文章编号:1000-5773(2009)03-0236-05

磁性对人造金刚石单晶机械性能的影响*

罗中平[1],姚亚林[2],夏志华[1],贺 兵[1]

(1.湖南工业大学机械工程学院,湖南株洲 412008;
2.湖南工业大学电气与信息工程学院,湖南株洲 412008)

摘要:对人造金刚石单晶进行了磁性分离实验研究,在此基础上对各样品进行了静压强度、冲击强度和热冲击强度等方面的分析测试。结果表明,磁性对人造金刚石单晶的机械性能有明显的影响。金刚石单晶的磁性越强,其外观颜色越深,内部气泡和杂质及缺陷越多,表面光洁度越差,则其静压强度、常温冲击强度(I_T)和热冲击强度指数(I_{TT})值就越低。磁性对静压强度和常温冲击强度的影响相对较小,而对热冲击强度的影响最大。

关键词:人造金刚石;机械性能;磁分离;静压强度;冲击强度指数
中图分类号:TQ164 **文献标识码**:A

1 引 言

金刚石是世界上已知的最硬物质,具有优异的力学、热学、光学、电学、声学和化学等综合性能,是重要的优质结构材料,也是发展潜力极大的功能材料。金刚石可用于铝、铜等有色金属的高效优质加工,特别适合于加工硬脆非金属材料,除少部分直接用于研磨、抛光、涂层等工艺外,绝大部分制成各种工具,用于不同的工业领域[1],在制造加工业中处于不可替代的重要地位。人造金刚石作为一种超硬材料,在使用过程中受到冲击和摩擦两种作用,其质量性能的优劣与承受这两种作用的能力密切相关。金刚石是碳的一种变体,灰份很低,是纯度很高的物质。人造金刚石在合成时使用含有 Ni、Mn、Co、Fe 等元素的触媒合金,从而导致在金刚石单晶中总是或多或少地残存由这类金属组成的包裹体和气泡等缺陷。由于人造金刚石中包裹体的存在难以避免,故往往因含有磁性触媒合金的包裹体而具有磁性,因而与其微结构有密切关联[2]。人造金刚石的磁化率一般为$(156\pm0.6)\times10^{-6}$ cm/g,随晶体中磁性元素含量和晶体尺寸的增大而增强,呈线性关系。磁性大的晶体耐磨性、研磨能力和耐热性均差;其单晶的性能主要受晶型及磁性包裹体含量的影响。金刚石的理论密度为 3.515 g/cm^3,不同产品的实际密度一般在 3.48～3.54 g/cm^{3}之间。作者曾对人造金刚石磁性强弱与静压强度的关系进行过初步研究[3]。

多年来,我国大部分制造和使用者以静压强度为主要指标来衡量金刚石的优劣,其代表性较差,人为误差大。采用常温冲击强度指数(I_T)模拟金刚石在使用时受到冲击和摩擦两种作用的实际状态,由于其测量的是群体效应,所以更接近于工具的使用效果。热冲击强度指数(I_{TT})则是把金刚石加热到 1 100 ℃,冷却后测 I_T 值,这就考虑到了金刚石磨粒在工具或磨具制造以及使用时受热的影响,故热冲击强度是一个更科学、全面的质量评价指标[4]。本研究先对经过振动选形机按晶体形态进行分选的人造金刚石单晶做磁性分选[5],在此基础上再对各样品进行静压强度、冲击强度和热冲击强度的测试,并据此探讨磁性对其机械性能的影响。

* **收稿日期**:2008-04-28;**修回日期**:2008-09-09
基金项目:湖南省教育厅资助科研项目(07C236)
作者简介:罗中平(1954—),男,教授,主要从事人造金刚石提纯分选加工技术和装备开发研究. E-mail:csluozping@163.com

