

文章编号 1004-924X(2014)04-0911-07

固结磨料研磨垫孔隙结构对其加工性能的影响

朱永伟*, 王成, 徐俊, 李军

(南京航空航天大学机电学院 江苏省精密与微细制造技术重点实验室, 江苏南京 210016)

摘要:为了解决铜在研磨过程中铜屑黏附减小了容屑空间,易导致研磨垫钝化问题,本文尝试在亲水性固结磨料研磨垫(FAP)内部添加硫酸镁晶体,利用硫酸镁晶体遇水溶解的特性,在研磨垫表面制造不同特征的孔隙。实验在FAP中添加粒径为8目、170目、500目的硫酸镁晶体制造了3种不同孔隙分布的研磨垫,研究了不同加工参数下FAP研磨铜片时的材料去除速率、摩擦系数、表面形貌及磨屑特征。结果表明,仅含170目硫酸镁的FAP与含8目和500目硫酸镁、质量分数分别为5%和10%的FAP在研磨过程中出现了不同程度的钝化,而FAP表现出良好的自修整性能,研磨过程摩擦系数较大且保持平稳;在研磨液流量为60 ml/min时,其材料去除速率为4.46 $\mu\text{m}/\text{min}$,表面粗糙度 R_a 为159 nm。

关键词:固结磨料研磨垫;铜;孔隙;摩擦系数;材料去除速率;自修整

中图分类号:TG74;TG176 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20142204.0911

Influence of pore distribution of fixed abrasive pad on its machining performance

ZHU Yong-wei*, WANG Cheng, XU Jun, LI Jun

(Jiangsu Key Laboratory of Precision and Micro-manufacturing Technology, College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

* Corresponding author, E-mail: meeywzhu@nuaa.edu.cn

Abstract: Copper is easy to adhere to the surface of a tool during the process of grinding or lapping, which may decrease the space for chips and lead to the passivation of a Fixed Abrasive Pad (FAP). To resolve the problem, this paper adds the magnesium sulfate crystal with water dissolved characteristics into the hydrophilic FAP to prepare holes with different characteristics on the surface of the FAP. In this study, different sizes of magnesium sulfate (MgSO_4) particles (8 mesh, 170 mesh and 500 mesh respectively) were added to the FAP to prepare three different FAPs. Material removal rates, friction coefficients, surface topography, and chip characteristics were obtained when lapping copper using different FAPs on different machining parameters. Results show that the FAP contained 170 # MgSO_4 particles only and the one contained 8 # and 500 # MgSO_4 particles with a mass fraction of 10% and 5%, were glazing to some extents during the process of lapping. However, the FAP containing 8 # and 500 # MgSO_4 particles with a mass fraction of 5% and 10% shows a good self-conditioning performance and its friction coefficient during lapping is larger and stable. With lapping liquid flow rate at 60 ml/min, the material removal rate is 4.46 $\mu\text{m}/\text{min}$ and the surface roughness R_a

收稿日期:2013-12-05;修订日期:2014-01-23.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51175260);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(No. NP2012506);江苏高校优势学科建设工程资助项目

is 159 nm.

Key words: Fixed Abrasive Pad (FAP); copper; pore; friction coefficient; material removal rate; self-conditioning

1 引言

化学机械抛光技术利用化学与机械的复合作用来实现对材料的微量去除,适用于多种材料的精密超精密加工^[1]。研磨作为抛光的前道工序,旨在降低工件的亚表面损伤层深度和表面粗糙度,提高工件的面型精度^[2]。传统的游离磨料研磨抛光技术基于三体磨损机理,平坦化效率差,往往需要较大的去除量才能达到平坦化效果;固结磨料研磨抛光技术基于二体磨损机理,平坦化效率高,材料去除速率高^[3,4]。研磨抛光过程中,随着加工时间的持续,工具出现钝化现象,严重影响着加工效率和工件表面质量^[5]。Choi 等人^[6]采用亲水性树脂制备了具有自修整功能的固结磨料研磨垫(Fixed Abrasive Pad, FAP),对钢制模具抛光时,抛光后的模具表面粗糙度 R_a 达到 15.1 nm。Tateishi 等人^[7]利用 TiO_2 的催化作用在 FAP 中制造了大量孔隙,气孔率可达 50% 以上,避免了加工过程中研磨垫的钝化,实现了铝合金磁盘的高效加工。Kim 等人^[8,9]利用抛光垫基体的吸水溶胀特性实现抛光垫的自修整,并将其用于金属钨及集成电路中层间介质的长时间抛光,材料去除速率基本保持稳定。朱永伟等人^[10,11]认为脆性工件的大尺寸磨屑可促进研磨垫的自修整过程,开展了固结磨料化学机械抛光水晶的机理研究。

