

扬子克拉通西部金刚石的表面形貌特征及其振动光谱研究

杨志军^{1,2}, 毛梦媛¹, 黄逸聪¹, 张佳伟¹

1. 中山大学地球科学与工程学院, 广东 广州 510275

2. 广东省地质过程与矿产资源探查重点实验室, 广东 广州 510275

摘要 基于金刚石表面形貌的研究, 有可能为反演金刚石的形成环境及为金刚石的合成工艺设计提供科学线索。采用光学显微镜、红外光谱、拉曼光谱对扬子克拉通西部的天然砂矿金刚石表面形貌与杂质氮、氢含量及有序度的关系研究结果表明, 金刚石的表面形貌包括与晶体生长相关的微形貌、与晶体定向相关的熔蚀形貌、与晶体定向无关的熔蚀形貌及与应力形变相关的形貌等四大类; 金刚石以 1aAB 型为主, 氮含量介于 $22.90\sim 752.40\ \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 之间, 绝大部分样品的 sp^3 杂化 C—H 键浓度含量高于 sp^2 杂化 C—H 键, 氢杂质的存在有利于 A 氮心向 B 氮心转变; sp^3 杂质 C—H 键的存在对金刚石表面出现的形貌类型可能不会造成实质性的影响, 但极利于形成熔蚀坑; 各种表面形貌的存在都会降低金刚石的表面有序度, 但发育晕线者的表面有序度相对最高, 而发育三角形生长片层者表面有序度最低。

关键词 表面形貌; 红外光谱; 拉曼光谱; 金刚石

中图分类号: P575.4 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2022)01-0236-07

引言

金刚石作为探讨地球深部过程的窗口, 人们围绕其成因、来源、深部科学意义等进行了大量卓有成效的研究^[1-6]。众所周知, 天然金刚石是在地球深部历经漫长的形成过程后, 由于金伯利岩、钾镁煌斑岩等寄主岩石的快速上升而携带至地表的, 因而其表面特征既与其生长过程有关, 亦受到上升过程中环境变化的影响有关。对于砂矿型而言, 其表面形貌还受到后期搬运期间的磨蚀作用等的影响。同时, 在人工合成金刚石的过程中, 由于温度、压力、介质条件的变化, 亦极易造成金刚石表面形貌的差异性。因此, 在相当程度上, 基于金刚石表面形貌的研究, 有可能为反演金刚石的形成环境及为金刚石的合成工艺设计提供科学线索。然而, 当前此类研究还需积累基础数据。

基于上述原因, 本文以扬子克拉通西部的天然砂矿金刚石为研究对象, 在采用光学显微镜对金刚石表面形貌分类的基础上, 尝试采用红外光谱、拉曼光谱技术探讨发育不同形貌的金刚石的杂质含量、品质的差异等, 旨在为人们深入探讨金刚石的形成环境及合成工艺设计等提供科学线索。

1 实验部分

本文所研究的 69 粒金刚石样品均来自扬子克拉通西部(沅水流域)的砂矿型天然金刚石。采用光学显微镜对金刚石样品进行显微放大观察, 并对样品的颜色、晶型、表面形貌进行相关统计。

不同形貌的金刚石样品的红外光谱测试在型号为 Thermo Scientific Nicolet 6700 傅里叶红外光谱仪上进行, 采用液氮冷却下的透射模式, 谱峰范围 $650\sim 4\ 000\ \text{cm}^{-1}$, 扫描次数 128 次, 测定时仪器的分辨率为 $8\ \text{cm}^{-1}$ 。

不同形貌的金刚石样品的拉曼光谱测试在型号为 Renishaw inVia 显微共焦拉曼光谱仪上进行, 采用 $514.5\ \text{nm}$ 的 Ar^+ 激发线, 光谱扫描范围为 $50\sim 4\ 000\ \text{cm}^{-1}$, 积分时间为 10 s, 测定时仪器的分辨率为 $4\ \text{cm}^{-1}$ 。

2 结果与讨论

2.1 表面微形貌及晶体形貌

从样品的光学显微镜照片(图 1)可以看出, 研究样品的表面形貌可以划分为四大类, 分别为: 与晶体生长相关的微形貌、与晶体定向相关的熔蚀形貌、与晶体定向无关的熔蚀

收稿日期: 2020-12-29, 修订日期: 2021-04-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(41373025), 广东省自然科学基金项目(2021A1515011472)资助

