

山东蒙阴褐色金刚石的透射电镜特征分析

武改朝^{1,2}, 余晓艳²

(1. 北京市商业学校, 北京 102209; 2. 中国地质大学 珠宝学院, 北京 100083)

摘要: 山东蒙阴褐色金刚石的颜色由多个原因导致, 为了验证褐色与塑性变形存在着一定的关系, 同时为了分析褐色金刚石在透射电镜下的特征, 本研究选取取自山东蒙阴胜利 1 号岩管的褐色金刚石样品, 利用透射电镜和 X 射线能谱仪对褐色金刚石的位错组态、位错密度以及矿物包裹体进行了实验研究。实验结果表明, 样品中存在片晶氮, 一定程度上表明山东蒙阴褐色金刚石中的位错组态以及位错间的相互作用、位错反应的类型是非常丰富的, 而这些都是以位错的运动为前提的, 位错密度从一定程度上表明该类金刚石样品均具有一定程度的塑性变形, 为褐色与塑性变形的关联提供一定的量化参考。

关键词: 蒙阴, 褐色金刚石, 透射电镜, 位错

中图分类号: P578.1+6

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2014)S0-0111-09

An analysis of the characteristics of brown diamonds from Mengyin in Shandong Province under transmission electron microscopy (TEM)

WU Gai-chao^{1,2} and YU Xiao-yan²

(1. Beijing Commerce School, Beijing 102209, China; 2. School of Gemology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: The color of brown diamond from Mengyin of Shandong Province is caused by many factors. In order to verify the relationship between the brown color and the plastic deformation and analyze the characteristics of brown diamond under the transmission electron microscopy (TEM), the authors collected brown diamond samples from Mengyin Victory 1 rock tube, and made experiments on dislocation configuration of brown diamond, dislocation density and mineral energy spectrum under transmission electron microscopy (TEM) and X-ray energy spectrometer. The results show that there exists wafer nitrogen in the sample, demonstrating to some extent the dislocation configuration in darkened brown diamond of Shandong and suggesting that both the interaction between dislocations and the dislocation reaction types are very rich, and these characteristics are based on the premise of dislocation motion. Dislocation density shows in a sense that the diamond samples have a certain degree of plastic deformation, which provides some quantified reference for the connection between the brown color and the plastic deformation.

Key words: Mengyin; brown diamond; transmission electron microscopy (TEM); dislocation

山东蒙阴褐色金刚石的颜色由多个原因导致, 为了验证褐色与塑性变形存在着一定的关系, 同时为了分析褐色金刚石在透射电镜下的特征, 本研究选取取自

自山东蒙阴胜利 1 号岩管的褐色金刚石样品, 利用透射电镜和 X 射线能谱仪对褐色金刚石的位错组态、位错密度以及矿物包裹体进行了实验研究。

收稿日期: 2013-12-04; 修订日期: 2013-12-16

作者简介: 武改朝 (1982-), 男, 汉, 硕士, 讲师, 主要从事宝石矿物学研究与宝石加工教学, E-mail: wu.g.c@126.com; 通讯作者: 余晓艳, 副教授, E-mail: yuxy@cugb.edu.cn。

1 材料与方法

1.1 样品制备

样品 MY-38(黄褐色)选自山东蒙阴胜利1号岩管。经青岛京华饰品有限公司进行两次抛磨至0.2 mm,切取直径为3 mm左右的圆片,经氩离子长时间(95 h)轰击穿孔,孔边缘处减薄至电子束可以穿透的厚度用于电镜观察和照相。测试仪器为lky-AB型离子刻蚀样品低温减薄仪。

1.2 样品观测及照相

TEM的观测工作是在日立公司H-8100型电镜上进行,工作的加速电压为200 kV,该仪器配备的X射线能谱仪(EDS)为Philp公司EDAX-4型,其探测器具有超薄窗口,能鉴定从硼(原子序数为5)到铀(原子序数为92)的所有元素。在进行TEM样品直接观测的同时,对内部出现的包体结合EDS进行微区成分分析测试。另外,拍照时还利用了透射电镜弱束暗场技术,大大提高了分辨率。

2 结果与讨论

2.1 山东蒙阴褐色金刚石位错组态

本次观测的MY-38样品中出现了位错、层错、

位错网络、位错环(位错圈)、片晶氮等5类结构缺陷。这5类结构缺陷主要由空位和包裹体引起。

2.1.1 位错

位错是晶体中的一种线缺陷,在金刚石中大多数沿[110]方向分布。如果同一平面上存在多个位错,在不大的外力作用下,位错部分的原子易产生移动,并会相继滑移出晶体,产生宏观可见的变形,即产生滑移线(奥尔洛夫,1977)。

金刚石晶体表面的溶蚀方向和程度与滑移线相关。当晶体受到较弱的溶蚀作用时,滑移线通常不明显,溶蚀作用强烈时,沿滑移线方向会刻蚀出三角形蚀像,蚀像沿此方向形成延伸的长链。样品MY-38的TEM图像显示表面溶蚀比较严重,出现一组滑移线(图1),位错与样品表面交叉,呈点状、线状出露,部分区域出现位错缠结。

2.1.2 层错

层错是全位错分解和扩展的结果(韩勇等,2007)。背景可见相干条纹。包含层错的扩展位错只能沿层错所在晶面运动,大大限制了位错的运动能力。一般全位错在运动中遇到障碍时,可以通过交叉滑移或攀移绕过障碍。扩展位错要离开层错所在晶面,则首先要重新合并成一根全位错,即发生束集。但束集是能量升高的过程,不能自发进行,需要外界供给能量,因而位错扩展后,其运动能力减弱,

