

# 手机屏幕磨料冲击加工声学系统设计

腾志君

(浙江正泰电器股份有限公司 零部件制造部, 浙江 温州 325603)

**摘要:** 针对手机屏幕形状复杂、加工精度要求高和材料脆性大等问题,采用磨料冲击加工方法对手机屏幕进行了加工制造;依据变幅杆设计原理对声学系统进行了理论分析,建立了声学系统数学模型,设计了圆锥形变幅杆和大尺寸矩形截面工具头,并利用HP4294A型阻抗分析仪测试了圆锥形变幅杆的阻抗特性和谐振频率,应用ANSYS有限元分析软件,对工具头和声学系统进行了结构动力学模态分析。研究表明,变幅杆的阻抗特性和谐振频率分别为 $54.36\ \Omega$ 和 $19.9\ \text{kHz}$ ,工具头和声学系统的谐振频率分别为 $19.858\ \text{kHz}$ 和 $20.185\ \text{kHz}$ ,所设计的手机屏幕磨料冲击加工声学系统能够满足设计和使用要求。

**关键词:** 手机屏幕; 磨料冲击加工; 变幅杆; 矩形截面工具头

**中图分类号:** TN929.53; TG663; TH16

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1001-4551(2012)12-1431-04

## Design of acoustical system of cellphone screen abrasive impacting machining

TENG Zhi-jun

(The Metalwork Division, Chint Electrics Co., Ltd., Wenzhou 325603, China)

**Abstract:** Aiming at a complicated shape, high processing accuracy and big brittle materials of cellphone screen, the abrasive impacting machining was used to solve the difficulty in machining cellphone screen. According to den principle of solid horn, acoustical system of machining apparatus was analyzed in theory and its mathematical model was established, the conical horn and tool with large dimension rectangular section were designed. The impedance characteristic and resonant frequency of the horn was tested with HP4294A impedance analyzer. Model analysis of the tool and acoustical system was made with ANSYS finite element analysis software. The results of analysis indicate that the impedance characteristic and resonant frequency of horn are  $54.36\ \Omega$  and  $19.9\ \text{kHz}$ , resonant frequencies of the tool and acoustical system are  $19.858\ \text{kHz}$  and  $20.185\ \text{kHz}$ , and acoustical system is satisfied with designing and operating requirement.

**Key words:** cellphone screen; abrasive impacting machining; conical horn; rectangular tool

## 0 引言

目前,智能手机外表面屏幕的材料一般是钢化玻璃或者是蓝宝石,二者都具有温度系数小、介电常数大、无滞后、高灵敏、高可靠、硬而透明等独特优点。钢化玻璃是在普通玻璃表面通过物理或化学方法形成压应力,来提高玻璃强度和抗压性;蓝宝石主要成分是氧化铝,属刚玉族矿物,莫氏硬度是9;二者都是硬脆材料。

由于手机屏幕形状复杂,几何尺寸精度要求高,同时硬脆材料具有高硬度和易断裂等特点,这使得手

机屏幕的加工更困难。现有对于手机屏幕的加工技术主要是激光切割技术、蚀刻法、磨料喷射法等。与金属材料不同,手机屏幕的加工直接受到加工方法的影响,以上几种加工技术都在不同程度上影响屏幕表面的完整性,容易产生裂痕,并造成断裂。

本研究针对手机屏幕难加工的特点,提出手机屏幕磨料冲击加工方法,并且对磨料冲击加工声学系统中的变幅杆和工具头进行分析和设计。

## 1 磨料冲击加工

磨料冲击加工技术具有一般切削加工技术所没有

的特点,能对硬质合金、石英、陶瓷、玻璃、金刚石、水晶和蓝宝石等硬脆材料进行加工。磨料冲击加工不仅可以大大提高加工速度,也可以获得很高的精度和很低的表面粗糙度,所以本研究采用磨料冲击加工方法加工手机屏幕。

磨料冲击加工是一种利用工具头端面做超声振动,通过磨料悬浮液加工工件材料的成形加工方法<sup>[1]</sup>。在加工过程中,超声波发生器产生高频电信号,换能器把电信号转换成机械振动,再经过变幅杆放大后传递到工具头的末端,磨料将在超声振动作用下,以很大的速度不断冲击打磨被加工工件表面,在被加工工件表面上形成很大的局部压强,当超过材料的强度极限时,材料将发生破坏,成为粉末被打下来。