作者简介: 杨志军, 1971 年生, 中山大学地球科学与工程学院教授 e-mail: yangzjh@mail.sysu.edu.cn

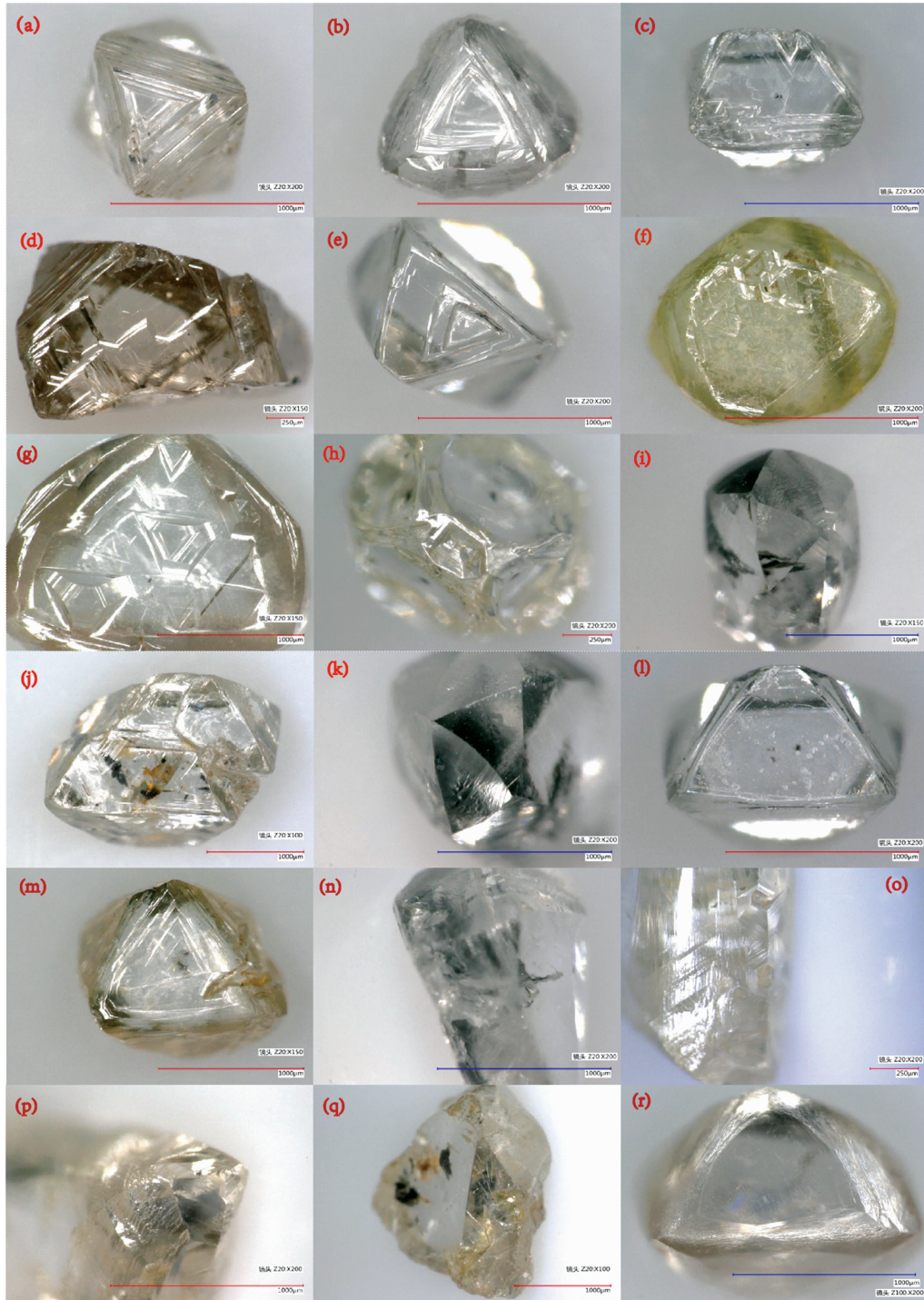


图 1 扬子克拉通西部金刚石的表面形貌

- (a): 三角形生长片层; (b): 盾形薄片; (c): 锯齿状生长纹; (d): 峰丛状三角丘; (e): 螺旋状生长纹; (f): 倒三角形凹坑;
- (g): 六边形凹坑; (h): 四边形凹坑; (i): 闭合晕线; (j): 束状晕线; (k): 滴状丘; (l): 熔蚀小坑; (m): 熔蚀沟;
- (n): 熔蚀孔道; (o): 塑性变形滑移线; (p): 叠瓦状蚀像; (q): 碰撞痕迹; (r): 划痕

Fig. 1 Surface morphology of diamonds from the Western Yangtze craton

- (a): Triangular growth lamella; (b): Shield sheet; (c): Serrated growth pattern; (d): Peak cluster triangular hill;
- (e): Spiral growth pattern; (f): Inverted triangle pit; (g): Hexagon pit; (h): Quadrilateral pit;
- (i): Closed halo; (j): Fascicular halo; (k): Drop mound; (l): Small melting pit;
- (m): Erosion ditch; (n): Erosion channel; (o): Plastic deformation slip line; (p): Imbricate etch figure;
- (q): Collision trace; (r): Scratch