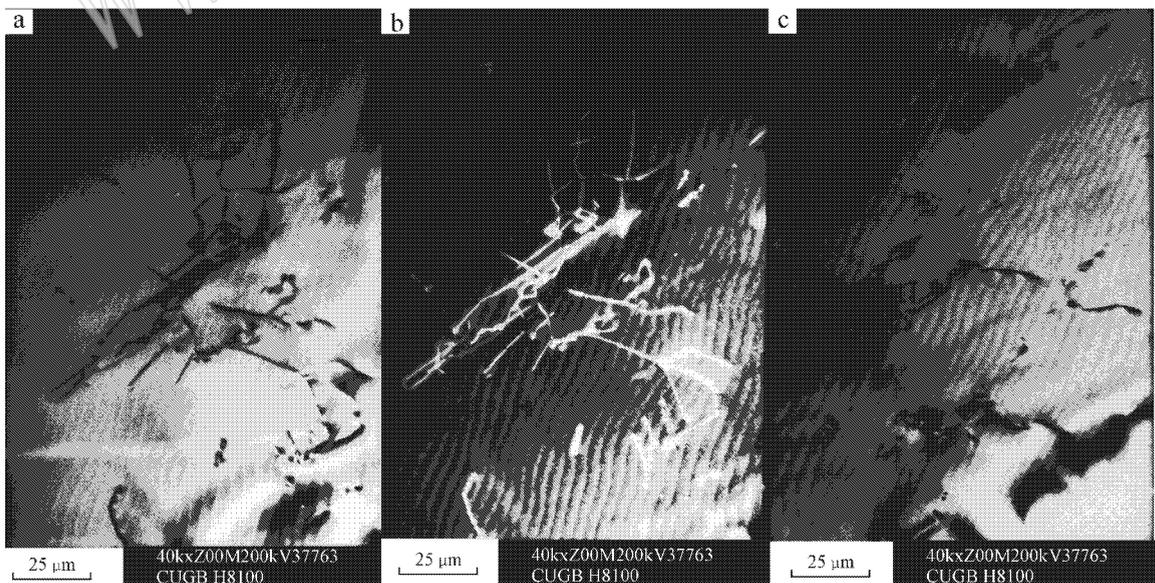


图1 TEM位错像(像宽5 cm)

Fig. 1 TEM dislocation picture(5 cm)

a—明场像(40 000×); b—中心暗场像(40 000×); c—明场像(40 000×)

a—light field picture(40 000×); b—center of dark field picture(40 000×); c—light field picture(40 000×)

并由此导致岩石材料强度增加,范性降低。

大量较宽的层错的存在,表明该区域的层错能较低。层错能的大小一般不仅取决于晶体结构,也与成分相关。而在有些区域只能观察到全位错,表明这些区域层错能高,全位错无法扩展。这表明天然金刚石在形成的过程中不同位置受应力和温度不

均匀,并由此导致晶体缺陷的类型随空间位置而改变。

图2显示,局部位错密度很高,主要是层错,全位错很少。这从一定意义上说明山东蒙阴褐色金刚石晶体层错能较低(可能由杂质原子偏聚引起),位错易于扩展,导致较多层错的产生。

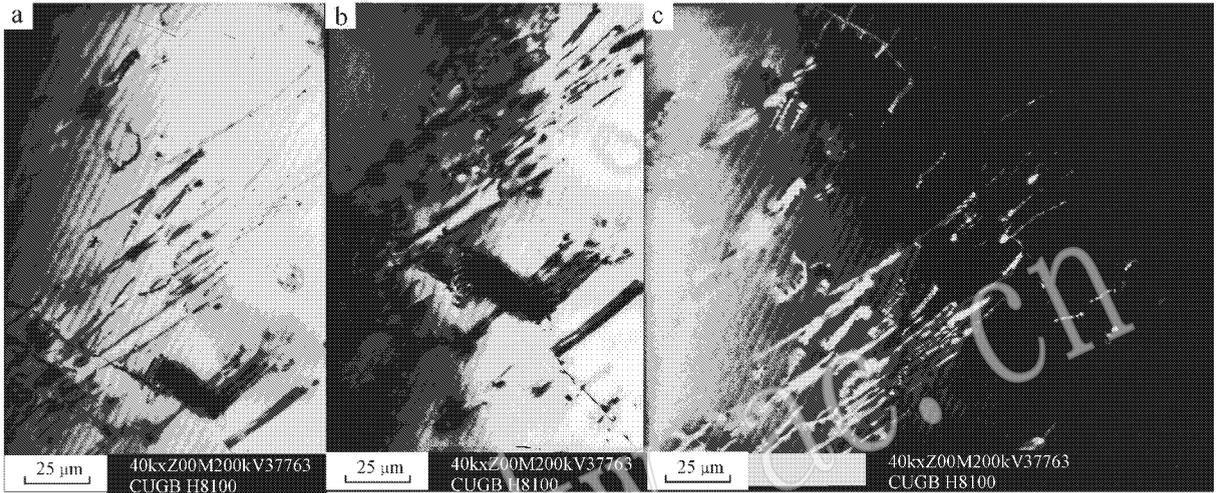


图2 层错像(像宽5 cm)

