

# 基于砂轮径向振动主动控制的 ELID 内圆磨削

李秦峰<sup>1</sup> 任成祖<sup>2</sup> 张 斌<sup>1</sup> 李德成<sup>1</sup> 陈晓峰<sup>1</sup>

1. 首都航天机械公司, 北京, 100076      2. 天津大学, 天津, 300072

**摘要:**在线电解修整(ELID)磨削过程中砂轮表面会生成一层具有一定厚度的氧化膜,其刚度远小于工件及砂轮结合剂的刚度,可以有效衰减磨削过程中的振动。将 ELID 技术应用到无心内圆磨削中,通过调节电解参数来改变氧化膜的状态,进而对砂轮径向振动进行控制。通过试验研究了电解参数的改变对砂轮径向振动的影响规律,并基于此规律设计了控制器,对磨削过程中的砂轮径向振动进行了主动控制磨削试验。试验结果表明,该控制器可以将磨削过程中的砂轮径向振动控制在设定值附近,维持 ELID 磨削的稳定。在实际的 ELID 内圆磨削中,可以先将砂轮径向振动控制在较高值,以实现较大的材料去除率;一段时间后再将砂轮径向振动控制在较低值,以提高工件表面质量。

**关键词:**在线电解修整(ELID);内圆磨削;砂轮径向振动;主动控制

**中图分类号:** TG662; TG580. 613

**DOI:** 10. 3969/j. issn. 1004 - 132X. 2015. 09. 009

## Internal ELID Grinding Based on Active Control of Wheel Radial Chatter

Li Qinfeng<sup>1</sup> Ren Chengzu<sup>2</sup> Zhang Bin<sup>1</sup> Li Decheng<sup>1</sup> Chen Xiaofeng<sup>1</sup>

1. Capital Aerospace Machinery Company, Beijing, 100076

2. Tianjin University, Tianjin, 300072

**Abstract:** The stiffness of oxide layer formed on wheel surface was much lower than that of work-piece and wheel bond in ELID grinding, so that the oxide layer can absorb and damp the wheel radial chatter. In order to avoid negative effects of the chatter on grinding efficiency and quality, the ELID was applied in centerless internal grinding. The wheel radial chatter was controlled by adjusting electrical parameters, and the law of this control was studied by experiments. Based on the above analyses, a series of fuzzy controllers were designed to stabilize the chatter within a certain range in ELID internal ceterless grinding. The grinding performance was studied under the active control experiments used different chatter set-points. The results show that, comparison with the ELID grinding without control, good surface quality and low material removal rate can be obtained with smaller chatter set-point; poor surface quality and high material removal rate can be obtained with larger chatter set-point.

**Key words:** electrolytic in-process dressing(ELID); internal grinding; wheel radial chatter; active control

## 0 引言

内圆磨削工序在整个制造业中占有较大的比重,但它存在磨削线速度低、磨削力大且不易散热、砂轮轴刚度低等局限性<sup>[1]</sup>,因而很难直接获得精密的加工表面,终加工时仍然需要对重要表面进行研磨和抛光处理,这将增加设备投资且延长加工时间。因此,引入一种高效精密的内圆磨削方法显得尤为重要。

在线电解修整(electrolytic in-process dressing, ELID)磨削技术是一种精密的加工技术,具有高效稳定、磨削力较小等特点,广泛应用于现代加工领域<sup>[2-3]</sup>,并且被成功应用到内圆磨削加工中<sup>[3-4]</sup>。ELID 磨削能够实现较高表面质量的关键在于砂轮表面形成的氧化膜,这层低刚度且富有弹性的氧化膜将超细磨料颗粒包裹其中,以一种研磨与抛光相结合的复合方式进行材料去除。

磨削过程中理想的氧化膜状态应该是既能使磨粒始终保持一定的出刃高度进行材料去除,同时又能够在一定程度上对磨削过程中的振动干扰进行衰减<sup>[5-8]</sup>。Lim 等<sup>[9]</sup>通过改变峰值电流、电压等对氧化膜进行控制。Yang 等<sup>[6]</sup>通过对修整电流进行控制并使氧化膜维持在设定的状态,取得了较好的磨削效果。但上述研究都忽略了实际精密磨削过程中,砂轮在径向的振动是直接影响磨削质量和效率的关键因素<sup>[10-11]</sup>,需要对其进行一定的控制。因此,本文充分研究了砂轮径向振动的控制规律,并据此规律设计了砂轮径向振动的控制器,采用此控制器进行了基于砂轮径向振动主动控制的 ELID 内圆磨削。

