

金刚石在不同温度和压力下的强度及断裂

邢广忠

(燕山大学材料工程学院 秦皇岛 066004)

张丽颖 Brookes C A

(Department of Engineering Design and Manufacture University of Hull HU6 7RX UK)

摘 要

本文利用软压头技术,测定了人造金刚石和天然金刚石在不同温度下的强度.在室温,利用软压头技术测得的金刚石强度与常规方法所得的结果一致.高温条件下,金刚石的断裂行为取决于试验温度、平均接触压力及摩擦系数.观察到两种类型的裂纹,{111}解理裂纹与低温、高压有关,而应变诱发裂纹产生于{110}面上,与高温、低应力有关.根据试验结果,提出了金刚石在不同温度和应力状态下的强度图.

关键词 软压头技术, 金刚石, 强度

1 引言

众所周知,金刚石是世界上最硬的材料.碳原子之间的共价结合,决定了金刚石具有最高的硬度、极高的强度和弹性模量($\sim 1000\text{GPa}$).金刚石在室温下几乎不发生位错运动和塑性变形,因而被定义为极脆材料.

如果从立方体的 $\langle 100 \rangle$ 方向、八面体的 $\langle 111 \rangle$ 方向或十二面体的 $\langle 110 \rangle$ 方向观察,金刚石是一种层状结构.不同层上,原子键的强度和密度不同.金刚石的断裂通常发生在特定的晶面—{111}解理面上,因为此面的断裂能最低(11.0Jm^{-2})^[1].沿{110}和{100}面断裂则困难得多,因其断裂能分别为 13.0Jm^{-2} 和 18.4Jm^{-2} ^[1].

天然单晶金刚石尺寸小,且价格昂贵,用常规方法测定其强度极为困难.目前常用赫兹法来测定.赫兹法采用金刚石制成的球形或其它形状的尖形压头(努式或维式),以一定压力作用于金刚石的特定晶面上.计算产生裂纹所需要的最小应力.由于压头和试样为同等材料,压头的寿命很低,且不能测定其高温性能.本文提出一种利用软压头技术,采用静载和滑动摩擦相结合的方法,来测定金刚石在不同温度下的强度及断裂方式.

2 试验材料及设备

静载加压及滑动摩擦试验在自制的高温多用试验机上进行^[2],设备结构如图1所示.该设备由真空、加载、加热、冷却、记录等几部分组成.试验时,金刚石试样安装在石墨试样台上.石墨试样台由高频感应线圈(HF Coil)采用感应方式加热.压头位于试样上方,整个系统处于真空腔内.载荷为100N.压头材料采用 TiB_2 或cBN聚晶,加工成顶角为 120° 的圆锥形,试验温度为20、1000、1200和 1400°C .试样为De Beers公司提供的 I_b 型人造金刚石和 I_a 型天然金刚石,尺寸为 $2\times 2\times 1\text{mm}$.所有试验均在经抛光的(001)晶面上进行.对于

* 1996年12月2日收到初稿, 1997年2月4日收到修改稿
得到De Beers金刚石公司资助

滑动摩擦试验, 摩擦方向分别为 $\langle 100 \rangle$ 和 $\langle 110 \rangle$. 每次试验前, 先将金刚石试样在丙酮溶液中、用超声方法清洗 30min, 然后在真空中加热到 1200°C , 并在此温度下保温 30min, 以去除试样表面的污垢和气体吸附层. 然后将试样冷却到室温, 保持在真空中.

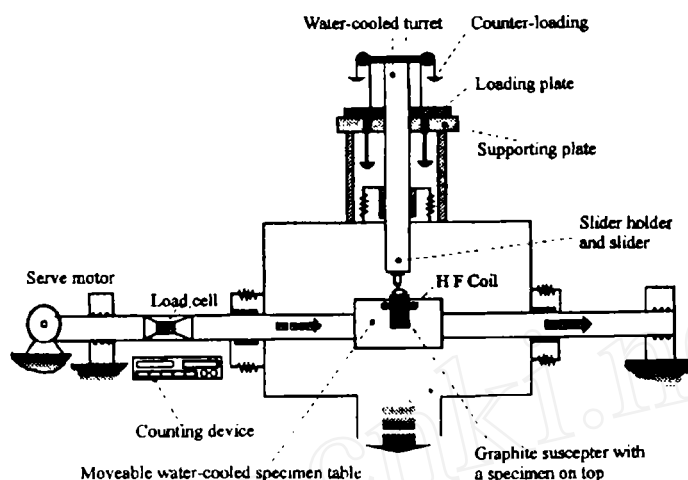


图 1 高温装置示意图

Fig.1 Schematic of the high-temperature apparatus

3 结果和讨论

3.1 室温强度

分别采用静载加压及滑动摩擦方式测定 I_a 和 I_b 金刚石的室温强度. 静载加压时, 最大径向拉应力产生于压头和金刚石接触面的周边, 其大小为:

