

文章编号:0253-9993(2007)05-0552-05

超声磁粒复合研磨技术

芦亚萍¹, 马季², 张军强², 何丽鹏²

(1. 宁波工程学院 机械工程学院, 浙江 宁波 315016; 2. 吉林大学 机械科学与工程学院, 吉林 长春 130022)

摘要: 提出将超声振动附加于磁粒研磨过程中的思想. 通过分析传统磁粒研磨材料去除数学模型, 揭示了提高磨刷切削能力是提高磁粒研磨效率的关键. 以超声振动理论和磁场理论为基础设计了一套超声磁粒复合研磨实验系统, 实验证明, 在单纯磁粒研磨显示磨粒失效的情况下, 超声磁粒复合研磨可以使表面粗糙度平均下降 $0.357 \mu\text{m}$. 最后对实验结果进行了分析, 得出功率大小适当的超声振动可以促进磨粒刃口自锐, 工作磨粒及时更新, 从而提高磨刷切削能力等结论.

关键词: 超声振动; 磁粒; 复合研磨; 磁力研磨; 模具

中图分类号: TG669 **文献标识码:** A

Ultrasonic magnetic abrasive finishing technology

LU Ya-ping¹, MA Ji², ZHANG Jun-qiang², HE Li-peng²

(1. School of Mechanical Engineering, Ningbo University of Technology, Ningbo 315016, China; 2. College of Mechanical Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China)

Abstract: Put forward a new kind of polishing method which compounded ultrasonic vibration with magnetic abrasive finishing (MAF) process. By analyzing the mathematics cutting model of traditional MAF, it is found that increasing the cutting ability of the magnetic abrasive brush is the key to improve the efficiency of MAF. An experimental system, based on the magnetic field theory and the ultrasonic vibrancy theory, was designed, and the experiments show that the average roughness value of the surface by compound-finishing is $0.357 \mu\text{m}$ lower than that by simple-finishing when the brush is used up in the traditional MAF. At last, the conclusion is got that proper ultrasonic vibration can enhance the efficiency of the normal MAF due to the ultrasonic vibration can make the grain flow more frequently and then refresh the milling-grain on-working and sharpen the grain's blade.

Key words: ultrasonic vibration; magnetic; compound-finishing; magnetic abrasive finishing (MAF); moulds

模具表面粗糙度的高低已成为衡量模具生产能力的重要标志, 直接影响着模具的使用寿命和成型产品质量. 目前, 模具型面的光整加工以手工抛光为主, 由于高速铣等高效高精度设备没能大量普及, 型面手工打光的工作量远比欧、美、日等模具发达国家大得多, 这导致我国模具生产周期长的同时模具表面质量和型面精度得不到可靠保证. 磁粒研磨工艺是指磁性磨料在磁场作用下, 被吸附在磁极上形成具有一定刚度的“柔性磨刷”, 通过磨刷与工件相对运动实现对工件表面研磨的一种加工方法. 由于磁性磨刷的柔软性, 磨刷工作面可以随加工表面形状的变化而变形, 因而可以实现复杂表面的研磨, 且可多面同时进行, 特别适合模具型面加工, 其表面粗糙度可达 $0.10 \sim 0.05 \mu\text{m}$, 甚至更小. 该方法还具有研磨效率高、工作环境清洁良好等优点. 但由于磨粒制备上的困难和磨刷有效工作时间短等原因, 实际磁粒研磨的高效率优

收稿日期: 2007-01-12 责任编辑: 高雪梅

基金项目: 宁波市工业科研攻关项目(2005B100058)

作者简介: 芦亚萍(1963-), 女, 浙江宁波人, 副教授. E-mail: luyaping@nbut.cn

势得不到有效发挥, 这直接导致了该技术一直未能在生产中推广应用^[1]. 为了突破现状, 笔者提出将超声振动附加于磁粒研磨过程中, 利用超声振动能量促进磨粒振动实现磨粒自锐, 同时, 超声振动又通过加剧磨粒流动实现工作磨粒及时更新, 从而提高磨刷的切削能力以及磁粒的研磨效率. 本文分析了磁粒研磨过程中材料去除规律的数学模型, 设计制作了超声磁粒复合研磨实验装置, 并进行了相关实验研究, 为该复合技术的进一步研究奠定基础.