## 1 砂轮径向振动的控制规律

### 1.1 砂轮径向振动的控制方法

本文采用的砂轮是粒度为 W10 的铸铁基砂轮,ELID 磨削过程中砂轮表面形成的氧化膜厚

度为几十至一百微米<sup>[12-13]</sup>,其弹性模量约在30~50 GPa 之间,均远远小于砂轮机基材料的弹性模量<sup>[12]</sup>。当砂轮表面受到交变应力作用时,这层主要由金属氧化物、微细磨粒以及材料缺陷组成的氧化膜会产生强烈的内摩擦,从而消耗振动干扰能量。氧化膜整体较厚、致密性较高时,这种对砂轮径向振动能量的消耗作用就较强;当氧化膜厚度较小、致密性较差时,这种对振动能量的消耗作用就较弱<sup>[6-7]</sup>。因此可以通过调节氧化膜的状态来对砂轮径向振动进行控制。

ELID 磨削过程中氧化膜的状态直接由机械加工参数与电解参数决定,可以通过改变这些磨削参数来对氧化膜进行调整,进而控制砂轮径向振动。在实际的磨削过程中一般尽量避免改变直接决定磨削效率和质量的机械加工参数,同时在本文的试验中也不能直接改变电解参数,因为这样会改变磨削过程中电解电流的大小,而电解电流在本文中用来表征氧化膜状态<sup>[6,14]</sup>。这样就会出现不确定情况:电解电流的减小(增大)究竟是由于氧化膜变厚致密性变好(变薄变差)造成的,还是因为电解参数减小(增大)造成的。因此本文采用下述方法对电解参数进行调整。

利用 2 个脉冲卡生成 2 个脉冲信号,其中一个脉冲的占空比不变,其周期设为微秒级,此脉冲即为实际电解修整脉冲,本文称其为小脉冲;另一个脉冲信号的占空比可变,其周期设为毫秒级,此脉冲为电解电源的控制信号,本文称其为大脉冲。将两路脉冲进行叠加即产生控制脉冲,如图 1 所示。

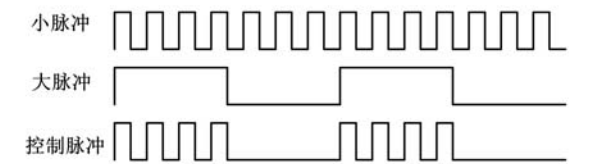


图 1 控制脉冲示意图

当控制信号的大脉冲为零时,此时无电解修整作用;当控制信号的大脉冲不为零时,电解电源输出波形的占空比与控制脉冲中的小脉冲一致,此时处于在线电解修整状态。增大大脉冲的占空比,则电解强度提高,导致氧化膜的厚度变厚、致密性变好,进而抑制振动的能力增强;减小大脉冲的占空比,则电解强度降低,导致氧化膜厚度变薄、致密性降低,进而抑制振动的能力减弱。在整个电解修整过程中,脉冲电源输出的电压幅值以及控制脉冲中的小脉冲是保持不变的,同时磨削过程中仅当大脉冲处于高电平时(电解作用开启

时)才进行电解电流的采集,从而保证了在调整电解参数(大脉冲占空比)时不直接改变电解电流,这样就解决了上述不确定性问题。因此,在实际 ELID 磨削过程中,可以通过调整大脉冲占空比来控制砂轮的径向振动。

1.2 砂轮径向振动控制规律的研究

在 ELID 磨削过程中可以通过改变大脉冲占空比来对砂轮径向振动进行控制,因此,有必要研究调节大脉冲占空比对磨削过程中砂轮径向振动的影响规律。但是,不同状态(电解电流)下的氧化膜由于其阻尼、厚度等不同,导致相同的脉冲调节量也可能对砂轮径向振动产生不同的影响,因此,本文为了获得不同氧化膜状态下对砂轮径向振动的主动控制策略,进行以下试验研究。