铜作为典型的塑性材料,具有很好的延展性,极易堵塞砂轮或研磨抛光垫表面的孔隙,造成工具容屑空间的急剧下降,是一种典型的难磨削(研磨)加工材料。适用于铜的高效镜面加工主要有精密超精密车削、油介质的散粒磨料研磨等,精密超精密车削对机床及刀具要求较高,加工效率低,且加工后易留下走刀痕迹;而散粒磨料研磨效率低,磨料利用率低,往往还需采用非水介质,环境污染严重。目前还未有采用固结磨料技术对铜片进行研磨抛光加工的报导^[12,13]。为了解决研磨过程中铜屑黏附导致的研磨垫钝化问题,本文在已布有沟槽的亲水性 FAP 内部添加硫酸镁晶体,

利用硫酸镁晶体遇水溶解的特性,在研磨垫表面制造不同特征的孔隙;研究了孔隙特征对 FAP 研磨铜片的去除效率和工件表面粗糙度的影响,探索 FAP 实现自修整的条件,实现了铜片的高效持续的研磨加工。

2 实验设计

2.1 不同孔隙结构 FAP 的制备

FAP 的制备流程详见文献^[10],唯一不同的是,本文在树脂搅拌过程中,加入了不同尺寸的硫酸镁晶体,利用硫酸镁晶体遇水溶解的特性制备孔隙。设计了 3 种不同特征的孔隙结构,如表 1 所示,研磨垫中同时固结了粒径为 30~40 μm 的金刚石磨粒。

表 1 3 种研磨垫中孔隙特征

Tab. 1 Characteristics of pore in three FAPs (%)

研磨垫编号	8 目硫酸镁	170 目硫酸镁	500 目硫酸镁
1#	5		10
2#	10		5
3#		15	

2.2 研磨试验

采用美国 CETR 公司的 CP-4 型抛光机进行研磨实验,该抛光机具有过程实时监测系统,可以采集加工过程中施加在主轴上的载荷、摩擦力、声发射、抛光环境温度等信号,采用 2.1 中制备的 FAP 作为研磨工具。工件为直径 65 mm 的铜片,初始厚度为 3 mm,研磨前对铜片进行表面预处理,采用美国 APE 公司接触式三维轮廓仪 NanoMap500LS 测量表面粗糙度 R_a 在 1.8 μm 左右。研磨过程中研磨液采用清水,流量分别为 60、80 和 100 ml/min,其他工艺参数设定为:研磨盘转速 100 r/min,工件转速 95 r/min,研磨压力 27.5 kPa,研磨时间 10 min。每次研磨前都用油石进行修盘,去除黏附在研磨垫表面的铜屑并使金刚石磨粒完全出露,以保证每次研磨前 FAP 性能保持一致。

2.3 材料去除速率和表面粗糙度的测量

利用赛多斯 BS224S 型精密分析天平(精度 0.1 mg)称量研磨前后铜片的质量,利用式(1)计算材料的去除速率(MRR):

$$MRR = \frac{\Delta h}{t} = \frac{(m_1 - m_2) \times h_1}{m_1 \times t}, \quad (1)$$

式中: m_1 、 m_2 分别为加工前后工件的质量; h_1 为加工前工件的厚度; t 为加工时间。

使用美国 APE 公司接触式三维轮廓仪 NanoMap500LS 测量工件表面粗糙度和三维形貌。在测量表面粗糙度时,在工件表面均匀选取 5 个点进行测量,取其平均值作为当前工件的表面粗糙度;测量三维形貌时,在工件表面选取一个 $500 \mu\text{m} \times 500 \mu\text{m}$ 的范围进行测量。利用 Dino-Lite 手持式数字显微镜在现场采集 FAP 表面孔隙特征。