1 磁粒研磨材料去除规律

1.1 磁粒研磨压力

图1为传统磁粒研磨加工过程中磨粒被磁化后沿磁力线方向排列形成磁刷对工件进行研磨加工的示意. 工作中, 研磨压力取决于磨粒对工件的法向力, 而这个法向力在这里主要来源于磁场力. 根据麦克斯韦观点, 可以把作用在媒质任意区域上的体积力归结为这一区域表面所受的张力. 磁场中的张力就是沿磁力线方向的纵拉力和垂直于磁力线的侧压力, 在均匀各向同性的媒质中, 单位面积上张力的的大小都等于积蓄于单位体积内的能量, 根据边界磁场连续性条件, 结合磁粒研磨过程中磁力线与工件界面总是垂直的条件, 假设单位面积内的磁粒数为 N , 可以推得单个磁粒所受的法向力 (即研磨压力) P ^[2] 为

$$P = \frac{H^2}{2N} \left(\frac{1}{\mu_0} - \frac{1}{\mu} \right), \quad (1)$$

式中, H 为微小面积上的磁感应强度, A/m; μ_0 为真空磁导率, H/m; μ 为磁性磨料的磁导率, H/m; N 为微小面积内的磁性磨粒个数.

1.2 磁粒研磨材料去除规律

研磨时真正参与切削的是磨刷中与工件接触的最底层磨粒, 根据精密切削理论和摩擦学理论, 磁粒研磨过程中, 单颗磨粒对表面的磨削形式主要有接触滑擦、刻划、挤压、切削等, 其中以切削为主要形式^[3]. 图2为单个磁粒在某一短暂时间段 t 的研磨加工过程的物理模型. 为研究方便, 这里仅考虑因研磨压力引起的材料切削, 并假设: ① 在某一时间段 t 内直接参与切削的磨粒以某一切刃相对无转动地切向工件; ② 被切削的金属材料是均匀的且各向同性; ③ 磨粒是绝对刚性的, 并且研磨中的进给切深与实际切深相同. 由图2可知, 材料去除量^[2] 为

$$M = SL\rho, \quad (2)$$

式中, ρ 为材料密度, kg/m³; L 为切削长度, m; $L = vt$, v 为该点的进给速度, m/s, t 为加工时间, s; S 为单个磁粒切入试件的最大断面积, m², 其大小与工件材料的硬度成反比, 与磨粒硬度及其刃口锋利程度等切入工件的能力、单个磨粒与工件的实际接触面积、单个磨粒所受的磁场力成正比, $S = k_1 k_2 AP$, k_1 为与工件材料硬度成反比的常数; k_2 为与磨粒硬度及其刃口切入工件的能力成正比的常数; A 为单个磁粒与试件的实际接触面积, m²; P 为单个磁粒对工件的研磨力, N.

将相关算式代入式 (2), 若加工区域内有 n 颗磨粒参与切削, 则时间段 t 内材料去除量的数学模型为

$$M = C \sum_{i=1}^n k_1 k_2 \rho v_i A_i \frac{H_i^2}{2N} \left(\frac{1}{\mu_0} - \frac{1}{\mu} \right) t, \quad (3)$$

式中, C 为实验系数, 与切削液是否使用及切削液种类等外界条件有关.

分析式 (3) 可知, 对于一定的磁粒研磨系统, 当工件、磨粒及填充量、研磨压力、研磨时间和磁极转速等工艺参数一定时, 即当设备及工况一定时, 磁粒研磨的效率取决于 k_2 , 即磨粒切入工件的能力.

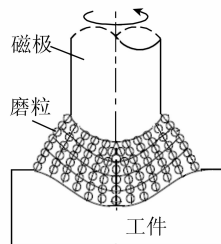


图1 磁刷研磨

Fig. 1 The magnetic abrasive brush

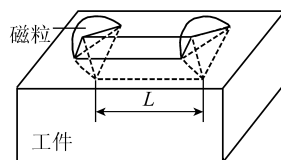


图2 单个磁粒光整加工

Fig. 2 Finishing of the single particle

若整个研磨过程中磨粒毫无转动地研磨工件表面,则磨粒刃口迅速钝化,切削能力势必急剧下降.若在研磨过程中采取措施提高工作磨粒切削时的刃口锋利度,同时设法使磨刷中的底层以外磨粒也都发挥对工件的研磨作用,磨刷的切削能力就能得以提高,显然这是在既定工况下提高研磨效率的有效途径,正是基于这样的思考,本文提出附加超声振动激励磨粒转动实现刃口自锐,同时加剧磨粒流动实现工作磨粒不断更新的目的.

