第 37 卷第 5 期　　河 北 科 技 大 学 学 报　　Vol. 37, No. 5
2016 年 10 月　　Journal of Hebei University of Science and Technology　　Oct. 2016

**文章编号:1008-1542(2016)05-0449-08**　　**doi:10.7535/hbkd.2016yx05004**

# 难加工合金材料复杂曲面磁性磨料光整加工技术

马付建[1],陶德松[1],宫　臣[1],康仁科[2],张生芳[1],沙智华[1]

(1.大连交通大学机械工程学院,辽宁大连　116028;2.大连理工大学精密与特种加工教育部重点实验室,辽宁大连　116024)

**摘　要:**磁性磨料光整加工技术是一种非常重要的光整加工技术,与低频振动和超声振动相结合,可实现高精度、高质量和高效率的光整加工。介绍了磁性磨料光整加工、振动辅助磁性磨料光整加工及超声辅助磁性磨料光整加工技术的原理和特点及相关的国内外研究现状。根据难加工合金材料复杂曲面的特点,提出实现复杂曲面磁性磨料光整加工,需要就以下问题开展进一步研究和探索:通过提高加工间隙的磁通量密度及磁能与其他能量复合来提高光整加工效率;建立复杂曲面磁性磨粒光整加工过程控制函数;探讨在磁极工具的空间几何约束作用下复杂曲面磁性磨料光整加工工艺的规划方法等。

**关键词:**特种加工工艺;难加工合金;复杂曲面;超声;光整加工;磁性磨料

**中图分类号:**TG663　　**文献标志码:**A

# Technology of magnetic abrasive finishing in machining of difficult-to-machine alloy complex surface

MA Fujian[1], TAO Desong[1], GONG Chen[1], KANG Renke[2], ZHANG Shengfang[1], SHA Zhihua[1]

(1. School of Mechatronic Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian, Liaoning 116028, China; 2. Key Laboratory for Precision & Non-traditional Machining of Ministry of Education, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China)

**Abstract:** The technology of magnetic abrasive finishing is one of the important finishing technologies. Combining with low-frequency vibration and ultrasonic vibration, it can attain higher precision, quality and efficiency. The characteristics and the related current research of magnetic abrasive finishing, vibration assisted magnetic abrasive finishing and ultrasonic assisted magnetic abrasive finishing are introduced. According to the characteristics of the difficult-to-machine alloy's complex surface, the important problems for further study are presented to realize the finishing of complex surface with the technology of magnetic abrasive finishing, such as increasing the machining efficiency by enhancing the magnetic flux density of machining gap and compounding of magnetic energy and others, establishing of the control function during machining and the process planning method for magnetic abrasive finishing of complex surface under the space geometry restraint of complex surface on magnetic pole, etc.

**Keywords:** non-traditional machining; difficult-to-machine alloy; complex surface; ultrasonic; finishing; magnetic abrasive

---

收稿日期:2016-04-21;修回日期:2016-05-31;责任编辑:陈书欣

基金项目:国家自然科学基金(51505057);国家高技术研究发展计划项目(2015AA043402);辽宁省教育厅科学研究项目(L2014181)

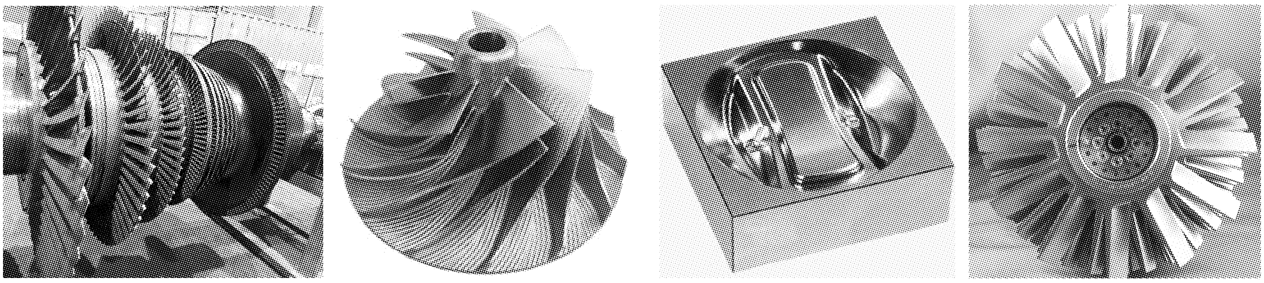
作者简介:马付建(1982—),男,河南商丘人,博士,主要从事难加工材料精密高效加工技术方面的研究。

E-mail:mafj@djtu.edu.cn

马付建,陶德松,宫　臣,等.难加工合金材料复杂曲面磁性磨料光整加工技术[J].河北科技大学学报,2016,37(5):449-456.

MA Fujian, TAO Desong, GONG Chen, et al. Technology of magnetic abrasive finishing in machining of difficult-to-machine alloy complex surface[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2016, 37(5): 449-456.

