

超声波振动辅助磁力研磨加工研究^{*}

陈燕 刘昭前 王显康

(辽宁科技大学先进磨削技术研究所, 鞍山 114051)

摘要: 根据研磨加工的材料去除模型, 分析得到增加研磨压力是提高磁力研磨加工效率的可行手段。通过在单纯磁力研磨工艺中引入超声波振动, 增加了研磨粒子的瞬时研磨压力。经实验证明, 在超声振动辅助磁力研磨加工中, 研磨粒子在水平切削和垂直冲击挤压运动的综合作用下, 对工件材料的去除率高且表面质量均匀; 加工效率较单纯磁力研磨工艺提高了约 50%; 工件表面粗糙度 R_a 可降至 $0.06\text{ }\mu\text{m}$ 左右; 电子显微镜观察发现其加工后工件表面形貌较单纯磁力研磨细密均匀; 采用 X 射线干涉仪检测得知, 经超声振动辅助磁力研磨加工后的工件材料 (SUS304) 表层的应力状态已由原始的残余拉应力 $+320\text{ MPa}$ 变为压应力 -40 MPa , 有效提高了工件的疲劳强度。

关键词: 磁力研磨 超声波振动 复合加工 表面形貌 应力状态

中图分类号: TG669 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)10-0294-05

Ultrasonic Vibration-assisted Magnetic Abrasive Finishing

Chen Yan Liu Zhaoqian Wang Xiankang

(Institute of Advanced Grinding Technology, University of Science and Technology Liaoning, Anshan 114051, China)

Abstract: Based on the material removal model, it was concluded that the increase of finishing pressure was a practicable method for improving the efficiency of the magnetic abrasive finishing. By adding ultrasonic vibration to the magnetic abrasive finishing process, the instantaneous pulsating finishing pressure of magnetic abrasive particles could be increased. Experiment results showed that, magnetic abrasive particles could efficiently remove the workpiece material and keep surface smooth with the combined force in rotational movement and vertical impact. The practical experiment proved that the finishing efficiency was improved by 50% or so. The surface roughness of workpiece decreased to $0.06\text{ }\mu\text{m}$. Compared with only magnetic abrasive finishing, the ultrasonic vibration-assisted magnetic abrasive finishing made the surface morphology smoother and well-distributed in digital microscope. By using X-ray interferometer detection, the stress state of workpiece surface layer after ultrasonic vibration-assisted magnetic abrasive finishing changed from residual tensile stress ($+320\text{ MPa}$) to compressed stress (-40 MPa), which effectively improved fatigue strength of workpiece.

Key words: Magnetic abrasive finishing Ultrasonic vibration Combined machining Surface morphology Stress condition

引言

随着制造技术的进步, 大量新材料、新结构的零件应运而生, 同时也对零件的表面质量提出了越来越高的要求。复杂形状零件因结构复杂, 传统的加工工艺和工具难以完成精密加工。磁力研磨法

(Magnetic abrasive finishing, MAF) 作为一种非传统的光整加工工艺, 是利用磁性研磨粒子在磁场的作用下沿着磁力线分布排列并形成具有一定刚性的磁粒刷; 通过磁粒刷与工件之间的相对运动实现对工件表面研磨的加工方法^[1]。磁性研磨粒子作为磁力研磨的加工工具, 通常由铁磁相和磨粒相组成, 每

一个磁性研磨粒子都相当于一个多刃的加工刀具^[2],在磁场中被磁化并集聚形成的磁粒刷具有良好的柔性、自适应性和自锐性,可以实现传统方法不能或难以加工的细长管、弯管内壁的光整加工^[3~5],尤其适合研磨加工复杂型面工件^[6~8]。但是因加工效率低使磁力研磨得不到有效的发挥,难以在工业生产中得到推广应用。为了提高加工效率,Yan B H 等研究了电解磁力研磨工艺,将磁力研磨工艺(MAF)与电化学加工工艺相结合,以完成对工件表面的光整加工^[9]。El-Taweel 将电化学旋转加工工艺与磁力研磨相结合来提高材料(6061 铝合金)的去除率并降低表面粗糙度。研究表明在电化学旋转加工中引入磁力研磨工艺与单一电化学旋转加工相比,可以提高加工效率并改善表面质量^[10]。以上方法虽然可以提高加工效率,但是因为电解液的使用,不利于操作工人的健康并会污染环境。