## 2 变幅杆的设计

### 2.1 变截面杆的纵振动方程

本研究假设:

- ① 变截面杆由均匀、各向同性材料构成;
- ② 机械损耗小,可忽略不计;
- ③ 杆中通过的弹性波的波阵面为平面,即在杆中的横截面上的应力是均匀分布的;
- ④ 平面纵波沿杆轴向传播。

根据牛顿定律可写出变截面聚能器的动力学方程为<sup>[2-3]</sup>:

$$\frac{\partial (A\sigma)}{\partial x} dx = A\rho \frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial t^2} dx \quad (1)$$

式中:  $A$ —杆的横截面积函数,  $A=A(x)$ ;  $\varepsilon$ —质点位移函数,  $\varepsilon=\varepsilon(x)$ ;  $\sigma$ —应力函数,  $\sigma=\sigma(x)=E \cdot \partial \varepsilon / \partial x$ 。

在简谐振动的前提下,式(1)可写成:

$$\frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial x^2} + \frac{1}{A} \frac{\partial A}{\partial x} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} + K^2 \varepsilon = 0 \quad (2)$$

式中:  $K$ —圆波数,  $K=\omega/c$ ;  $c$ —纵波在杆中的传播速度,  $c=\sqrt{E/\rho}$ 。

### 2.2 圆锥形变幅杆

本研究以圆锥形变幅杆为例,如图1所示。

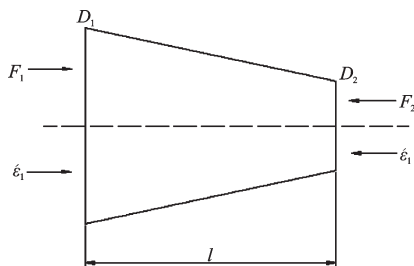


图1 圆锥形变幅杆

则式(2)的解为<sup>[4-5]</sup>:

$$\varepsilon = \frac{1}{x - \frac{1}{\alpha}} (a_1 \cos Kx + a_2 \sin Kx) \quad (3)$$

式中:  $\alpha=(D_1-D_2)/D_1 l$ 。

由边界条件  $\frac{\partial \varepsilon}{\partial x}|_{x=0} = \frac{\partial \varepsilon}{\partial x}|_{x=l} = 0$ , 可以得到频率方程:

$$\operatorname{tg}(Kl) = \frac{Kl}{1 - \left(\frac{K}{\alpha}\right)^2 (\alpha l - 1)} \quad (4)$$

圆锥形变幅杆的工作频率为20 kHz, 材料为45钢, 大端直径为50 mm, 小端直径为30 mm, 由式(4)可计算出共振长度  $l=132.5$  mm, 位移节点  $x_0=59.5$  mm, 放大倍数  $M_p=1.65$ 。

圆锥形变幅杆的三维模型如图2所示。

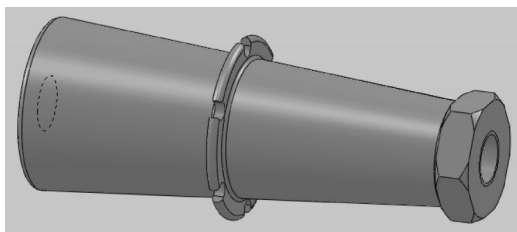


图2 圆锥形变幅杆三维模型

本研究将设计的变幅杆进行加工制造, 用螺栓连接换能器和变幅杆, 并利用美国安捷伦公司生产的HP4294A型阻抗分析仪(如图3所示)测量超声变幅杆的阻抗特性和谐振频率。变幅杆的阻抗特性和谐振频率的测量结果分别为54.36 Ω和19.9 kHz, 基本满足设计的要求。

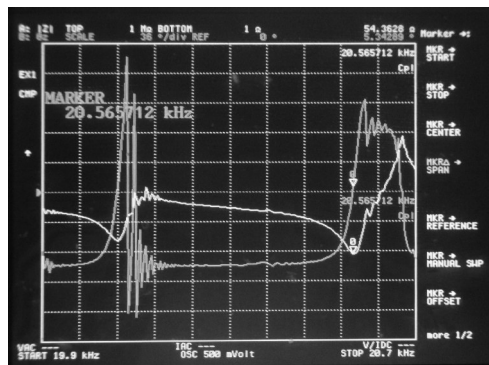


图3 HP4294A型阻抗分析仪

## 3 工具头的设计

在磨料冲击加工中, 工具头的形状和成品形状相反, 手机屏幕的截面形状近似矩形, 这就决定了工具头的横截面应该是矩形。本研究提出的磨料冲击加工方法中, 工具头除了有加工工件的作用外, 还有一个主要的作用就是放大振幅。根据变幅杆的设计原理, 笔者进行了大尺寸矩形截面工具头的设计。

