

超声振动辅助磁力研磨协同增效 机制与试验研究*

康璐, 陈燕, 赵杨, 马学东

(辽宁科技大学机械工程及自动化学院, 鞍山 114051)

[摘要] 磁力研磨加工技术因其加工工具为柔性的磁粒刷, 可以自应对复杂自由曲面仿形研磨加工。为了提高磁力研磨的加工效率, 引入超声波振动和改变磁极形状等措施, 建立超声振动辅助磁力研磨系统; 论述了磁场发生源的选择和磁极形状优化设计的基本思想; 通过理论分析和具体的试验结果验证了加入超声振动增加磁性研磨粒子对工件表面的瞬时研磨压力, 提高材料去除率达到协同增效的目的; 改变磁极形状可以引入磁场强度变化率, 促进磨料切削刃的自我更新, 改善表面质量。以上综合作用可以提高磁力研磨加工效率和加工件表面的研磨质量。

关键词: 超声波振动; 磁力研磨; 磁极形状; 优化设计; 研磨压力; 材料去除率

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2018.21.057



康璐

硕士研究生, 研究方向为精密加工与特种加工, 参加 2018 年“创青春”辽宁省大学生创业大赛并获得铜奖。

复杂结构零件形状复杂, 目前, 某企业还采用手工打磨抛光的方法。手工打磨抛光过程无冷却液, 波纹度大, 易烧伤^[1-3]; 靠样板控制形状精度, 其加工表面精度较低, 材料去除量不均匀, 致使工件表面质量不稳定, 特别是复杂部位手工打磨抛光无法达到精度要求, 产品的一致性也很差^[4-5]。

磁力研磨工艺中的磁性研磨粒子由于自锐性好, 在加工过程中无需进行磨损补偿^[6], 因其本身具有仿形、柔性、自适应性等优点^[7-8], 所以对于零件表面残余的刀痕、磨削纹理、毛刺等加工痕迹能够有效去除, 在非传统加工方法中具有无法取代的优势^[9-11]。特别是磁性研磨粒子的柔性特点, 适合于复杂几何形状表面的精密研磨加工^[12]。

磁力研磨过程中, 由于磁场力的作用, 使磁性研磨粒子形成具有一定柔性的磁粒刷并压附在工件表面。

磁粒刷与工件柔性接触, 不会对工件表面带来损伤, 属于柔性加工^[13-14], 这也导致加工效率比传统机械加工低, 尤其是针对硬度较高的磨具钢、合金钢和加工面积较大的零件^[15-16], 提高加工效率很有必要。

为提高磁力研磨加工效率, 在磁力研磨工艺中结合超声波振动, 通过超声激励系统促使磁性磨料翻滚, 实现自锐并冲击挤压工件表面^[17-21], 增加研磨粒子的瞬时研磨压力, 提高材料去除率达到协同增效的目的。在水平切削和垂直冲击、挤压运动的综合作用下, 研磨粒子呈现不规则的运动, 加工纹理没有方向性变得更加细密均匀, 彻底阻止了细小裂纹扩展的根源。同时, 改变磁极形状, 可以改变磁力线的方向和磁场强度变化率, 促进磁性磨料在磁场中翻滚变形, 激发磨料切削刃的自我更新, 残留在工件表面的加工纹理成为无规则点状纹理, 改善表面质量。

* 基金项目: 国家自然科学基金(51775258); 辽宁省自然科学基金重点项目(20170540458); 精密与特种加工教育部重点实验室基金(B201703)。

超声辅助磁力研磨装置

如图1所示,基于立式数控铣床改造的超声辅助磁力研磨装置,在五轴联动的数控铣床的主轴上安装具有超声振动装置的磁极头,超声波以纵波形式进行传播,经过换能器转化为高频振动,振幅通过变幅杆放大后传递到磁极头端部输出频率为15~20kHz机械振动。利用机床主轴带动超声辅助磁力研磨装置转动,在磁场中被磁化的磁性研磨粒子仿形贴附在工件表面实现与工件之间的柔性接触,数控铣床通过控制程序并根据零件表面形状的变化,作出正确的姿态调节,在加工过程中使磁极与工件之间的距离保持一致,从而获得均匀、细密的研磨效果。

可旋转超声振动激励系统与磁力研磨工具头的组合构成了超声振动磁力研磨装置,磁力研磨工具头的结构尺寸与铣削工件的铣刀相匹配^[22]。磁极头与超声振动系统连接为一体后,在其下端输出振幅约为10~16 μm的高频振动(15~20kHz),形成超声辅助磁力研磨系统,超声辅助磁力研磨加工的运动轨迹由原有的数控铣床运动系统完成。