本文利用超声振动辅助磁力研磨(Ultrasonic vibration assisted magnetic abrasive finishing, UVAMAF)装置,使用粗糙度测量仪和超景深显微镜对加工前后的工件表面粗糙度 R_a 和微观形貌进行观测;采用 X 射线衍射仪检测工件加工前后的应力状态变化。

1 超声振动辅助磁力研磨加工机理

1.1 工作原理

图 1 是超声振动辅助磁力研磨加工示意图。超声波发生器、换能器、集电环、变幅杆组成可旋转超声振动发生系统;磁力研磨工具头为一圆柱形钕铁硼永磁体,与超声振动发生系统连接为一体。

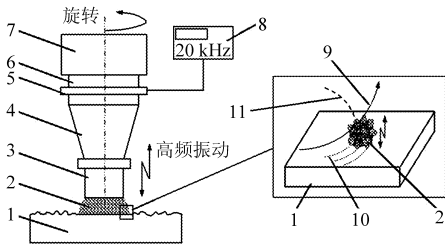


图 1 超声振动辅助磁力研磨加工示意图

Fig. 1 Working principle of ultrasonic vibration-assisted magnetic abrasive finishing

1. 工件 2. 磁性磨料 3. 磁极 4. 变幅杆 5. 集电环 6. 换能器 7. 机床主轴 8. 超声波发生器 9. 旋转轨迹 10. 研磨轨迹 11. 磁力线

实际加工时,在磁力研磨工具头与工件表面的间隙中加入磁性研磨粒子,在磁场力作用下,磁性研磨粒子沿着磁力线分布,形成柔性磁粒刷并压附在工件的表面。控制超声波发生器开始工作,超声波以纵波的形式传播,经换能器转换成高频机械振动,

振幅经变幅杆放大后传递到磁力研磨工具头端部,输出频率为 20 kHz、振幅约为 16 μm 的机械振动。该高频振动将给磁粒刷提供能量,促使磁性磨料翻滚实现自锐并冲击挤压工件表面^[11~14]。机床启动后,磁性研磨粒子将随着机床主轴旋转并按照规定加工轨迹进给,磁性研磨粒子在工件的表面刻划、切削,以降低工件的表面粗糙度;同时磁性研磨粒子在高频振动作用下,冲击挤压工件表面,一方面可以提高研磨压力,增大磨粒的切深,另一方面磨粒的冲击作用可以改善工件材料表面的应力状态,减小因前工序切削加工而产生的残余拉应力,甚至引入压应力。另外,在研磨加工过程中,研磨液会在超声振动的作用下产生微小的空化效应,空化气泡的破裂也会对工件的表面起到一定的光洁作用。综合以上所述,在该复合研磨加工过程中,磁性磨料会在旋转运动、高频振动和磁场力这 3 种能量的综合作用下,完成对工件表面的光整加工,实现提高磁力研磨加工效率的目的。

1.2 研磨压力与速度分析

根据普林斯顿方程

$$M = kpv \tag{1}$$

式中 M ——材料去除率

k ——比例常数,由研磨压力和速度以外的其他因素决定

p ——研磨压力 v ——研磨速度

为了提高磁力研磨的加工效率,由式(1)可以得到,材料去除率 M 与研磨压力 p 和研磨速度 v 成正比,所以增加磁力研磨过程中工件材料去除率的方法可以从两方面考虑:一是增加工件与磁粒刷的相对运动速度,另一种是增大研磨压力。由于磨料受到离心力的作用,转速太高会导致磨料挣脱磁力的束缚飞出加工区域,所以磁粒刷的转速不能太高。

在单纯的磁力研磨加工过程中,研磨压力为^[11]

$$p_m = \frac{B^2}{2\mu_0} \left(1 - \frac{1}{\mu_m} \right) \tag{2}$$

式中 B ——磁通密度

μ_0 ——空气磁导率,为 $4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$

μ_m ——磁性磨料的相对磁导率

由式(2)可知,研磨压力 p_m 是由外部磁场决定的,与磁通密度 B 的平方呈正比。而不论是使用永久磁极还是电磁线圈励磁,磁通密度 B 为 1~2 T。无论采用哪种磁性磨料制备工艺,所得到的磁性磨料的相对磁导率是有限的^[15]。当外部磁场达到其饱和磁化强度后,继续增大磁场强度并不会提高粒子所受的磁力。所以想通过提高磁场和磁性磨料的相对磁导率的方法来提高研磨压力从而提高磁力研