本试验建立在数控改造后进给精度为 1 $\mu$ m 的磨床上,系统原理如图 2 所示。连接 ELID 脉冲电源正极的铸铁基 CBN 砂轮安装在机床的水平轴上。工件由电磁无心夹具吸紧,依靠端面支撑及两个径向的绝缘支撑定位,其中工件通过端面支撑与脉冲电源的负极相连。磨削过程中的振动信号由固定在绝缘支撑上的振动传感器拾取,输出范围为 $\pm 5$ V 的电压信号,修整电流由霍尔电流传感器测量得到。上述两个实时信号均通过采集卡采集并实时地在工控机中显示和记录。详细试验设备及试验条件见表 1。

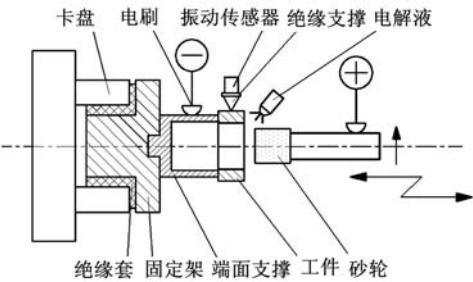


图 2 试验系统原理图

表 1 试验设备及试验条件

磨床	3MZ1410 自动轴承外圈沟磨床
砂轮	W10 铸铁基 CBN 砂轮(外径 30 mm)
工件	轴承套圈(内径 40 mm)
砂轮主轴转速	30 000 r/min
工件转速	120 r/min
砂轮轴向进给速度	100 mm/min
磨削深度	2 $\mu$ m
电源	TJCP-Ⅱ型高频直流脉冲电源
磨削液	TJMX-V 型 ELID 磨削液
电解电压	60 V
测量仪器	Taylor Hobson 轮廓仪 Lance-LC0108 振动传感器 LA-28 霍尔电流传感器

根据氧化膜的主动控制法<sup>[6]</sup>将 ELID 磨削过程中的氧化膜状态(电解电流)分别维持在 0.2 A、0.4 A、0.6 A、0.8 A、1.0 A、1.2 A 以及 1.4 A 附近,待其稳定在设定值后停止主动控制器,对大脉冲占空比分别进行调节量为 10%、8%、6%、4%、2%、-2%、-4%、-6%、-8%、-10% 的调节,并记录调节后的振动信号峰峰值 A。为了保证试验精度,相同的占空比调节量试验重复三次,取平均值,并且每一次占空比调节试验后都必须启动控制器使氧化膜重新达到设定状态(电解电流)才能进行下次试验。

图 3 所示为不同氧化膜状态(电解电流)下,对大脉冲占空比进行不同调节量所得到的砂轮径向振动峰峰值 A。由试验结果可以看出,不论氧化膜处于哪种状态,砂轮径向振动总体上均随着占空比调节量的减小而不断增大,并且,氧化膜越薄、致密性越差(电解电流越大)时,振动的增大趋势越来越大。上述规律意味着:ELID 磨削是一个氧化膜生成与损耗的动态平衡过程,当氧化膜处于较薄、致密性较差的状态(电解电流较大)时,改变大脉冲占空比很可能会在较大程度上打破这个动态平衡,从而造成磨削过程中的振动产生较大幅度的改变;当氧化膜处于较厚、致密性较好的状态(电解电流较小时),改变大脉冲占空比是会不会对振动产生太大的影响的。

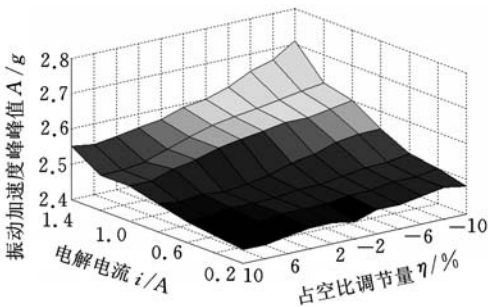


图 3 不同占空比调节量下的砂轮径向振动信号峰峰值(不同氧化膜状态)