2　实验装置与实验方法

2.1　实验样品和实验方法

实验样品选用国内人造金刚石企业生产的中档品级人造金刚石单晶产品,金刚石采用两面顶压机生产,并经过振动选形机按外形形状进行分选。

磁性分选实验使用自制的、磁场强度连续可调的永久磁体磁性分离装置,采用从物料上部拣选的方法,由低磁场到高磁场,逐级选出不同磁场条件下的磁性物料。

2.2　样品测试设备和测试方法

静压强度测试:采用德国 Vollstaedt-Diamant GmbH Co. 公司生产的自动静压强度仪(Static Fracture Strength Tester DiaTest-SI)进行测试。方法是,将样品以二分法取样,放入送样器中测试单晶受压破碎时的抵抗压力 F_{CC}(单位为 N)。由相关软件可计算出单位面积的静压强度(p_S)值及分散性指数。

冲击强度指数(I_T)测试:使用意大利 RE. TEK 公司设计的冲击韧性测试仪(Friability Index Tester)进行测试。方法是,将 400 mg 的某粒级试样与一个钢球放入一个淬过火的钢容器中,以一定的频率振动冲击一定次数后筛分试样,收集比基本粒度细一号的标准筛上的金刚石样品。此样品的重量与总重量的比值即为 I_T 值[6]。

热冲击强度指数(I_{TT})测试:将基本粒放入 TF 1100 型管式气体保护加热炉(Model TF 1100 Tube Furnace with Gas Protection)中,在 Ar 气体保护下加热到 1 100 ℃保温 10 min 后,按 I_T 测试方法所测的值即为 I_{TT}。

3　实验结果及讨论

3.1　粒度相同、晶形相近的人造金刚石单晶磁性对机械性能的影响

经过振动选型机选出的 35/40 号(粒度为 425～500 μm)中等品级 1 号原样,即粒度晶形相近的产品,通过 3 个不同磁场强度进行拣选。

在最弱磁场强度(240 mT)下分选出的磁性物为强磁性产品 C_1,中等磁场强度(360 mT)下分选出的磁性物为中等磁性产品 C_2,最强磁场强度下(480 mT)分选出的磁性物为弱磁性产品 C_3,而其磁选后的剩余物为非磁性产品 C_4。

首先用肉眼直接观察各样品的外观颜色,可见从 C_1 到 C_4,即产品磁性由强到弱,而颜色则由深变浅(由深绿逐渐过渡到浅黄)。

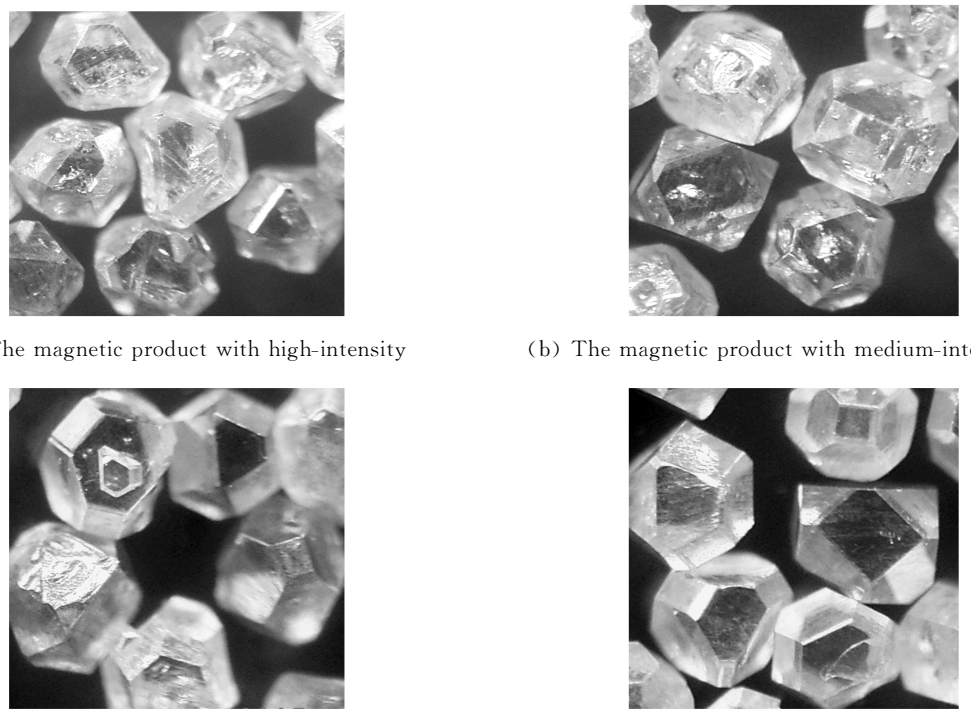
然后在体视显微镜下观察各样品的显微特征。可以发现,从 C_1 到 C_4 磁性由强到弱,颜色越来越接近金黄,晶体形状越来越完好,表面光洁度越来越高,内部气泡、缺陷和杂质越来越少。图 1 为强磁(图 1(a))、中磁(图 1(b))、弱磁(图 1(c))和非磁(图 1(d))4 种不同磁性产品的显微照片。