2.4 磨屑及研磨垫研磨前后表面观察与分析

用器皿收集研磨过程中产生的铜屑,烘干后加酒精稀释并进行超声处理,尽量减少铜屑团聚,1 h 后用滴管取一滴放在卤素灯下迅速干燥,在日立 S-4800 扫描电子显微镜下观察铜屑的形貌与特点,并将拍摄好的扫描电镜图片导入 Photoshop 中处理,测量磨屑尺寸。分别在研磨前后的研磨垫加工区域取一小块垫子样品进行喷金处理,然后用日立 S-4800 扫描电子显微镜分析研磨垫加工前后表面铜屑分布及金刚石出露情况。

3 实验结果与分析

3.1 不同硫酸镁颗粒组合的 FAP 孔隙特征

采用 Dino-Lite 手持式数字显微镜采集 FAP 表面孔隙特征,如图 1、2 所示,图中突起尺寸为 $2 \text{ mm} \times 2 \text{ mm} \times 0.8 \text{ mm}$ 。图 1 显示了 3 种 FAP 表面孔隙的大概分布情况,1# FAP 和 2# FAP 表面都有 8 目硫酸镁晶体产生的孔隙,取其中一个孔隙分析,形状大致呈圆柱状,几乎占据了突起一半的面积,容屑能力强,如图 2(b) 所示,直径为 0.716 mm ,长度为 1.993 mm 。2# FAP 中 8 目硫酸镁产生的孔隙明显多于 1# FAP。图 2 中含有 500 目硫酸镁的 1# FAP 表面有较多的细小孔隙,表面较为粗糙,而不含 500 目硫酸镁的 3# FAP 表面树脂较为连续,表面较为光滑。

170 目硫酸镁产生的孔隙形状与 8 目硫酸镁

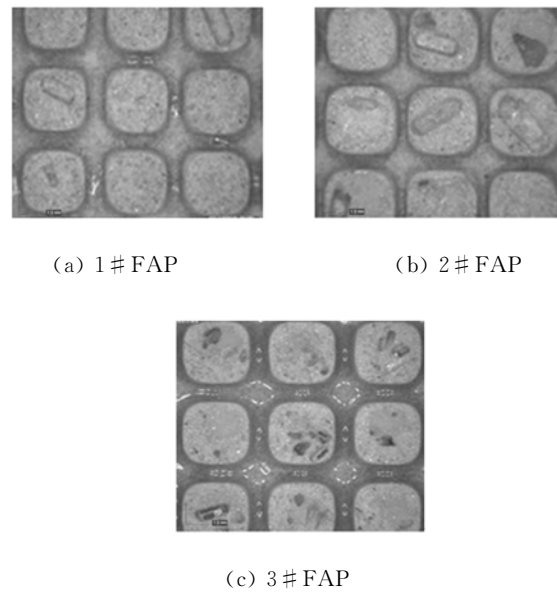
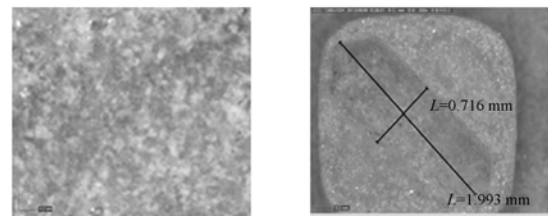


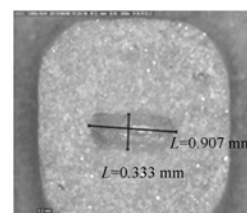
图 1 3 种不同研磨垫表面孔隙分布

Fig.1 Distribution of pore on the surface of three FAPs

产生的孔隙形状大致相同,呈圆柱型,图 2(c) 中,直径为 0.333 mm ,长度为 0.907 mm ,且在 FAP 突起上所占的面积较小,分布不是很均匀,容屑能力稍差。