Fig. 2 Dislocation picture(5 cm)

a—明场像(40 000×); b—明场像(50 000×); c—中心暗场像(40 000×)

a—light field picture(40 000×); b—light field picture(50 000×); c—center of dark field picture(40 000×)

2.1.3 位错网络

位错网络常常在超显微包裹体富集区域附近形成,富集区域的集中应力通过位错网络来释放(Yin *et al.*, 2001)。位错网络很稳定,因为超显微包裹体为位错网络提供了“势能谷”;同时,位错产生应力,将超显微包裹体牵引回去,使其不能脱离此区域。样品中的位错网络图像(图3)显示,由直线位错相交构成网状,明场像显示位错缠结,属于高密度位错。

2.1.4 位错环(位错圈)

研究表明,位错环有两种形成机制。其一是由空位或间隙原子聚集造成(Evans and Phaal, 1962);金刚石在地幔的高温高压条件下形成,晶体中存在大量位错环。金刚石的原子密排面(111)具有最低表面能。因此空位优先在(111)面凝聚成空位片,当空位片的尺寸到达上百个原子间距时,上下的原子面就会向空位片方向崩塌,片的周界便被封闭的刃位错中间的空位构成位错环。金刚石TEM薄片厚度大约为200 nm,空位的浓度大约是 1.019 cm^{-3} 数量级(Evans and Phaal, 1962)。如果金刚石在深部长

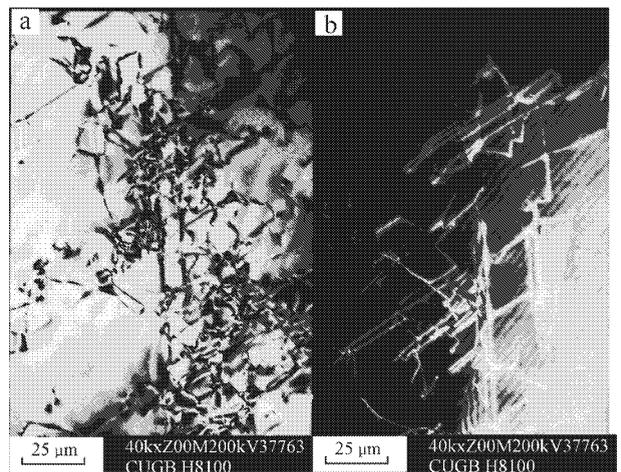


图3 位错网络(明显的位错缠结)
(像宽5 cm)

Fig. 3 Dislocation networks(obvious dislocation tangles)(5 cm)

a—明场像(40 000×); b—中心暗场像(40 000×)

a—light field picture(40 000×); b—center of dark field picture(40 000×)

时间受高压作用,空位片逐渐崩塌,间隙原子在(111)面上聚集成片,就好像在正常的晶面堆垛顺序中多了一层附加原子面,片的周界也被封闭的刃位错所包围。

通过研究辽宁瓦房店天然金刚石的位错组态,韩勇等(2005)揭示出位错圈(位错环)是由空位盘崩塌形成的。说明金刚石样品经历过急冷(过饱和的空位聚集而形成大量空位盘,空位盘的崩塌将导致位错圈的产生,且这种位错圈只能是刃型位错),极有可能是金刚石在抬升过程中遇水所致[辽宁天然

金刚石含有 CO_2 流体包裹体(肖化云等,2001),而山东蒙阴金刚石含有钾盐、石盐等流体包裹体(吴伟娟,1998)]。

在位错环区域内,原子层堆垛破坏了正常顺序,通常会形成层错。图4中TEM样品的3个位置均出现层错干涉条纹。位错环也可能由螺旋位错运动造成(Evans and Phaal,1962)。这种位错环常常又长又窄,也称为位错偶,可以分解成小的位错圆环。图4中样品的位错环除个别比较明显之外,总体较弱。

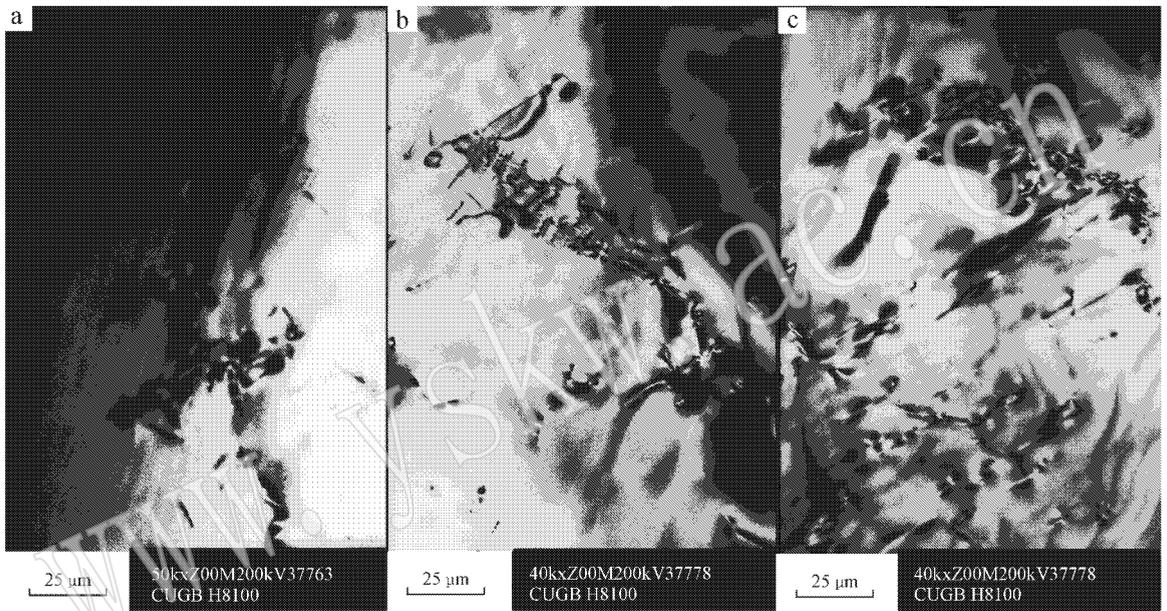


图 4 位错环(位错圈)以及位错偶(像宽 5 cm)