为提高磁力研磨的加工效率,需提高对工件表面材料的去除率。由磨削理论得知^[23],研磨量 m 简化为:

$$m = bPv \quad (1)$$

式中, b 为根据工作条件而确定的一个常量; P 为研磨压力; v 为研磨速度。

分析公式(1)可以得到,在单位时间内研磨压力 P 或研磨速度 v 增大或减小,研磨量 m 也增大或减小,两者分别与研磨量 m 成正比关系。因此增加研磨过程中的材料去除量有两种方法。一种是增加工件与磁粒刷之间的相对速度,但是受到离心力的作用,转速太高会导致磁性研磨粒子飞散出加工区域而无法参加研磨。另一种是增大研磨压力,而研磨

压力 P 主要由外部磁场决定,与磁通密度的平方成正比。为了保证研磨自由曲面工件时各处的磁场强度分布均匀,磁极的体积受到限制,磁场强度不可能太大。因此在单纯的磁力研磨发挥到最佳状态的基础上,通过施加外部压力对工件进行加工磨削,达到提高去除材料研磨量的目的,引入高频超声振动辅助装置,用来提升研磨过程中的加工效率和研磨压力。

在超声振动辅助磁力研磨加工过程中,磁性研磨粒子处于3种能量的综合作用,即随主轴旋转运动产生的离心力、高频超声波振动产生的冲击压力以及磁场力,完成对工件表面的光整加工,实现提高研磨加工效率的目的。如图1所示,磁极与工件之间(大约2mm)填放磁性研磨粒子。磁性研磨粒子由于磁场的作用被磁化并聚集起来,形成具有切削能力的磁粒刷压附在工件表面。随着磁极与工件之间的相对运动,结合超声振动辅助运动,如图1所示,磁性研磨粒子对工件摩擦、挤压,对零件进行抛光、去毛刺处理。随着工作台的XY轴移动再叠加磁极的旋转运动,磁性研磨粒子不断翻滚、分离、再结合,追随磁极到达新的加工部位,从而完成零件表面各部位的光整加工。磁性研磨粒子在高频超声波振动的作用下使磁性研磨粒子冲击挤压工

件表面,提高了磁性研磨粒子对工件表面的研磨压力,增大了磁性研磨粒子的切削深度。

1 磁场发生装置

磁力研磨工艺其必备条件是加工区域磁场的存在。磁场产生方式有两种,一种是靠铁芯缠绕线圈通电后产生的电磁场;另一种是永磁铁产生的静磁场。电磁场的优点是可以通过调节电流大小改变磁场强度,但缺点是电磁场结构复杂、体积大,且电磁线圈产生涡流热,长时间工作必须配备冷却系统^[24-25]。静磁场具有体积小、结构简单、价格便宜等优点,但其产生的磁场是恒定的,不可调节。考虑到被加工工件的形状、尺寸的制约和工件材质的影响,采用永磁铁作为磁场发生源,材质为强磁钕铁硼。

为了适应自由曲面工件仿形的需要,工具端磁极须为半球形,且为了提高磁场的变化梯度和更好地储存磁性研磨粒子,需要在工具端部开槽。强磁钕铁硼具有很高的硬脆性,可加工性差,直接将永磁铁做成所需的复杂形状很困难,甚至无法加工。电工纯铁作为导磁性良好的金属材料,可以加工成磁力研磨所需的形状,从而满足上述要求。电工纯铁做成的磁极头与永磁铁相吸后,将作为一整体放在磁极套内,磁极套通过变幅杆与上部的机床主轴连接实现磁

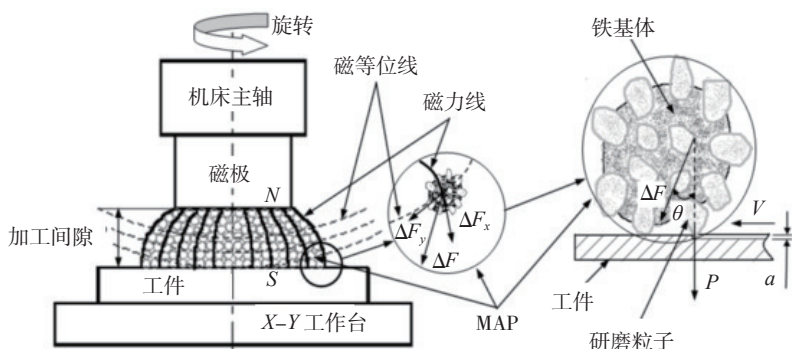


图1 超声波振动辅助磁力研磨试验装置加工原理简图
Fig.1 Ultrasonic vibration assisted magnetic grinding experimental device processing principle diagram