2 超声磁粒复合研磨工作原理及装置设计

为了便于推广应用,本文基于普通立式数控铣床开发了一套可对模具自由表面实现超声磁粒复合研磨加工的系统.系统中有可与机床主轴连接的复合研磨杆组件,该组件中心部位沿轴向分别设置了压电陶瓷、换能器、变幅杆等超声发生系统和研磨工具头;为了安装方便同时保证工具头轴心与机床主轴轴心的相对位置精度,研磨杆组件上端制作成莫氏锥度外形;为了给高速旋转的超声系统供电,研磨杆组件外部适当位置设置电刷和集电环;为了防止压电陶瓷温升过高影响正常工作,合理设计了系统冷却装置.磁场由研磨工具头周围空套的电磁线圈产生,以直流励磁供电方式对电磁线圈进行供电,系统磁感应强度可调,以达到磁刷刚度可调的目的.

图3为该超声磁粒复合研磨实验装置的工作原理.工作时,在模具型腔需研磨的自由表面加入磁性磨粒,线圈通电,加切削液,研磨工具头吸引磁粒形成柔性磁刷,与此同时控制超声发生器工作;研磨工具头在机床数控环境下沿模具型面三维运动的同时随主轴高速旋转带动磁刷实现模具型面研磨,同时超声振动由研磨工具头传向磨粒.这样,一方面利用磁性磨刷的柔性,磨刷底面随加工表面形状的变化而变形,实现模具复杂自由表面的研磨;另一方面,超声振动给磨粒提供足够的能量促使磨粒滚动及流动实现“自锐”和工作磨粒的交替、更新,从而提高磨刷切削能力,提高研磨效率.

而超声振动对材料去除模型的改变可以这样来分析:图3所示装置中,超声波在研磨工具头内主要以纵波形式传播,振动从换能器传到工具头端面再向各磨粒传播,由超声振动学理论中的超声传播特点和衰减特性^[4],结合上述推导的材料去除模型,可以推得超声磁粒复合环境下,若加工区域内有 n 颗磨粒参与切削,则时间段 t 内材料去除量的数学模型为

$$M = C \sum_{i=1}^n k_1 k_2 \rho v_i A_i \left[\frac{H_i^2}{2N} \left(\frac{1}{\mu_0} - \frac{1}{\mu} \right) + m_i B \omega^2 \sin \omega t e^{-\alpha \nabla} \right] t, \quad (4)$$

式中, m_i 为单颗磨粒 i 的质量,kg; B 为超声振动的振幅,m; ω 为超声波的角频率,rad/s, $\omega = 2\pi f$; f 为超声波的频率,Hz; α 为衰减系数,它与介质的物理特性和超声波的特性有关; ∇ 为加工间隙,m.

式(4)反映了超声振动使材料去除量在普通磁粒研磨基础上增加了一周期性变化的附加量^[5].

3 实验研究及结果分析

3.1 实验研究

实验机床为XK7132型数控铣床.实验磨粒的平均粒度为200目的铁粉和平均粒度为400目的氧化铝以4:1的比例(重量比)混合均匀后,用日本住友石碳矿业株式会社SPS-1030烧结炉以高温(1000℃)、高压(25MPa)烧结,然后粉碎得到所需磨粒,本次实验所用磨粒粒度在60~80目之间.粗糙度检测仪型号为Perthometer S2,检测精度达纳米级.实验工件的直径为300mm的圆柱形平板,材料为45钢,经调质处理硬度为HRC29,为了减少试验效果评价误差,试验前先用磨削的方法将工件端面粗

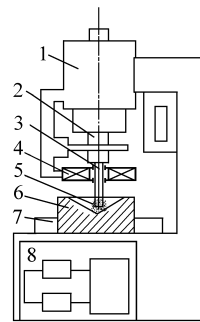


图3 超声磁粒复合研磨工作原理

Fig.3 The mechanism of UMAF

- 1——铣床; 2——研磨杆组件;
3——研磨工具头; 4——磁场发生系统;
5——磨料; 6——模具型腔;
7——机床工作台; 8——控制系统

糙度加工至均匀一致, 经粗糙度仪检测本实验加工至 $0.762 \mu\text{m}$. 超声振动的功率为 50 W , 频率为 20 kHz . 主轴转速为 800 r/min , 进给速度为 5 mm/min , 工件表面与研磨工具头间的加工间隙为 2 mm . 研磨工具头头部附近磁感应强度为 0.7 T . 试验以直线为走刀轨迹, 30 mm 长度来回分别 2 次为 1 个加工单元.