不同磁性产品性能的测试结果见表 1。由表 1 的性能测试结果可以看出,人造金刚石单晶磁性对其机械性能有明显的影响:磁性越强,静压强度数值就越低,常温冲击强度和热冲击强度指数值也就越低。相比较而言,从非磁性的 C_4 到强磁性的 C_1,静压强度和常温冲击强度数值下降了大约 1/2,而热冲击强度指数值却下降了近 3/4。由此可知,磁性对人造金刚石单晶静压强度和常温冲击强度的影响相对较小,对热冲击强度的影响很大。显然磁性产品的热稳定性差,而非磁性产品的热稳定性好。

表 1 不同磁性产品性能的测试结果

Table 1 Performances of products with different magnetism

Sample	Mass fraction w/(%)	F_{CC}/(N)	I_T	I_{TT}	Thermal stability(I_{TT}/I_T)
C_1	5.49	217	41.25	18.5	0.448
C_2	7.37	249	51.50	35.0	0.680
C_3	7.74	315	64.00	46.2	0.722
C_4	79.40	426	75.00	73.5	0.980
Original sample	100.00	393	70.56	65.5	0.928



(a) The magnetic product with high-intensity (b) The magnetic product with medium-intensity

(c) The magnetic product with low-intensity (d) The non-magnetic product

图 1 4 种不同磁性产品的显微照片图

Fig. 1 Photos of four products with different magnetic intensities

3.2 粒度不同、晶形相近的人造金刚石单晶磁性对其机械性能的影响

将粒度 500～600 μm(30/35 号)、425～500 μm(35/40 号)、355～425 μm(40/45 号)和 300～355 μm(45/50 号)4 种粒级中等品级样品(即粒度不同、晶形相近的同品级样品)在 480 mT 磁场下分成磁性和非磁性两种产品,并进行性能测试。不同粒级磁性和非磁性产品的性能测试结果见表 2。

表 2 中不同粒级磁性和非磁性产品性能测试结果进一步证实了人造金刚石单晶磁性对其机械性能的影响很明显。从表 2 还可以看出,随着 4 种同品级人造金刚石单晶(原始样品)粒度的减小,单晶受压破碎的抵抗压力(F_{CC})明显降低。这是由于单晶粒度减小,其受压面积相应减小所致,实际上单位面积受压的破碎抵抗压力变化不大;而 I_T 和 I_{TT} 值则有一定的增加。这是因为单晶粒度减小,其磁性降低所致,这从磁性物占原样品质量分数的降低即可看出。一般认为,磁性包裹体的形成与晶体的生长速率有关,晶体生长得越快,就越容易形成包裹体。而金刚石的磁化系数与包裹体含量呈线性关系。当金刚石的粒度相同且其中包裹体的成分相同时,冲击强度与包裹体的含量有较好的线性关系[7]。

