

文章编号 1000-5013(2003)02-0162-06

磁粒性能分析及其应用实验

方建成^① 金洙吉^② 徐文骥^② 周锦进^②

(^① 华侨大学机电及自动化学院, 福建 泉州 362011; ^② 大连理工大学机械工程学院, 辽宁 大连 116023)

摘要 磁粒的弹性微刃切削可以实现自由曲面的自动化光整加工, 但制造方法不同, 磁粒性能也不同. 从磁粒的制造方法入手, 分析磁粒相关性能, 并通过实验分析磁粒在磁粒光整加工和电化学磁粒光整加工中的不同切削行为. 研究表明, 电化学磁粒光整加工效率和表面质量都得到提高.

关键词 磁粒, 性能, 光整加工

中图分类号 TG 74⁺ 3. 07 TG 580. 68

文献标识码 A

在模具制造中, 有 30% ~ 40% 的工作量是光整加工. 传统上一般采用风动或电动机械抛光甚至依靠经验丰富、技术熟练的老工人进行人工抛光, 磨料由粗到细, 多道工序实现, 其劳动强度大、生产效率低、质量不稳定. 国际上采用多轴数控机床、机器人等须在严格的现代化环境下(如 CAD/CAM 技术及型腔面的数字化技术)使用固结砂轮来实现, 其设备成本高, 制造复杂, 对研磨头的要求也苛刻, 而且每道工序间必须清洗、干净, 给自动化加工增加了难度. 对于一些特殊型面如细小孔、异型管及带有复杂型腔的内表面等固结砂轮难以触及的, 其加工更是无法实现. 如何解决这些难题, 已成为模具行业发展的关键. 近年来不断得到重视的磁粒光整加工, 由于磁粒在空间受到磁场力的作用, 形成了具有一定刚度和自锐性的“柔性”磁刷. 实现弹性微刃切削, 磨头与被加工面之间有间隙, 避免了对磨头结构的复杂要求, 对解决上述一些难题有明显的优势. 因此, 本文从磁粒的制造方法入手, 分析在加工中扮演重要角色的磁粒特性. 通过实验, 分析磁粒在磁粒光整加工和电化学磁粒光整加工中的不同切削行为, 以及对表面粗糙度和去除量的影响.

1 磁粒制造方法及其性能比较

磁粒被认为是由基质相和硬质相的高度浓缩的微型砂轮. 基质相一般是具有磁性的软磁材料粉末, 以 Fe, Co, Ni 粉末为主. 硬质相一般是具有切削能力的氧化物或碳化物、硼化物等金属或非金属陶瓷粉末. 基质相作为结合剂把硬质相连接起来并分散在其周围, 切削时基质相在磁场力的作用下带动硬质相运动而实现切削. 它和砂轮的强制切削不同, 是一种弹性的微

刃切削. 与机械光整加工、电化学机械光整加工相比, 虽然更容易实现自由曲面的自动化加工, 但是由于受到磁粒制造水平的制约, 其最致命的缺点是切削能力差、生产效率低. 因此, 高性能磁粒制造方法已成为该技术发展的核心问题. 下面我们重点分析几种磁粒的制造方法及其相关性能.

最简单的磁粒, 应满足一定性能要求的铁氧体磁性材料、金属磁性材料以及硬质合金粉末, 如 Fe-C, Fe-Al-C, Fe-Ti 等. 这些纯磁粒硬度低、切削能力差, 通常只用于研磨软质合金或有色金属, 也可用于去除软的氧化薄膜或氧化皮.