形貌及与应力形变相关的形貌。其中：与晶体生长相关的微形貌包括三角形生长片层[图 1(a)]、盾形薄片[图 1(b)]、锯齿状生长纹[图 1(c)]、峰丛状三角丘[图 1(d)]、螺旋式生长纹[图 1(e)]；与晶体定向相关的熔蚀形貌包括倒三角形凹坑[图 1(f)]、六边形凹坑[图 1(g)]、四边形凹坑[图 1(h)]、晕线[图 1(i,j)]、滴状丘[图 1(k)]；与晶体定向无关的熔蚀形貌包括熔蚀小坑[图 1(l)]、熔蚀沟[图 1(m)]、熔蚀孔道[图 1(n)]；与应力形变相关的形貌包括塑性变形滑移线[图 1(o)]、叠瓦状蚀像[图 1(p)]、碰撞痕迹[图 1(q)]、划痕[图 1(r)]。

就晶体形态而言，研究样品主要包括八面体单晶、菱形十二面体单晶、四六面体单晶、三角形板状双晶、八面体平行连生、浑圆状晶体、金刚石碎块、聚形和金刚石多角刻面状多晶等。其中：八面体单晶数量最多，其次为三角形板状双晶。

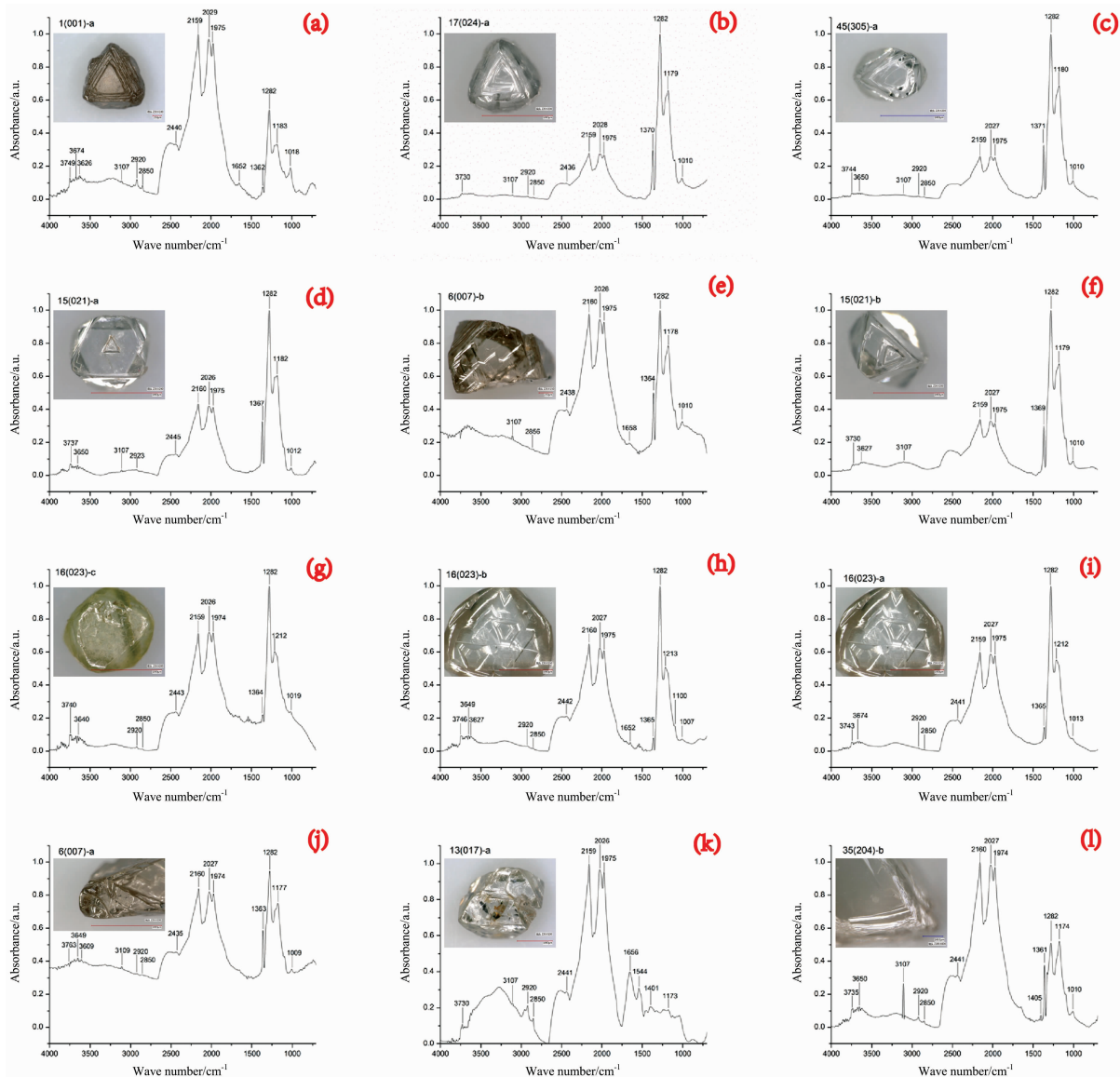
2.2 FTIR

图 2 为基于形貌特征选择的 12 个样品进行的 17 个点位

的典型透射红外光谱图。从图 2 可以看出，主要包括有金刚石的 C—C 晶格振动峰($2\ 670\sim 1\ 900\text{ cm}^{-1}$)、氮杂质($1\ 430\sim 1\ 000\text{ cm}^{-1}$)和氢杂质吸收相关峰(>C=CH_2 : $\sim 3\ 107\text{ cm}^{-1}$; sp^3 杂化 C—H 键: $\sim 2\ 850\text{ cm}^{-1}$ 、 $\sim 2\ 923\text{ cm}^{-1}$; H_2O : $\sim 3\ 640\text{ cm}^{-1}$; —OH: $\sim 3\ 760\text{ cm}^{-1}$)等三大类吸收峰。