Fig. 4 Dislocation loops (dislocation loop) and dislocation dipole (5 cm)

a—明场像(50 000×); b—明场像(40 000×); c—明场像(40 000×)

a—light field picture(50 000×); b—light field picture(40 000×); c—light field picture(40 000×)

2.1.5 片晶氮

Woods(1976)、Humble(1982)、Barry 和 Bursill(1985)、Bursill 和 Glaisher(1985)、Goss 等(2003)研究发现,氮是金刚石中的主要杂质,以单个替代形式(C中心)和各种聚集形式存在,包括A中心、N3中心、B中心和片晶氮。片晶氮在(100)面上沿[100]方向分布,产生 $1363 \sim 1370 \text{ cm}^{-1}$ 左右的红外吸收峰,与样品MY-38的FTIR(1363.44 cm^{-1})的结果一致。片晶氮大小 $100 \sim 130 \text{ nm}$,多数为 125 nm 。内部显示明暗交替条纹。在样品图片中呈现蜈蚣状或纽扣状分布,背景为相干条纹(图5)。

2.2 山东蒙阴褐色金刚石的位错密度

2.2.1 位错密度的定义

位错密度是单位面积内位错露头的数目。对单晶完整性的评价往往是以晶体中位错密度(ρ)的大小来度量的。

但无论用透射电镜或其他方法(例如X射线法)测量出的位错密度,通常只有数量级的意义(黄孝瑛,1989)。影响透射电镜精确测定位错密度有下列4个因素:①位错密度具有不均匀性,与力学、物理和化学性质实际相关的是样品的平均位错密度,而电镜观察的视场一般是微米数量级或更小的范围;②由于薄膜试样很薄,接近于二维的形状,部分位错逸出试样;③在薄膜制备过程中,由于塑性变形或加热导致样品的位错密度发生变化;④由于位错的不可见性,测定时需要倾转使其再现。但由于

