

固结磨料研磨镁铝尖晶石的材料去除机理

王占奎^{1,2}, 朱永伟¹, 王加顺¹, 王建彬¹, 徐俊¹, 左敦稳¹

(1. 南京航空航天大学机电学院, 南京 210016; 2. 河南科技学院机电学院, 新乡 454003)

摘要: 研磨过程中机械去除作用与化学去除作用的有效分离是实现研磨过程可控调节及提高加工表面质量的前提。本文通过尖晶石在不同介质中的材料去除速率, 对其在不同研磨液中化学与机械作用的材料去除率进行了分离和计算; 采用微/纳压痕仪测量了不同研磨液作用下工件表面的显微硬度, 依此分析了其软化层厚度。结果表明: 研磨液对镁铝尖晶石工件具有一定的化学去除作用, 研磨过程中材料去除以机械作用下的脆性去除为主; 研磨液的化学作用主要体现在工件表面形成了一层软化层, 其中乙二醇产生的软化层最厚, 三乙醇胺最薄。

关键词: 镁铝尖晶石; 固结磨料; 软化层; 去除机理

中图分类号: TH161; TG74 + 1

文献标识码: A

文章编号: 1000-985X(2014)09-2205-08

Removal Mechanism of Lapping Magnesia Alumina Spinel Using Fixed Abrasive

WANG Zhan-kui^{1,2}, ZHU Yong-wei¹, WANG Jia-shun¹, WANG Jian-bin¹, XU Jun¹, ZUO Dun-wen¹

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. School of Mechanical and Electrical Engineering, Henan Institute of Science and Technology, Xinxiang 454003, China)

(Received 23 March 2014, accepted 12 May 2014)

Abstract: The effective separation of mechanical removal and chemical removal during lapping is the foundation to realize controllable lapping process and improving the surface quality. The mechanical and chemical functions during the material removal of different lapping slurries were separated and calculated by measuring the material removals during different mediums when fixed abrasive pad worked on spinel. Micro hardness of work piece surface during different lapping slurries were measured by nanoindentation, and the thickness of soft layers were analyzed. The research results indicate that there is some chemical corrosion with slurries in lapping spinel which could remove some material; the material removals in lapping spinel with different slurries are mainly brittle removal; the soft layers are formed by corrosion of lapping slurries; the soft layers produced by ethylene glycol are the thickest, and that produced by triethanolamine are the thinnest.

Key words: magnesia alumina spinel; fixed abrasive; soft layer; removal mechanism

1 引言

镁铝尖晶石 ($MgAl_2O_4$) 为立方晶系, 由常温至高温液相的过程中不经历相变, 具有硬度高、化学性能稳定、透光性能好等优点^[1], 特别适用于高温高压、磨蚀性和腐蚀性的工况条件, 在多个军用和民用领域具有

收稿日期: 2014-03-23; 修订日期: 2014-05-12

基金项目: 国家自然科学基金(51175260, 50905086); 中央高校基本科研业务专项资金(NP2012506, NS2013055); 江苏省普通高校研究生科研创新计划资助项目(KYLX_0229)

作者简介: 王占奎(1980-), 男, 河南省人, 讲师, 博士研究生。E-mail: luckywzk@126.com

通讯作者: 朱永伟, 教授, 博士生导师。E-mail: meeywzhu@nuaa.edu.cn

广泛的应用前景^[2,3]。但因其硬度高、脆性大,很难高效率地获得纳米级超光滑平面,因此研究镁铝尖晶石的研磨机理,提高其加工效率-表面质量,具有重要的理论意义和应用前景。

固结磨料研抛技术作为最具有发展前景的研磨抛光技术之一,因其去除效率高、研抛均匀性好、绿色环保等优点引起了研究者的关注^[4]。Luo等^[5]研究了固结磨料研磨硅片时,固结磨粒的粒度、旋转速度和压力等参数对表面粗糙度的影响。Tateishi等^[6]将TiO₂掺入聚氨酯中研制出了一种多孔的固结磨料研磨垫,将其用于硬盘驱动器铝基板的抛光,获得了Rz为19.3nm的光滑平面。采用含氧化铝磨粒的研磨液结合固结磨料研磨垫对蓝宝石进行研抛,实现氧化铝颗粒对固结磨料研磨垫的修整,提高了材料去除率^[7]。Choi等^[8]认为石英玻璃和水之间发生的水合作用有利于研磨效率的提高。居志兰等^[9]探索了固结磨料研磨水晶时抛光介质的作用机理,认为六偏磷酸钠研抛液中的氢氧根离子具有较强的化学作用,促进了水晶表面水合层的形成和材料去除速率的提高。朱永伟等^[10]比较了固结磨料研抛K9玻璃和硅片的材料去除率和表面粗糙度,得出工件的脆性对保持研磨垫的自修整性有利。