(a)500 目硫酸镁晶体(1#FAP) (b)8 目硫酸镁晶体(2#FAP)
(a)500 mesh MgSO_4 (1# FAP) (b)8 mesh MgSO_4 (2# FAP)



(c) 170 目硫酸镁晶体(3# FAP)

(c) 170 mesh MgSO_4 (3# FAP)

图 2 不同尺寸硫酸镁晶体制造的孔隙

Fig.2 Pore developed by MgSO_4 particles with different grain sizes

从对树脂基体的影响来看,由于 1# 研磨垫表面有较多细小孔隙,且分散均匀,孔隙表面积比

2# 和 3# 研磨垫更大,加工过程研磨液中的水分子更易于渗入到树脂中与树脂基体中的亲水基团(如羧基—COOH, 羰基—CO)结合,使得基体的高分子网状结构变得膨胀疏松,基体的溶胀率更大,基体的结合强度降低;且大量细小孔隙的存在,增加了基体的不连续性,也减少了树脂基体对磨粒的包裹,磨粒的把持力下降,有利于钝化后金刚石的脱落。

3.2 研磨过程中摩擦系数

图 3 所示为研磨液流量为 100 ml/min 时 3 种 FAP 的摩擦系数随时间变化趋势。通常摩擦系数受到研磨过程中工艺参数的影响,如 FAP 表面状况、工件表面粗糙度、研磨液流量、研磨盘与工件之间的转速比等。摩擦系数为剪切力(即摩擦力)和法向力的比值^[14]。CP-4 型抛光机具有压力补偿功能,研磨过程中施加的法向载荷恒定,因此摩擦系数主要受到加工过程中摩擦力变化的影响。摩擦力主要包括抵抗剪切变形的阻力和接触面表面分子吸附作用所产生的黏合力及切断黏结点所产生的阻力。

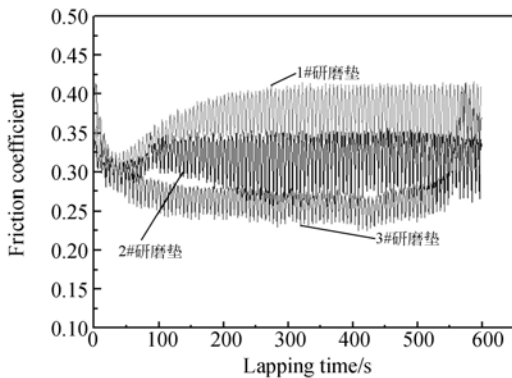
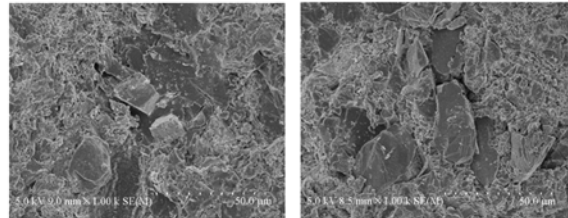


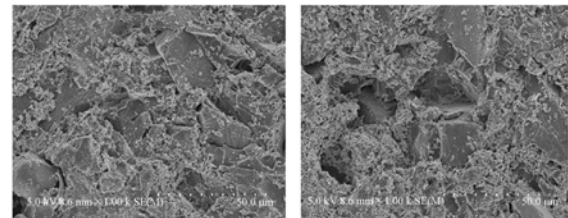
图 3 3 种 FAP 研磨过程摩擦系数随时间变化趋势
Fig. 3 Trend of friction coefficient of three FAPs during lapping

1#、2#、3# FAP 在加工开始阶段,摩擦系数均呈下降趋势。随着加工时间的继续,具有粗细孔隙组合分布的 1# 与 2# FAP 的摩擦系数提高,并稳定在一定水平。上述 FAP 中的细小孔隙在 FAP 表面分布均匀,起到了临时容屑的作用,而大孔隙和表面沟槽则起到了输送抛光液和铜屑的作用;另外,孔隙的存在,破坏了 FAP 基体树脂的连续性,降低了 FAP 的抗磨损能力。由于 1# FAP 中存在较多的细小孔隙,其基体的抗磨损能力下降程度高于 2# FAP,使得 FAP 中金刚石磨