根据当前国际上通用的金刚石中氮杂质含量的计算方法可以计算出发育不同形貌的研究样品中氮的浓度^[7]，计算结果见表 1。

从表 1 可以看出，研究区的金刚石晶体的总氮含量(N_T)变化非常大，介于 $22.90\sim 752.4\ \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 之间。由此看来，研究样品主要是 IaB 型，少量 IaA、IaB 型，且 B 心占总氮含量的比例总体比较低($B\% = 22.35\% \sim 55.58\%$)。其中：晕线中的聚集态氮全部为 B 心，而六边形凹坑、倒三角凹坑、滑移线中的聚集态氮全部为 A 心。



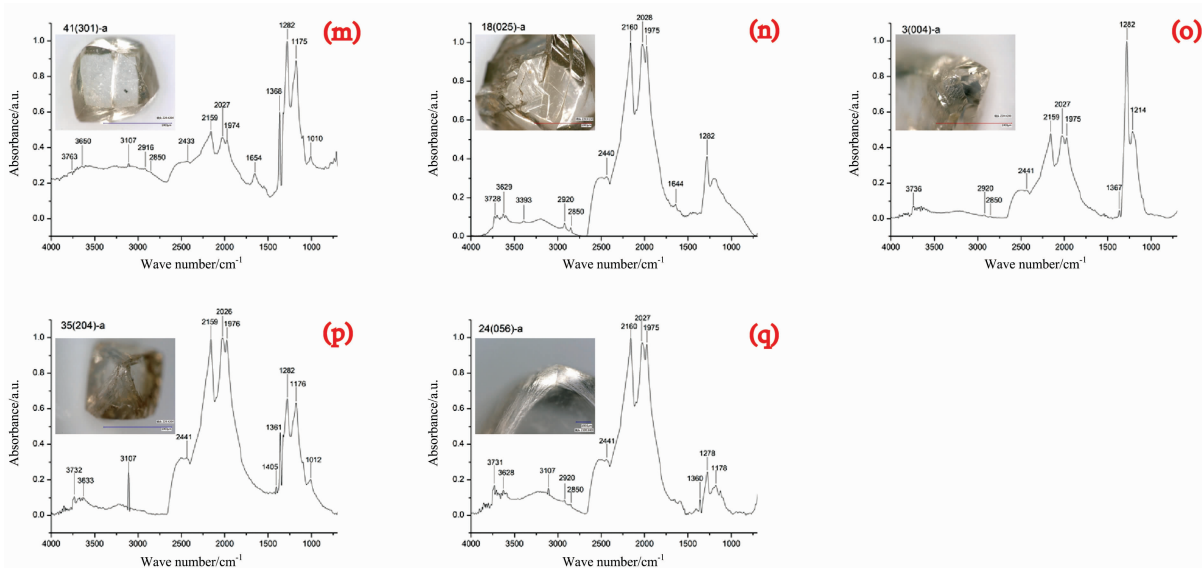


图 2 发育不同形貌的金刚石样品的显微红外透射光谱图

- (a): 三角形生长片层 1(001)-a; (b): 盾形薄片 17(024)-a; (c): 盾形薄片 45(305)-a; (d): 锯齿状生长纹 15(021)-a; (e): 峰丛状生长丘 6(007)-b; (f): 螺旋生长纹 15(021)-b; (g): 倒三角凹坑 16(023)-c; (h): 六边形凹坑 16(023)-b; (i): 六边形凹坑 16(023)-a; (j): 四边形凹坑 6(007)-a; (k): 晕线 13(017)-a; (l): 滴状丘 35(204)-b; (m): 熔蚀坑 41(301)-a; (n): 滑移线 18(025)-a; (o): 叠瓦状蚀像 3(004)-a; (p): 叠瓦状蚀像 35(204)-a; (q): 三角锥状丘 24(056)-a