极头的旋转。该磁场发生器体积小、结构简单,磁极头的大小和形状可根据工件的尺寸和形状快速更换。

2 磁极形状设计

磁力研磨工艺中加工区域磁场的分布和磁性研磨粒子在磁场中的受力以及加工过程中磁性研磨粒子的运动状态是影响磁极形状的主要因素^[26-29]。为了提高磁性研磨粒子的切削加工能力,通过增大磁场强度和磁场的变化梯度来加大磁性研磨粒子对工件表面的压力,并促使磁性研磨粒子在工作区域内不断翻滚而实现微小切削刃的自我更新。磁力 F 与磁场强度变化梯度之间的关系为:

$$F = KVH (\partial H/\partial t) \quad (2)$$

式中, K 为磁性磨粒的磁化率; V 为磁性磨粒的体积; H 为加工区域的磁场强度 (A/m); $\partial H/\partial t$: 磁场强度变化梯度。可以看出磁性研磨粒子对工件表面的研磨压力与磁性磨粒的规格尺寸、磁场强度的大小以及磁场强度变化梯度成正比。由此可见,为了提高研磨效率,改变磁极的形状增大磁场强度变化梯度是可行的。

磁场强度变化梯度与磁极的表面形状有关,在磁极的端部开槽后,磁极各点到工件的距离发生变化,磁极由均匀场变为不均匀场,引起磁场变化率增大,使磁力线在槽的棱边处聚集,磁性研磨粒子会在磁场变化梯度大的地方聚集形成磁粒刷。当开槽磁极旋转时,磁性研磨粒子会在旋转的不均匀磁场的驱动下,与磁极同步旋转、翻滚、自我更新切削刃,加工效率大幅提高。另外,大量的试验研究发现,对磁极表面开槽不仅可以提高加工效率,还可以减少曲面倾角对加工效率的影响。

采用 ANSYS 软件模拟分析永久磁极的磁力线分布,对磁极形状进行优化设计^[30]。模拟所使用的参数设定为:永久磁极,矫顽力 $8.7 \times 105 \text{ kA/mm}$,相对磁导率 8000。

磁极头相对磁导率 12000,导磁工件相对磁导率 2000。空气层相对磁导率 1。

几何模型中,永久磁极的尺寸为 $\phi 25 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$,工件与磁极头端部之间的间隙按照实际加工的工况为 2mm,磁极头的几何形状主要分为平头、锥形和锥头开槽。因为几何形状模型简易且规整,所以采用智能网格自由划分,将水平控制为 1,得到有限元模型。其中平头磁极磁力线模拟时,网格的划分情况如图 2 所示。

在空气模型边界施加磁通平行边界条件,强制空气周围磁力线平行表面。通过模拟结果的磁力线分布

图和磁通密度等值线云图,分析磁极头形状对磁场分布的影响,并对磁极头形状进行优化设计,最终确定合适的磁极形状。

据图 3 和图 4 所示的磁力线及磁通密度模拟结果分析,相对于图 3 (a) 所示的圆柱磁极头,图 3 (b) 所示的圆锥面磁极头可以将一部分磁力线聚集到磁极头端部,相较于图 4 (a),图 4 (b) 所示在工件表面产生的磁感应强度区域相对较大,但相应地也会在圆锥面上产生一部分磁漏;图 3 (c) 所示的圆锥开槽磁极头的磁力线在经过圆锥面的聚集后,并在开槽的部位集中,开槽后的磁极头相当于两个小磁极独立作用,故实现加