钛合金和高温合金等难加工合金材料具有强度高，耐高温和耐腐蚀，且具有良好的抗疲劳性和抗断裂韧性等优点[1]，在航空、航天、船舶、能源及其他工业领域得到越来越广泛的应用[2-3]。这些合金材料主要被用于制造汽轮机和飞机发动机的叶轮、涡轮分子泵转子及精密模具等，如图1所示。



a) 汽轮机叶轮　　b) 飞机发动机叶轮　　c) 精密模具　　d) 涡轮分子泵转子

图1　典型的难加工合金零件

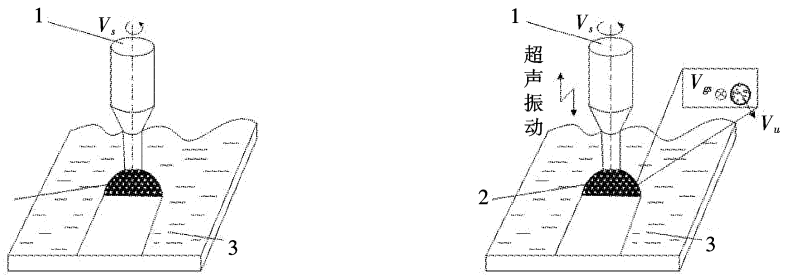
Fig.1　Typical parts of difficult-to-cut alloy

在这些典型的零件中，均需要对复杂曲面进行光整加工，但由于这类零件所采用的钛合金和高温合金等合金材料的强度高、韧性强、黏性大，是典型的难加工材料，加之这类零件结构复杂，在加工中易产生刀具干涉，且对加工精度和加工效率要求高。尤其是叶轮类零件，由于其结构上具有叶片薄、厚度不均、扭曲大、面型复杂和叶片间隔小等特点[4-5]，在加工中易变形，对加工质量和精度要求更高，因此，这些零件是典型的难加工零件。如何实现这类难加工复杂曲面零件的高质量、高效率光整加工，已成为当前国内外学者关注的研究热点问题。

为了解决难加工合金材料的高质高效光整加工问题，一些新型的加工技术被应用于该类材料的光整加工中。其中，磁性磨料光整加工技术具有加工表面质量、加工精度和效率高，表面残余应力低，且易于控制加工效率和精度等特点，同时可以很好地与数控机床、加工中心和机器人结合，实现光整加工的自动化[6]，适合于各种复杂曲面零件的光整加工。因此，国内外学者针对磁性磨料光整加工技术开展了许多相关研究。

## 1　磁性磨料光整加工技术原理

磁性磨料光整加工技术是利用强磁场力进行光整加工的一种新型加工技术，将磁性磨料置于磁场中，在磁场力的作用下，磁性磨料沿着磁力线的延伸方向有序排列起来，在磁极与加工表面之间，形成一个结构紧密的磁性磨料刷，并对加工表面产生压力，在机床主轴高速旋转带动下以速度 $V_s$ 做旋转运动，磁性磨料在工件表面进行滑擦和微切削作用，从而实现对工件表面的光整加工，其加工原理如图2 a)所示。




1—磁极工具；2—磁性磨料；3—工件。　　1—磁极工具；2—磁性磨料；3—工件。

a) 磁性磨料光整加工　　b) 超声辅助磁性磨料光整加工

图2　磁性磨料光整加工和超声辅助磁性磨料光整加工原理

Fig.2　Principle of magnetic abrasive finishing and ultrasonic assisted magnetic abrasive finishing

由于磁性磨料光整加工时，靠近磁性磨料刷中心的磨料线速度低、外围的磨料线速度高，导致了靠近边缘的磁性磨料加工速度快、靠近中心的加工速度慢，在进给运动的作用下，被加工区域两侧高速运动的磨粒密度高、中间部位的高速磨粒密度低，从而导致加工表面质量不均匀。为此，有学者提出采用低频振动辅助

磁性磨料光整加工的振动辅助磁性磨料光整加工技术，该加工方法是在传统磁性磨料光整加工的磁极或工件上施加垂直于进给方向的低频振动，垂直于进给方向的振动使工件和磁性磨料刷在水平方向上产生相对运动，从而消除表面加工不均匀的现象。同时还可施加沿磁极轴向的低频振动，该振动增加磁性磨料对工件的压力和速度，从而提高加工效率和加工质量。但是，由于辅助振动的频率较低，提高加工质量和效率的效果有限。

随着超声辅助加工技术的发展，近些年出现了一种新型的复合加工技术，即超声辅助磁性磨料光整加工技术，可进一步提高磁性磨料光整加工的加工质量和效率。超声辅助磁性磨料光整加工技术的加工原理如图 2 b)所示，该技术通过在磁极上施加超声振动，利用超声振动的高频碰撞作用，使磁性磨料除了随着旋转磁场以速度 $V_{gs}$ 做旋转运动，还在超声振动的作用下以速度 $V_u$ 向工件表面运动，磁性磨料对工件材料去除作用除了剪切滑擦，还增加了高频高速撞击作用，并增加单位时间内与工件表层接触的磁性磨粒数量，从而实现材料的高质高效加工。

## 2　磁性磨料光整加工技术的国内外研究现状

难加工材料的高质高效光整加工需求对传统表面光整加工技术提出了许多新的挑战，面对这些挑战，国内外学者针对难加工材料磁性磨料光整加工、振动及超声辅助磁性磨料光整加工开展了广泛的研究。