Fig. 2 Micro-FTIR spectra of the diamonds with different surface morphology

- (a): Triangular lamella 1(001)-a; (b): Shield sheet 17(024)-a; (c): Shield sheet 45(305)-a; (d): Serrated growth pattern 15(021)-a; (e): Peak cluster triangular hill 6(007)-b; (f): Spiral growth pattern 15(021)-b; (g): Inverted triangle pit 16(023)-c; (h): Hexagon pit 16(023)-b; (i): Hexagon pit 16(023)-a; (j): Quadrilateral pit 6(007)-a; (k): Halo 13(017)-a; (l): Drop mound 35(204)-b; (m): Melting pit 41(301)-a; (n): Slip line 18(025)-a; (o): Imbricate etch figure 3(004)-a; (p): Imbricate etch figure 35(204)-a; (q): Triangular conical hill 24(056)-a

表 1 不同表面形貌的金刚石中 A 心氮、B 心氮及总氮的浓度计算表

Table 1 Concentration of A-center, B-center and total nitrogen in diamonds with different surface morphology

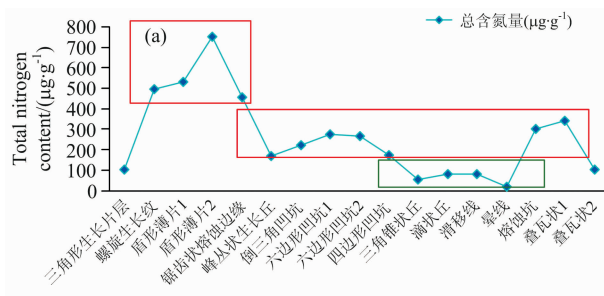
表面形貌样品编号	有效光径 d/cm	氮含量/($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)			N_B/N_T (B%)	氮的存在形式
		N_A	N_B	N_T		
三角形生长片层 1(001)-a	0.203 8	81.34	25.17	106.51	23.63	片晶 N N_A N_B
螺旋生长纹 15(021)-b	0.060 0	491.80	7.05	498.86	31.50	片晶 N N_A N_B
盾形薄片 45(305)-a	0.055 6	527.49	6.55	534.04	32.40	片晶 N N_A N_B
盾形薄片 17(024)-a	0.057 2	513.27	239.13	752.40	31.78	片晶 N N_A N_B
锯齿状熔蚀边缘 15(021)-a	0.087 1	353.65	101.81	455.47	22.35	片晶 N N_A N_B
峰丛状生长丘 6(007)-b	0.187 1	149.18	22.01	171.19	40.70	片晶 N N_A N_B
倒三角凹坑 16(023)-c	0.143 2	222.81	0	222.81	0	片晶 N N_A
六边形凹坑 16(023)-a	0.119 5	277.96	0	277.96	0	片晶 N N_A
六边形凹坑 16(023)-b	0.121 7	267.15	0	267.15	0	片晶 N N_A
四边形凹坑 6(007)-a	0.166 6	157.79	19.60	177.38	41.27	片晶 N N_A N_B
三角锥状丘 24(056)-a	0.206 9	34.44	24.34	58.77	32.88	片晶 N N_A N_B
滴状丘 35(204)-b	0.208 1	60.47	24.48	84.95	55.58	片晶 N N_A N_B
滑移线 18(025)-a	0.210 9	81.39	0	81.39	0	N_A
晕线 13(017)-a	0.194 6	0	22.90	22.90	100.00	N_B
熔蚀坑 41(301)-a	0.090 1	293.54	10.60	304.14	47.94	片晶 N N_A N_B
叠瓦状 3(004)-a	0.096 9	341.59	0	341.59	0	片晶 N N_A
叠瓦状 35(204)-a	0.2110	78.79	24.82	103.61	52.73	片晶 N N_A N_B