粒的出露高度和容屑空间均大于 2# FAP;同时,1# FAP 中磨钝后的金刚石磨粒因过高的出露高度而及时脱落,上述两个原因,使得 1# FAP 中金刚石磨粒切入工件的深度较大,工件对磨粒运动的阻力随之增大,摩擦系数较大,如图 4 所示。对于 3# FAP,在相同的硫酸镁质量比前提下,孔隙的数量大为减少,FAP 树脂基体的连续性得到明显改善,基体的抗磨蚀能力提高,使得一些已经钝化的金刚石磨粒无法及时脱落;另外,孔隙数量减少,造成 FAP 表面孔隙分布的均匀性恶化,大量铜屑无法及时排出,被压入 FAP 基体,造成 FAP 表面容屑空间的进一步减小,研磨过程中,增大了 FAP 基体与工件直接接触的可能性,金刚石磨粒所承担的压力减小,磨粒切入工件的深度下降,摩擦力与摩擦系数降低。



(a) 研磨前(1# FAP) (b) 研磨后(1# FAP)
(a) Before lapping(1# FAP) (b) After lapping(1# FAP)



(c) 研磨后(2# FAP) (d) 研磨后(3# FAP)
(c) After lapping(2# FAP) (d) After lapping(3# FAP)

图 4 研磨垫加工前后表面形貌 SEM 照片

Fig. 4 SEM pictures of surface morphology of FAPs before and after lappings

3.3 铜屑形貌及材料去除速率

相关研究表明,铜的临界切深为 $6 \mu\text{m}$,本试验条件下,FAP 中金刚石切入工件的最大切深要远小于 $6 \mu\text{m}$,工件与 FAP 相对运动过程中,工件材料表面沿着金刚石磨粒的运动方向前方及两侧隆起,在多向多刃切削作用下,工件材料因塑性变形的位错移动等原因,形成磨屑,实现材料的去除,如图 5 所示。3 种 FAP 加工产生的铜屑尺寸

差异较大,1#FAP加工产生的磨屑主要集中在长度 $3\mu\text{m}$,宽度 $1\mu\text{m}$ 左右;2#FAP加工产生的磨屑只有极少部分大磨屑,大部分集中在长度 $1\mu\text{m}$,宽度 $0.5\mu\text{m}$ 左右;3#FAP加工产生的磨屑大部分集中在长度 500nm ,宽度 200nm 左右。产生这种差异的原因主要是金刚石磨粒切入工件深度的差异。从3.2节的分析得知:1#FAP中金刚石磨粒的突起高度最大,2#FAP次之,3#FAP最小;其次,3#FAP中孔隙数量最少,分布最不均匀,造成排屑不畅,铜屑黏附在研磨垫表面,使3#FAP中磨粒的突起高度进一步下降。在相同载荷作用下,1#FAP与2#FAP的载荷大都通过磨粒转移到工件,对于3#FAP,本该由磨粒承担的载荷,很大一部分由FAP基体或基体

上的铜屑承担,磨粒切入工件的深度进一步下降。因此,1#FAP磨屑尺寸最大,3#FAP磨屑尺寸最小。

研磨液流量为 $100\text{ml}/\text{min}$ 时,三种FAP加工过程摩擦系数和工件的材料去除速率如图6所示。FAP的材料去除速率与其摩擦系数的大小有着很好的对应关系。摩擦系数是FAP与工件相对运动过程中切向力与正向力(施加载荷)的比值,由于施加载荷不变,摩擦系数越大,对应的磨粒切入工件的深度越大,材料的去除速率也就越大。

3.4 研磨液流量对铜片加工性能影响

3种不同FAP在不同研磨液流量下的材料去除速率和摩擦系数变化情况如图7所示。不同的研磨液流量下,3种FAP加工铜片的材料去除速率表现出不同的趋势。2#FAP和3#FAP的材料去除速率随着研磨液流量减小而降低,2#