### 1.3 砂轮径向振动的主动控制策略

ELID 磨削过程中氧化膜的阻尼以及砂轮径向振动均是复杂的、非线性的控制对象,很难通过精确的数学模型进行建模。因此,本文根据前文试验得到的不同氧化膜状态(电解电流)下砂轮径向振动随占空比变化的规律,采用模糊控制算法设计出相应的控制器,其输入参数包括砂轮径向振动峰峰值的设定值与实际值的误差  $e$  以及误差的变化率  $ec$ ,输出参数为大脉冲占空比的调节量。因此,在磨削过程中需要根据氧化膜所处的状态(电解电流),实时选择对应不同控制规律的

控制器。图 4 所示为砂轮径向振动的主动控制策略原理。同时,为了加快控制器的响应时间,根据误差  $e$  和误差变化率  $ec$  的大小实时调整控制器输出整定参数  $K$ , $e$  和  $ec$  均不断增大时模糊控制器采用一个较大的  $K$  值使得误差尽快减小,反之则减小  $K$  值使磨削过程处于稳定状态。

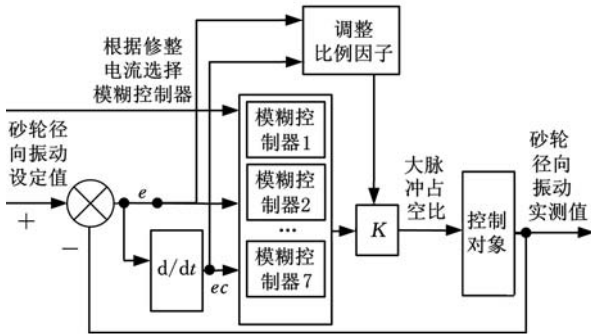


图 4 主动控制策略原理图

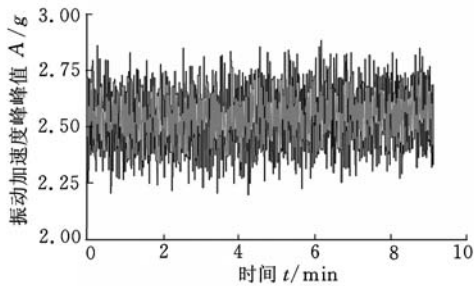
## 2 砂轮径向振动的主动控制试验

为了验证主动控制方案的可行性,本文在无心中圆磨床上进行了有主动控制与无主动控制的 ELID 内圆磨削试验。试验系统如图 2 所示,详细试验设备和条件如表 1 所示。本试验进行了无主动控制和两种有主动控制的 ELID 内圆磨削,并且有主动控制的 ELID 内圆磨削的砂轮径向振动峰峰值 A 分别设为 2.6 g 和 2.4 g。上述三组 ELID 磨削均持续 10 min。

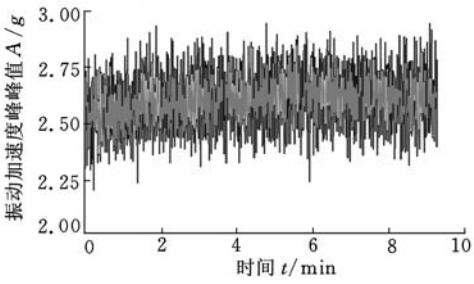
图 5 所示分别为无主动控制以及两种有主动控制下砂轮径向振动峰峰值 A 的变化曲线,可以看出,无主动控制下砂轮径向振动略微有所增大但不明显,总体稳定在一定的范围内;而在有主动控制下设定值为 2.6 g 的 ELID 磨削中,砂轮径向振动在刚开始磨削的 2 min 内有所增大,随后稳定在设定值附近;有主动控制下设定值为 2.4 g 的 ELID 磨削中,砂轮径向振动逐渐减小并最终稳定在设定值附近。表 2 显示了三种不同磨削方式下得到的粗糙度、波纹度以及材料去除量,可以看出,试验 1 和试验 3 的粗糙度接近且均优于试验 2;试验 3 的波纹度最小,试验 2 的波纹度最大;试验 2 的材料去除量最大,试验 3 的材料去除量最小。

在 ELID 磨削过程中通过对砂轮径向振动进行主动控制将其维持在设定值附近,可以保证磨削的稳定进行。当砂轮径向振动设定值较高时,氧化膜较薄、阻尼较小,此时砂轮的主要材料去除方式是以超硬磨料的微量磨削进行的,因此最终得到较差的表面质量和较高的材料去除率;当砂轮径向振动设定值较低时,氧化膜较厚、阻尼较