### 2.1　磁性磨料光整加工技术

近些年，国内外在磁性磨料光整加工方面开展了大量的研究。在理论方面，JAYSWAL 等[7-8]通过电磁学、接触力学和塑性力学建立了磁性磨料光整加工的材料去除效率和表面粗糙度的有限元模型，对电磁力进行了数值仿真并对材料去除效率和表面粗糙度进行预测。JIAO 等[9]建立磁性磨料光整加工中磁性磨料的运动轨迹模型，并分析了运动轨迹对加工表面质量的影响。MORI 等[10]研究了磁性磨粒刷形在磁化能、排斥能和张力能等作用下的形成机理，如图 3 所示，并建立了加工非磁性材料时法向力和切向力的数学模型。王显康等[11]根据 Preston 经验公式推导出磁性磨粒光整加工的压力计算公式，通过分析认为磁性磨料粒度、磁极速度以及加工间隙是影响加工效率的主要因素。李建国等[12]和冯宝富等[13]通过分析认为，磁性磨料光整加工主要通过磁性磨粒微量切削作用、磁性磨粒磨损作用和磁性磨粒化学磨损作用等进行材料去除。张萍萍等[14]根据基尔霍夫定律建立了磁性磨料光整加工磁极设计的数学模型，并设计了开槽磁极。JIAO 等[15]建立了双磁极光整加工的磁场分析有限元模型，分析了两磁极夹角对磁通密度的影响。

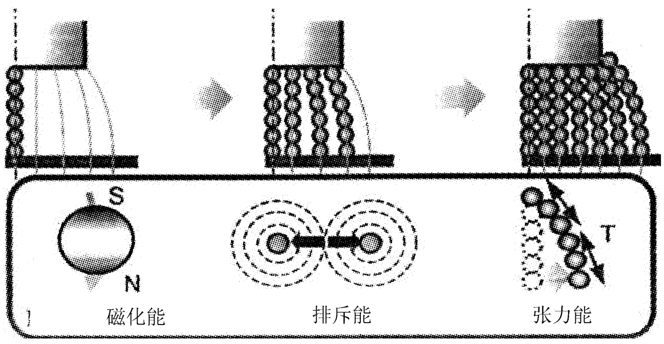



图 3　磁性磨粒刷的形成机理

Fig. 3　Formation mechanism of magnetic abrasive brush

在试验研究方面，SINGH 等[16]用如图 4 所示的试验装置测量了磁性磨料光整加工中的切向和法向切削力，研究发现切向和法向切削力均随着磁感应强度的增大而增大，随着加工间隙的增大而减小，且法向力随着润滑剂比例增加而增大，切向力随着转速的增大而减小。李长河等[17]通过试验研究了磨料粒度、加工间隙和磁极工具形状等对 45＃钢表面磁性磨料光整加工效果的影响规律，结果表明在保持磁感应强度不变的情况下，磨料粒度对加工质量影响较大，间隙为 2 mm 时加工质量较好，开槽工具比未开槽的切削力大、加工效率高。LIN 等[18]利用田口法研究了加工参数对 SUS304 不锈钢磁性磨料光整加工表面质量的影响，结果表明加工间隙、进给速度和磨料粒度的大小是影响表面质量的显著因素。韩冰等[19-20]通过正交试验法研究了加工参数对钛合金弯管内表面光整加工质量的影响，结果显示磁极转速、加工间隙、磨料粒度和进给速度的影响程度依次降低。徐志锋等[21]通过对 45＃钢进行磁性磨料光整加工试验，研究了磁极表面场强对光整加工效果的影响，结果表明磁极表面场强≥1.0 T 时才能实现光整加工。张萍萍等[22]通过对 SUS304 不锈钢板进行磁性磨料光整加工试验，研究了加工时间对工件表面粗糙度的影响，试验结果如图 5 所示。结果

表明随着加工时间的增加,表面粗糙度先快速降低,后缓慢上升,加工中存在一个最优的加工时间。KWAK 等[23-24]通过在有色金属材料工件的下方增加磁极的方式,实现加工间隙中磁通量密度的增加,有效提高了加工表面质量。陈燕等[25]通过在陶瓷管内增加 V 型磁铁,大大增加了磁感应强度,加工效率成倍增加,并实现了镜面加工。YAMAGUCHI 等[26]通过对比试验研究了磁性磨料光整加工对钛合金切削刀具的作用,发现经过磁性磨料光整加工的刀具寿命是正常刀具寿命的 2 倍。WANG 等[27]采用硅胶作为磨粒的约束剂对 SKD-11 模具钢进行光整加工试验,结果表明采用硅胶作为磨粒的约束剂是无约束时加工效率的 3 倍。