$$\sigma_r = 1/2(1 - 2\nu)P$$

其中, ν 为金刚石的泊松比, ν 的值与方向及金刚石的状态有关, 在 0.01 和 0.3 之间. 这里, 取 $\nu=0.1$ ^[1]. P 为平均压应力. 径向应力 σ_r 在金刚石 $\{111\}$ 解理面的分解应力为:

$$\sigma = \sigma_r \sin^2 \theta \quad (1)$$

θ 为金刚石 $\{001\}$ 晶面和 $\{111\}$ 解理面之间的夹角. 对于本文所采用的两种压头材料, TiB_2 所产生的压应力为 5.7GPa, 而 cBN 则为 15.9GPa. 显微观察证实, 静载加压时, 只有 cBN 可以使 I_b 和 I_a 型金刚石产生裂纹. 如图 2 所示. 对于 I_a 型天然金刚石, 此时的断裂应力为 4.3GPa, 而对于 I_b 型人造金刚石, 其断裂应力为 3.7GPa, 此试验结果与文献 [1, 3] 中的结果相吻合. 天然金刚石的强度大于人造金刚石, 其原因之一可能是由于氮原子在这两种金刚石晶体中的存在方式不同造成的. 在 I_a 天然金刚石中, 氮原子以集聚的片状形式存在, 且大都以间隙原子的方式; 而在 I_b 人造金刚石中, 氮原子主要以分散的、转换原子的形式存在^[2]. 原因之二是人造金刚石的内部的杂质及缺陷较多, 且存在有较大的内应力.

滑动摩擦时, 裂纹总是在试样表面压头后部产生. 这是因为除在压头和试样接触面的周边产生拉应力外, 在压头后面尚有由于摩擦力而产生的附加拉应力. 这样, 试样表面压头后部的总的拉应力为^[4]:

$$\sigma = 1 + A\mu$$

而

$$A = 3\pi(4 + \nu)/8(1 - 2\nu)$$

其中, ν 为金刚石的泊松比, μ 为摩擦系数.

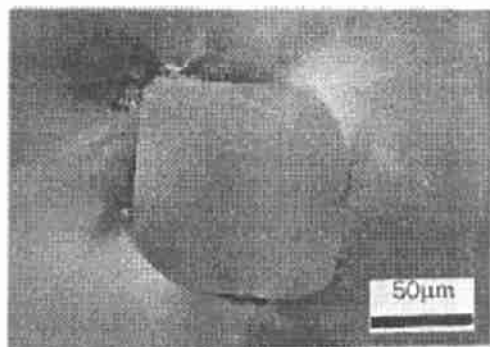


图 2 室温时, cBN 压头在金刚石的 (001) 表面形成的赫兹裂纹

Fig.2 Hertzian cracks on (001) surface of diamond made by cBN indenter at room temperature

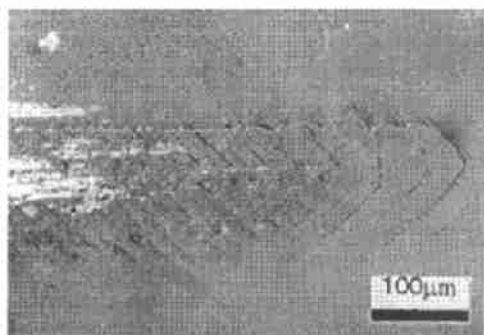


图 3 TiB₂ 磨头在金刚石 (001) 表面沿 [100] 方向摩擦时形成的裂纹

Fig.3 Typical cracks formed on (001) surface of diamond using TiB₂ slider in [100] direction

当用 TiB₂ 和 cBN 作压头时, 其在不同温度下实测的摩擦系数如表 1 所示.