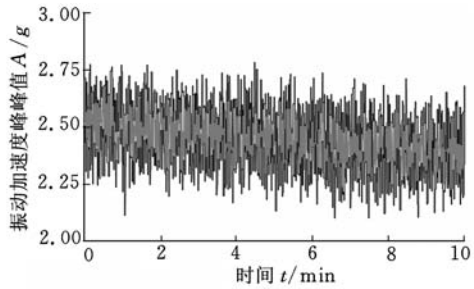




(a) 无主动控制下



(b) 设定值为 2.6 g 的主动控制下



(c) 设定值为 2.4 g 的主动控制下

图 5 不同控制方式下的振动信号峰峰值

表 2 不同控制下的试验结果

试验 编号	砂轮径向振动 设定值(g)	粗糙度 Ra(μm)	波纹度 Wa(μm)	材料去除量 (μm)
1	无	0.0382	0.0510	4
2	2.6	0.0425	0.0667	8
3	2.4	0.0398	0.0416	3

大,参与磨削的磨粒大部分甚至完全处于氧化膜的包裹之中,此时 ELID 磨削的材料去除主要是以微细超硬的磨粒对工件表面研磨抛光的方式进行的,从而获得较高的表面质量和较低的材料去除率。因此,在实际的 ELID 磨削过程中可以先将砂轮径向振动维持在较高值,实现较大的材料去除率,以消除上道工序中的加工痕迹和变质层,再将砂轮径向振动维持在较低值,以提高工件的表面质量。

3 结论

(1)砂轮径向振动可以通过调节氧化膜状态来进行控制。

(2)在相同的氧化膜状态下,增加大脉冲的占空比可以减小磨削过程中的砂轮径向振动;在相同的大脉冲占空比调节量下,氧化膜越薄致密性越差

(电解电流越大),则砂轮径向振动的改变量越大。

(3)可以根据磨削过程的实际需要,将砂轮径向振动维持在不同的设定值附近,设定值较高时可以实现较大的材料去除率,设定值较低时可以提高加工表面质量。

参考文献:

[1] 夏新涛,马伟.滚动轴承制造工艺学[M].北京:机械工业出版社,2007.

[2] Ohmori H,Nakagawa T. Mirror Surface Grinding of Silicon Wafers with Electrolytic In-process Dressing [J]. Annals of the CIRP,1990,39(1):329-332.

[3] Qian Jun, Li Wei, Ohmori H. Precision Internal Grinding with a Metal-bonded Diamond Grinding Wheel[J]. Journal of Materials Processing Technology,2000,105(1/2):80-86.

[4] 杨黎健,任成祖,靳新民.轴承套圈内圆 ELID 磨削试验[J].中国机械工程,2011,22(2):212-214.

Yang Lijian,Ren Chengzu,Jin Xinmin. Internal Cylindrical ELID Grinding Experiment of Bearing Rings[J]. China Mechanical Engineering,2011,22(2):212-214.

[5] 关佳亮,郭东明,袁哲俊. ELID 镜面磨削中砂轮生成氧化膜特性及其作用的研究[J]. 机械工程学报,2000,36(5):89-92.

Guan Jialiang, Guo Dongming, Yuan Zhejun. Research on the Characteristics and Roles of Oxide Film on Grinding Wheel of ELID Mirror Surface Grinding[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering,2000,36(5):89-92.

[6] Yang Lijian,Ren Chengzu,Jin Xinmin. Experimental Study of ELID Grinding Based on the Active Control of Oxide Layer[J]. Journal of Materials Processing Technology,2010,210:1748-1753.

[7] 李秦峰,任成祖,张开飞.磨削参数对 ELID 内圆磨削轴承外圈的影响[J].中国机械工程,2013,24(9):1177-1180.

Li Qinfeng,Ren Chengzu,Zhang Kaifei. The Effect of Grinding Parameters on Internal ELID Grinding of Bearing Rings[J]. China Mechanical Engineering,2013,24(9):1177-1180.

[8] Zhang C,Ohmori H,Marinescu I,et al. Grinding of Ceramic Coatings with Cast Iron Bond Diamond Wheels[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology,2001,18(8):545-552.

