砂矿金刚石特征及包裹体研究 [J]. 地质学报, 94(9): 2 687~2 697.
- 邱健荣, 杜景红, 曾威. 2019. 一粒无色钻石呈绿色荧光的成因初步探究 [J]. 中国宝玉石, (6): 112~115.
- 宋修曦. 2018. 单晶金刚石同质外延生长的应力研究 [D]. 武汉: 武汉工程大学.
- 王久华, 王阳明. 2016. 山东省白彦地区绿色金刚石特征及宝石学意义 [J]. 岩石矿物学杂志, 35(S1): 182~184.
- 王琦. 2020. 湖南砂矿来源钻石中包裹体的产地信息及指示 [J]. 科技视界, (14): 231~232.
- 谢长仑, 吴承国, 苏永荣. 2015. 和(县)含(山)硬石膏矿成因类型、沉积环境及赋矿规律 [J]. 安徽地质, 25(1): 28~34.
- 兴江然. 2001. 世界金刚石和金伯利岩产地概览(连载 I) [J]. 国土资源科技管理, (1): 36~39.
- 严春杰, 郑建平. 1989. 辽宁复县金刚石的微形貌特征 [J]. 地质实验室, (5): 307~309.
- 严俊, 邵惠萍, 黄雪冰, 等. 2017. 有无 N<sub>3</sub> 的无色与近无色天然钻石的荧光与光谱特征研究 [J]. 中国测试, 43(9): 53~58.
- 严俊, 王小祥, 陶金波, 等. 2015. 天然钻石与合成钻石的特异性光谱初步研究 [J]. 光谱学与光谱分析, 35(10): 2 723~2 729.
- 杨明星, 高岩. 2002. 湖南金刚石的褐斑特征及其意义 [J]. 宝石和宝石学杂志, (4): 15~19.
- 杨志军, 梁榕, 曾祥清, 等. 2012. 山东蒙阴金刚石多晶的显微红外光谱研究及其成因意义 [J]. 光谱学与光谱分析, 32(6): 1 512~1 518.
- 殷莉. 2008. 华北地台金刚石包裹体特征及意义: 以山东蒙阴为例 [D]. 武汉: 中国地质大学(武汉).
- 袁姝, 丘志力, 周永哲, 等. 2011. 世界主要金刚石产出国近期金刚石开采现状分析 [C]// 珠宝与科技——中国珠宝首饰学术交流会论文集(2011). 58~67.
- 曾祥清, 郑云龙, 杨志军, 等. 2013. 湖南扬子地台砂矿金刚石的红外、拉曼特征及指示意义 [J]. 光谱学与光谱分析, 33(10): 2 694~2 699.
- 张蓓莉, 王曼君, 李景芝, 等. 2006. 系统宝石学(第二版) [M]. 北京: 地质出版社, 113~128.
- 张健, 陈华, 陆太进, 等. 2019. 中国三产地金刚石结晶度研究 [C]// 珠宝与科技——中国珠宝首饰学术交流会论文集(2019). 22~24.
- 赵欣, 施光海, 张骥. 2015. 岩石圈地幔中的金刚石及其矿物包裹体的研究进展 [J]. 地球科学进展, 30(3): 310~322.
- 郑云龙, 杨志军, 曾祥清, 等. 2012. 金刚石典型表面形貌的形成与环境意义 [J]. 矿物学报, 32(S1): 76~77.