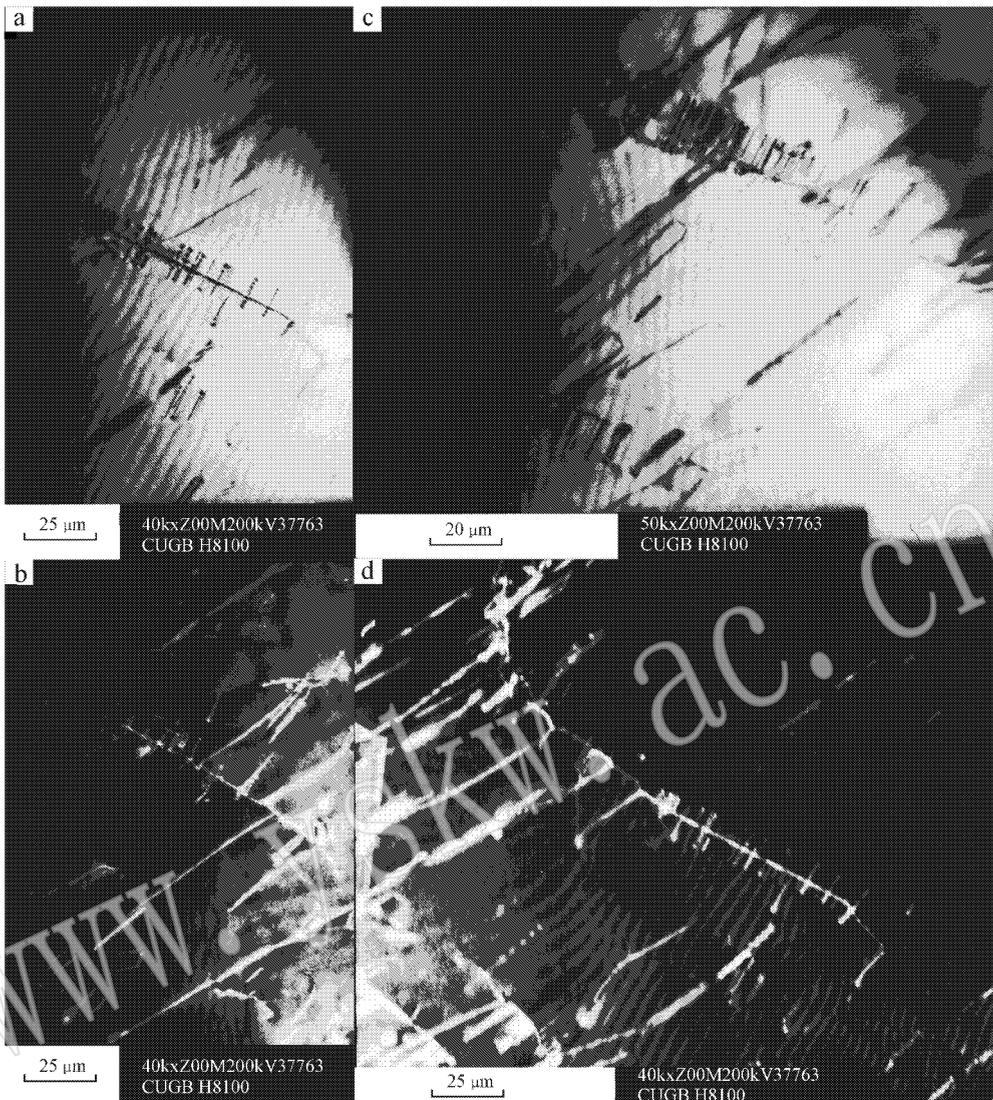


图 5 片晶氮

Fig. 5 Wafer nitrogen

- a—明场像(40 000×)(像宽 5 cm); b—中心暗场像(40 000×)(像宽 5 cm); c—明场像(50 000×)(像宽 9 cm);
 d—中心暗场像(40 000×)(像宽 9 cm)
 a—light field picture(40 000×); b—center of dark field picture(40 000×); c—light field picture(50 000×);
 d—center of dark field picture(40 000×)

受倾动台性能的限制,也很难使位错全部再现。

2.2.2 位错密度计算方法

测量位错密度的方法,分低密度位错测量和高密度位错测量两种。一般说,衍衬照片上位错分布稀疏,可用一般方法逐根计数,为低密度位错;反之,如果位错纠结在一起,以致很难将它们分开加以计数,如胞结构、位错纠结等,均列入高密度位错范围。本文实验 TEM 照片特征显示,除个别照片因出现明显的位错纠结不易计数之外,大部分照片显示可以通过逐根计数的方法计算密度。

实际电镜观察的薄片晶体样品是透明的,存在上下膜面两个截面,位错密度等于试样中位错线与上下两个膜面相交的点数,也就是位错的端点露头数,可以表达为:

$$\rho = 2 P_A M / (ab) \quad (1)$$

其中, ρ 为位错密度(cm^{-2}), P_A 为单位面积与位错线的交截点数, M 为放大倍数, a 、 b 为照片边长(cm)。

根据公式 1,对样品 MY-38 的多个视场中位错密度进行统计,统计结果见表 1。

表 1 样品 MY-38 位错密度统计表

Table 1 Dislocation density of sample MY-38

位错类型	位错	层错	位错网络	片晶氮
位错密度/cm ⁻²	8.9×10 ⁴	1.6×10 ⁵	2.2×10 ⁵	8.1×10 ⁴

由表 1 可知,样品 MY-38 的位错密度范围为 $8.1 \times 10^4 \sim 1.6 \times 10^5 \text{ cm}^{-2}$, 平均密度为 $1.2 \times 10^5 \text{ cm}^{-2}$ 。由于个别视场出现大面积的位错缠结,故实际密度比测出的平均密度还要大。

位错环可以近似看成是封闭的位错线,其密度是位错的密度的一半,即

$$\rho_{\text{环}} = 2 P_A^1 M / (ab) \quad (2)$$

其中, $\rho_{\text{环}}$ 为位错环密度 (cm^{-2}), P_A^1 为单位面积与位错环的交截点数, M 为放大倍数; a 、 b 为照片边长 (cm)。公式 2 计算结果显示,位错环密度范围为 $1 \times 10^4 \sim 5.19 \times 10^4 \text{ cm}^{-2}$, 平均密度为 $3.1 \times 10^5 \text{ cm}^{-2}$ 。

位错是晶体中普遍存在的结构缺陷。研究表明,较完整晶体的位错密度约为 $102 \sim 103 \text{ cm}^{-2}$, 一般晶体约为 $103 \sim 104 \text{ cm}^{-2}$, 表现出塑性变形的晶体约为 $105 \sim 109 \text{ cm}^{-2}$, 形变严重的约为 $1010 \sim 1012 \text{ cm}^{-2}$ (郑辙, 1992)。本文计算发现金刚石样品的位错密度相差不大, 介于 $104 \sim 105 \text{ cm}^{-2}$ 之间, 从一定意义上表明该类金刚石均具有一定程度的塑性变形。

2.3 山东蒙阴褐色金刚石位错组态小结

天然金刚石结晶时,位错密度应该很低,而笔者在 TEM 下观察到的产自山东蒙阴的褐色金刚石的位错密度较高,且位错分布不均匀,局部密度可达 1010 cm^{-1} 。位错间呈现很强的相互作用,表明样品曾经经历很大的塑性变形。考虑到金刚石的力学性能,这种变形应该是在高温高应力(熔点的绝对温度的一半以上,即约 1700°C 以上)条件下进行,表明金刚石在形成后经历裹高温剧烈变形,在某些区域有层错集中出现,可能是杂质原子偏聚降低了层错能,造成局部位错扩展的结果。

2.4 山东蒙阴褐色金刚石 TEM 下矿物包裹体能谱分析

从 X 射线能谱仪元素分析表(表 2)中,可看出 C 的含量总体很高,这是因为基底为金刚石的缘故,不排除还有石墨包体的可能性。但是图 6c-A 包体中未出现 C 元素, Cu 元素含量很高。Cu 峰的存在,极有可能是离子减薄中铜质压环碎屑所致或者透射电