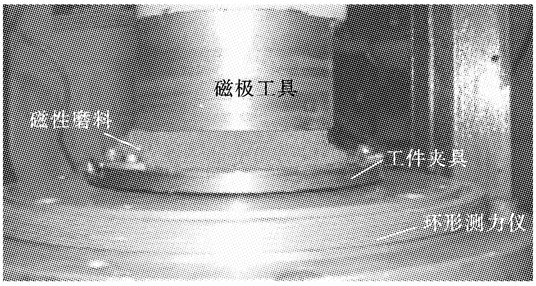



图 4 平面磁性磨料光整加工试验装置

Fig. 4 Experimental setup of plane magnetic abrasive finishing

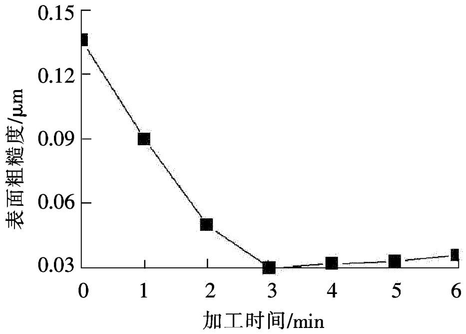



图 5 加工时间与表面粗糙度的关系

Fig. 5 Relationship between machining time and surface roughness

### 2.2 振动辅助磁性磨料光整加工技术

在振动辅助磁性磨料光整加工方面,YIN 等[28-29]采用如图 6 所示的试验装置对 AZ31B 镁合金进行加工试验,对工件施加垂直于进给方向的低频振动(频率为 6 Hz)辅助磁性磨料光整加工,相对于不加振动辅助的磁性磨料光整加工,达到最佳表面质量的时间减少了 40%,最佳表面粗糙度 Ra 由 0.4 μm 减小到 0.1 μm,且表面质量更加均匀,试验结果如图 7 所示。韩冰等[30]针对 $Al_2O_3$ 陶瓷管研究了振动频率对光整加工质量的影响,结果表明在一定范围内,表面质量随着振动频率的升高而提高。YIN 等[31-32]通过分析振动辅助磁性磨料光整加工的机理,认为振动的引入能够提高光整加工单位加工距离的材料去除率及加工距离,从而提高了材料去除率。在此基础上,YIN 等[33]对不加振动辅助、施加轴向低频振动辅助、施加垂直于进给方向低频振动辅助和同时施加轴向和垂直于进给方向低频振动辅助的磁性磨料光整加工分别进行了加工试验,研究结果表明:施加轴向振动辅助的磁性磨料光整加工有助于提高材料去除效率;施加垂直于进给方向振动辅助的磁性磨料光整加工有助于提高表面质量;同时施加轴向和垂直于进给方向振动辅助的磁性磨料光整加工对加工效率和表面质量都有所提高。

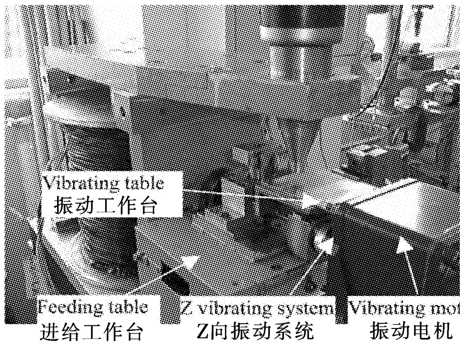
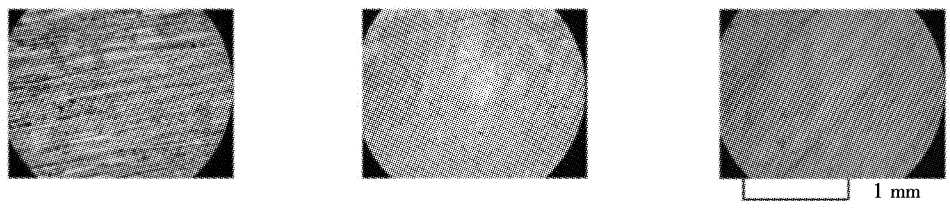



图 6 振动辅助磁性磨料光整加工试验装置

Fig. 6 Experimental setup of vibration assisted magnetic abrasive finishing




a) 加工前 b) 无振动辅助 c) 有振动辅助

图 7 AZ31B 加工表面的微观图像

Fig. 7 Microscopic photographs of AZ31B machined surface

LEE 等[34-35]开发了沿进给方向和垂直于进给方向二维振动辅助磁性磨粒光整加工试验装置，如图 8 所示，并利用该装置研究了加工间隙、振幅、振动频率、磁极转速等对 SUS304 不锈钢表面加工质量的影响规律，利用田口分析法得到间隙为 1 mm、振幅为 0.1 mm、振动频率为 16.67 Hz、转速为 500 r/min 时可获得较好的表面质量，通过试验发现该参数条件下，可实现表面粗糙度 Ra 为 0.032 μm 的镜面加工。