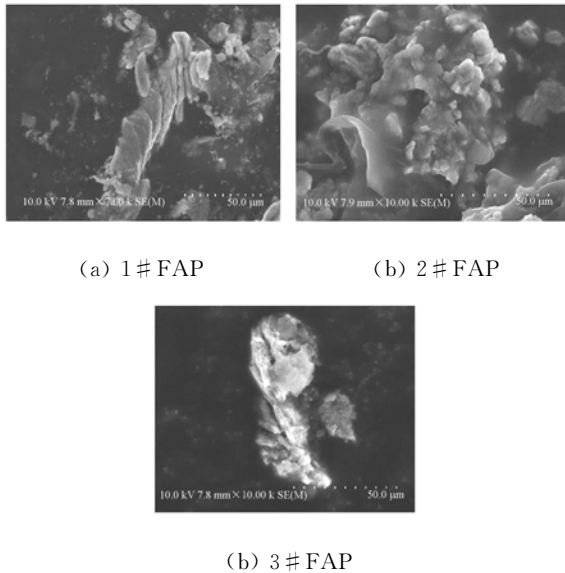


图5 研磨液流量 $100\text{ml}/\text{min}$ 时3种研磨垫加工产生的铜屑形貌SEM照片

Fig.5 SEM pictures of chips at the flow rate of $100\text{ml}/\text{min}$

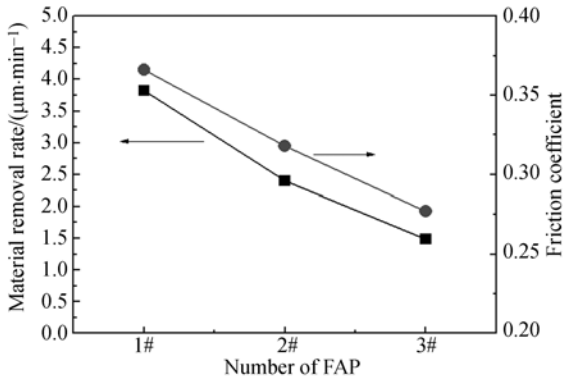
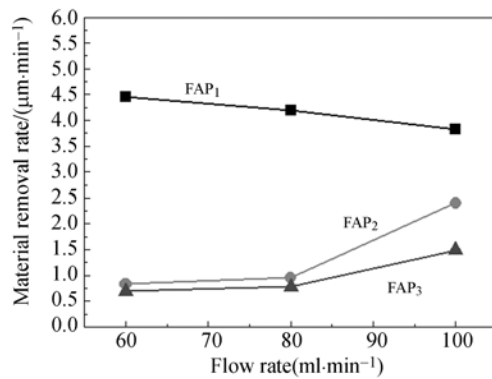