表 1 TiB₂ 和 cBN 的摩擦系数

Table 1 The coefficient of friction for TiB₂ and cBN sliders

Impressor	Direction	20°C	100°C	1200°C	1400°C
TiB ₂	[110]	0.26	0.13	0.13	0.20
TiB ₂	[100]	0.51	0.17	0.15	0.21
cBN	[110]	0.22	0.25	0.22	0.22
cBN	[100]	0.41	0.28	0.25	0.28

一般来说, 对于这两种压头材料, 室温摩擦系数均大于高温摩擦系数. 同时, 在 [100] 方向的摩擦系数大于 [110] 方向. 金刚石材料的室温摩擦各向异性早已有文献报道^[1]. 而在高温, 特别是在软压头摩擦条件下的摩擦各向异性行为则未见于文献中. 此时产生各向异性的原因是由于金刚石塑性变形的结果^[2]. 在滑动摩擦时, 由于附加拉应力的作用, TiB₂ 和 cBN 均可使 I_b 和 I_a 型金刚石表面产生裂纹. 如图 3 所示. 利用公式 (1) 进行计算, 并考虑到附加拉应力的作用, 得出 I_a 和 I_b 金刚石的断裂强度分别为 4.22 GPa 和 3.7 GPa. 与利用静载加压法一致.

3.2 高温强度

高温试验采用滑动摩擦方式, 试样表面为 (001) 晶面, 摩擦方向分别为 [100] 和 [110]. 由于温度较高, 位错的产生及运动相对容易. 金刚石在产生断裂前, 通常发生一定程度的塑性变形^[2,5,6]. 此时裂纹的产生、性质及发展取决于试验温度、平均压应力和摩擦系数. 一般来说, 裂纹的数量随温度升高而减少, 裂纹深度则随温度升高而增加. 同时, 裂纹产生方式也发生变化. 在 1000°C 变形时, 裂纹主要产生在 {111} 解理面上, 即以解理断裂为主. 而在 1200、1400°C, 则为 {111} 和 {110} 面的混合型裂纹. 其中 {110} 面的裂纹是位错运动引起的应变诱发断裂. 图 4 给出了金刚石在 1000 和 1400°C 的裂纹形态. 图 4(a) 为在 1000°C、

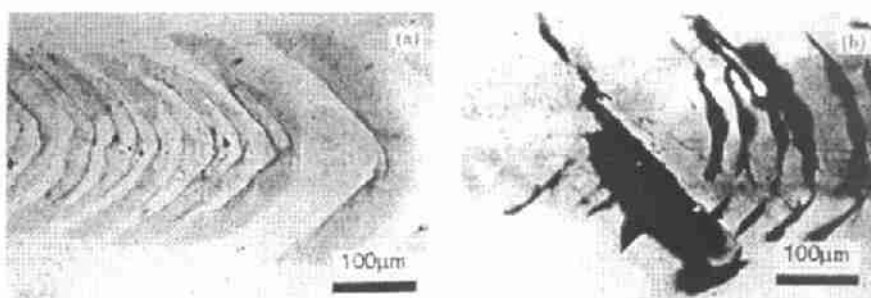


图 4 TiB_2 磨头在金刚石 (001) 表面沿 [100] 方向摩擦时产生的裂纹

Fig.4 Cracks produced on sliding tracks on (001) surfaces of diamond using TiB_2 sliders sliding in [100] directions (a) 100°C, (b) 1400°C

沿 [100] 方向摩擦变形时产生的裂纹. 裂纹与摩擦方向成 45°. 而且, 此照片采用透光显微镜拍摄, 因此可以研究裂纹的走向. 从晶体内部裂纹形成的阴影区, 可判定裂纹是沿 {111} 晶面发展. 亦即在此温度与变形条件下, 金刚石是以解理断裂为主. 图 4(b) 是在 1400°C、沿 [100] 方向摩擦变形时产生的裂纹. 除 {111} 面的解理裂纹外, 尚有部分裂纹与 (001) 晶面垂直, 表明这些裂纹是沿 {110} 晶面发展. 这些裂纹的产生与发展是因为金刚石在此时产生一定程度的塑性变形, 位错运动导致的应变诱发裂纹. 综合在不同温度、不同方向的摩擦变形试验结果, 可以测得金刚石在不同温度下的强度. 表 2 给出了在不同温度下这两种金刚石的断裂强度.