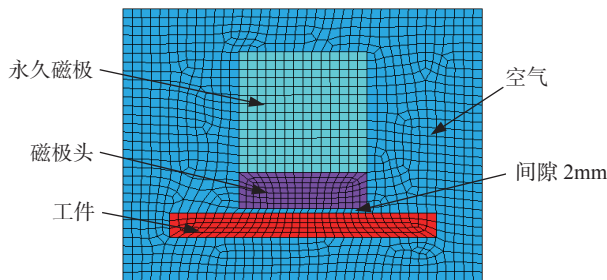


图2 有限元模型
Fig.2 Finite element model

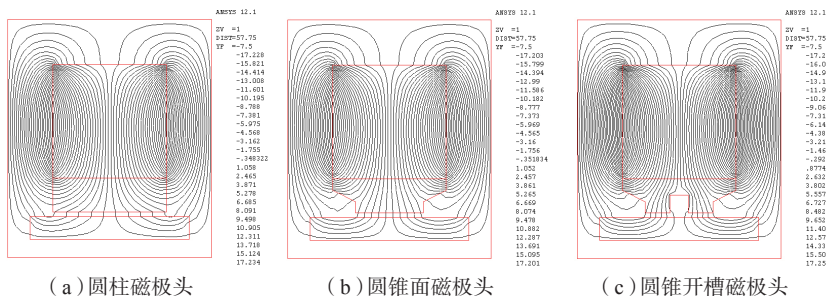


图3 不同形状的磁极头对磁力线分布的影响

Fig.3 Influence of different shapes of magnetic poles on the distribution of magnetic lines

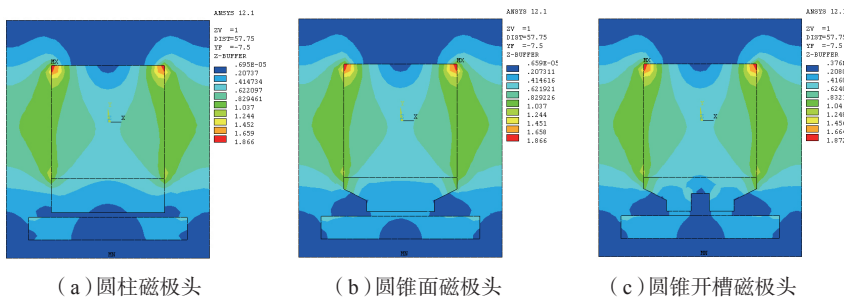


图4 不同形状的磁极头对磁通密度的影响

Fig.4 Effect of different shapes of magnetic poles on magnetic flux density

工区域的整体磁场是非均匀场,不仅改变了磁力线的分布情况,图4(c)显示加工区域的磁感应强度较前两者有所提高,与此同时,还可促进磁性研磨粒子在加工区域的翻滚和切削刃的自我更新,更有利于满足磁力研磨加工工艺的需要。

通过 ANSYS 有限元分析磁极头的磁场分布,对磁极头的形状设计提供了理论参考。结合实际工件结构和形状,考虑到零件的沟槽和型腔面曲率半径的不同,磁极头端部形状还应与被加工工件表面形状相仿,如图5所示。由于加工曲面的凸凹和曲率半径不同,需将磁极头端部设计合理的圆弧形状以保证合适的加工间隙。当曲面的曲率半径不大时,可采用与之相近半径的球头磁极;当曲面的曲率半径与磁极的半径比很大时,可以近似地采用平面磁极头来代替球面。综合以上分析,在本试验设计使用的磁极头如图6所示。

研磨试验与结果分析

利用图1所示的加工装置进行研磨试验,将试验结果与单纯磁力研磨的研磨效果进行比较,从加工效率



图5 磁极形状与工件之间的匹配关系
Fig.5 Matching relationship between magnetic pole shape and workpiece



图6 各种规格磁极头
Fig.6 Various specifications of magnetic poles

和加工纹理两个方面进行比较。将超声振动辅助磁力研磨试验装置安装在数控铣床的主轴上,机床的工作台上固定好待加工的工件,工件与磁极端面保持一定的间隙1.5mm,并在加工间隙内添加一定量的磁性研磨粒子,启动机床与超声波高频发生器,试验装置将按照设定的转速和进给速度并伴随着高频振动对工件表面研磨加工。累计加工时长为20min,工件材质为SUS304不锈钢,磁性研磨粒子粒径为60目FA烧结磁性研磨粒子5g;磁极 $\Phi 8\text{mm} \times 10$ 的N40钕铁硼永久磁铁;磁极转速为1600r/min;进给速度为8mm/min,试验结果见图7。