磨加工效率有局限性。至此分析可以得出,在单纯磁力研磨已发挥到最佳的研磨效率的基础上,只有通过施加外部压力才能进一步提高工件材料的去除率,从而提高研磨效率。因此在磁极上施加一高频振动,使磁性磨料对工件的表面形成脉冲压力 p_v ,此时在超声振动辅助磁力研磨加工过程中的材料去除率为

$$M = k(p_m + p_v)v \tag{3}$$

由式(3)可知,在磁力研磨过程中引入超声振动可以增大研磨压力,从而提高工件材料的去除率和研磨效率。磁极的高频振动迫使磨粒对工件的表面产生冲击挤压,使得工件表面的残余拉应力明显变小,甚至变为压应力,并且使应力分布均匀。

磁性研磨粒子在复合研磨过程中的运动分析如图2所示。在超声振动辅助磁力研磨过程中,变幅杆的振动形式为周期性正弦波,磨粒在振动方向速度 v_z 为

$$v_z = z' = (A \sin \omega t)' = A \omega \cos \omega t \tag{4}$$

式中 A ——超声波振动的振幅

t ——时间 ω ——振动频率

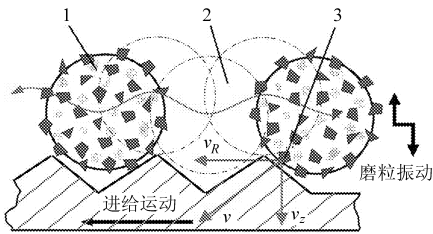


图2 磁性研磨粒子的运动分析

Fig.2 Motion analysis of magnetic abrasive particle

1. 磁性粒子 2. 磁性粒子运动轨迹 3. 研磨粒子

在本研究中, A 为 $16\text{ }\mu\text{m}$, ω 为 20 kHz ,代入式(4)中,即可得到磨粒轴向振动的最大速度为 2.01 m/s 。磨粒的振动加速度 a_z 和对工件表面的脉冲压力 p_v 为

$$a_z = v'_z = -A\omega^2 \sin \omega t \tag{5}$$

$$p_v = ma_z/S \tag{6}$$

经计算得出振动频率为 20 kHz 条件下,磨粒的最大振动加速度 a_z 为 $2.52 \times 10^5\text{ m/s}^2$ 。虽然单一磨粒质量 m 很小,但因磨粒在超声振动作用下,冲击工件表面的时间很短,故冲击作用力会相对较大,且磨粒与工件表面接触面积 S 很小,所以磁性磨粒会在瞬间冲击工件表面时产生相对较大的冲击压力 p_v ,这个过程类似于喷丸冲击强化。

如图2所示,单纯磁力研磨时,磨粒在工件轮廓波峰的上升沿一侧高速地划擦后,经过波峰的最高点进入波谷,而此时磨粒会在磁场力的作用下继续旋转运动,划擦挤压下一个波峰的上升沿一侧,几乎

没有与前一波峰的下降沿产生相对的挤压、划擦运动,或者只是轻微地从其表面掠过。致使单纯磁力研磨产生对工件波峰的两侧材料去除不均匀、高低不平。当引入超声振动后,磨削力主要来自垂直振动的超声波压力。在复合研磨过程中,磁性磨粒在工件的表面做水平切削运动和垂直于加工表面的冲击挤压运动。当磨粒处于波谷上方时,在轴向振动的作用下,磨粒被迫压入波谷,相对于单纯磁力研磨增加了磨粒与波谷背侧的接触时间,使得每一个波峰两侧的材料去除量近乎相等,始终保持着类对称的圆弧曲线,加工纹理更均匀,材料去除率更高。

2 超声振动磁力复合加工实验

2.1 实验过程

将超声振动辅助磁力研磨实验装置安装在数控铣床的主轴上,工件(材质:SUS304 不锈钢)固定在机床的工作台上,实际加工状态如图3所示。实验中使用平均粒径为 $325\text{ }\mu\text{m}$ 烧结法制备的磁性研磨粒子^[12],其材料构成如表1所示。磁场由永久磁铁(钕铁硼)产生,磁极与工件的加工间隙为 1 mm 。