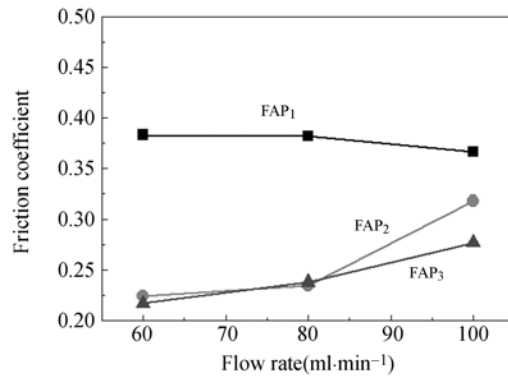
图6 3种FAP加工过程摩擦系数与材料去除速率

Fig.6 Friction coefficient and material removal rate of three FAPs



(a) 材料去除速率

(a) Material removal rate



(b) 摩擦系数

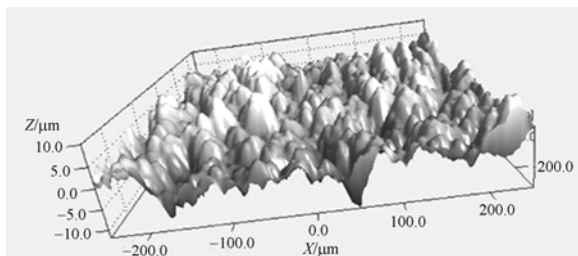
(b) Friction coefficient

图7 不同研磨液流量下材料去除速率和摩擦系数

Fig.7 Material removal rate and friction coefficient at different flows

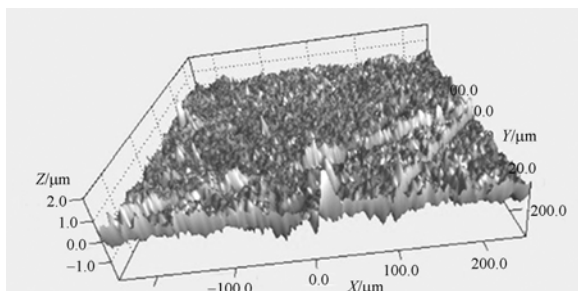
FAP 的材料去除速率下降趋势更为明显。随着研磨液流量的减小,加工产生的大量磨屑不能及时带离加工区域,导致大量的磨屑停留在加工区域或被压入 FAP 表面,使 FAP 表面金刚石出露高度下降,材料去除速率降低。但 1#FAP 的材料去除速率随着研磨液流量呈相反的趋势,可能是因为 1#FAP 的孔隙数量最多,分布最为均匀,容屑场所多,排屑通畅,不存在排屑困难的问题。此时,研磨液流量减少,磨屑的浓度提高,对 FAP 的磨蚀能力增强,金刚石磨粒的出露高度增加,材料去除速率提高;另一方面,大量的细小孔隙破坏了 FAP 基体的连续性,工件及磨屑与树脂基体之间的接触面积减小,FAP 的磨蚀速率加快,随着表层树脂基体不断被去除,亚表层的新鲜金刚石不断出露;还有,金刚石磨粒的出露高度的提高,有利于钝化的金刚石颗粒脱落,FAP 表现出更优越的自修整性能。

摩擦系数与材料去除速率有着相同的变化趋势。1#FAP 加工过程摩擦系数随着研磨液流量的减小而增大;主要是因为随着流量减小,金刚石颗粒切入工件的深度增加;另外,铜屑对研磨垫的磨蚀性增强,研磨垫表面微凸起增多,与工件表面接触时的机械咬合作用增强,造成摩擦系数增大。2#FAP 和 3#FAP 加工过程摩擦系数随着研磨



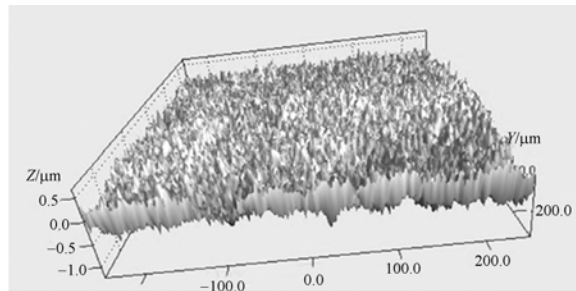
(a) 研磨前

(a) Before lapping



(b) 1#FAP 研磨后

(b) After lapping for 1#FAP



(c) 3#FAP 研磨后

(c) After lapping by 3#FAP

图 8 研磨液流量为 60 ml/min 时铜片研磨前后三维形貌

Fig. 8 Surface morphology of lapped copper at the flow of 60 ml/min

液流量减小而减小。研磨液流量减小,研磨垫表面的孔隙被大量的铜屑堵塞,研磨垫表面粗糙度减小,与工件之间的剪切作用减弱,摩擦系数减小。

图 8 所示为研磨液流量为 60 ml/min 时使用 1#FAP 和 3#FAP 研磨铜片前后铜片表面三维形貌。可以看出研磨后,铜片的粗糙度大大降低,1#FAP 加工后的表面粗糙度 R_a 为 159 nm,3#FAP 加工后的表面粗糙度 R_a 为 115 nm。由于 3#FAP 磨粒突起高度有限,加上 FAP 表面黏附了大量的铜屑,磨粒切入工件较浅,而工件表面的粗糙度与磨粒切入工件表面深度成正比,造成工件的表面粗糙度较小。