混合法主要有铁磁性粉末, 分别与传统磨料和磁粒的混合、金属短纤维与磁粒的混合. 该法工艺最简单、成本最低, 但效率也最低. 如大粒径的铁粉分别与 WA 磨料和 Cr_2O_3 磨料混合 (粘合剂为油酸、聚乙烯甘醇) 或直接与研磨膏混合, 可以对钠玻璃和氮化硅陶瓷进行磁粒光整加工. 研究表明, 氮化硅陶瓷从加工前的 $0.70 \mu\text{mRa}_{\text{max}}$ 下降至 $0.05 \mu\text{mRa}_{\text{max}}$, 比传统的光整加工效率高^[1]. 羰基铁粉与 SiC 纤维混合发现, SiC 纤维含量 (体积分数, 下同) 为 0.10 时效率最高, 而与金刚石混合时发现金石含量为 0.30 时效率最高. 大粒径的铁粉与磁粒混合也可以提高效率. 而另一种研究表明, 如果用金属短纤维代替大粒径铁粉, 则能避免因磁刷刚度不足使在高速旋转时引起的磁粒滞后或分层运动, 可进一步提高加工效率^[2].

机械压嵌法制造困难, 成本较高, 且结合强度低、易产生脱落磨损, 使用性能不理想. 东京大学生产技术研究所的安斋正博等人^[3], 把铁粉分别与 Al_2O_3 , NbC, SiC 纤维单晶, SiC, 金刚石在球磨机里混合. 在不同转速和不同混合时间 (10 ~ 30 h 不等) 下, 发现 SiC 纤维单晶磁粒的加工性能最好, 如体积分数为 0.065 的 SiC 纤维单晶在球机里混合 10 h 的磁粒, 能使 S55C 材料从 $0.20 \mu\text{mRa}$ 下降到 $0.06 \mu\text{mRa}$.

粘接法分无机粘接和有机粘接法, 工艺简单, 成本低, 但结合差、寿命短. 如一定比例的磁性粉末和氧化铝粉末均匀混合, 再按一定的工艺与磷酸一氧化铜混合搅拌, 固化、粉碎、筛选, 便可制得氧化铝磁粒. 铁粉与 Al_2O_3 按不同的质量比 (4 : 1) 加 HJ 101 树脂粘接剂混合、固化、粉碎、筛选, 制得磁粒. 对 45 号钢光整加工实验表明, 表面粗糙度 (σ) 从 $1.40 \sim 1.60 \mu\text{mRa}$ 下降至 $0.20 \mu\text{mRa}$.

烧结法是指磁性粉末与磨料在球磨机里均匀混合, 装模并在一定的气氛下高温烧结、粉碎、筛选, 便得到磁粒. Anzai 等人^[4]把 $2.50 \mu\text{m}$ 铁粉和石墨粉用球磨机混合 10 min 后加入金刚石粉及质量分数为 0.01 的硬脂酸锌, 并在球磨机里再混合 10 min, 装在模腔里加压 490 MPa. 在 1423 K 及 NH_3 裂化气氛下烧结 30 min, 粉碎、筛选, 便可获得金刚石磁粒 (Fe-金刚石磁粒). 在对 Si_3N_4 陶瓷 ($\varnothing 12 \times 100 \text{ mm}$, 磁隙为 1.5 mm) 的光整加工实验表明, 表面粗糙度从 $5.00 \mu\text{mRa}_{\text{max}}$ 下降至 $0.30 \mu\text{mRa}_{\text{max}}$. 也可以把铁粉与 Al_2O_3 按不同的重量比 (4 : 1) 均匀混合后烧结制得 Fe- Al_2O_3 磁粒. 烧结法是目前磁粒制造最常用的工艺方法, 其制造的磁粒耐用度、加工效率和加工性能均好于上述几种, 且制造容易, 但成本高.