试验方法: 方法 1. 先用单纯磁粒研磨方法 (以下简称单纯方法) 加工 1 个单元, 然后更换磨粒, 再开启超声系统用超声磁粒复合研磨方法 (以下简称复合方法) 加工 1 个单元, 分别检测加工后的表面粗糙度值, 分别进行 5 组试验; 方法 2. 先用单纯方法加工若干单元至磨刷失效 (研磨时, 表面粗糙度几乎不下降定义为失效, 本试验中加工至第 7 单元时, 发现磨刷几乎失去研磨效果), 然后在不改变磨粒情况下开启超声振动系统, 实施复合研磨, 分别检测两者表面粗糙度值. 也做 5 组试验进行对比分析. 这组实验的设计出于这样的思考: 单纯磁粒研磨磨刷显示失效时, 实际上往往只是与工件表面接触的附近部分磨粒失效, 此时附加超声振动, 若磨刷磨削能力提升, 则更能体现振动对磨粒流动翻滚的作用.

实验结果发现: 对于新磨粒, 单纯方法与复合方法研磨效果差别不明显, 均达到 $0.063 \mu\text{m}$ 左右, 差值小于 $0.003 \mu\text{m}$. 但对于失效的磨粒, 则效果差别较大, 复合方法比单纯方法表面粗糙度平均多下降 $0.357 \mu\text{m}$, 图 4 为表 2 对应的第 1 组试验效果实物照片, 图中 A 为单纯方法; B 为复合方法. 表 1 为方法 2 的试验结果记录.

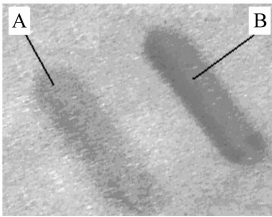


图 4 单纯与复合效果的对照

Fig. 4 Comparison of the simple and the compound effect

表 1 失效磨粒 2 种方法的粗糙度
Table 1 Comparison of the surface roughness value for two methods μm

方法	第 1 组	第 2 组	第 3 组	第 4 组	第 5 组
单纯	0.758	0.740	0.738	0.762	0.746
复合	0.387	0.377	0.358	0.449	0.388
差值	0.371	0.363	0.380	0.313	0.358

3.2 实验结果分析

超声振动除了如式 (4) 所示使材料去除量增加了一个周期性变化的附加量外, 它对磁粒研磨的作用是多方面的, 主要有:

(1) 超声振动能使式 (4) 中反映磨粒切削能力的 k_2 、磨粒进给速度 v 和磨粒与工件的接触面积等都比单纯的磁粒研磨有所提高. 这是因为: 磨粒由于附加了超声振动, 实际形成一种脉冲切削, 研磨的线速度大大提高, 同时磨粒更易翻转自锐和流动, 有效磨粒和磨粒的磨刃有效性都显著增加, 磨粒切入工件能力得以提升. 而且超声振动的介入使磨粒高频振动, 磨料相对于工件表面的运动轨迹与单一的磁粒研磨相比发生很大变化. 在一个周期内, 磁性磨粒随时改变切削方向, 形成一种类似“多刃磨削”的效果, 使工件表面切痕彼此交织, 对表面粗糙度值的进一步降低非常有利^[6].

(2) 研磨时在加工界面上的研磨液产生空化效应. 当超声能引入研磨界面后, 加工界面的液膜在疏松相和压缩相之间交替变化, 在疏松相时, 液体内部压力急剧降低, 产生大量蒸汽气泡. 当界面液膜进入压缩相时, 气泡内的压力急剧上升, 同时在液膜内高速运动 (150 m/s), 一部分会逸出液面, 一部分富集在材料表面交错耕犁后形成的突出体的边沿和沟槽处. 这些富集在材料表面的气泡在瞬间爆裂, 产生数千个大气压的局部液压冲击波, 有效去除工件表面的微凸体^[7].