镜物台上铜环的影响。但不排除包体中铜元素的存在,陈丰等(1992)在辽宁、山东和湖南的金刚石中均发现高铜高氯包体。

图 6a 和图 6b 中四个点的 X 射线能谱显示,氯元素含量很高,最高达到 41.6%。这表明山东蒙阴褐色金刚石中含有高氯包体,与陈丰等(1992)研究吻合。

吴伟娟(1998)发现山东蒙阴金刚石含有钾盐、石盐等流体包裹体。本文测试的图 6a-A 处包体主要含有氯、钠元素,可推测其主要含有石盐包体。

陈丰等(1992)在山东蒙阴金刚石中初次发现钾盐包体。本文中图 6a-B 处的包体主要含有钾、氯两种元素,含量分别为 24%、25.6%。二者含量比值 $K/Cl = 1.15$, 比较接近 KCl 中的比值 1.10(39/35.5), 并且原子数分别为 15.2%、14.6%, 原子数比值为 1.04, 接近 KCl 中原子数比值 1。故可以判断该包体为钾盐包体,且主要为 KCl。这与陈丰等(1992)的发现吻合。但是,不同的是,此次含这种包体的金刚石类型为 I aAB, 而陈丰等(1992)发现含有钾盐包体的类型为 II 型。

图 6b-A 与图 6a-A 处包体各项元素含量接近。也主要含有氯、钠元素。且氯元素高达 38.7%, 属于高氯包体。

图 6b-B 处包体主要含有氧、氯、钙、钠等元素,还含有微量的镁、铝、硅。可能存在石盐和微量的镁铝榴石包体。

图 6c-A 处除了不含 C, 还有大量的 Cu 之外, 还含主要含有 O、Si、Fe、Ca 等元素, 且铁的含量相对较高。包体中还含有微量的 Mg。故可推测此处含有橄榄石、透辉石等包体。

图 6c-B 处主要含有 C、O、Si、Al、Ca、Fe 等元素, 还含有微量 Mg。故可推测此处含有橄榄石、透辉石等包体。

图 6d-A 处,除了含有大量 C 外, 还有较多比重的 N 元素。N 的存在,是形成样品黄色调的一个因素。其他元素最主要的是 O。Ca、K、Si、Na、Cl 等元素的比重相当。还含有微量的 Mg、Al 等元素。

图 6d-B 处,含有大量的 Si、O 元素(各占 30% 左右)。其次为 Al、Ca、N 等。还有微量的 Mg 元素。故可推测此处主要含有镁铝榴石包体。钾盐的红外吸收峰在 228 cm^{-1} (本文测试红外最低波数为 400 cm^{-1} , 该数值超出本文红外测试范围,故在红外光谱中没有显示), 石盐无特征红外吸收峰(彭文世等, 1982)。

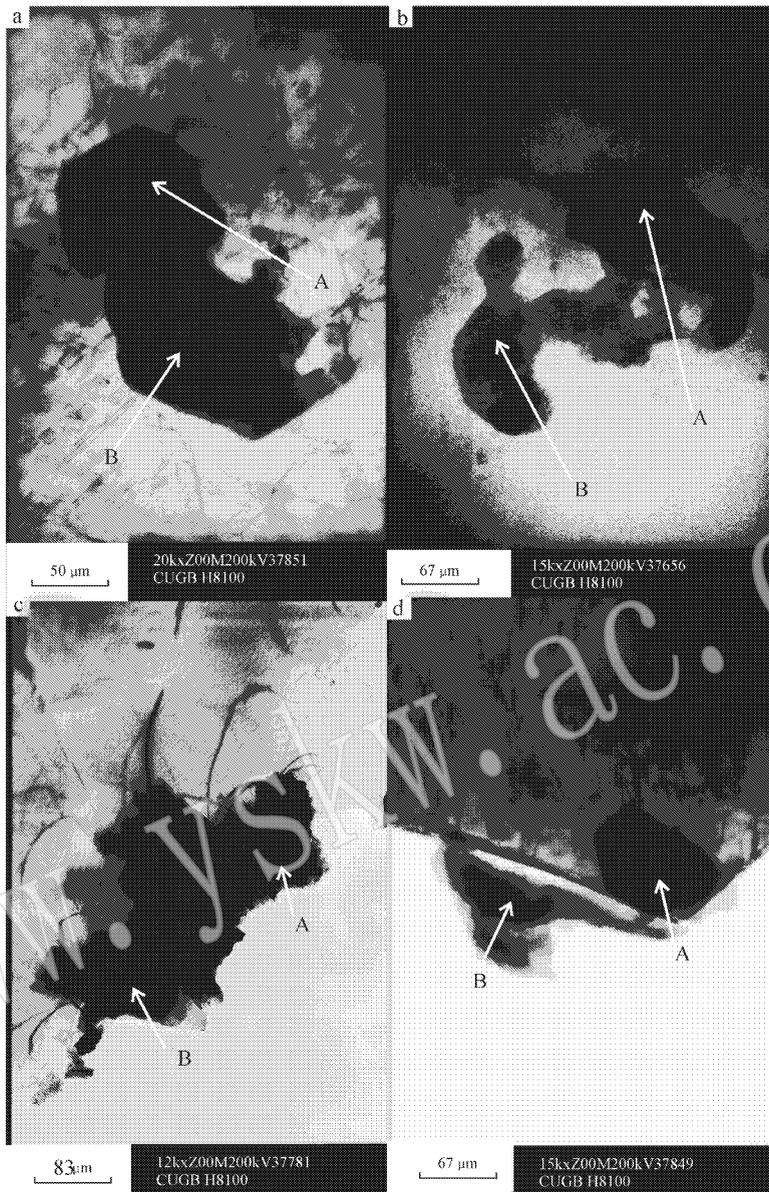


图 6 TEM 下矿物包裹体能谱分析

Fig. 6 The analysis of mineral energy spectrum under the TEM

a—包体明场像(20 000×)(像宽 5 cm); b—包体明场像(15 000×)(像宽 5 cm); c—包体明场像(12 000×)(像宽 5 cm);