### 3.1 横向振动分析

以往对大尺寸矩形截面变幅杆的分析都是在  $l \gg h, w \gg h$  的情况下, 即变幅杆的辐射面为一狭长矩形面下进行的<sup>[6-7]</sup>, 其中, 工具头的长度为  $l$ , 宽度为

$w$ , 厚度为  $h$ ; 忽略了厚度  $h$  方向的振动情况。令工具头的长度  $l$ 、宽度  $w$  和厚度  $h$  分别沿着三维直角坐标系的  $x$ 、 $y$  和  $z$  轴方向。

根据广义胡克定律, 物体内任意一点的应力  $\sigma$  与应变  $\varepsilon$  满足以下关系<sup>[8]</sup>:

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E} [\sigma_x - \mu(\sigma_y + \sigma_z)] \quad (5)$$

$$\varepsilon_y = \frac{1}{E} [\sigma_y - \mu(\sigma_x + \sigma_z)] \quad (6)$$

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E} [\sigma_z - \mu(\sigma_x + \sigma_y)] \quad (7)$$

式中:  $E$ ,  $\mu$ —材料的弹性模量和泊松比。

根据式(5~7)计算可得:

$$E_x = E \frac{\sigma_x}{\sigma_x - \mu(\sigma_y + \sigma_z)} \quad (8)$$

$$E_y = E \frac{\sigma_y}{\sigma_y - \mu(\sigma_x + \sigma_z)} \quad (9)$$

$$E_z = E \frac{\sigma_z}{\sigma_z - \mu(\sigma_x + \sigma_y)} \quad (10)$$

式中:  $E_x$ ,  $E_y$ ,  $E_z$ —耦合振动工具头在长度  $l$ 、宽度  $w$  和厚度  $h$  上的等效弹性模量。

由以上分析可知, 大尺寸矩形截面工具头的耦合振动是由3个相互垂直的分振动组成。

### 3.2 工具头优化设计及有限元分析

手机屏幕三维模型尺寸如图4所示。下面以图4为例来设计工具头。根据文献[5~6]给出的几种大尺寸矩形截面变幅杆的设计方法, 笔者设计了谐振频率为20 kHz的大尺寸矩形截面工具头。工具头的振动是由3个分振动相互耦合而成, 沿长度  $l$  方向的振动是纵向振动, 宽度  $w$ 、厚度  $h$  方向的振动是横向振动, 其横向振动必须被抑制。

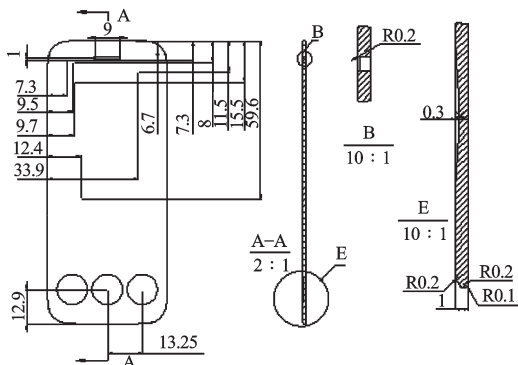


图4 手机屏幕三维模型

本研究采用了在工具头4个侧面进行开槽的方法来抑制横向振动, 并且采用ANSYS软件进行有限元分析<sup>[9~11]</sup>。工具头材料为Cr合金钢, 其弹性模量为  $E = 2.11 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$ 、泊松比为0.27、密度为  $\rho = 7.82 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 。工具头有限元模型如图5所示。