(3) 由于超声波在研磨界面液膜中传播, 液体内部压力急剧变化, 激起起悬浮在液体内的微小磨屑和破碎的磨料高速冲刷工件表面, 这一效应相当于对工件表面实施了浮法抛光, 十分有利于提高加工表面质量^[7].

需要指出的是: 上述分析都是以超声的加入没有破坏磨刷正常工作所需刚度为前提的, 要发挥磁粒研磨技术的种种优势, 必须在磁场力的保持下形成具有一定刚度的磨料刷, 而超声振动则使磨粒获得能量进

行高频振动,磨粒的高频振动有使磨刷松弛、刚度下降的趋势,过高的超声功率可以大大降低磨刷的研磨切削能力,甚至严重影响磁刷的形成(本课题试验中就发现过当超声功率达到150 W时,复合研磨效果不如单纯研磨的现象)。另外,还有超声频率也有一个合理的范围,因此,要充分发挥超声在磁粒研磨中的作用,采用适当的超声参数以保证磁场力与超声振动的合理匹配是非常关键的。关于复合研磨有关参数及工艺研究因篇幅所限,将在另文展开。

实际研磨效果是诸多因素的综合,研磨开始阶段,由于参与研磨的磨粒新,磨粒刃口尚锋利,磨粒流动与流动不充分的效果差别无法体现,虽然研磨线速度的提高提升了切削效率,研磨时的空化效应加剧了表面微凸的去除,但超声振动降低了磨刷刚度引起切削效率的降低,复合研磨与单纯研磨的差异相对较小。但随着磨粒工作时间的延长,磨刷的刚度和研磨线速度及空化效应几乎不变,而超声振动使磨刷的切削能力开始胜过单纯磁粒研磨,这时,两种研磨的差别开始变大。本实验结果与该分析吻合,这正证明了超声振动对磨粒振动、磨粒流动实现磨粒自锐和工作磨粒更新所起到的积极作用。

4 结 论

(1) 将反映磨粒切入工件能力的系数 k_2 引入磁粒研磨材料去除模型,得出结论认为,当工件、磨粒及填充量、研磨压力、研磨时间和磁极转速等工艺参数一定时,加剧磨粒流动,促进磨粒自锐和工作磨粒交替、更新是提高磨刷切削能力和提高磁粒研磨效率的有效途径。

(2) 超声磁粒复合研磨使材料去除量在普通磁粒研磨基础上增加了一周期性变化的附加量,同时,适当功率的超声振动除了产生空化效应等对表面质量提高有利作用外还促使磁粒流动,实现磨粒自锐和工作磨粒更新,提高磨刷切削能力,从而提高研磨效率。

(3) 高频振动会降低磨刷刚度,要充分发挥超声在磁粒研磨中的积极作用,合理确定超声振动参数,使磁场力与超声振动实现合理匹配非常关键。

磁力研磨中附加超声振动是一项对模具加工有许多积极意义的研究,它还将使表面受到磨粒的喷丸作用,使原来模具表面的加工应力减少甚至消失,从而提高模具使用寿命。超声磁粒复合研磨技术的研究还刚刚开始,研磨机理非常复杂,复合研磨的效果与工艺方法、工艺参数等有很大关系,这方面还有大量的理论和工艺尚需深入探索。

参考文献:

- [1] 芦亚萍,马季,蔡军伟,等. 模具自由曲面磁力超精研磨控制系统[J]. 农业机械学报, 2006, 37(7): 163~166.
- [2] 方建成,金洙吉,徐文骥,等. 磁粒光整加工基础研究[J]. 中国机械工程, 2002, 13(18): 1593~1596.
- [3] 陈红玲,张银喜. 磁性磨料磨粒的磨削机理研究[J]. 太原理工大学学报, 2000, 31(5): 562~565.
- [4] 王家胜,董文中,曾晟,等. 超声波在煤粉中的衰减特性的仿真[J]. 锅炉技术, 2005, 36(1): 49~52.
- [5] Lu Yaping, Ma Ji, Zhang Junqiang. Ultrasonic magnetic abrasive finishing[J]. Journal of Coal Science & Engineering (China), 2006, 12(2): 104~107.
- [6] 李新和,王龙段,吉安. 超声/机械复合研磨在光纤连接器端面加工中的应用研究[J]. 中国机械工程, 2006, 17(11): 1174~1179.
- [7] 王萍辉. 超声空化影响因素[J]. 河北理工学院学报, 2003, 25(4): 154~161.