上述研究大都集中在工艺参数对固结磨料研抛工件时的材料去除速率和表面质量的影响,没有深入地研究工艺参数对研抛过程的哪个环节产生了影响,以及如何影响。另外,镁铝尖晶石是一种化学稳定性极高的多晶材料,少见有关镁铝尖晶石研磨机理和工艺的研究报道。本文尝试对尖晶石研磨过程中的机械去除作用和化学去除作用进行分解,探讨其材料去除的机制,并对不同研磨液在工件表面形成的软化层厚度进行分析,用于指导研抛液的科学选择与研抛工艺的制定。

2 实 验

2.1 尖晶石研磨及化学去除实验

研磨实验在Nanopoli-100环抛机上进行,研磨盘转速100 r/min,研磨压力10.37 kPa,偏心距45 mm、研磨液流速100 mL/min,研磨时间30 min。实验所用研磨垫为实验室自制固结磨料研磨垫(FAP),FAP中固结W4-6金刚石,具体的制备工艺见文献^[11]。

研磨工件为直径2 inch、厚度3 mm的镁铝尖晶石,为使实验样品表面形貌一致,实验前,采用W14固结磨料研磨垫研磨10 min。

为获得研磨液对工件的腐蚀速率(MRR_c),在室温下将尖晶石工件竖直放置于不同研磨液中(具体的研磨液成分如表1)中浸泡4 h后取出进行超声清洗,然后放置于干燥箱中进行烘干,用失重法评价研磨液对工件的腐蚀作用。

表1 不同研磨液成分

Table 1 Components of different lapping fluid

Sample	lapping fluid
0	DI(去离子水)
1	DI + 0.1% Ethylenediamine(去离子水 + 0.1% 乙二胺)
2	DI + 0.2% Ethylenediamine(去离子水 + 0.2% 乙二胺)
3	DI + 3% Triethanolmine(去离子水 + 3% 三乙醇胺)
4	DI + 3% Glycol(去离子水 + 3% 乙二醇)

2.2 材料去除率及表面形貌

实验采用失重法来计算尖晶石研磨时的材料去除率,采用赛多利斯BS224S精密分析天平(精度为0.1 mg)测量研磨前后的工件质量差或研磨液腐蚀前后的质量差。其具体的材料去除率(MRR , $\mu\text{m}/\text{min}$)计算公式如式(1)所示。为确保金刚石固结磨料研磨垫加工性能的一致性,每次研磨前均需用修整器对FAP修整2 min。研磨结束后,采用MITUTOYO工具显微镜进行观察尖晶石表面的微观形貌,采用NANOMAP500LS三维轮廓仪测量研磨后尖晶石表面形貌。

$$MRR = \frac{\Delta m \times H}{M \times t} \times 10^6 \quad (1)$$

式中, H 为研磨前工件的厚度 (mm); Δm 为研磨前后的工件质量差或研磨液腐蚀前后的质量差 (g); M 为研磨前或研磨液腐蚀前的工件质量 (g); t 为研磨时间或研磨液腐蚀时间 (min)。

2.3 微/纳压痕实验

为研究经不同研磨液浸泡后工件软化层微/纳米尺度上的力学性能, 采用载荷分辨率为 50 nN, 位移分辨率为 0.01 nm 的微/纳压痕系统进行微/纳压痕实验。系统采用 Berkovich 型金刚石压头, 利用恒定加载速率加载到最大载荷, 然后进行保压和卸载, 最后计算硬度 H_v , 其加载载荷 10 mN、加载速率 20 $\mu\text{N/s}$ 、压入深度精度 0.1 nm、保压时间 10 s。

3 结果与讨论

3.1 研磨实验材料去除率的分解

固结磨料研磨镁铝尖晶石工件时的材料去除率可以分解为纯机械去除、纯化学去除、化学与机械的耦合作用形成的材料去除率 (nm/min), 其具体的表达式为:

$$MRR_T = MRR_C - MRR_M - MRR_I \quad (2)$$

式中, MRR_T 为固结磨料研磨镁铝尖晶石工件时总的材料去除速率; MRR_C 为研磨液纯化学作用所形成的材料去除速率; MRR_M 为固结磨料研磨垫的纯机械作用所形成的材料去除速率; MRR_I 为化学与机械的耦合作用所形成的材料去除速率。