图7中可以看出,工件在加工前10min时,单纯磁力研磨与超声振动辅助磁力研磨加工的工件表面粗糙度分别为 $1.6\mu\text{m}$ 和 $1.25\mu\text{m}$ 左右,两者表面粗糙度下降率相差较小,此时由于尖端效应,优先去除工件表面凸起的位置,加工10min后,表面凸起被去除,剩余待加工的工件表面凸起底部较宽,需要去除的材料较多,而单纯的磁力研磨工艺会因其研磨压力不足导致材料去除量较少,其表面粗糙度开始下降缓慢。在超声振动辅助磁力研磨过程中,磁性研磨粒子在超声振动辅助下,持续高频的冲击、挤压促使材料发生变形达到去除波峰的目的。由于冲击时间较短,磁性研磨粒子与工件表面接触面积 S 很小,磁性研磨粒子会在瞬间产生较大的冲击压力,致使材料去除率更高。磁性研磨粒子的运动状态由水平旋转运动与垂直工件表面的冲击挤压产生的运动进行复合。工件原始表面的波峰、凸起在复合运动的作用下通过磁性研磨粒子去除的更均匀、更彻底。从曲线图中可以看出加工20min后,超声振动辅助磁力研磨加工的工件表面粗糙度的变化值 ΔR_a 为 $2.4843\mu\text{m}$,而单纯磁力研磨后的工件表面粗糙度的变化值 ΔR_a 为

$1.6425\mu\text{m}$ 。由此可见超声振动辅助磁力研磨加工的工件效率明显优于单纯的磁力研磨加工的结果,其研磨质量相对较好。

如图8所示,从磁性研磨粒子的运动轨迹方面分析:当单纯磁力研磨加工时,磁性研磨粒子在工件表面波峰的上升沿一侧进行划擦、挤压,先后途经波峰、波谷,此时磁性研磨粒子因水平运动在波峰上升沿一侧进行切削,并持续划擦、挤压至下个波峰上升沿一侧,磁性研磨粒子在运动过程中几乎不与波峰下降沿一侧进行划擦、挤压或只有微量去除,致使工件表面的波峰两侧材料去除不均匀、高低不平。当在单纯磁力研磨工艺中加入高频超声波振动后,在研磨加工过程中,磁性研磨粒子凭借水平切削运动与垂直的冲击挤压复合运动对工件表面进行磨削,磨削力主要来自垂直方向上超声波振动产生的短暂冲击压力。由于超声振动的轴向压力,磁性研磨粒子被迫压入波谷,并对波峰上升沿与下降沿两侧的材料进行去除,去除量相差无几,相较于单纯磁力研磨而言,超声振动磁力研磨加工纹理更加细密、均匀,材料去除率也更高。同时,在研磨过程中观察到,高频超声振动产生的冲击压力激发了研磨液的空化现象,使研磨液产生了大量的微小气泡,加快了磁性研磨粒子群运动过程中的翻滚、变形,对工件表面的冲击压力增大,

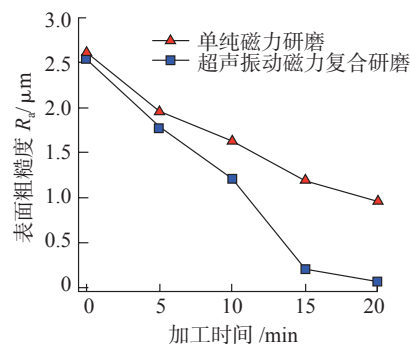


图7 超声振动辅助磁力复合研磨效率比较
Fig.7 Ultrasonic vibration assisted magnetic composite grinding efficiency comparison chart

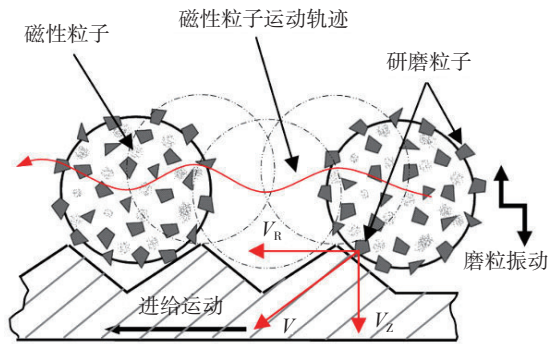
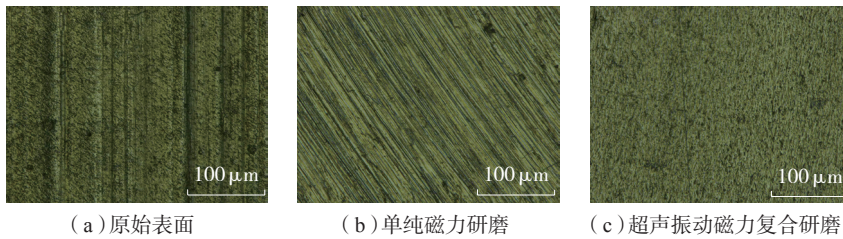