等离子熔积法 (PPM, Plasma Powder Melting) 是日本东京大学安齐正博等提出来的. 基本原理是利用转移弧的高温作用, 在试件表面形成熔池, 并把弧柱内预先混合的粉末加热至熔融或半熔融状态, 喷射到熔池内进一步熔化. 当喷枪移开时熔池开始冷却凝固, 后经粉碎、筛选即得磁粒, 熔积工艺参数如表 1 所示. 尽管其制造难度大, 但使用性能好、成本低, 这种方法回避了熔铸法需要机械搅拌才能混合均匀的要求. 详细的研究表明, NbC 磁粒比同种制造方法

的其它磁粒性能好,且碳质量分数在0.004~0.006时光整效果最好.对S55C的加工表明,表面粗糙度(σ)从2.40 μmRa 下降到0.08 μmRa .如果经过酸洗后加工效率可以进一步得到提高.众所周知铁粉容易高温氧化,因此该技术还必须解决熔积过程中粉末的氧化问题.另一方面,还必须保证混合粉末中的基质相在熔积过程中熔融状态.粉末温度变化满足方程⁶⁾为

$$\frac{\partial \theta_p}{\partial t} = \frac{6k_p(\theta_f - \theta_p)}{\rho_p D C_p}, \tag{1}$$

式中 θ_f 为焰流温度, θ_p 为粉末温度, k_p 为粉末热传导系数, C_p 为粉末比热容, ρ_p 为粉末的密度, D 为粉末的直径.说明粉末的温度变化与弧柱温度和粉末热传导系数成正比,而与粉末的比热容、密度、直径成反比.太粗的粉末需要更多的热量才能被熔融,太细的因加热过度则会气化.因此,实验中必须满足 $\theta_{p\text{熔点}} < \theta_p < \theta_{p\text{沸点}}$.

上述众多的制造方法表明,不同方法制成的磁粒,其性能也不同,如表2所示.

表 2 几种磁粒性能相对比较表

| 磁 粒 | 制造难易程度 | 适合加工的材料 | 成本 | 去除难易程度 | $\sigma/\mu\text{mRa}_{\text{max}}$ |
|---|--------|-------------------|----|--------|-------------------------------------|
| Fe-NbC(PPM 法) | 最难 | 碳素钢、灰口铸铁等 | 低 | 易 | 0.4 |
| Fe-SiC 纤维单晶 (机械压嵌法) | 难 | 碳素钢、钛、铁镍合金 | 较高 | 较易 | 0.2 |
| Fe-SiC 纤维单晶 (混合法) | 易 | 碳素钢、灰口铸铁 | 较高 | 易 | 0.5 |
| Fe-Al ₂ O ₃ (粘接法) | 易 | 碳素钢 | 低 | 较难 | 0.2 |
| Fe-金刚石(混合法) | 易 | WC-Co, Si, Cu, Al | 高 | 难 | 0.1 |
| Fe-金刚石(烧结法) | 难 | 碳素钢、铁镍合金 | 最高 | 较易 | 0.2 |

2 磁粒磨损评价⁶⁾

磁粒的使用性能和寿命主要取决于磁粒的组成、结构、形形状以及硬质相与基质相的润湿能力、磁粒自身的强度,并直接受到制造方法的影响.磁粒光整加工过程中,磁粒磨损包括磨耗磨损、破碎磨损和脱落磨损.磨耗磨损把磁粒的切削刃磨钝,最终失去切削能力.当润湿能力差,结合强度就低,受力超过了磨粒与磁性结合剂的结合强度,硬质相易从基质相上脱落下来而形成脱落磨损.当磁粒的自身强度低时,在磁场力的作用下,磁粒受力超过了其极限强度和疲劳强度,是自身的破碎,形成破碎磨损.这几种磨损是同时发生,也是随机的.从概率学角度进行分析,可以得出磁粒破碎磨损、脱落磨损的发生机率.其中破碎磨损如式(2)、脱碎磨损如式(3).即

$$P_{tg} = A_g t \exp\left[\frac{z_g k_g B^2}{\mu_0 N_{\text{磁粒}}}\left(1 - \frac{1}{\mu_{rm}}\right)\right] \tag{2}$$

$$P_{tb} = A_b t \exp\left[\frac{z_b k_b B^2}{s_b \mu_0 N_{\text{磁粒}}}\left(1 - \frac{1}{\mu_{rm}}\right)\right] \tag{3}$$