固结磨料研磨镁铝尖晶石时总的材料去除率 MRR_T 可通过使用不同的研磨液进行研磨实验后, 测量实验前后质量差根据公式 (1) 计算获得。 MRR_C 是通过对工件的浸泡实验后, 根据实验前后的质量差代入公式 (1) 计算得到。尽管去离子水对镁铝尖晶石也有一定的化学作用, 但非常微弱, 可以忽略不计, 因此, MRR_M 可采用去离子水代替研磨液研磨镁铝尖晶石工件后测量实验前后质量差, 按公式 (1) 计算获得; 由于采用各研磨液进行研磨时所用的垫子、工件和研磨参数均相同, 故他们的纯机械作用产生的材料去除率 MRR_M 可认为是一样的, 都是采用去离子水研磨后得到的材料去除率, 即表 2 中 0 号研磨液加工后的材料去除率。当 MRR_C 、 MRR_M 、 MRR_T 都获得后即可根据公式 (2) 可计算固结磨料研磨垫研磨镁铝尖晶石工件时化学与机械的耦合作用形成的材料去除率 MRR_I 。

3.2 研磨液的纯化学作用和软化层

采用不同的研磨液对用 W14 固结磨料研磨垫研磨后的工件进行浸泡 4 h, 获得的化学去除速率见表 2。实验所用的各种研磨液对工件的纯化学作用去除率很低, 在亚纳米量级, 其中 0.2% 的乙二醇研磨液的化学作用最强, 但纯化学去除率也只有 0.19 nm/min。这是由于镁铝尖晶石材料本身性能非常稳定, 具有很强的耐酸碱和耐腐蚀的特性, 故研磨液对其纯化学作用的去除率很小。

表 2 化学腐蚀和研磨的材料去除率及表面质量

Table 2 The MRR and Ra of lapping and chemical corrosion

Sample	$MRR_T/\text{nm} \cdot \text{min}^{-1}$	$MRR_C/\text{nm} \cdot \text{min}^{-1}$	$MRR_I/\text{nm} \cdot \text{min}^{-1}$	Ra/nm
0	59.09*	-	-	79.4
1	91.3	0.17	32.04	84.3
2	53.7	0.19	-5.58	63.8
3	180.2	0.13	120.98	95.5
4	92.98	0.14	33.75	72.5

* 为固结磨料研磨尖晶石时纯机械作用的材料去除率 MRR_M

用工具显微镜对化学作用最强的 2 号研磨液浸泡前后工件的相同表面进行观察, 所得图像如图 1 所示。通过对比图 1(a) 和图 1(b) 箭头所指的相同部位可知, 研磨液浸泡后工件表面变化很小, 研磨形成的凹坑没有出现明显的腐蚀痕迹, 进一步表明研磨液对工件的化学作用较小, 纯化学作用的材料去除率较低, 不能对尖晶石工件产生显著的腐蚀。

虽然研磨液直接对工件的腐蚀作用很小, 但由于其中的活性化学物质进入到工件表面, 并与晶界或缺陷中的分子发生吸附或缓慢的化学作用, 会在工件的表面形成一层微/纳量级的软化层。为探索不同种类的研

磨液浸泡后工件软化层的微观特性,对未经浸泡的原始工件和表1中的2~4号研磨液浸泡后的工件进行了微/纳压痕实验,实验结果如表3。

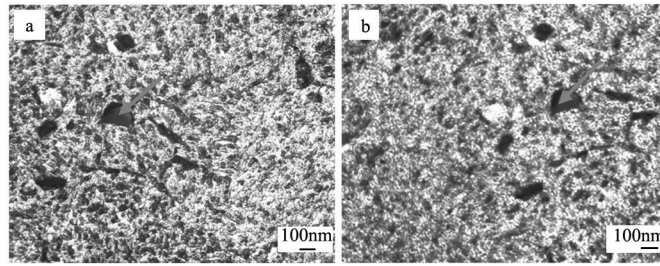


图1 2号研磨液浸泡前后的工件表面二维形貌

Fig.1 Surface morphology of sample before and after immersion in 2 fluid (a) before immersion; (b) after immersion