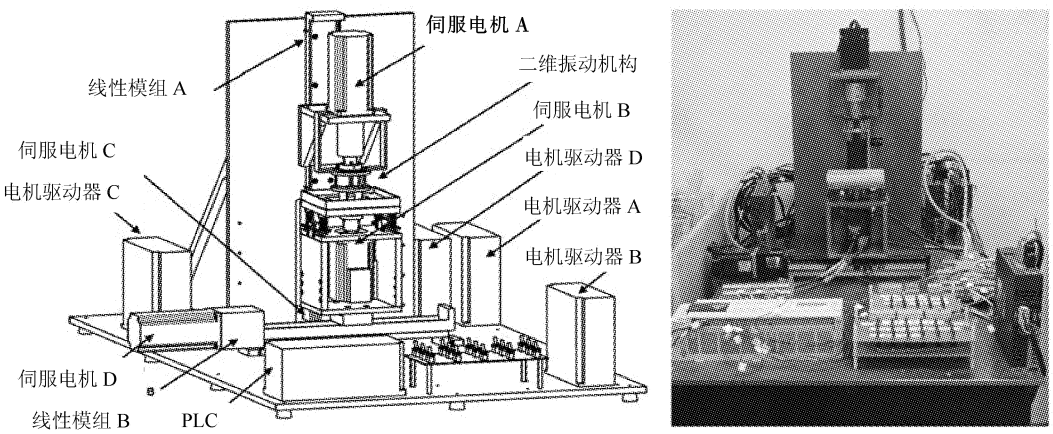
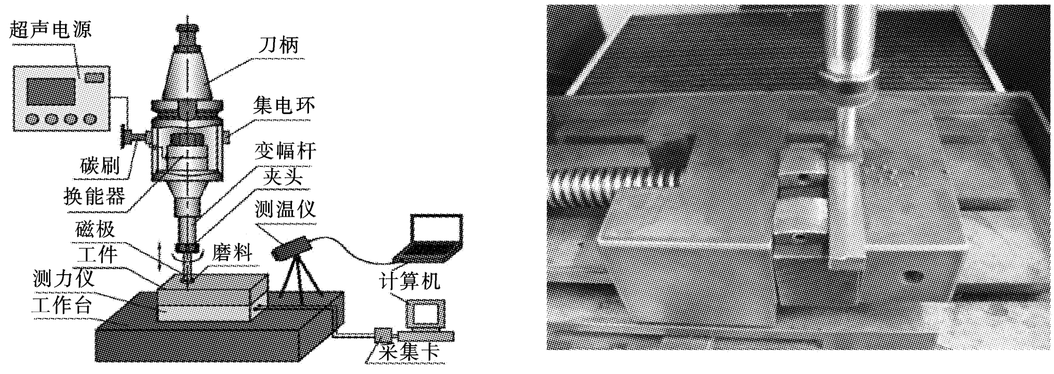



图 8　二维振动辅助磁性磨料光整加工试验装置

Fig. 8　Experimental setup of two-dimensional vibration assisted magnetic abrasive finishing

## 2.3　超声辅助磁性磨料光整加工

在超声辅助磁性磨料光整加工方面，YAMAMOTO 等[36]针对 SKD-11 淬硬钢进行了超声辅助与传统磁性磨料光整加工对比试验，结果表明超声辅助磁性磨粒光整加工可以节约一半以上的加工时间。陈燕等[37]针对 SUS304 不锈钢进行了超声辅助磁性磨料光整加工试验，结果表明与传统的磁性磨料光整加工相比，加工效率提高了一倍，并且获得表面粗糙度 Ra 为 0.06 μm 的加工表面。本文利用如图 9 所示的超声辅助磁性磨料光整加工试验台，针对 TC4 钛合金开展超声辅助磁性磨料光整加工试验，试验结果如图 10 所示，由试验结果可看出经过同样的加工时间，超声辅助磁性磨料光整加工的表面粗糙度仅为普通磁性磨料光整加工的 25％左右。YUN 等[38]针对氧化铝陶瓷管进行了超声辅助磁性磨料光整加工试验，结果发现材料去除率随振动频率和转速的增大而增大，表面粗糙度随振动频率的增大而降低，但转速对表面粗糙度的影响相对较小，通过试验获得的最佳表面粗糙度 Ra 为 0.03 μm。MULIK 等[39-43]针对硬度为 HRC61 的 AISI52100 淬硬钢进行了超声辅助磁性磨料光整加工试验，结果表明与普通磁性磨料光整加工相比，加工表面粗糙度约降低 124％，并获得表面粗糙度 Ra 为 0.022 μm 的高质量表面，对超声辅助磁粒光整加工的法向力和转矩进行测量，法向力的变化范围为 12～20 N，转矩的变化范围为 2～14 N・m。马季等[44-46]对 45＃钢进行超声辅助磁性磨料光整加工试验，发现在一定范围内，加工效率随磁感应强度的增强而增大，当达到饱和磁感应强度时，加工效率将不再增加；且发现加工间隙对加工效果影响较大，间隙较小易导致工件表面划伤，




a) 试验平台示意图　　b) 试验平台实物图

图 9　超声辅助磁性磨料光整加工试验平台

Fig. 9　Experimental setup of ultrasonic assisted magnetic abrasive finishing

间隙过大会导致磁场强度降低，合理的加工间隙范围为 1.5～2.0 mm。ZHOU 等[47]对钛合金零件进行了超声辅助磁性磨料光整加工试验，结果发现超声辅助磁性磨料光整加工可以大大改善钛合金的表面应力状态，表面应力从 280 MPa 下降到 20 MPa。

KALA 等[48-50]经研究发现双磁极可以增加加工间隙的磁通量密度，利用该原理开发了如图 11 所示的超声辅助双盘磁性磨料光整加工装置，并进行加工试验发现该加工方式可在较短的时间获得较好的加工表面。