d—包体明场像(15 000×)(像宽 5 cm)

a—Inclusions Light field picture(20 000×); b—Inclusions Light field picture(15 000×); c—Inclusions Light field picture(12 000×);

d—Inclusions Light field picture(15 000×)

样品 MY-38 的红外光谱吸收谱峰显示含有包裹体主要为：镁铝榴石(474.41 cm^{-1})，透辉石(674.97 cm^{-1})，橄榄石(877.46 cm^{-1} 处于 875 cm^{-1} (透铁橄榄石)与 880 cm^{-1} (贵橄榄石)之间(彭文世等, 1982]。透射电镜 X 射线能谱仪显示金刚石样

品中含有钾盐(KCl)、石盐(NaCl)、橄榄石($\text{Mg, Fe}_2[\text{SiO}_4]$)、镁铝榴石 $\text{Mg}_3\text{Al}_2[\text{SiO}_4]_3$ 、透辉石($\text{CaMg}[\text{Si}_2\text{O}_6]$)等包体。

红外光谱显示的包体类型与透射电镜能谱仪测试的结果相吻合。

表 2 透射电镜 X 射线能谱仪对包体元素分析表

Table 2 EDS data of sample

图名	元素比重	C	N	O	Na	Mg	Al	Si	S	Cl	K	Ca	Fe	Cu	总计
图 6a-A	重量%	37	1.9	2.2	10.9	-	-	0.8	-	41.6	1.5	0.2	-	-	100
	原子数%	61.9	1.6	1.8	8.9	-	-	0.5	-	21.5	0.7	0.1	-	-	100
图 6a-B	重量%	36.6	1.0	3.3	0.2	-	-	1.0	1.2	25.6	24	0.8	-	-	100
	原子数%	61.9	2.2	4.2	0.1	-	-	0.7	2.2	14.6	15.2	0.4	-	-	100
图 6b-A	重量%	45.4	1.6	1.9	8.3	-	-	0.5	0.5	38.7	0.8	0.4	-	-	100
	原子数%	66.8	3.3	3.2	6.4	-	-	0.3	0.3	13	0.4	0.2	-	-	100
图 6b-B	重量%	21	5.5	28.7	7.9	2.1	0.6	0.8	1.7	21.8	3.0	7.9	-	-	100
	原子数%	31.9	7.3	33.7	6.4	1.0	0.4	0.5	1.0	11.5	2.2	3.7	-	-	100
图 6c-A	重量%	-	-	15.4	-	1.0	2.1	15.1	0.8	0.4	0.9	4.7	8.4	51.1	100
	原子数%	-	-	35.1	-	1.5	1.7	17	0.9	0.4	0.8	4.3	5.5	30.0	100
图 6c-B	重量%	25.5	-	32.2	-	0.9	10.2	11.1	0.9	1.1	10.2	5.7	5.7	-	100
	原子数%	33	-	36.3	-	0.7	7.0	8.0	1.2	0.5	0.5	4.7	1.9	-	100
图 6d-A	重量%	28.3	15.2	22	1.8	0.8	1.1	4.1	3.7	3.4	6.0	5.4	-	-	100
	原子数%	8.6	17.8	29	1.0	0.5	0.7	2.2	1.9	1.6	1.5	1.2	-	-	100
图 6d-B	重量%	17.1	3.9	31.0	0.8	0.7	7.0	30.6	-	1.0	1.0	4.8	-	-	100
	原子数%	26.8	5.2	37.6	0.6	0.6	4.9	20.5	-	0.5	0.9	2.1	-	-	100

注：以上 EDS 数据由中国地质大学地学实验中心透射电镜室韩勇测试。

3 讨论与结论

(1) 虽然只观察了一粒样品,但从一定意义上表明山东蒙阴褐色金刚石中的位错组态以及位错间的相互作用、位错反应的类型是非常丰富的,而这些都是以位错的运动为前提的。但是,本次实验观测的样品 MY-38 包含较多的包体,并且层错能较低(可能由杂质原子偏聚引起),位错易于扩展,这些又都是不利于位错运动的因素。综合考虑这些方面,样品应该经受了高温高应力的长期作用。在此期间,位错发生了显著的运动,位错增殖与位错回复基本达成动态平衡,使位错密度不会持续增长,但位错分布趋向于非均匀化。

(2) 金刚石生长过程具有不均一性(Vance *et al.*, 1973),并常会捕掳包裹体。包裹体和金刚石主体之间存在热胀系数的差异,当金刚石被岩浆侵位携至地壳上部,温度的骤降势必引入应力场,当应力达到一定的临界之时,将形成位错。透射电镜显微能谱显示,样品 MY-38 中有超显微包体,包体引起的应力几种区域最有可能产生位错,超显微包体富集区域容易形成位错网络。