表3显示,经研磨液浸泡后的工件,显微硬度有所降低,压头的压入深度比原始工件深。这表明研磨液对工件表面的侵蚀和渗透形成了一定厚度的软化层,且软化层比原始工件表面的显微硬度低,有利于磨粒压入工件形成切削,提高材料去除率。其中,含乙二醇的研磨液对工件的侵蚀和渗透最严重,工件表面的显微硬度最小,可能是由于当表面含 Al^{3+} 的尖晶石晶体浸泡在乙二醇溶液中时,其中的 Al^{3+} 易与乙二醇分子中醚氧原子上的孤对电子产生作用形成了对乙二醇的吸附^[12],从而产生了硬度较低的软化层。

表3 微纳压痕实验结果

Table 3 Nanoindentation experiment results

Sample	Average hardness/Hv	Average pressing depth/nm
Original	2216	172
2	1876	176
3	1904	176
4	1848	177

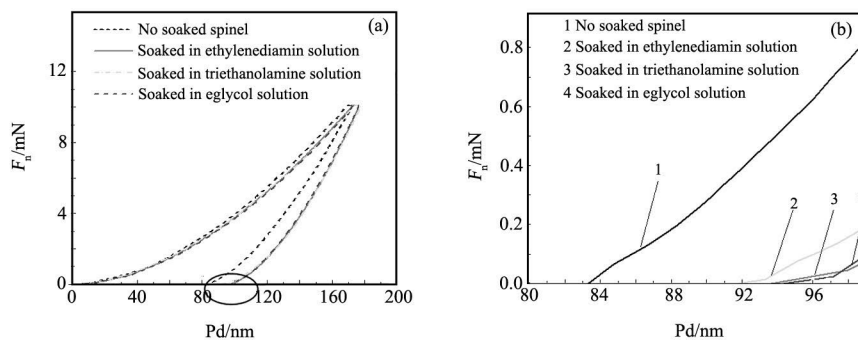


图2 工件的加卸载曲线

Fig.2 Loading and unloading curves of samples (a) load-displacement curve; (b) amplified local curve

由于软化层的显微硬度较尖晶石基体低,故工件表面软化层越厚实验形成的纳米压痕就越深。这样就可以由加卸载曲线得到卸载后压痕的深度,通过比较不同研磨液浸泡后工件的压痕深度与未浸泡尖晶石工件压痕深度的差值来定性的判断何种研磨液在工件表面形成的软化层较厚。图2(a)为微/纳压痕实验的加卸载曲线,图2(b)为图2(a)中黑圈内局部曲线的放大图。由图2(b)显示,各工件卸载后的压痕深度与未浸泡尖晶石工件卸载后的压痕深度差较小,只达到纳米量级。其中,乙二醇浸泡过的工件与未浸泡尖晶石工件卸载后的压痕深度差最大,达11 nm;三乙醇胺浸泡过的工件与未浸泡尖晶石工件卸载后的压痕深度差最小,仅为9 nm。这表明乙二醇对尖晶石工件作用产生的软化层最厚,造成工件卸载后与未浸泡尖晶石工件卸载后的压痕深度差最大,而三乙醇胺产生的软化层最薄,使工件卸载后与未浸泡尖晶石工件卸载后的压痕深度差最小。

3.3 纯机械作用的材料去除率

采用去离子水和 W4-6 的 FAP 得到的纯机械作用所形成的材料去除率有限, 仅为 59.09 nm/min(表 2), 加工后的表面粗糙度 Ra 为 79.4 nm。由于工件表面没有形成软化层, 而工件上金刚石的最大压入深度超过了尖晶石的临界塑性切削深度, 所以在工件的表面留下了脆性去除形成的深划痕和凹坑及塑性去除形成的浅划痕, 造成工件的表面较为粗糙(图 3)。与图 1 对比可知, 采用 W4-6FAP 研磨镁铝尖晶石时, 能将上道工序产生的残留高度和损伤层去除, 去除过程以脆性去除为主, 去除率低、表面质量差。