图8 磁性研磨粒子的运动分析

Fig.8 Motion analysis of magnetic abrasive particles



(a) 原始表面

(b) 单纯磁力研磨

(c) 超声振动磁力复合研磨

图9 不同加工方法的加工纹理比较

Fig.9 Comparison of processing textures of different processing methods

材料去除率提高,研磨量显著增加。

在 1000 倍显微镜下观察不同加工方法条件下的加工纹理(如图 9 所示),加工时间为 20min。对图 9 的 3 种工作条件下的加工纹理进行比较后也可以证明,单纯磁力研磨后的表面粗糙度得到大幅度降低,但是还有一定规律的加工纹理残留在工件表面;超声振动辅助磁力研磨后的加工纹理是不规则的斑点,更有利于阻止或减少细小裂纹的扩展和产生,可以大幅度提高疲劳强度,延长工件的使用寿命。磁力研磨属于微削加工,在加工过程中由于研磨压力不足,导致切削力较小,经过超声振动辅助加工后,工件表面的粗糙度降低,表面质量得到显著提高。

结论

超声振动辅助磁力研磨可以较好地去除工件表面加工纹理和波纹,提高研磨效率和表面质量。通过改变磁极头形状可以适应自由曲面零件的结构特征,保持抛光过程中磁极与工件之间距离的一致性,保证各处

的研磨力基本均匀,从而能够获得均匀的抛光效果。改变磁极形状,有利于促进磁性磨料在加工区域的翻滚和切削刃的自我更新,形成无方向性不规则加工纹理,更有利于满足改善表面质量的需要。

参考文献

- [1] 孙奕澎. 基于五自由度并联机床的曲面磁力研磨研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2004.
- [2] 李长河, 孙奕澎, 蔡光起. 自由磨粒复杂曲面磁力研磨光整加工试验研究[J]. 制造技术与机床, 2005(5): 72-75.
- [3] 陈燕. 磁研磨法在自由曲面模具型腔抛光中的应用[J]. 模具制造, 2004(7): 61-63.
- [4] LI Changhe, SUN Yipeng, CAI Guangqi. Experimental research on magnetic abrasive finishing machining on complicated surface[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2005(5): 72-75.
- [5] 陈燕. 磁研磨法在自由曲面模具型腔抛光中的应用[J]. 模具制造, 2004(7): 61-63.
- [6] CHEN Yan. The application of magnetic lapping in the polishing of mold cavity of free surface[J]. Die & Mould Manufacture, 2004(7): 61-63.

[4] KIM J D, CHOI M S. Study on magnetic polishing of free-form surfaces[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 1997, 37(8): 1179-1187.

[5] 赵玉刚, 周锦进. 自由曲面磁粒光整加工的研究[J]. 电加工, 1999(2): 18-22.

ZHAO Yugang, ZHOU Jinjin. Research on free-form surface magnetic grain finishing[J]. Electrical Processing, 1999(2): 18-22.

[6] 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.

LU Yaping, MA Ji, CAI Junwei, et al. Study of intelligent control system in magnetic abrasive finishing on molds free surface process[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(7): 163-166.

[7] 李伯民, 赵波, 李清. 磨料、磨具与磨削技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2009.

LI Bomin, ZHAO Bo, LI Qing. Abrasives materials, abrasives tools and grinding technology[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2009.

[8] CHEN Y, M ZHANG M, LIU Z Q. Study on sintering process of magnetic abrasive particles[J]. Advanced Materials Research, 2011, 337: 163-167.

[9] 陈燕, 刘昭前, 王显康. 超声振动辅助磁力研磨加工研究[J]. 农业机械学报, 2013, 44(10): 294-298.

CHEN Yan, LIU Zhaoqian, WANG Xiankang. Ultrasonic vibration-assisted magnetic abrasive finishing[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(10): 294-298.

[10] 高传玉, 倪秀付, 袁润, 等. 旋转磁场在微小工件磁力研磨加工中的应用[J]. 机械设计与制造, 2011(2): 64-66.

GAO Chuanyu, NI Xiufu, YUAN Run, et al. The application of rotating magnetic field on manufacturing of micro-parts in magnetic abrasive finishing[J]. Machinery Design & Manufacture, 2011(2): 64-66.

[11] 赵玉刚, 江世成, 周锦进. 新型的复杂曲面磁粒光整加工机床[J]. 机械工程学报, 2000, 36(3): 100-106.

ZHAO Yugang, JIANG Shicheng, ZHOU Jinjin. New complex curved magnetic grain finishing machine[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2000, 36(3): 100-106.

[12] 王兴祥. 基于自由曲面磁性研磨永磁磁极头开发与实验研究[D]. 太原: 太原理

工大学, 2003.