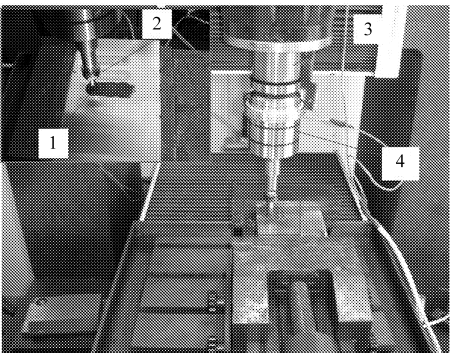


图3 超声振动辅助磁力研磨实验装置

Fig.3 Device of ultrasonic vibration-assisted magnetic abrasive finishing

1. 磁性磨料 2. 磁极 3. 机床主轴 4. 超声波振动装置

表1 磁性研磨粒子的材料构成

Tab.1 Composition of sintered magnetic abrasive particles

参数	数值
铁磁相	还原铁粉 Fe 粒径 $150 \sim 175\text{ }\mu\text{m}$
磨粒相	Al_2O_3 粒子粒径 $40 \sim 50\text{ }\mu\text{m}$
质量比(Fe: Al_2O_3)	4:1
烧结温度/ $^\circ\text{C}$	1 200
烧结时间/h	3

如图3所示,调整磁极端面与工件表面的加工间隙,在间隙内添加磁性磨料(质量为 3 g),然后启动机床和超声波发生器。在加工过程中可以观察到,由于超声振动对研磨液的空化作用,研磨液产生许多微小的气泡,加剧了磁性磨粒群的变形和翻滚,

对工件表面的冲击力加大,研磨量明显增加。

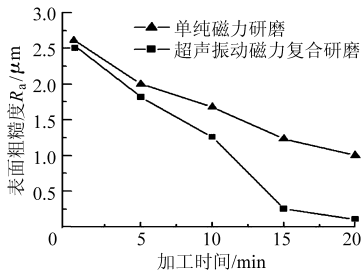


图 4 表面粗糙度与时间的关系曲线

Fig.4 Workpiece surface roughness vs time

2.2 工件表面粗糙度及表面形貌变化

加工后使用表面粗糙度仪测取表面粗糙度随加工时间的变化如图 4 所示。加工时间前 10 min,单纯磁力研磨与超声波振动辅助磁力研磨加工后的工件表面粗糙度变化相差不大,这是因为磁力研磨工艺中,存在尖点效应,即表面突起的地方优先被加工,故材料去除率均较高。但后续的加工中,因工件表面原始加工纹理波峰的顶部已在前 10 min 内被去除,剩余待加工的波峰底部宽,需被去除的材料多,所以单纯磁力研磨加工后工件表面粗糙度的变化率开始变得缓慢,而超声波振动辅助磁力研磨加工过程中,因超声振动的引入,研磨力和材料因磨粒高频冲击挤压产生的变形都要大于单纯磁力研磨

过程,且随着波峰顶部的减小,波峰角变大,磨粒对波峰材料产生的有效研磨压力和接触面积增大,导致加工时间为 20 min 时的加工效果要远远好于单纯磁力研磨。

由图 4 可知,在相同加工时间(20 min)条件下,有超声振动辅助时,工件表面粗糙度由 R_a 2.62 μm 下降到 R_a 0.14 μm , ΔR_a 为 2.48 μm ,而相同时间内单纯磁力研磨后的表面粗糙度由 R_a 2.62 μm 下降到 R_a 0.98 μm , ΔR_a 为 1.64 μm 。由此可以证明超声波振动辅助磁力研磨的加工效率要高于单纯磁力研磨;研磨效果也明显好于单纯磁力研磨。

电子显微镜观察到工件表面的加工纹理如图 5 所示。磁力研磨加工前,工件原始表面是由铣削加工得到的,表面存在规律性的波峰波谷。经单纯磁力研磨加工后,表面呈现连续性的旋转加工纹理。该纹理是磁性研磨粒子在磁场力和磁极旋转运动作用下,在工件表面划擦、刻划和挤压形成的。

当引入超声波振动时,磁性研磨粒子在划擦工件表面的同时,高频振动冲击工件的表面,该过程类似于机械喷丸。因为磨粒质量和直径都很小,所以磁性研磨粒子在工件表面产生的压痕很小,在 500 倍显微镜下可观察到工件表面产生均匀的微小凹坑,如图 5c 所示。