在式(2)、(3)中, t 为时间, A, z 为实验常数, k_g, k_b 为比例系数, s_b 为结合面积, μ_0 为真空磁导

率, μ_m 为磁粒的相对磁导率, B 为空间磁感应强度, 单位面积内的磁粒数为 $N_{\text{磁粒}}$. 从式中可知, 破碎磨损和脱落磨损的机率与磁场力即磁感应强度大小有关, 同时还是光整加工的时间函数. 磁场力越大或光整加工时间越长, 几率越高.

3 加工工艺比较

图 1 为磁粒光整加工实验装置示意图. 磁极材料为工业纯铁, 磁极间隙这 1.5 mm, 温度

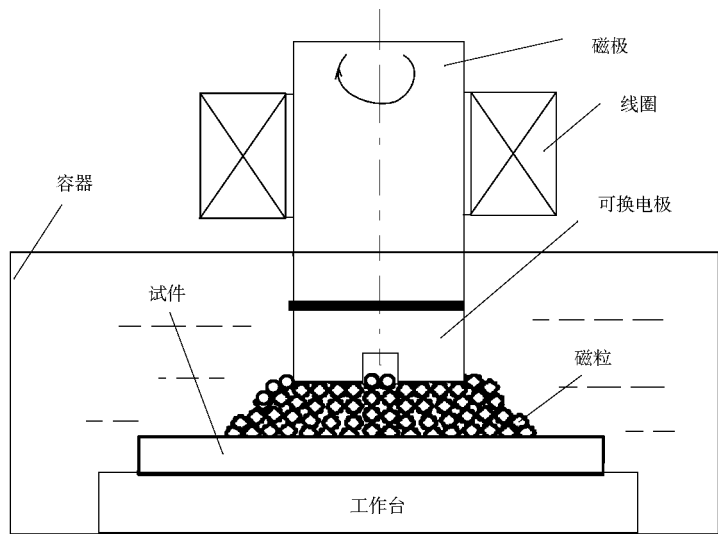


图 1 磁粒光整加工实验装置示意图

为室温, 试件为 45# 钢; 磁粒为 150#. 其中 Al_2O_3 为 W14 与铁氧体均匀混合后高温烧结, 粉碎筛选后所得的磁粒. 激磁电流(i)与磁感应强度(B)的关系, 如图 2 所示. 其填充量为 20 g, 电解液是质量分数为 0.2 的 $NaNO_3$ (静态) + 添加剂.

图 3 表明磁粒光整加工和电化学磁粒光整加工的效果不同. 磁粒光整加工的磁粒直接去除基体, 而电化学磁粒光整加工中磁粒的主要作用是刮除钝化膜, 活化基体使之参与电化学反应. 钝化膜通常是由氧化物、氢氧化物、盐或氧的吸附层等组成, 硬度远远低于试件基体本身的硬度, 这样所需要的切削力小于磁粒光整加工的要求. 从前期的研究表明, 激磁电流越大产生的磁感应强度也越大, 磁粒所受的磁场力也越大, 去除钝化膜的能力也越强. 但是, 当激磁电流过大, 磁粒在磁场力作用下除了刮除钝化膜外还去除基体, 如图 4 所示. 去除量最大值时激磁电流 $i = 2.5$ A, 此时表面粗糙度不是最好. 图 3 的实验结果还表明激磁电流对表面粗糙度的影响存在最佳值. 即对于磁粒光整加工, 当激磁电流为 2.5 A 时存在最佳表面粗糙度值 $0.23 \mu m Ra$. 对于电化学磁粒光整加工, 当激磁电流为 1.5 ~ 2.0 A 时, 最佳待表面粗糙度为 $0.12 \mu m Ra$.