WANG Xingxiang. The development of permanent magnetic poles based on freeform surface magnetic abrasive finishing and experimental studies on their working performance[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2003.

[13] LIN C T, YANG L D, CHOW H M. Study of magnetic abrasive finishing in free-form surface operation using the Taguchi method[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2007, 34(1-2): 122-130.

[14] 徐立军. 曲面数字化磁力研磨加工技术基础研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2004.

XU Lijun. Basic research on surface digital magnetic abrasive machining technology[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2004.

[15] KIM J D, NOH I H. Magnetic polishing of three dimensional die and mold surfaces[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2007, 34(1-2): 18-23.

[16] 张鹏, 鲁红梅, 黄伟九, 等. 模具数字化磁力研磨加工中研磨运动轨迹的研究 [J]. 模具工业, 2005(6): 52-56.

ZHANG Peng, LU Hongmei, HUANG Weijiu, et al. study of the finishing pathes of digitized magnetic abrasive finishing of mould or die surfaces[J]. Mold Industry, 2005(6): 52-56.

[17] 刘昭前. 自由曲面磁力研磨加工机理与应用研究 [D]. 鞍山: 辽宁科技大学, 2012.

LIU Zhaoqian. Research on mechanism and application of free-surface magnetic abrasive machining[D]. Anshan: University of Science and Technology Liaoning, 2012.

[18] 尹韶辉. 磁场辅助超精密光整加工技术 [M]. 长沙: 湖南大学出版社, 2009.

YIN Shaohui. Magnetic field assisted ultra-precision finishing technology[M]. Changsha: Hunan University Press, 2009.

[19] YIN S H, SHINMURA T. Study on vibration-assisted magnetic abrasive finishing process-effects of pulsed finishing pressure on machining characteristics and its mechanism transaction[J]. Japan Society of Mechanical Engineering (JSME), 2003, 68(673): 3464-3471.

[20] YIN S H, SHINMURA T. Vertical vibration-assisted magnetic abrasive finishing and debarring for magnesium alloy [J]. International Journal of Machine & Manufacture, 2004, 44(12-13): 1297-1303.

[21] JAIN V K, KUMAR P S. Effect of working gap and circumferential speed on the performance of magnetic abrasive finishing process[J]. Wear, 2001, 250: 384-390.

[22] 马季. 模具自由曲面超声磁力复合研磨机理及试验研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2007.

MA Ji. Mechanism and experimental study of ultrasonic magnetic composite grinding of die free surface[D]. Changchun: Ji Lin University, 2007.

[23] 焦安源, 全洪军, 陈燕, 等. 超声磁力复合研磨钛合金锥孔的试验研究 [J]. 机械工程学报, 2017, 53(19): 114-119.

JIAO Anyuan, QUAN Hongjun, CHEN Yan, et al. Experimental research of titanium alloy taper hole by ultrasonic magnetic abrasive finishing[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(19): 114-119.

[24] YAN B H, CHANG G W, CHENG T J, et al. Electrolytic magnetic abrasive finishing[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2003, 43(13): 1355-1366.

[25] EI-TAWHEEL T. Modelling and analysis of hybrid electrochemical turning magnetic abrasive finishing of 6061 Al/Al₂O₃ composite[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2008, 35(7/8): 705-714.

[26] 肖作义, 赵玉刚, 吴文权. 磁极形

状对磁粒研磨工艺影响的数值分析 [J]. 现代制造工程, 2003(10): 10-12.

XIAO Zuoyi, ZHAO Yigang, WU Wenquan. The numerical analyzing for the effects of magnetic pole shape to the process of magnetic abrasive finishing[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2003(10): 10-12.

[27] 赵玉刚, 江世成, 周锦进. 磁极开槽形状和尺寸对磁场分布和磁粒光整加工能力影响的研究 [J]. 中国机械工程, 1999, 10(6): 685-688.

ZHAO Yugang, JIANG Shicheng, ZHOU Jinjin. Study on the influence of magnetic slotting shape and size on magnetic field distribution and magnetic particle finishing ability[J]. China Mechanical Engineering, 1999, 10(6): 685-688.

[28] 程肖冰. 强永磁材料平面磁极头的开发及其实验分析 [D]. 太原: 太原理工大学, 2002.

CHENG Xiaobing. The exploitation of strong permanent magnetic poles on planes surface and the experiment research on its working character[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2002.

[29] 冯宝富, 盖全芳, 赵万胜, 等. 磁力研磨头形状对研磨效果的影响 [J]. 中国工程机械学报, 2008, 6(1): 101-104.