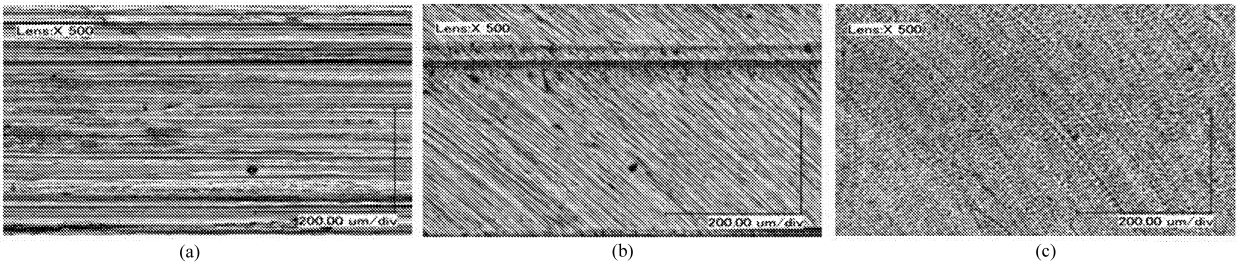


图 5 工件表面的加工纹理形貌

Fig.5 Texture of workpiece surface

(a) 工件原始铣削表面 (b) 磁力研磨 20 min (c) 超声振动磁力研磨 20 min

2.3 工件表层应力分析

为了解析超声振动辅助磁力研磨对工件表面应力状态的影响,在上述实验样件上用 X 射线干涉仪,分别对铣削后的工件表面,以及加工条件相同条件下采用超声振动辅助磁力研磨和单纯磁力研磨加工工件表面进行了残余应力测量。采用 $\sin^2\psi$ 法^[16]测得 2θ 对 $\sin^2\psi$ 的斜率如图 6 所示,根据式(7)计算得到残余应力的测量结果如表 2 所示。

$$\sigma_{\text{total}} = -\frac{E}{2(1+\nu)}\cot\theta_0 \frac{\pi}{180} \frac{\partial(2\theta)}{\partial(\sin^2\varphi)} \quad (7)$$

式中 E ——材料弹性模量 ν ——材料泊松比

由表 2 可知,工件经铣削后,表面的应力状态为残余拉应力,其值为 +320 MPa。磁力研磨属于微屑

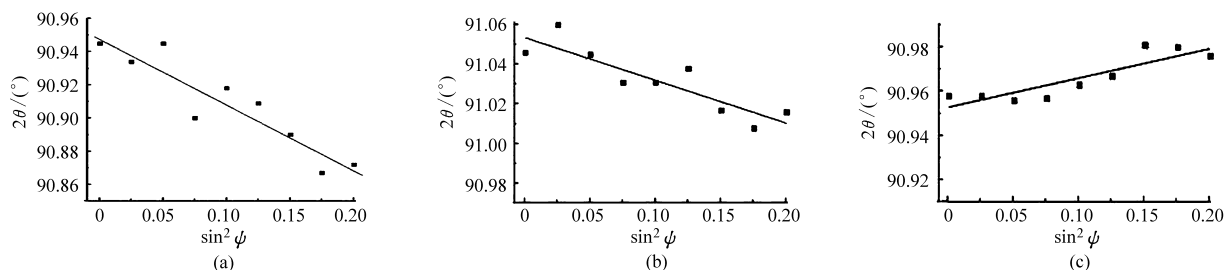
表 2 工件表层材料的应力状况

Tab.2 Stress conditions of workpiece surface material

状态	残余应力/MPa
铣削后原始表面	+320
单纯磁力研磨	+80
复合磁力研磨	-40

加工,本身在加工过程中的切削力相对很小,经磁力研磨加工后,工件表面的原始铣削纹理大部分已被去除,工件表面的粗糙度得到了很大的改善;经磁力研磨加工后,工件表面的应力状态有了明显的变化,残余拉应力已降至 +80 MPa。

由于超声波振动的引入,使磁性研磨粒子冲击挤压工件的表面,造成表层金属发生多次微小塑变

图 6 工件表层的衍射角 2θ 对 $\sin^2 \psi$ 的直线Fig. 6 Diffraction angle 2θ vs $\sin^2 \psi$

(a) 工件原始铣削表面 (b) 磁力研磨 20 min (c) 超声振动磁力研磨 20 min

并累计叠加,最终产生微小的喷丸强化层。经检测得知,超声振动辅助磁力研磨加工后的工件表面应力状态,已由铣削后的残余拉应力变为残余压应力 -40 MPa。虽然经超声振动辅助磁力研磨后产生的压应力很小,但是对于提高工件的疲劳寿命还是很有益的。