表 2 I_a 和 I_b 型金刚石的断裂强度

Table 2 The fracture strength of type I_a and type I_b diamond (GPa)

Type: plane	Temperature/°C			
	20	1000	1200	1400
I_b : {111}	3.7	3.5	3.0	2.8
I_b : {110}	—	2.8	2.4	1.0
I_a : {111}	4.3	—	4.0	3.4
I_a : {110}	—	4.2	2.8	1.8

综合上述试验结果, 我们可以得出 I_a 和 I_b 型金刚石在不同温度下的强度及断裂方式状态图. 如图 5 所示.

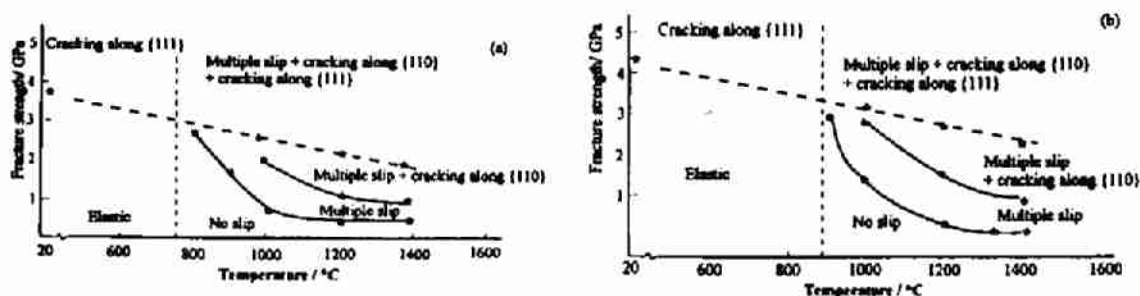


图 5 在不同的温度和平均接触压力下 I_a 和 I_b 金刚石的断裂行为

Fig.5 Illustrations of the behaviour of I_a and I_b diamond corresponding to various temperatures and mean contact pressures

(a) type I_b diamond, (b) type I_a diamond

值得注意的是, 此图是在低速摩擦条件下, 采用软压头技术测得, 如摩擦速度较高, 则应考虑摩擦速度及压头尺寸的影响。

4 结论

1. 利用软压头技术, 可测得金刚石在不同温度下的断裂强度。
2. 在室温, cBN 压头可使金刚石在发生弹性变形的同时, 产生典型的赫兹型断裂。其结果与常规方法相吻合。
3. 在高温滑动摩擦加载方式下, 可在 I_a 和 I_b 型金刚石中观察到不同形状的裂纹。沿 $\{111\}$ 解理面发展的裂纹通常发生在低温、高应力状态下, 应变诱发 $\{110\}$ 裂纹则发生在高温、低应力条件下。
4. 综合考虑影响金刚石断裂的因素, 提出了金刚石在不同温度及应力下的强度状态图。

致谢 作者感谢 De Beers 金刚石公司提供的博士奖学金及研究经费。

参 考 文 献

- 1 Field J E, "The Properties of Natural and Synthetic Diamond", 1992, London Academic.
- 2 Xing Guangzhong (邢广忠), PhD Thesis (博士学位论文): Teformation of Diamond under Conditions of Sliding Friction. 1995, University of Hull, UK.
- 3 Field J E, Freeman C J. *Phil. Mag.*, 1981, **A43**: 595.
- 4 Hamilton G M, Goodman L E. *J. Appl. Mech.*, 1966, **33**: 371.
- 5 Brookes C A, et al. *J. Hard Mats.*, 1990, **1**: 3.
- 6 Brookes C A, Brookes E J, Xing G. Proc. MRS Spring Meeting, 1995, San Francisco, USA.

The Strength of Diamond at Various Temperatures and Pressures

XING Guangzhong

(Yanshan University Qinhuangdao 066004 China)

ZHANG Liying Brookes C A

(Department of Engineering Design and Manufacture University of Hull Hull HU6 7RX UK)

Abstract

The strength of synthetic and natural diamonds was measured as a function of temperature by using the soft impressor/slider technique.

The results showed that the strength of diamond measured by using the soft impressor/slider technique at room temperature was consistent with that measured by using the normal method.

At elevated temperatures, the fracture behaviour of diamond depended on temperature, mean contact pressure and the coefficient of friction. Two types of fractures were observed, (111) cleavage cracks were associated with high mean contact pressure and low temperature, whilst strain induced cracks were produced on (110) planes and associated with low mean contact pressure and high temperature. A schematic map was plotted out to illustrate the fracture behaviour of diamond as a function of temperature and mean contact pressure.

Key words soft impressor technique, diamond, strength