从图 3(a)中不同表面形貌的金刚石晶体中总氮量的变化曲线可以看出，三角形生长片层、三角锥状丘、滴状丘、滑移线、晕线中的总氮含量低于凹坑状形貌，而螺旋状生长

纹、盾形薄片、锯齿状边缘熔蚀形貌中的总氮含量最高。由此看来，低氮情况下有利于三角形生长片层等形貌的形成，而高氮量情况下更利于螺旋状生长纹等形貌的形成。事实上，

由于氮作为金刚石中的杂质，氮含量高容易造成缺陷，进而诱发螺旋状生长，而氮含量低、缺陷少更有利于层状生长。

从图 3(b)可以看出，发育晕线的金刚石中 B% 达 100%，



因而在地幔中停留的时间较长^[7-8]，而发育凹坑状形貌、滑移线的金刚石中 B% 为 0%，因而其在地幔中停留的时间最短。

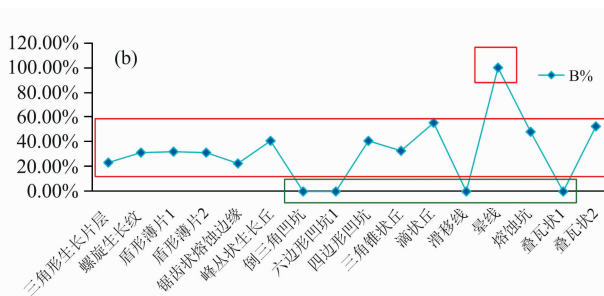


图 3 不同表面形貌的金刚石晶体中总氮量(a)、B 氮心的转换率变化(b) 曲线图

Fig. 3 Conversion rate change curve of total nitrogen (a) and B-center nitrogen (b) in diamonds with different surface morphology

从发育不同表面形貌的金刚石晶体中氢杂质相对含量 (A/d 值) 计算结果 (表 2) 可以看出，除了峰丛状生长丘 6(007)-b、螺旋生长纹 15(021)-b、滴状丘 35(204)-b、叠瓦状 35(204)-a 和三角锥状丘 24(056)-a 外，绝大部分研究样品中的 sp³ 杂化 C—H 键浓度含量高于 >C=CH₂ 的 C—H 键。发育熔蚀坑的金刚石中 2 920 和 3 107 cm⁻¹ 吸收峰都是所有形貌中最高的，四边形凹坑次之，而发育螺旋生长纹的金刚石中几乎不含 sp³ 杂化 C—H 键。

从图 4(a)中不同表面形貌的金刚石晶体中 ~2 920 cm⁻¹ 峰相对含量的变化曲线可以看出，除发育熔蚀坑、四边形凹坑形貌的金刚石中 sp³ 杂质 C—H 键含量明显较高外，其他

形貌与 sp³ 杂质 C—H 键的相关性不明显，这暗示着 sp³ 杂质 C—H 键的介入对金刚石中出现的表面形貌类型可能不会造成实质性的影响。需要进一步指出的是，由于氢相对于碳原子明显偏小，易造成晶体结构的不稳定，从而易发生熔蚀坑形成熔蚀坑。

从图 4(b)中不同表面形貌的金刚石晶体中 ~2 920 cm⁻¹ 峰相对含量与 B 氮心转换率的关系的变化曲线可以看出，sp³ 杂质 C—H 键与 B 氮心的转化率有相对较高的正相关性，这暗示着 sp³ 杂质 C—H 键的存在有利于 A 氮心向 B 氮心的转化。

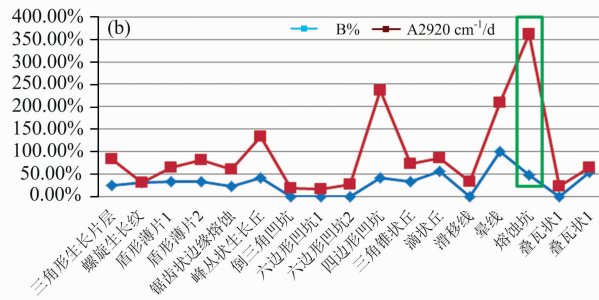
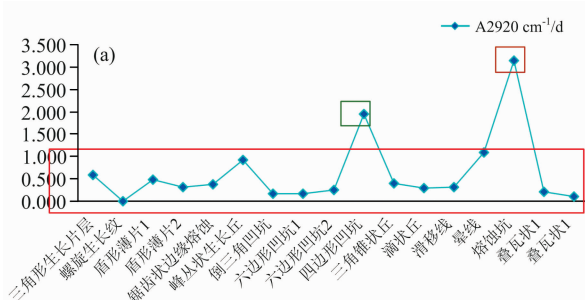


图 4 不同表面形貌的金刚石晶体中 2 920 cm⁻¹ 峰相对含量(a)及其与 B 氮心转换率的关系(b)图

Fig. 4 Related concentration of sp³ (C—H) (a) and its relationship with B-center nitrogen (b) in diamonds with different surface morphology