表 2 中各磁性产品的性能指标均比原始样品明显低,而非磁性产品的性能指标均比原始样品高。这说明,利用人造金刚石单晶的磁性差异对其进行质量分选是一种很有效的方法。同时也预示了降低

晶体中磁化物含量是提高金刚石产品机械性能质量品级的重要手段。

分析磁性对人造金刚石单晶机械性能影响程度的差异[8]可以认为:磁性金刚石单晶内部结构差,有较多的缺陷、气泡、杂质,晶体形状及完整性和晶面平整光滑度差,脆性较大,塑性小,不耐冲击,因而其冲击强度明显较低;而磁性金刚石单晶内部结构虽然差,但有发育较好的骨架,能支撑较大的静压力,因而其抗压强度并不低。

表 2　不同粒级磁性和非磁性产品的性能测试结果

Table 2　Performance of the products with different particle sizes

Sample		Mass fraction	F_{CC}/(N)	I_T	I_{TT}	Thermal stability
Grain size/(μm)	Character	w/(%)				(I_{TT}/I_T)
500～600	Magnetic	40.95	292.92	50.28	29.44	0.586
	Non-magnetic	59.05	493.63	74.50	72.75	0.977
	Original sample	100.00	411.45	64.58	55.01	0.852
425～500	Magnetic	26.98	208.83	48.01	30.91	0.644
	Non-magnetic	73.02	411.35	71.62	66.91	0.934
	Original sample	100.00	356.71	65.25	57.20	0.877
355～425	Magnetic	18.50	193.50	56.08	43.69	0.779
	Non-magnetic	81.50	294.73	75.61	67.70	0.895
	Original sample	100.00	276.00	72.00	63.26	0.879
300～355	Magnetic	21.90	172.47	60.78	44.36	0.730
	Non-magnetic	78.10	248.69	78.83	73.22	0.929
	Original sample	100.00	232.00	74.88	66.90	0.893

而金刚石单晶热冲击强度的降低[9]主要是由于晶体内部存在的金属包裹体所致,具体可考虑如下:(1) 由于金属的热膨胀系数远远大于金刚石的热膨胀系数,因而晶体在合成过程中生成的金属包裹体在高温时受热膨胀,在晶粒内部产生很大的应力,导致大量新缺陷的产生;(2) 在高温条件下,缺陷自身也会产生移动、长大的现象;(3) 当温度高于 700 ℃时,与包裹体相邻处的金刚石将会出现石墨化现象,而且随着温度的升高,石墨化现象会越发严重。这 3 种原因都可能导致金刚石单晶热冲击强度的降低。

4　结　论

(1) 磁性对人造金刚石单晶的质量性能有明显的影响:人造金刚石单晶磁性越强,外观颜色越深,颗粒内部气泡和杂质及缺陷越多,形貌参数值(晶体形状及完整性和晶面平整光滑度等)越差,其静压强度、常温冲击强度和热冲击强度指数值就越低。磁性对人造金刚石单晶静压强度和常温冲击强度的影响相对较小,对热冲击强度的影响最大。磁性产品热稳定性差,而非磁性产品热稳定性好。

(2) 人造金刚石单晶的磁性与其粒度大小有正相关性,粒度尺寸减小,其磁性降低。利用人造金刚石单晶磁性的差异对其进行质量分选是一种很有效的方法。使用高冲击强度和优良热稳定性的人造金刚石单晶,可以提高金刚石工具的使用性能、延长工具使用寿命。

(3) 基于金刚石单晶中的磁性包裹体对机械性能的不利影响,如何在合成金刚石工艺和触媒金属的优选上采取有效措施对其加以控制,则成为十分重要的课题。

References:

[1] Li Z H, Shao D H, Liu Q X, et al. Development and Applications in Machining Industry of Superhard Materials in China [J]. Tool Technique, 1999, 5: 3-6. (in Chinese)
李志宏,邵德厚,刘庆选,等. 我国超硬材料的发展及在机械加工中的应用 [J]. 工具技术,1999,5:3-6.