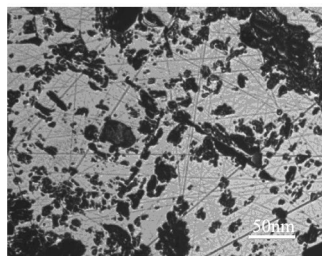


图 3 纯机械去除后的工件表面形貌

Fig.3 Surface morphology of pure mechanical removal

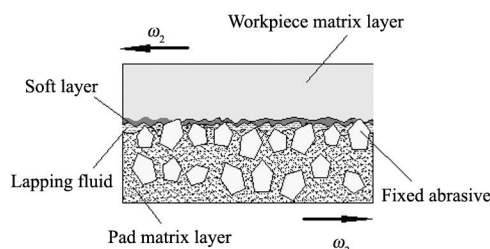


图 4 固结磨料去除材料机制

Fig.4 Material removal mechanism of fix abrasive

3.4 各研磨液总的材料去除率

表 2 中的研磨实验结果表明, 使用三乙醇胺研磨尖晶石的材料去除率可达 180.32 nm/min, 而使用乙二胺的材料去除率较低, 且 0.2% 浓度的材料去除率低于 0.1%。这是由于 FAP 研磨工件时, 磨料首先压入研磨液在工件表面侵蚀和吸附形成的软化层, 若压入较深可进入工件基底层。压入深度取决于固结磨料的出露高度和软化层的厚度, 其去除材料的机制如图 4 所示。FAP 表面磨粒的出露高度取决于研磨垫基体层的自修整能力和对固结磨粒的把持能力, 而软化层的厚度取决于研磨液对工件的化学作用。乙二胺对垫子中的铜有较强的腐蚀作用, 能与铜离子生成易溶于水的络合物^[13], 具体的反应方程式如式(3)~(6), 这一方面会提高垫子的自修整能力, 另一方面会降低垫子基体对固结磨料的把持力, 从而降低磨粒压入工件的深度。若乙二胺的浓度过高, 就会使垫子的把持力过小, 从而使磨料压入工件的过深, 大幅降低了材料去除率。故乙二胺研磨尖晶石时 0.2% 浓度的材料去除率低于 0.1%。三乙醇胺对铜有一定的腐蚀性, 但比乙二胺弱, 可以在稍微降低垫子把持力的基础上, 有效提高垫子的自修整能力, 从而提高磨粒的压入深度, 获得较高的材料去除率。乙二醇对工件的化学作用较强, 产生的软化层最厚, 但由于其不能提高垫子的自修整性, 故材料去除率介于二者之间。

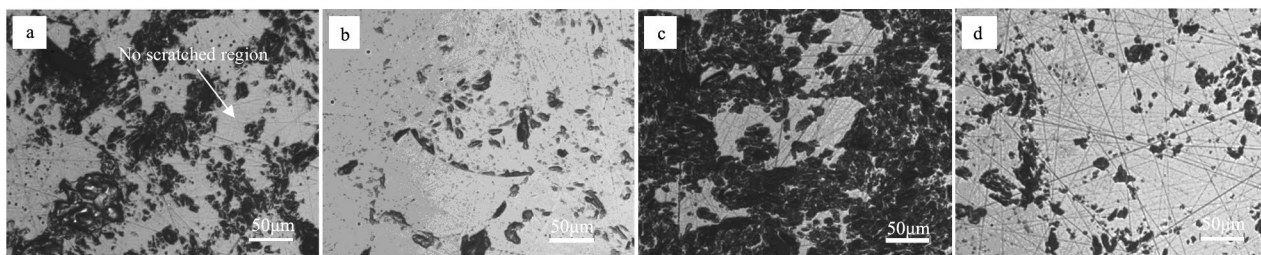
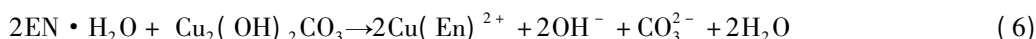
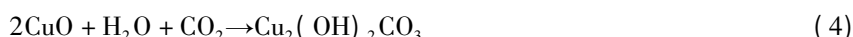


图 5 不同研磨液加工过的工件表面形貌

Fig.5 Surface morphologies of sample processed using different lapping fluids (a) 1 lapping fluid; (b) 2 lapping fluid; (c) 3 lapping fluid; (d) 4 lapping fluid

在不同的研磨液中,使用0.2%的乙二醇研磨后的表面质量最好, R_a 可达63.8 nm,最差的为使用三乙醇胺研磨后的表面,其表面粗糙度 R_a 为95.5 nm,其次为0.1%的乙二醇;使用乙二醇研磨后的表面质量好于去离子水,但差于0.2%的乙二醇(见表2)。不同研磨液加工后的二维表面形貌如图5所示。0.1%的乙二醇加工过的表面质量较差,有较多的深划痕,但非划痕区域的表面质量较好,说明0.1%的乙二醇对垫子的腐蚀作用有限,而自修整效果好,使工件表面产生了较深的粗划痕;0.2%的乙二醇加工过的表面质量较好,其划痕较少且大部分为较浅的细划痕,但仍有个别较深的粗划痕,说明0.2%的乙二醇对垫子的腐蚀作用较大,造成了固结磨料的出露高度小,加工后的表面质量较好,但仍有个别磨料压入工件的深度超过了工件的软化层厚度,在工件表面形成了划痕和脆性去除的凹坑;3%的三乙醇胺加工过的表面质量很差,大部分区域为脆性去除产生的黑色凹坑,只有极小部分区域为细划痕,表明三乙醇胺对研磨垫具有较好的自修整作用,提高了固结磨料的出露高度,使磨料压入工件的深度远大于工件的软化层厚度且超过了尖晶石的临界塑性切削深度,使加工后工件表面形成了大量脆性去除产生的粗划痕和凹坑;3%的乙二醇加工过后的表面质量处于1和2之间,表面布满了较浅细划痕和部分因脆性去除留下的凹坑,这说明虽然乙二醇对工件的化学作用强,形成的软化层较厚,但仍有部分固结磨料的压入深度大大超过工件的软化层,并继续压入工件基体层,形成了脆性去除,在工件表面留下了划痕和凹坑。