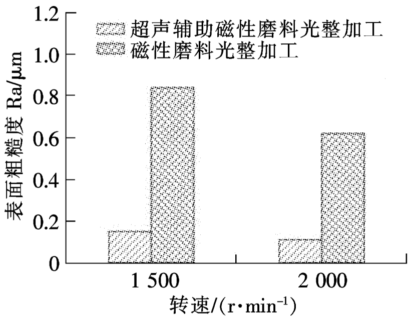



图 10 磁性磨料光整加工和超声辅助磁性磨料光整加工的表面粗糙度

Fig. 10 Surface roughness of magnetic abrasive finishing and ultrasonic assisted magnetic abrasive finishing

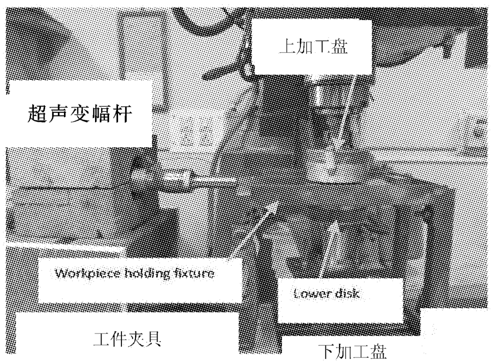



图 11 超声辅助双盘磁性磨料光整加工装置

Fig. 11 Setup of ultrasonic assisted double disk magnetic abrasive finishing

## 3 研究展望

光整加工通常作为机械加工的最后一道工序，用来提高零件的表面质量、机械性能和使用寿命。磁性磨料光整加工技术作为一种重要的光整加工技术，目前已引起国内外研究人员的广泛关注，且取得了许多研究成果，但要实现复杂曲面的磁性磨料光整加工还需在以下方面开展进一步的深入研究。

1)通常情况下，以整体叶轮为代表的复杂曲面的加工受到空间的限制，无法使用大直径磁极工具，因此其光整加工效率会大大降低，如何通过磁极和磁路设计提高加工间隙的磁通量密度及通过磁能与其他能量的有机复合，实现复杂曲面高效率光整加工是要解决的首要问题。

2)在复杂曲面磁性磨料光整加工中，磁性磨料受到磁极工具及复杂曲面的空间约束及旋转运动、进给运动、磁场和其他能量场的共同作用，复杂曲面表面材料去除函数变得极为复杂，因此研究复杂曲面表面材料的变形和流动规律及表面材料的去除机理，建立稳定可靠的复杂曲面表面材料去除函数是亟待解决的一个重要问题。

3)由于以整体叶轮为代表的复杂曲面对其加工精度均有较高的要求，磁极工具和磁性磨料在加工中的磨损对其加工精度均有较大的影响，因此建立不同磁极工具位姿状态下材料去除和工具磨损函数的数学模型，以及磁性磨粒磨损模型，从而建立复杂曲面磁性磨粒光整加工过程控制函数是要解决的关键问题。

4)结合建立的复杂曲面磁性磨粒光整加工过程控制函数和复杂曲面对磁极工具的空间几何约束作用，建立复杂曲面磁性磨料光整加工工艺规划方法是实现复杂曲面光整加工需要进一步研究的另一重要问题。

**参考文献/References：**

[1] 赵忠阳. 钛合金和高温合金切削过程的有限元仿真[D]. 哈尔滨：哈尔滨理工大学，2012.
ZHAO Zhongyang. Finite Element Simulation for the Cutting Process of Titanium Alloy and Superalloy[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2012.

[2] 吉春辉，刘振旺，秦旭达，等. 钛合金螺旋铣孔参数对表面粗糙度影响研究[J]. 河北科技大学学报，2015，36(3)：225-231.
JI Chunhui, LIU Zhenwang, QIN Xuda, et al. Study on the influence of helical milling parameters on surface roughness of titanium alloy [J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2015, 36(3): 225-231.

[3] 李博，沈以赴，胡伟叶. TC4 钛合金搅拌摩擦焊微观组织特征及影响[J]. 河北科技大学学报，2016，37(1)：20-25.
LI Bo, SHEN Yifu, HU Weiye. Microstructural characteristics and effects of TC4 titanium alloy processed by using friction stir welding [J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2016, 37(1): 20-25.