表 2 不同表面形貌的金刚石晶体中氢杂质相对含量计算结果

Table 2 Concentration of hydrogen in diamonds with different surface morphology

表面形貌、样品编号	有效光径 d/cm	sp ² (C—H)		sp ³ (C—H)				Σ(A/d)
		A _{3 107}	A/d	A _{2 850}	A/d	A _{2 920}	A/d	
三角形生长片层 1(001)-a	0.203 8	0.112	0.549	0.082	0.403	0.119	0.584	0.987
螺旋生长纹 15(021)-b	0.060 0	0.082	1.374	0	0	0	0	0.000
盾形薄片 45(305)-a	0.055 6	0.027	0.670	0.014	0.357	0.020	0.488	0.846
盾形薄片 17(024)-a	0.057 2	0.025	0.434	0.011	0.200	0.018	0.320	0.520
锯齿状边缘熔蚀 15(021)-a	0.087 1	0.032	0.367	0	0	0.033	0.384	0.384
峰丛状生长丘 6(007)-b	0.187 1	0.241	1.286	0	0	0.173	0.924	0.924
倒三角凹坑 16(023)-c	0.143 2	0	0	0.013	0.091	0.025	0.177	0.267

续表 2

六边形凹坑 16(023)-a	0.119 5	0	0	0.009	0.074	0.019	0.160	0.235
六边形凹坑 16(023)-b	0.121 7	0	0	0.016	0.134	0.031	0.254	0.388
四边形凹坑 6(007)-a	0.166 6	0.367	2.205	0.318	1.910	0.325	1.954	3.863
三角锥状丘 24(056)-a	0.206 9	0.152	0.735	0.061	0.293	0.084	0.406	0.699
滴状丘 35(204)-b	0.208 1	0.261	1.255	0.038	0.183	0.063	0.301	0.484
滑移线 18(025)-a	0.210 9	0	0	0.044	0.209	0.068	0.322	0.531
晕线 13(017)-a	0.194 6	0.226	1.159	0.138	0.711	0.212	1.089	1.800
熔蚀坑 41(301)-a	0.090 1	0.312	3.460	0.261	2.903	0.284	3.149	6.052
叠瓦状 3(004)-a	0.096 9	0	0	0.012	0.122	0.021	0.220	0.342
叠瓦状 35(204)-a	0.211 0	0.239	1.131	0	0	0.024	0.112	0.112

2.3 Raman

表 3、图 5 分别为 15 颗金刚石样品的 21 个形貌微区的拉曼光谱测试结果中 $\sim 1332.5\text{cm}^{-1}$ (金刚石本征拉曼位移) 的半高宽、积分面积数据表。

表 3 不同表面形貌金刚石中 $\sim 1332.5\text{cm}^{-1}$ 、半高宽和积分面积计算表

Table 3 FWHM value and integral area of $\sim 1332.5\text{cm}^{-1}$ Raman shift of diamonds with different surface morphology

表面形貌	拉曼位移 / cm^{-1}	半高宽 / cm^{-1}	积分面积 / (a. u)
三角形生长片层	1 329.7	7.356 6	281 935.9
	1 329.6	5.415 8	783 430.6
螺旋生长纹	1 329.8	5.467 8	1 166 337.2
	1 329.4	5.254 9	1 096 576.4
盾形薄片	1 329.7	5.214 2	881 288.7
	1 329.6	5.442 4	808 815.1
锯齿状熔蚀边缘	1 329.7	5.318 6	2 201 656.7
	1 329.6	5.442 4	808 815.1
峰丛状三角形生长丘	1 329.9	5.571 0	1 780 502.8
	1 329.3	5.551 6	864 060.1
倒三角形凹坑	1 329.1	5.473 2	1 047 242.0
	1 329.6	5.721 9	973 113.3
六边形凹坑	1 329.9	5.508 7	938 316.5
	1 330.2	5.410 2	948 774.1
	1 329.9	5.482 2	739 825.1
三角锥状丘	1 330.6	5.156 8	1 345 742.4
	1 329.5	5.586 8	11 774 582.0
滴状丘	1 329.8	5.497 1	1 667 486.9
	1 329.4	5.270 1	1 020 489.3
滑移线	1 329.8	5.184 1	1 890 941.2
	1 330.1	5.275 8	601 549.0
熔蚀沟	1 329.7	5.595 9	1 395 854.2
熔蚀坑	1 329.7	5.595 9	1 395 854.2

从表 3、图 5 可以看出，不同表面形貌金刚石的拉曼本征峰的半高宽在 $5.1568\sim 7.3566\text{cm}^{-1}$ 之间，明显高于高质量天然金刚石单晶的 FWHM($1.5\sim 2.5\text{cm}^{-1}$)^[4]。其中，发育晕线的金刚石的拉曼本征峰的半高宽最小，品质相对最佳；而发育三角形生长片层的金刚石的半高宽最大，品质最差；滴状丘品质优于三角锥状丘，四边形凹坑品质优于倒三