3.5 化学与机械耦合作用下的材料去除率

在镁铝尖晶石固结磨料研磨过程中,化学与机械的耦合机制表现为:(1)FAP中的固结磨粒与工件表面之间摩擦引起工件表面晶格的松弛、结构的裂解和局部的高温,从而提高了工件表面材料的化学活性,降低了研磨液与工件之间化学反应所需的能量,增强了相互间的化学作用并提高了材料的去除;(2)研磨液的化学作用在工件表面形成一层硬度较低的软化层,从而增加了磨粒的压入深度,促进了磨粒的机械作用,提高了材料的去除;(3)另一方面研磨液与FAP中填料Cu的化学反应,引起了FAP对磨粒的把持力产生变化,影响了磨粒的最大压入深度和从FAP表面脱落的难易程度,从而对磨粒的机械作用产生了一定的影响。故采用不同研磨液研磨时化学与机械耦合作用产生的材料去除是以上三个方面的综合反映。

表4 各因素占材料去除的比值

Table 4 Ratio of each factor to material removal

Sample	$MRR_C / \%$	$MRR_M / \%$	$MRR_I / \%$
1	0.2	64.7	35.1
2	0.3	110	-10.3
3	0.1	32.8	67.1
4	0.2	63.5	36.3

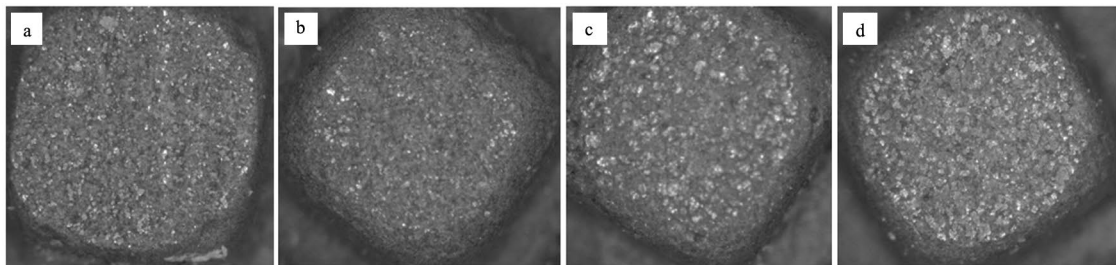


图6 不同研磨液作用后的研磨垫表面形貌

Fig. 6 Surfaces morphologies of polishing pad acted using different lapping fluids

(a) using 1 lapping fluid; (b) using 2 lapping fluid; (c) using 3 lapping fluid; (d) using 4 lapping fluid

根据研磨实验的结果,按照式(2)计算不同研磨液作用下的W4-6固结磨料研磨垫研磨尖晶石时化学与机械耦合作用下的材料去除率 MRR_I ,所得结果如表2,计算各因素对材料去除的贡献百分比如表4所示。结果表明,用W4-6的固结磨料研磨垫研磨尖晶石时,材料的去除主要以机械去除为主,化学作用直接对材

料的腐蚀去除很小,只占材料去除的0.1%~0.3%。其中乙二胺浓度为0.2%时,其耦合作用的材料去除率计算值为-5.58 nm/min,对总的材料去除贡献比率为-10.3%。这主要是由于乙二胺对研磨垫的化学腐蚀作用较大,造成了金刚石的脱落,从而使实际计算所得的耦合作用去除率较小;而三乙醇胺研磨液浓度为3%时,其耦合作用材料去除率的计算值达到120.98 nm/min,对总的材料去除贡献比率高达67.1%。这一方面是由于三乙醇胺的化学腐蚀促进了研磨垫的自修整,提高了磨粒的出露高度,另一方面,三乙醇胺研磨液在工件表面形成了一定厚度的软化层,使磨粒压入工件的深度增加,从而提高了材料去除率。