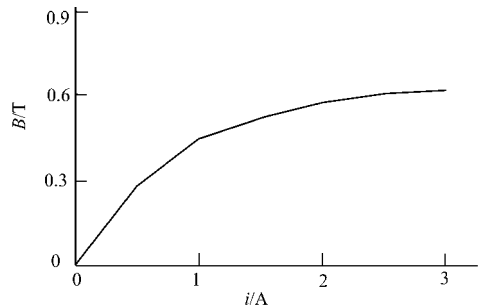


图 2 激磁电流与 B 的关系

图 4 为激磁电流与去除量(M)之间的关系. 从图中可知随着激磁电流的增大, 磁粒光整加工去除量也提高. 但由于铁氧体饱和磁感应强度低, 随着激磁电流的提高, 磁场力几乎不

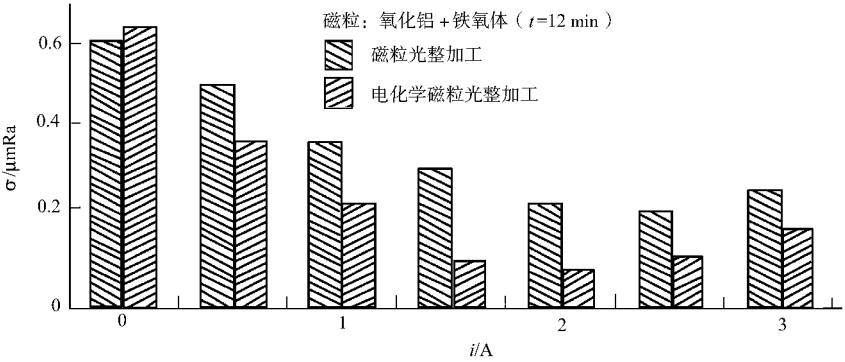


图 3 激磁电流对表面粗糙度的影响

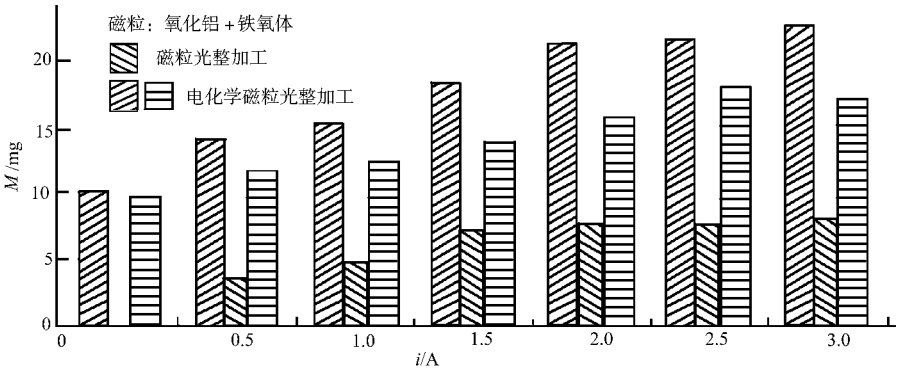


图 4 激磁电流对去除量的影响

变, 且铁氧体硬度低, 切削能力差. 因此, 在激磁电流为 2.0 A 以后去除量基本不变. 但是, 对于电化学磁粒光整加工, 磁粒在磁场的作用下, 形成磁刷, 在相对运动的过程中起到去除钝化膜的作用, 使新的基体露出, 加快了电化学过程, 因此复合后去除量得到提高. 从图中还知, 由于添加切削性能强的 Al_2O_3 粉末后去除量更大.