角形凹坑优于六边形凹坑，盾形薄片品质优于锯齿状熔蚀边缘优于三角形生长片层。

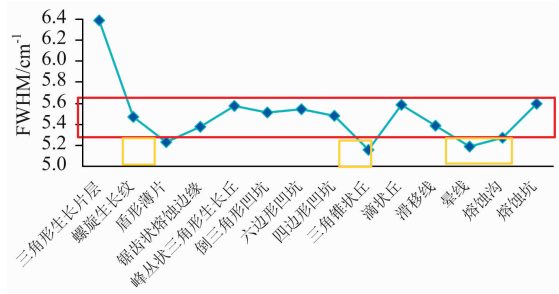


图 5 不同表面形貌金刚石的拉曼本征峰半高宽均值变化曲线图

Fig. 5 Variation curve of FWHM mean value of Raman eigen-peak of diamonds with different surface morphology

3 结 论

(1) 扬子克拉通西部砂矿型金刚石的表面形貌主要包括：与晶体生长相关的微形貌、与晶体定向相关的熔蚀形貌、与晶体定向无关的熔蚀形貌及与应力形变相关的形貌等四大类。其中：与晶体生长相关的微形貌包括三角形生长片层、盾形薄片、锯齿状生长纹、峰丛状三角丘、螺旋式生长纹；与晶体定向相关的熔蚀形貌包括倒三角形凹坑、六边形凹坑、四边形凹坑、晕线、滴状丘；与晶体定向无关的熔蚀形貌包括熔蚀坑、熔蚀沟、熔蚀孔道；与应力形变相关的形貌包括塑性变形滑移线、叠瓦状蚀像、碰撞痕迹、划痕。

(2) 扬子克拉通西部金刚石以 IaAB 型为主，少数为 IaA、IaB 型。金刚石晶体中氮含量介于 $22.90\sim 752.40\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 之间，绝大部分样品的 sp^3 杂化 C—H 键浓度含量高于 sp^2 杂化 C—H 键，氮杂质的存在有利于 A 氮心转化为 B 氮心。

(3) sp^3 杂质 C—H 键的存在对金刚石表面出现的形貌类型可能不会造成实质性的影响，但极利于形成熔蚀坑。

(4) 各种表面形貌的存在都会降低金刚石的表面有序度，但发育晕线者的表面有序度相对最高，而发育三角形生长片层者表面有序度最低。

References

- [1] Simakov S K. *Ore Geology Reviews*, 2018, 102: 195.
- [2] Attrash M, Kuntumalla M K, Michaelson S, et al. *Surface Science*, 2021, 703: 121741.
- [3] Howell D, Collins A T, Loudin L C, et al. *Diamond & Related Materials*, 2019, 96: 207.
- [4] Yang Z J, Li H Z, Peng M S, et al. *Chinese Science Bulletin*, 2008, 53(1): 137.
- [5] Taylor W R, Canil D, Milledge H J. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 1996, 60(23): 4725.
- [6] Yang Zhijun, Liang Rong, Zeng Xiangqing, et al. *ISRN Spectroscopy*, 2012, 2012: 1.
- [7] HU Piao-ye, ZENG Liang-liang, YANG Zhi-jun, et al(胡飘野, 曾亮亮, 杨志军, 等). *Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析)*, 2015, 35(6): 1534.

Study on the Surface Morphology and Its Vibrational Spectra of Diamond From the Western Yangtze Craton

YANG Zhi-jun^{1,2}, MAO Meng-ai¹, HUANG Yi-cong¹, ZHANG Jia-wei¹

1. School of Earth Sciences and Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China

2. Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources Exploration, Guangdong Province, Guangzhou 510275, China

Abstract Based on the possibility to provide scientific clues for the inversion of diamond formation environment and the design of the diamond synthesis process, the paper studied the relationship between the surface morphology, the content of impurity nitrogen and hydrogen and the degree of order in structure of natural placer diamonds from the western Yangtze Craton by using the optical microscope, infrared spectroscopy and Raman spectroscopy. The results show that the surface morphology on diamond includes micro-morphology related to crystal growth, ablation morphology depend on crystal orientation, ablation morphology independ on crystal orientation, and morphology related to stress deformation. The diamonds mainly belong to type IaAB and the nitrogen content in them is $22.90\sim 752.40\ \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$. The concentration of sp^3 hybridized C—H bond is higher than of sp^2 hybridized C—H bond in most of the samples, that indicated the existence of hydrogen was conducive to transformation from the A nitrogen center to B nitrogen center in diamond and the sp^3 hybridized C—H bond may result in the formation of corrosion pits and affect slightly the others morphology of the diamond surface. All of the surface morphologies would lower the degree of order of diamond. The degree of surface order was the highest in diamond with halo and the lowest in diamond with growth lamella.

Keywords Surface topography; FTIR; Raman; Diamond

(Received Dec. 29, 2020; accepted Apr. 6, 2021)