[9] Lim H S,Fathima K, Kumar A S,et al. Rahman, A Fundamental Study on the Mechanism of Electrolytic In-process Dressing(ELID) Grinding[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture,2002,42:935-943.

# 飞机空气导管泄漏特性的试验研究及数值模拟

王合旭 蒋彦龙 施 红 韩建军  
南京航空航天大学,南京,210016

**摘要:**在研究国内外现有空气导管泄漏探测系统的基础上,搭建了管道泄漏探测试验台,并结合 FLUENT 三维泄漏流场的数值模拟,研究了不同导流洞大小、绝热层厚度及泄漏位置情况对泄漏探测性能的影响。试验结果与 FLUENT 计算结果表明:绝热层导流洞孔径及绝热层厚度的增大均能一定程度地增强感温线捕捉泄漏信号的效果;泄漏位置也会影响探测性能。给出了小孔泄漏流量的计算方法。研究结论可为国内飞机空气导管的相关研究工作提供参考。

**关键词:**高温压力管道;泄漏探测;试验;数值模拟

**中图分类号:**V211.3                      **DOI:**10.3969/j.issn.1004-132X.2015.09.010

## Experiment and Numerical Simulation on Leakage Characteristics of Aircraft Duct

Wang Hexu Jiang Yanlong Shi Hong Han Jianjun

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,Nanjing,210016

**Abstract:**Based on the study of the duct overheat detector of commercial and domestic aircraft in existing combined with the three-dimension flow field simulation of the leakage by FLUENT,the overheat detection experimental platform was built,the influences of the deflector size,thickness of the insulation and the leakage position on the detection performance were investigated by experiments. By analyzing the test results and FLUENT results,it is found that,the increasing of the deflector size and the insulation thickness will both increase the ability to capture leaking signals;the leakage position will affect the detection performance too,at the same time,the computing method of flow rate of eye-let leak is deriveed. The conclusion can provide technical reference for the related work upon ducts of domestic aircraft.

**Key words:**high-temperature pressure piping;leakage detection;experiment;numerical simulation

0 引言  
空气管理系统是飞机的重要机载系统之一,

它主要包括引气、座舱压力调节、座舱温度调节、防冰以及为满足地面环境控制要求而设计的辅助动力装置等子系统,各子系统之间通过空气导管

收稿日期:2013-12-01

[10] Albizuria J,Fernandes M H,Garitaonandia I,et al. An Active System of Reduction of Vibrations in a Centerless Grinding Machine Using Piezoelectric Actuators[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture,2007,47:1607-1614.

[11] Inasaki I,Karpuschewski B,Lee H S. Grinding Chatter -Origin and Suppression[J]. CIRP Annals—Manufacturing Technology,2001,50(2):515-534.

[12] 邹吉才,张飞虎. ELID 磨削砂轮表面氧化膜力学性能[J]. 纳米技术与精密工程,2010,8(5):447-451.

Kuai Jicai,Zhang Feihu. Mechanical Properties of Oxide Film on ELID Grinding Wheel Surface[J]. Nanotechnology and Precision Engineering,2010,8(5):447-451.

[13] Fathima K,Rahman M,Senthil Kumar A,et al. Modeling of Ultra-precision ELID Grinding[J].

Journal of Manufacturing Science and Engineering,2007,129:296-302.

[14] 杨黎健,任成祖,靳新民. ELID 磨削砂轮表面氧化膜状态的表征[J]. 工具技术,2011(6):40-43.

Yang Lijian,Ren Chengzu,Jin Xinmin. State Characterizing of Oxide Layer on Surface of ELID Grinding Wheel[J]. Tool Engineering,2011(6):40-43.

(编辑 苏卫国)

**作者简介:**李秦峰,男,1987 年生。首都航天机械公司总装事业部工程师。研究方向为精密制造与装配。任成祖,男,1962 年生。天津大学天津市先进制造技术与装备重点实验室教授、博士研究生导师。张 斌,男,1984 年生。首都航天机械公司总装事业部工程师。李德成,男,1973 年生。首都航天机械公司总装事业部高级工程师。陈晓峰,男,1977 年生。首都航天机械公司总装事业部高级工程师。