4 结 论

本文通过在固结磨料研磨垫中添加不同粒径的硫酸镁晶体制造了 3 种不同孔隙分布的研磨垫,结果表明,FAP 表面孔隙分布情况直接影响着固结磨料研磨铜片加工性能,含 8 目和 500 目硫酸镁、质量分数为 5% 和 10% 的 1#FAP 加工铜片时的材料去除速率最大,具有良好的自修整性。含 170 目硫酸镁、质量分数为 15% 的 FAP 的材料去除速率较低。2# 和 3#FAP 随着研磨液流量的增加,摩擦系数增加,而 1#FAP 则呈现相反的趋势。摩擦系数在一定程度上反映了 FAP 的自修整性,摩擦系数越大,FAP 自修整越好,材料去除速率越大。1#FAP 加工铜片性能

最好,研磨液流量为 60 ml/min 时,材料去除速率达到 4.46 $\mu\text{m}/\text{min}$,表面粗糙度 R_a 达到 159 nm。

参考文献:

- [1] LIN J, LIU Y H, LU X C, *et al.*. Material removal mechanism of copper CMP from a chemical-mechanical synergy perspective [J]. *Tribology Letter*, 2013, 49: 11-19.
- [2] 袁巨龙, 王志伟, 文东辉, 等. 超精密加工现状综述[J]. *机械工程学报*, 2007, 43(1): 35-48.
YUAN J L, WANG ZH W, WEN D H, *et al.*. Review of the current situation of ultra-precision machining [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2007, 43(1): 35-48. (in Chinese)
- [3] VAN V P. Chemical mechanical polishing with fixed abrasives using different subpads to optimize wafer uniformity [J]. *Microelectronic Engineering*, 2000, 50: 41-46.
- [4] 王旭, 张峰, 张学军. 固着磨料抛光碳化硅反射镜的去除函数[J]. *精密光学工程*, 2009, 17(5): 951-957.
WANG X, ZHANG F, ZHANG X J. Removal function of computer controlled polishing SiC mirror with fixed abrasive [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(5): 951-957. (in Chinese)
- [5] CHANG O, KIM H, PARK K, *et al.*. Mathematical modeling of CMP conditioning process [J]. *Microelectronic Engineering*, 2007, 84: 577-583.
- [6] CHOI J Y, JEONG H D. A study on polishing of molds using hydrophilic fixed abrasive pad [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2004, 44(11): 1163-1169.
- [7] 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.
- [8] KIM H, PARK B, LEE S, *et al.*. Self-conditioning fixed abrasive pad in CMP [J]. *Journal of Electrochemical Society*, 2004, 151(12): 858-862.
- [9] KIM H, KIM H, JEONG H, *et al.*. Self-conditioning of encapsulated abrasive pad in chemical mechanical polishing [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2003, 142: 614-618.
- [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 ZH L, *et al.*. Influence of material characteristics on machining performance of hydrophilic fixed pad [J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2013, 11(1): 51-56. (in Chinese)
- [11] 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 ZH L, ZHU Y W, WANG J B, *et al.*. Effect of slurries on chemical mechanical polishing of decorative glasses by fixed-abrasive pad [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(4): 955-962. (in Chinese)
- [12] ZHU P Z, HU Y Z, MA T B, *et al.*. Study of AFM-based nanometric cutting process using molecular dynamics [J]. *Applied Surface Science*, 2010, 256(23): 7160-7165.
- [13] BLONDE R, CHAN H L, BONASSO N A, *et al.*. Evolution of texture and microstructure in pulsed electro-deposited Cu treated by Surface Mechanical Attrition Treatment (SMAT) [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2010, 504(1): 410-413.
- [14] ZHANG Z F, YAN W X, ZHANG L, *et al.*. Effect of mechanical process parameters on friction behavior and material removal during sapphire chemical mechanical polishing [J]. *Microelectronic Engineering*, 2011, 88: 3020-3023.

作者简介:



朱永伟(1967—),男,浙江平湖人,教授,博士生导师,1988年于中南大学获学士学位,1991年于长沙矿冶研究院获硕士学位,2002年于中南大学获得博士学位,主要从事纳米材料的制备与应用、精密超精密加工、表面工程等方面的研究。E-mail: meeywzhu@nuan.edu



王成(1989—),男,江苏扬州人,硕士研究生,主要从事水晶玻璃以及金属的精密超精密加工方面的研究。E-mail: nuaawc@163.com