[2] Petitet J P. Recent Trends in Superhard Materials Science and Techmology [J]. СверхтвердЫе Материалы, 2001, 6: 3.

[3] Luo Z P. Study on the Magnetic Separation of Synthetic Diamond [J]. Superhard Materials and Engineering, 1999, (3): 10-13. (in Chinese).
罗中平. 人造金刚石磁分离研究 [J]. 超硬材料与工程, 1999, (3): 10-13.

[4] Zhao C X. Toughness Index of Man-Made Diamond [J]. Materials for Mechanical Engineering, 1997, 21(2): 48-49. (in Chinese)
赵春霞. 人造金刚石冲击强度 [J]. 机械工程材料, 1997, 21(2): 48-49.

[5] Luo Z P, Yao Y L. A Study on the Methods for Precise Sorting of Synthetic Diamond Abrasives [J]. Key Engineering Materials, 2006, 304-305: 66-70.

[6] Zhao W D, Zheng L X, Li Z F, et al. A Discussion on Standard of Toughness Index for Sythetic Diamond and Its Testing Technique [J]. Superhard Material & Gem, 2002, 4: 17-20. (in Chinese)
赵文东, 郑丽雪, 李忠福, 等. 浅议企业人造金刚石冲击韧性标准与检测技术 [J]. 超硬材料与宝石, 2002, 4: 17-20.

[7] Fang J F, Zhang J Y, Jin C H, et al. Relationship between Impact Strength and Inclusion Content in Diamond [J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2001, 2: 24-25. (in Chinese)
方建锋, 张晋远, 金成海, 等. 人造金刚石的冲击强度与其中包裹体含量关系的研究 [J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2001, 2: 24-25.

[8] Huo X P, Song Y Y, He Y H. Influence of Structural Features of Synthetic Diamond on Its Properties and Performance [J]. PTCA(Part A: Physical Testing), 2002, 38(3): 96-98. (in Chinese)
霍喜平, 宋媛媛, 何远航. 人造金刚石的结构特征对其性能的影响 [J]. 理化检验-物理分册, 2002, 38(3): 96-98.

[9] Jia X P, Li F H, Chen L X, et al. Research on the Crystal Characteristics of Synthetic Diamond and Its Relative Factors [J]. Diamond and Abrasives Engineering, 2002, 2: 13-16, 18. (in Chinese)
贾晓鹏, 李风华, 陈立学, 等. 人造金刚石的晶粒性质及其相互关系的研究 [J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2002, 2: 13-16, 18.

Study on the Influence of Magnetism of Synthetic Diamond Single Crystal on Their Mechanical Performances

LUO Zhong-Ping[1], YAO Ya-Lin[2], XIA Zhi-Hua[1], HE Bing[1]

(1. *School of Mechanical Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou* 412008, *China*;
2. *School of Electric and Information Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou* 412008, *China*)

Abstract: Static-pressure strength, toughness index (I_T) and thermal-toughness index (I_{TT}) of each sample were analyzed on the basis of the experimental studies on the magnetic separation of diamond single crystal. The results show that the magnetism of synthetic diamond single crystal has an obvious influence on the mechanical performance. With the increase of magnetism, synthetic diamond single crystal becomes darker and darker in appearance color, and have more bubbles, impurities and defects inside the particles. Furthermore, their surface fineness observed under the microscope becomes worse. Meanwhile, the static-pressure strength, the I_T under the normal temperature and I_{TT} become lower and lower. The influence of magnetism on the static-pressure strength and the I_T is slight, however, the influence on I_{TT} is serious.

Key words: synthetic diamond; mechanical performance; magnetic separation; static-pressure strength; toughness index(I_T)