3 结论

(1) 根据材料去除率模型分析得知,在单纯磁力研磨的主要影响因素磁场强度和磁性磨料已发挥到最佳指标的基础上,可以通过增大研磨压力的手段来实现提高磁力研磨的加工效率。采用在单纯磁力研磨工艺中引入超声波振动,可以使磁性磨粒在

受到磁场力作用的同时,对工件表面产生脉冲压力,以提高研磨效率。

(2) 在超声振动磁力复合加工时,磁性磨粒的运动状态由单纯磁力研磨的简单水平旋转运动,变为水平旋转运动和垂直冲击挤压运动的合成。磁性研磨粒子的合成运动对工件原始表面波峰波谷的材料去除更均匀、更快速,与单纯磁力研磨加工进行比较,加工后的工件表面形貌更加细密、均匀。

(3) 由于超声波振动的引入,磁性研磨粒子会产生微小的喷丸强化作用,使工件表层材料的切削加工应力减小或消失并引入微小的压应力,可以大幅度提高工件的疲劳寿命。

参 考 文 献

- Liu Z Q, Chen Y, Li Y J, et al. Comprehensive performance evaluation of the magnetic abrasive particles [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013.
- 王艳, 胡德金. 不锈钢物流管道内表面磁力研磨的回转磁场设计[J]. 机械工程学报, 2005, 41(2): 45 ~ 48.
Wang Yan, Hu Dejin. Design of rotating magnetic field about internal finishing of stainless steeltube [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41(2): 45 ~ 48. (in Chinese)
- Yamaguchi H, Shinmura T, Sekine M. Uniform internal finishing of SUS304 stainless steel bent tube using a magnetic abrasive finishing process[J]. ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2005, 127(3): 605 ~ 611.
- Chang G W, Yan B H, Hsu R T. Study on cylindrical magnetic abrasive finishing using unbonded magnetic abrasives[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2002, 42(5): 575 ~ 583.
- 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 ~ 2): 122 ~ 130.
- Fox M, Agrawal K, Shinmura T, et al. Magnetic abrasive finishing of rollers[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 1994, 43(1): 181 ~ 184.
- 肖作义, 赵玉刚, 吴文权. 基于反求工程和磁粒研磨的模具精加工技术[J]. 农业机械学报, 2005, 36(1): 108 ~ 110.
Xiao Zuoyi, Zhao Yugang, Wu Wenquan. Finishing machining technology of mould and die based on the magnetic abrasive finishing and reverse engineering[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(1): 108 ~ 110. (in Chinese)
- 刘仁鑫, 杨卫平, 吴勇波. 硅片边缘超声振动辅助化学机械抛光实验[J]. 农业机械学报, 2010, 41(2): 221 ~ 226.
Liu Renxin, Yang Weiping, Wu Yongbo. Experiment on silicon wafer edge hybrid polishing of ultrasonic vibration and chemical mechanical[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(2): 221 ~ 226. (in Chinese)
- Yan B H, Chang G W, Cheng T J, et al. Electrolytic magnetic abrasive finishing[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2003, 43(13): 1355 ~ 1366.
- El-Taweel T A. Modelling and analysis of hybrid electrochemical turning-magnetic abrasive finishing of 6061 Al/ Al_2O_3 composite [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2008, 37(7 ~ 8): 705 ~ 714.
- Chang G W, Yan B H, Hsu R T. Study on cylindrical magnetic abrasive finishing using unbonded magnetic abrasives[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2002, 42(5): 575 ~ 583.