图6显示了使用不同研磨液实验后研磨垫的表面形貌,图中亮色颗粒为金刚石,灰色部分为固结磨料垫的基体材料。由于在化学与机械耦合作用机制中,第(3)种耦合机制为研磨液与研磨垫的化学机械耦合,故不同研磨液实验后研磨垫的表面形貌由其耦合结果所决定。图6(a)和图6(b)对比显示,在乙二胺研磨液作用下,其化学与机械的第(3)种耦合对磨粒的机械作用产生了消极影响,造成了固结磨粒的脱落,降低了工件的材料去除,其中0.2%乙二胺研磨液的影响更大。图6(c)和图6(d)对比表明,3%三乙醇胺研磨液作用下其化学与机械的第(3)种耦合对磨粒的机械作用产生了积极影响,使研磨过程中的新鲜磨粒的出露和磨损磨料的脱落保持了均衡,提高了材料去除;而3%乙二胺研磨液作用下该耦合对磨粒的机械作用影响较小,但会造成了大量的磨损磨粒没有及时脱落而产生钝化。

4 结 论

(1) 研磨液对镁铝尖晶石具有一定的化学去除作用,但数值较小,其化学作用主要是在工件表面形成了一层软化层,促进了材料的去除;其中乙二胺产生的软化层最厚,三乙醇胺最薄。

(2) 3%的三乙醇胺产生的化学与机械耦合作用的去除率最大,达到120.98 nm/min,但表面质量最差,粗糙度 R_a 只有95.5 nm;而0.2%的乙二胺产生的化学与机械耦合作用去除率的计算值只有-5.58 nm/min,源于乙二胺对FAP中铜的过度腐蚀造成磨粒出露高度下降,但表面质量最好,粗糙度 R_a 可达63.8 nm。

(3) W4-6的固结磨料研磨垫研磨尖晶石时,机械作用产生的材料去除率为研磨材料去除率的主要组成部分,研磨液化学和机械作用耦合产生的材料去除率也占较大比例。

参 考 文 献

- [1] 段红娟,祝洪喜,邓承继,等. 温度和气氛对合成镁铝尖晶石纤维的影响[J]. 人工晶体学报, 2013, 42(11): 2380-2383.
Duan H J, Zhu H X, Deng C J, et al. Influence of Temperature and Atmosphere on the Synthesis of $MgAl_2O_4$ Spinel Fiber [J]. *Journal of Synthetic Crystals* 2013, 42(11): 2380-2383 (in Chinese).
- [2] 燕红,陈彬,黄存新. 光学透明多晶尖晶石的烧结性能研究[J]. 人工晶体学报, 2013, 42(5): 860-863.
Yan H, Chen B, Huang C X. Research on Sintering Performance of Optically Transparent Polycrystalline Spinel [J]. *Journal of Synthetic Crystals*, 2013, 42(5): 860-863 (in Chinese).
- [3] 李跃龙,黎建明,苏小平,等. 红外窗口和整流罩材料研究现状与发展趋势[J]. 人工晶体学报, 2007, 36(4): 877-884.
Li Y L, Li J M, Su X P, et al. Research Trends and Current Status in Infrared Window and Dome Materials [J]. *Journal of Synthetic Crystals*, 2007, 36(4): 877-884 (in Chinese).
- [4] 朱永伟,王军,李军,等. 固结磨料抛光垫抛光硅片的探索研究[J]. 中国机械工程, 2009, 10(6): 723-727.
Zhu Y W, Wang J, Li J, et al. Research on Polishing of Silicon Wafer by Fixed Abrasive Pad [J]. *China Mechanical Engineering* 2009, 10(6): 723-727 (in Chinese).
- [5] Luo S Y, Chen K C. An Experimental Study of Flat Fixed Abrasive Grinding of Silicon Wafers Using Resin-bonded Diamond Pellets [J]. *Journal of Materials Processing Technology* 2009, 209(2): 686-694.
- [6] Tateishi T, Gao Q, Tani Y, et al. Development of a High-Porosity Fixed-Abrasive Pad Utilizing Catalytic Effects of TiO_2 on Polyurethane Matrix [J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology* 2006, 55(1): 321-324.
- [7] Kim H M, Manivannan R, Moon D J, et al. Evaluation of Double Sided Lapping Using a Fixed Abrasive Pad for Sapphire Substrates [J]. *Wear*, 2013, 302(1-2): 1340-1344.
- [8] Choi B J, Kim H M, Manivannan R, et al. On the Mechanism of Material Removal by Fixed Abrasive Lapping of Various Glass Substrates [J]. *Wear* 2013, 302(1-2): 1334-1339.