图 5 说明加工时间(t)不同, 表面粗糙度也不同. 电化学磁粒光整加工表面粗糙度的改善

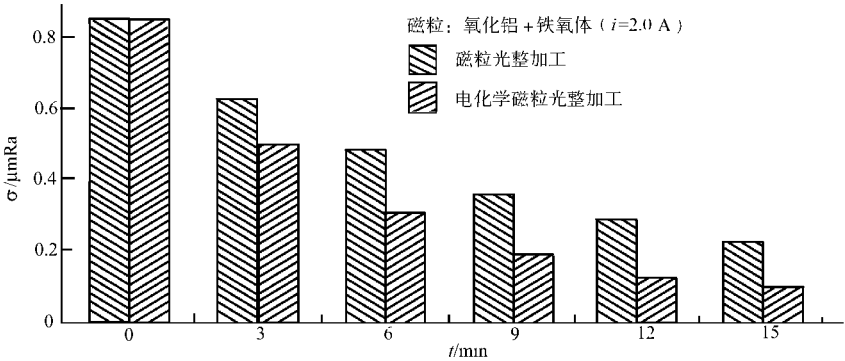


图 5 光整加工时间对表面粗糙度的影响

效果相对较好,且光整加工效率明显提高。因为从尖点理论可知,峰点处的电力线集中,电场强度大,阴离子首先与峰点处的阳离子发生作用,使得峰点处的电化学反应比谷点处快。同时,峰点处的钝化膜厚度小于谷点处,磁刷在相对运动中刮除钝化膜,实现了表面整平。由此可见,磁粒在两种加工中的切削行为不同,得到的加工效果也不同。

4 结束语

(1) 分析几种典型制造方法制备的磁粒性能。结果表明,制造方法不同,磁粒性能也不同。(2) 从概率学角度,分析了磁粒破碎磨损、脱落磨损的发生机率。(3) 磁粒在电化学磁粒光整加工中,主要起去除钝化膜的作用。通过电化学过程去除基体材料,实现表面整平。(4) 电化学磁粒复合光整加工可以有效地提高材料去除率,改善表面粗糙度。

参 考 文 献

- 1 进村武男,王风辉. 铁粉混合砥粒を用いた硬ぜい材料の平面磁気研磨法とその研磨特性[J]. 精密工学会志, 1994, 60(11): 1 652 ~ 1 653
- 2 大桥裕之,佐佐木哲夫,植松哲太郎等. 短纤维混合磁性研磨材法によるピツクフイード面の磁気研磨[J]. 型技术, 1992, (7): 12 ~ 13
- 3 安斋正博,须藤亨,中川威雄等. メカニカルアロイングによる磁性砥粒の作制とその研磨特性[J]. 粉体および粉末冶金, 1991, 38(1): 55 ~ 58
- 4 Anzai M, Otaki H, Sudo T, et al. Manufacturing of iron bond diamond magnetic abrasives by sintering and its finishing characteristics[J]. Int. J. Japan Soc. Prec. Eng., 1995, 27(4): 357 ~ 358
- 5 高荣发. 热喷涂[M]. 北京: 化学工业出版社, 1995. 20 ~ 99
- 6 周荷生,张 清. 金属的磨料磨损与耐磨材料[M]. 北京: 机械工业出版社, 1988. 30 ~ 201

Performance Analysis and Application Trial Ran of Magnetic Abrasive

Fang Jiancheng^① Jin Zhuji^② Xu Wenji^② Zhou Jinjin^②

(^① College of Electromech. Eng. & Auto., Huaqiao Univ., 362011, Quanzhou, China;

^② College of Mech. Eng., Dalian Univ. of Sci. & Eng., 116023, Dalian, China)

Abstract The elastically micro-bladed cutting of magnetic abrasive (MA) is capable of realizing automatic finishing machining of free curved surface. However, manufacturing methods differ and so are the performance of MA. Proceeding from the manufacturing methods of MA, the authors analyse the interrelated performance of MA; and experimentally analyse the different cutting behaviour of MA in abrasive finishing machining and in electrochemically abrasive finishing machining. Both the efficiency and the surface quality are improved in electrochemically abrasive finishing machining, as indicated by the study.

Keywords magnetic abrasive, performance, finishing machining