FENG Baofu, GAI Quanfang, ZHAO Wansheng, et al. Impact of magnetic abrasive tool's shapes on abrasive effects[J]. Chinese Journal of Construction Machinery, 2008, 6(1): 101-104.

[30] JAIN N K, JAIN V K, JHA S. Parametric optimization of advanced fine-finishing processes[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2007, 34: 1191-1213.

通讯作者: 陈燕, 博士, 教授, 研究方向为精密加工和精密测量技术, E-mail: laochen412@gmail.com.

Synergistic Mechanism and Experimental Study of Ultrasonic Vibration Assisted Magnetic Grinding

KANG Lu, CHEN Yan, ZHAO Yang, MA Xuedong

(School of Mechanical Engineering and Automation, University of Science and Technology Liaoning, Anshan 114051, China)

(下转第 68 页)

Yueqing, et al. Study on surface integrity of 6061-T6 aluminum alloy sheet after laser shot peening[J]. Applied Laser, 2007, 27(6): 450-455.

[10] YOSHIKAZU T, MINORU U, KOICHI T. Comparison of nanocrystalline surface layer in steels formed by air blast and ultrasonic shot peening[J]. Materials Transactions, 2004, 45(2): 376-379.

[11] 盈亮,戴明华,胡平,等. 6061-T6 铝合金高温本构模型及温成形数值模拟[J]. 中国有色金属学报, 2015(7): 1815-1821.

YING Liang, DAI Minghua, HU Ping, et al. Thermal constitutive model and numerical simulation of hot forming for 6061-T6 aluminum alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2015(7): 1815-1821.

[12] 谢灿军,童明波,刘富,等. 7075-T6

铝合金动态力学试验及本构模型研究[J]. 振动与冲击, 2014(18): 110-114.

XIE Canjun, TONG Mingbo, LIU Fu, et al. Dynamic tests and constitutive model for 7075-T6 aluminum alloy[J]. Journal of Vibration and Shock, 2014(18): 110-114.

通讯作者: 汪伟, 教授, 研究方向为精密微细特种加工, E-mail: wangwei@nuaa.edu.cn.

Residual Stress Field of 6061-T6 Aluminum Alloy Arc Groove Induced by Ultrasonic Impact Treatment

HU Shenyang, GENG Qidong, MIAO Xinghua, WANG Wei

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

[ABSTRACT] The work aims to study the formation and stress distribution of the surface residual stress field of the arc groove of 6061-T6 aluminum alloy specimen after ultrasonic impact treatment. By means of finite element analysis software, the residual stress field distribution of the arc groove is simulated by ultrasonic impact treatment, and the effect of different technological parameters on the residual stress value on the bottom surface of the arc groove is investigated by comparing the simulation results with the orthogonal process test. The results show that the ultrasonic impact treatment has formed a residual compressive stress layer with a thickness of about 0.35mm at the bottom of the arc groove, the residual stress first increased and then decreased along the depth direction, and the maximum residual stress value can reach about -362.5MPa. The process test is basically consistent with the influence trend of various process parameters on the residual stress value of the bottom surface of the groove obtained by the finite element simulation under the same condition, the residual stress value at the bottom of the arc groove increases with the increase of tool vibration amplitude, and decreases slightly with the increase of machining gap, while the change of workpiece movement velocity has little effect on the stress value.

Keywords: Ultrasonic impact treatment; Arc groove; Finite element simulation; Residual stress; Aluminum alloy

(责编 大漠)

(上接第 62 页)

[ABSTRACT] The magnetic grinding processing technology can adaptively grind and process complex free-form surfaces because its processing tool is a flexible magnetic particle brush. In order to improve the processing efficiency of magnetic grinding, introducing ultrasonic vibration and changing the shape of the magnetic pole, the ultrasonic vibration assisted magnetic grinding system is established; the selection of magnetic field source and the basic idea of magnetic pole shape optimization design are discussed; through theoretical analysis and experimental results, introducing ultrasonic vibration excitation can increase the instantaneous grinding pressure of magnetic abrasive particles and improve the material removal rate to achieve synergistic effect. Changing the shape of the magnetic pole can introduce the rate of change of the magnetic field strength and promote the abrasive cutting edge. Self-renewal to improve surface quality. The above comprehensive effects can improve the efficiency of magnetic grinding processing and the grinding quality of the workpiece surface.

Keywords: Ultrasonic vibration; Magnetic abrasive finishing; Magnetic pole shape; Optimal design; Finishing pressure; Material removal rate

(责编 大漠)