(下转第 293 页)

- Guo Jianying, Sun Yongquan, Wang Mingyi, et al. System reliability synthesis of wind turbine based on computer simulation[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012,48(2):2~8. (in Chinese)
- 30 于海生,张建武,张彤,等. 电磁功率分流混合动力汽车传动控制模式研究[J]. 农业机械学报,2012,43(6):1~7.
Yu Haisheng, Zhang Jianwu, Zhang Tong, et al. Transmission control mode of electromagnetic power-split hybrid electric vehicle [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012,43(6):1~7. (in Chinese)
- 31 田红亮,赵春华,方子帆,等. 基于各向异性分形理论的结合面切向刚度改进模型[J]. 农业机械学报,2013,44(3):257~266.
Tian Hongliang, Zhao Chunhua, Fang Zifan, et al. Improved model of tangential stiffness for joint interface using anisotropic fractal theory[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013,44(3):257~266. (in Chinese)
- 32 田红亮,朱大林,方子帆,等. 赫兹接触 129 年[J]. 三峡大学学报:自然科学版,2011,33(6):61~71.
Tian Hongliang, Zhu Dalin, Fang Zifan, et al. 129 years of Hertz contact[J]. Journal of China Three Gorges University: Natural Sciences, 2011,33(6):61~71. (in Chinese)
- 33 田红亮,朱大林,秦红玲,等. 结合部法向载荷解析解修正与定量实验验证[J]. 农业机械学报,2011,42(9):213~218.
Tian Hongliang, Zhu Dalin, Qin Hongling, et al. Modification of normal load's analytic solutions for joint interface and quantitative experimental verification[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011,42(9):213~218. (in Chinese)
- 34 曹衍龙,徐朋,金鹭,等. 基于图形处理器的三维表面质量快速评定技术[J]. 农业机械学报,2012,43(3):219~222,229.
Cao Yanlong, Xu Peng, Jin Lu, et al. 3-D surface quality evaluation based on graphics processing unit[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012,43(3):219~222,229. (in Chinese)
- 35 方子帆,贺青松,向兵飞,等. 低张力缆索有限元模型及其应用[J]. 工程力学,2013,30(3):445~450.
Fang Zifan, He Qingsong, Xiang Bingfei, et al. Research and applications of FE model on cables in low-tension[J]. Engineering Mechanics, 2013,30(3):445~450. (in Chinese)
-

(上接第 281 页)

- 11 李小彭,王伟,赵米鹤,等. 考虑摩擦因素影响的结合面切向接触阻尼分形预估模型及其仿真[J]. 机械工程学报,2012,48(23):46~50.
Li Xiaopeng, Wang Wei, Zhao Mique, et al. Fractal prediction model for tangential contact damping of joint surface considering friction factors and its simulation[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(23): 46~50. (in Chinese)
- 12 Wang S, Komvopoulos K. A fractal theory of the interfacial temperature distribution in the slow sliding regime: part I—elastic contact and heat transfer analysis[J]. ASME Journal of Tribology, 1994, 116(4): 812~822.
- 13 Wang S, Komvopoulos K. A fractal theory of the interfacial temperature distribution in the slow sliding regime: part II—multiple domains, elastoplastic contacts and applications[J]. ASME Journal of Tribology, 1994, 116(4): 824~832.
- 14 葛世荣,朱华. 摩擦学的分形[M]. 北京:机械工业出版社,2005.
- 15 朱育权,马保吉,姜凌彦. 粗糙表面接触的弹性、弹塑性、塑性分形模型[J]. 西安工业学院学报,2001,21(2):150~157.
Zhu Yuquan, Ma Baoji, Jiang Lingyan. The elastic elastoplastic and plastic fractal contact models for rough surface[J]. Journal of Xi'an Institute of Technology, 2001, 21(2): 150~157. (in Chinese)
- 16 Johnson K L. Contact mechanics[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1985.
- 17 黄康,赵韩,陈奇. 两圆柱体表面接触承载能力的分形模型研究[J]. 摩擦学学报,2008,28(6):529~533.
Huang Kang, Zhao Han, Chen Qi. Research of fractal contact model on contact carrying capacity of two cylinders' surface[J]. Tribology, 2008, 28(6): 529~533. (in Chinese)
-

(上接第 298 页)

- 12 Chen Y, Zhang M M, Liu Z Q. Study on sintering process of magnetic abrasive particles[J]. Advanced Materials Research, 2011,337:163~167.
- 13 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. (in Chinese)
- 14 Shinmura T. Magnetic abrasive finishing of rollers[J]. Annals of CIRP,1994,43(1):181~184.
- 15 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. (in Chinese)
- 16 Ferreira N G, Abramof E, Corat E J, et al. Residual stresses and crystalline quality of heavily boron-doped diamond films analysed by micro-Raman spectroscopy and X-ray diffraction[J]. Carbon, 2003, 41(6): 1301~1308.