[4] 魏志强，高峰，王涛. 基于 NX 的透平膨胀机整体叶轮五轴加工技术研究[J]. 煤矿机械，2015，36(1)：91-93.
WEI Zhiqiang，GAO Feng，WANG Tao. Study of five-axis machining technology of turboexpander integral impeller based on NX[J]. Coal Mine Machinery，2015，36(1)：91-93.
[5] 李茂月，刘献礼，于海滨. 整体叶轮铣削颤振在线控制技术的研究进展[J]. 河北科技大学学报，2013，34(4)：279-285.
LI Maoyue，LIU Xianli，YU Haibin. Research progress of online control technology for integral impeller milling chatter[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology，2013，34(4)：279-285.
[6] 徐立军，王文，杨诚. 磁力研磨加工技术综述[J]. 组合机床与自动化加工技术，2003(1)：41-43.
XU Lijun，WANG Wen，YANG Cheng. Review of the magnetic abrasive finishing [J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique，2003(1)：41-43.
[7] JAYSWAL S C，JAIN V K，DIXIT P M. Modeling and simulation of magnetic abrasive finishing process[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology，2005，26(5)：477-490.
[8] JAIN V K，JAYSWAL S C，DIXIT P M. Modeling and simulation of surface roughness in magnetic abrasive finishing using non-uniform surface profiles[J]. Materials and Manufacturing Processes，2007，22(2)：256-270.
[9] JIAO A Y，QUAN H J，LI Z Z，et al. Study on improving the trajectory to elevate the surface quality of plane magnetic abrasive finishing [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology，2015，80(9)：1613-1623.
[10] MORI T，HIROTA K，KAWASHIMA Y. Clarification of magnetic abrasive finishing mechanism[J]. Journal of Materials Processing Technology，2003，143/144：682-686.
[11] 王显康，陈燕，周锟. 磁力研磨法在微小凹槽表面光整加工中的应用[J]. 机械设计与制造，2014(2)：243-245.
WANG Xiankang，CHEN Yan，ZHOU Kun. Application research on magnetic abrasive finishing method to the finishing machining of micro-groove[J]. Machinery Design & Manufacture，2014(2)：243-245.
[12] 李建国，王勇. HR-2 钢精密零件表面磁力研磨磨粒加工机理研究[J]. 金刚石与磨料磨具工程，2005(4)：68-69.
LI Jianguo，WANG Yong. Researches on mechanism of magnetic abrasive surface finishing of HR-2 steel precise parts[J]. Diamond & Abrasives Engineering，2005(4)：68-69.
[13] 冯宝富，孙晓林，孙奕澎，等. 磁力研磨机理研究[J]. 北华大学学报(自然科学版)，2005，6(2)：187-189.
FENG Baofu，SUN Xiaolin，SUN Yipeng，et al. On grinding mechanism for magnetic abrasive finishing[J]. Journal of Beihua University (Natural Science)，2005，6(2)：187-189.
[14] 张萍萍，张桂香. 平面磁力研磨装置及磁极设计[J]. 山东理工大学学报(自然科学版)，2011，25(6)：67-70.
ZHANG Pingping，ZHANG Guixiang. Design of a plane magnetic abrasive finishing device and the magnetic pole[J]. Journal of Shandong University of Technology(Natural Science Edition)，2011，25(6)：67-70.
[15] JIAO A Y，QUAN H J，LI Z Z，et al. Study of magnetic abrasive finishing in seal ring groove surface operations[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology，2016，85(5)：1195-1205.
[16] SINGH D K，JAIN V K，RAGHURAM V. Experimental investigations into forces acting during a magnetic abrasive finishing process [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology，2006，30(7)：652-662.
[17] 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.
LI Changhe，SUN Yipeng，CAI Guangqi. Experimental research on magnetic abrasive finishing complicated surface[J]. Manufacturing Technology and Machine Tool，2005(5)：72-75.
[18] LIN C T，YANG L D，CHOW H M. Study of magnetic abrasive finishing in free-form surface operations using the Taguchi method[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology，2007，34(1)：122-130.
[19] 韩冰，刘立鑫，陈燕. 磁力研磨法加工弯管内表面的工艺参数优化[J]. 中国机械工程，2015，26(6)：814-817.
HAN Bing，LIU Lixin，CHEN Yan. Optimization of process parameters on magnetic abrasive finishing to inner surface of bending pipe [J]. China Mechanical Engineering，2015，26(6)：814-817.
[20] 邓超，韩冰，陈燕. 磁研磨法对钛合金弯管内表面的抛光研究[J]. 航空制造技术，2015(3)：61-63.
DENG Chao，HAN Bing，CHEN Yan. Study of inner surface polishing of titanium alloy elbow pipe by magnetic abrasive finishing[J]. Aeronautical Manufacturing Technology，2015(3)：61-63.
[21] 徐志锋，刘新才，潘晶，等. 磁极表面场强对磁力研磨效果影响的研究[J]. 电加工与模具，2000(3)：26-28.
XU Zhifeng，LIU Xincai，PAN Jing，et al. Research on the effect of magnetic field intensity on magnetic abrasive finishing[J]. Electromachining & Mould，2000(3)：26-28.
[22] 张萍萍，张桂香，赵玉刚，等. SUS304 不锈钢平面磁力研磨加工试验研究[J]. 山东理工大学学报(自然科学版)，2011，25(5)：103-105.
ZHANG Pingping，ZHANG Guixiang，ZHAO Yugang，et al. Experimental research on plate magnetic abrasive finishing of stainless steal SUS304[J]. Journal of Shandong University of Technology(Natural Science Edition)，2011，25(5)：103-105.
[23] KWAK J S. Enhanced magnetic abrasive polishing of non-ferrous metals utilizing a permanent magnet[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture，2009，49(7)：613-618.
[24] KIM T W，KANG D M，KWAK J S. Application of magnetic abrasive polishing to composite materials[J]. Journal of Mechanical Science and Technology，2010，24(5)：1029-1034.
[25] 陈燕，张广彬，韩冰，等. 磁力研磨法对陶瓷管内表面超精密抛光技术的试验研究[J]. 摩擦学学报，2015，35(2)：131-137.
CHEN Yan，ZHANG Guangbin，HAN Bing，et al. Experimental investigation of magnetic abrasive finishing for super precision polishing of inner surface of the ceramic tube[J]. Tribology，2015，35(2)：131-137.
[26] YAMAGUCHI H，SRIVASTAVA A K，TAN M，et al. Magnetic abrasive finishing of cutting tools for high-speed machining of titanium alloys[J]. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology，2014，7(4)：299-304.
[27] WANG A C，LEE S J. Study the characteristics of magnetic finishing with gel abrasive[J]. International Journal of Machine Tools and

Manufacture, 2009, 49(14):1063-1069.