- [9] 居志兰,朱永伟,王建彬,等. 抛光介质对固结磨料化学机械抛光水晶的影响[J]. 光学精密工程, 2013, 21(4): 955-962.
Ju Z L, Zhu Y W, Wang J B, et al. Effect of Slurries on Chemical Mechanical Polishing of Decorative Glasses by Fixed-abrasive Pad[J]. *Optics and Precision Engineering* 2013, 21(4): 955-962(in Chinese) .
- [10] 朱永伟,付杰,居志兰,等. 材料特性对亲水性固结磨料研磨垫加工性能的影响[J]. 纳米技术与精密工程, 2013, 11(1): 51-56.
Zhu Y W, Fu J, Ju Z L, et al. Influence of Material Characteristics on Machining Performance of Hydrophilic Fixed Abrasive Pad [J]. *Nanotechnology and Precision Engineering* 2013, 11(1): 51-56(in Chinese) .
- [11] 唐晓晓,朱永伟,付杰,等. 铜含量对亲水性固结磨料抛光垫加工性能的影响研究[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2012, 32(4): 10-13.
Tang X X, Zhu Y W, Fu J, et al. Influence of Copper Content on the Machining Performance of Hydrophilic Fixed Abrasive Pad [J]. *Diamond & Abrasives Engineering* 2012, 32(4): 10-13(in Chinese) .
- [12] 李国希,邓姝皓,夏笑虹,等. 聚乙二醇 Al_2O_3 /水界面吸附行为的 ESR 研究[J]. 波谱学杂志, 2000, 17(6): 495-499.
Li G X, Deng S H, Xia X H, et al. The ESR Investigation on Adsorption Behaviors of Polyethylene glycol at Al_2O_3 /Water Interface [J]. *Chinese Journal of Magnetic Resonance* 2000, 17(6): 495-499(in Chinese) .
- [13] 沈慕昭,李敏,胡志彬. 铜与乙二胺-柠檬酸盐的络合-缔合作用[J]. 电镀与精饰, 1985, 1(1): 1-5
Shen M Z, Li M, Hu Z B. Coordination-Association of Copper with Ethylenediamine and Citrate [J]. *Plating & Finishing*, 1985, 1(1): 1-5(in Chinese) .

· 信 息 ·

新方法合成的富勒烯硬度超钻石

莫斯科理工学院、俄罗斯超硬和新型碳材料技术研究所(FSBI TISNCM) 和密西根大学的研究人员采用一种新方法合成了超硬富勒烯材料, 硬度超过钻石。详细的合成方法刊登在最新一期的国际学术期刊《碳》杂志上。

合成的超硬富勒烯是一种由碳簇或由碳原子组成的球形分子构成的聚合物。研究人员指出, 钻石已经不是最坚硬的材料了。天然钻石的硬度接近 150 GPa, 但超硬富勒烯的硬度超越钻石, 成为在 150 GPa 到 300 GPa 列表值范围内位列第一的坚硬材料。

碳簇是以 60 个原子组成球体形式的碳分子。碳簇首次合成于 20 多年前, 当时这项工作被授予诺贝尔奖。碳球内的富勒烯以不同的方式排列, 这种材料的硬度很大程度上取决于其如何相互关联。研究人员开发出的超硬富勒烯技术, 以 60 个原子组成球体形式的碳分子通过共价键在所有方向相互连接, 该材料被科学家称为三维聚合物。

然而, 以工业规模生产这种有前途材料的方法还没有找到。主要困难在于开始反应需要的 13 GPa 高压, 现代大规模的设备不能提供这样的压力。

据物理学家组织网 9 月 15 日报道, 在新研究中, 研究人员证明添加二硫化碳到最初的混合试剂中可以催化合成富勒烯。根据实验, 二硫化碳是一个最终产品, 但在这里它充当催化剂的作用。有了它, 即使压力低至 8 GPa, 也可生成有价值的超硬富勒烯。此外, 生产所需的温度也从原来的 820 °C 以上, 降为目前的室温下即可。

这项研究的主要参与者, FSBI TISNCM 功能纳米材料实验室负责人米哈伊尔·波波夫指出“我们的新研究成果将在材料科学中创建一个新领域, 因为它将大大减少合成该材料所需的压力, 并且允许以工业规模制造这种材料及其衍生物。”

(来源: 科技日报)