(3) 样品中存在片晶氮。片晶氮在(100)面上沿 100 方向分布,产生 $1363 \sim 1370 \text{ cm}^{-1}$ 左右的红外吸收峰,与样品 MY-38 的 FTIR (1363.44 cm^{-1}) 的结果一致。片晶氮大小 $100 \sim 130 \text{ nm}$,多数为 125

nm。

(4) 样品的位错密度范围为 $1 \times 10^4 \sim 1.6 \times 10^5 \text{ cm}^{-2}$,从一定意义上表明该类金刚石样品均具有一定程度的塑性变形。尽管褐色的产生与塑性变形具有一定的关系,但是因为测试样品数量和观察方向的局限性,样品的颜色特征与位错密度是否存在某种相关性需要进一步讨论。

(5) 透射电镜 X 射线能谱仪显示,金刚石样品中含有钾盐、石盐、橄榄石、镁铝榴石、透辉石等包体。与红外光谱显示的包体类型相吻合。大量包体在其形成和演化过程中,形成一定应力场,造成了包体周边位错的产生。

致谢 感谢中国地质大学(北京)地学实验中心透射电镜室韩勇老师在透射电镜实验中给予的指导与大力协助。

References

- Barry J G and Bursill A. 1985. On the structure of {100} platelet defects in type I a diamond [J]. *Philosophical Magazine*, A51(1): 15~49.
- Bursill L A and Glaisher R W. 1985. Aggregation and dissolution of small and extended defect structure in type I a diamond [J]. *American Mineralogist*, 70: 608~618.
- Chen Feng, Wang Mingzai, Wang Sanxue, *et al.* 1992. For the first

- time found that high copper chloride inclusions in diamond[J]. Chinese Science Bulletin , 10(in Chinese with English abstract).
- Evans T and Phaal C. 1962. Dislocation loops in diamond[J]. Philosophical Magazine , 7(77): 843~846.
- Goss J P , Coomer B J , Jones R , *et al.* 2003. Extended defects in diamonds: The interstitial platelet[J]. Physical Review B , 67 : 165208-1-15.
- Han Yong and Chen Meihua. 2005. Dislocation configuration of natural diamond[J]. Journal of Electron Microscopy , 24(4): 326~326(in Chinese with English abstract).
- Han Yong , Lu Fengxiang and Fang Qinfang. 2007. Olive stone micro plastic deformation of transmission electron microscopy(TEM) analysis[J]. Journal of Mineral Rock Geochemical Bulletin , 26(supp.): 178(in Chinese with English abstract).
- Huang Xiaoying. 1989. Electron Microscopic Image Analysis Principle and Application[M]. Beijing : Astronautics Press , 310~398(in Chinese with English abstract).
- Humble P. 1982. The structure and mechanism of formation of platelets in natural type I a diamond[J]. Proceeding of the Royal Society of London , A381 : 65~81.
- Orlov Ю.И. 1977. Diamond Mineralogy(First Edition) [M]. Beijing : China Building Industry Press(in Chinese with English abstract).
- Peng Wenshi and Liu Gaokui. 1982. Mineral IR Atlas[M]. Beijing : Science Press(in Chinese with English abstract).
- Vance E R , Harris J W and Milledge H J. 1973. Possible origins of damage in diamonds from kimberlite and alluvial sourced[J]. Mineralogist Magazine , 39 : 349~360.
- Woods G S. 1976. Electron microscopy of " giant " platelets an cube planes in diamond[J]. Philosophical Magazine , 34(6): 993~1 012.
- Wu Weijuan. 1998. Diamond of fluid inclusions and the generated model [J]. Journal of Valuable Jade in China , 4 : 23(in Chinese with English abstract).
- Xiao Huayun , Liu Congqiang and Huang Zhilong. 2001. Diamond inclusions in the old mantle information[J]. Journal of Earth Science , (2): 244~250(in Chinese with English abstract).
- Yin L W , Li M S , Sun D S , *et al.* 2001. Observation of etch pits and defects in diamond single crystals prepared under high temperature-high pressure[J]. Materials Science and Engineering , A315 : 108~112.
- Zheng Zhe. 1992. Mineralogical Structure[M]. Beijing : University Newspaper , 343(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈 丰,王明再,王三学,等. 1992. 金刚石中首次发现高铜高氯包体[J]. 科学通报, 10.
- 韩 勇,陈美华. 2005. 天然金刚石中的位错组态[J]. 电子显微学报, 24(4): 326~326.
- 韩 勇,路凤香,方勤方. 2007. 橄榄石中显微塑性变形的透射电镜分析[J]. 矿物岩石地球化学通报, 26(增刊): 178.
- 黄孝瑛. 1989. 电子显微镜图像分析原理与应用[M]. 北京 : 宇航出版社, 310~398.
- 奥尔洛夫 Ю.И. 1977. 金刚石矿物学(第一版) [M]. 北京 : 中国建筑工业出版社.
- 彭文世,刘高魁. 1982. 矿物红外光谱图集[M]. 北京 : 科学出版社.
- 吴伟娟. 1998. 金刚石的流体包裹体及生成模式[J]. 中国宝玉石, 4 : 23.
- 肖化云,刘丛强,黄智龙. 2001. 金刚石包裹体中的古地幔信息[J]. 地球科学进展, 16(2): 244~250.
- 郑 轶. 1992. 结构矿物学[M]. 北京大学出版社, 343.