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

[29] YIN S H, SHINMURA T. Study of vibration-assisted magnetic abrasive finishing process(effects of vibration on cylindrical finishing characteristics and its mechanism)[J]. Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers C, 2001, 67(661):3006-3012.

[30] 韩冰，云昊，陈燕，等．振动辅助磁力研磨超硬精密 $Al_2O_3$ 陶瓷管内表面试验研究[J]．摩擦学学报，2016,36(2):169-176.
HAN Bing, YUN Hao, CHEN Yan, et al. Experimental study of vibration-assisted magnetic abrasive finishing on inner surface of superhard precise $Al_2O_3$ ceramic tubes[J]. Tribology, 2016,36(2):169-176.

[31] YIN S H, SHINMURA T. Study of vibration assisted magnetic abrasive finishing process (2nd report, effect of pulsed finishing pressure on machining characteristics and its mechanism)[J]. Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers C, 2002, 68:2464-2471.

[32] YIN S H, WANG Y, SHINMURA T, et al. Material removal mechanism in vibration-assisted magnetic abrasive finishing[J]. Advanced Materials Research, 2008, 53/54:57-63.

[33] YIN S H, SHINMURA T. A comparative study: Polishing characteristics and its mechanisms of three vibration modes in vibration-assisted magnetic abrasive polishing[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2004, 44(4): 383-390.

[34] LEE Y H, WU K L, JHOU J H, et al. Two-dimensional vibration-assisted magnetic abrasive finishing of stainless steel SUS304[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 69(9):2723-2733.

[35] LEE Y H, WU K L, BAI C T, et al. Planetary motion combined with two-dimensional vibration-assisted magnetic abrasive finishing[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 76(9):1865-1877.

[36] YAMAMOTO C, NAKADA I, KUBOI T, et al. Development of magnetic field assisted ultrasonic vibration finishing process and its apparatus[J]. Journal of the Japan Society for Abrasive Technology, 2004, 48:41-46.

[37] 陈燕，刘昭前，王显康．超声波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.

[38] YUN H, HAN B, CHEN Y, et al. Internal finishing process of alumina ceramic tubes by ultrasonic-assisted magnetic abrasive finishing [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016,85(1):727-734.

[39] MULIK R S, PANDEY P M. Ultrasonic assisted magnetic abrasive finishing of hardened AISI 52100 steel using unbonded SiC abrasives [J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2011, 29(1):68-77.

[40] MULIK R S, PANDEY P M. Mechanism of surface finishing in ultrasonic-assisted magnetic abrasive finishing process[J]. Materials and Manufacturing Processes, 2010,25(12):1418-1427.

[41] MULIK R S, PANDEY P M. Experimental investigations and optimization of ultrasonic assisted magnetic abrasive finishing process[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B Journal of Engineering Manufacture, 2011, 225(8):1347-1362.

[42] MULIK R S. Experimental Investigations and Analysis of Ultrasonic Assisted Magnetic Abrasive Finishing Process[D]. Delhi: Indian Institute of Technology Delhi, 2011.

[43] MULIK R S, PANDEY P M. Experimental investigations and modeling of finishing force and torque in ultrasonic assisted magnetic abrasive finishing[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2012, 134(5):76-87.

[44] 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. Study on the Mechanism and Test of Ultrasonic Assisted Magnetic Abrasive Finishing in Mould Free Surface[D]. Changchun: Jilin University, 2007.

[45] 芦亚萍，马季，张军强，等．超声磁粒复合研磨技术[J]．煤炭学报，2007，32(5):552-556.
LU Yaping, MA Ji, ZHANG Junqiang, et al. Ultrasonic magnetic abrasive finishing technology[J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(5):552-556.

[46] 芦亚萍，张军强，马季，等．超声磁粒复合研磨加工工艺参数控制系统设计[J]．农业机械学报，2007，38(8):168-172.
LU Yaping, ZHANG Junqiang, MA Ji, et al. Study on the control of ultrasonic magnetic abrasive finishing[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(8):168-172.

[47] ZHOU K, CHEN Y, DU Z W, et al. Surface integrity of titanium part by ultrasonic magnetic abrasive finishing[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 80(5):997-1005.

[48] KALA P, KUMAR S, PANDEY P M. Polishing of copper alloy using double disk ultrasonic assisted magnetic abrasive polishing[J]. Materials and Manufacturing Processes, 2013, 28(2):200-206.

[49] KALA P, PANDEY P M. Experimental study on finishing forces in double disk magnetic abrasive finishing process while finishing paramagnetic workpiece[J]. Procedia Materials Science, 2014(5):1677-1684.

[50] KALA P, PANDEY P M. Experimental investigations into ultrasonic-assisted double-disk magnetic abrasive finishing of two paramagnetic materials[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B Journal of Engineering Manufacture, 2015:1-18.