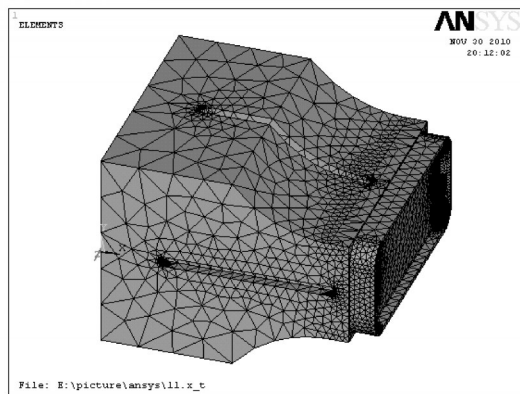


图5 工具头有限元模型

大尺寸矩形截面工具头有限元分析结果如图6所示。其谐振频率为19.858 kHz, 从图6中可以直观地看到其纵向振动效果很好, 横向振动得到了有效地抑制, 并且位移在工具头末端被放大, 达到了设计和使用要求。

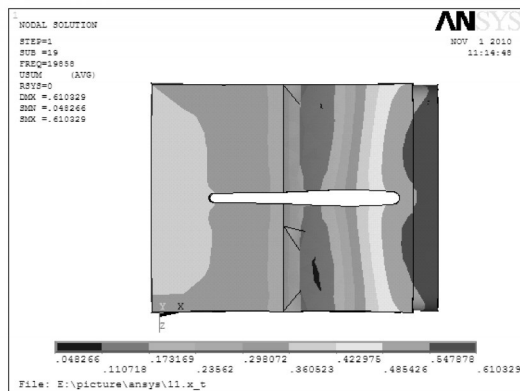


图6 工具头振型图

### 3.3 变幅杆-工具头有限元仿真

本研究将所设计的变幅杆-工具头进行有限元分析, 其结果如图7所示。由图7可以看出, 变幅杆和工具头在工作时的谐振频率为20.185 kHz, 底端振幅为60.396  $\mu\text{m}$ , 满足使用要求。

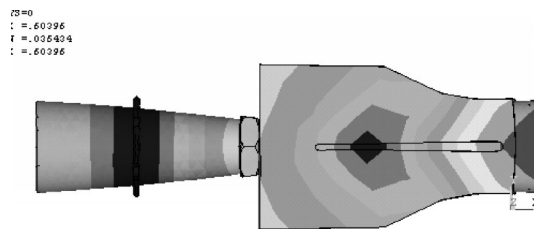


图7 变幅杆-工具头有限元仿真图

求解结构的各阶谐振频率如表1所示。

## 4 结束语

在分析、研究了手机屏幕磨料冲击加工声学系统的基础上, 根据变幅杆设计原理, 本研究设计了大尺寸矩形截面工具头, 并利用ANSYS有限元分析软件对声

表1 各阶谐振频率

| 阶数 | $f/\text{kHz}$ |
|----|----------------|
| 11 | 14.860         |
| 12 | 15.830         |
| 13 | 16.633         |
| 14 | 17.830         |
| 15 | 19.009         |
| 16 | 19.586         |
| 17 | 19.764         |
| 18 | 19.974         |
| 19 | 20.185         |
| 20 | 20.785         |

学系统进行了模态分析,其谐振频率为20.185 kHz,分析结果满足使用要求。

尺寸矩形截面工具头的振动由一个纵向振动和两个横向振动耦合而成,为了保证纵向振动的传递效果,必须对横向振动进行抑制,研究者可以采用在侧面开槽的方法来实现,工具头既加工工件,也放大振幅,使加工效果更好。

磨料冲击加工方法可以很好地解决硬脆材料难于加工的问题,特别是对手机屏幕的加工,不仅可以提高加工效率,而且可以较大程度地提高产品的成品率、加工精度,降低表面粗糙度,可以对现有技术起到一定的推进作用。

## 参考文献(References):

- [1] 曹凤国. 超声加工技术[M]. 北京:化学工业出版社, 2004.
- [2] 张云电. 超声加工及其应用[M]. 北京:国防工业出版社, 1995:78-81.
- [3] 张楠,侯晓林,闻邦椿. 超声加工振动系统波动方程的定解分析[J]. 东北大学学报:自然科学版, 2008, 29(6): 877-880.
- [4] 贺西平,高洁. 超声变幅杆设计方法研究[J]. 声学技术, 2006, 25(1): 82-85.
- [5] 张云电. 夹心式压电换能器及其应用[M]. 北京:科学出版社, 2006:133-203.
- [6] 林书玉,张成福. 大尺寸矩形截面符合变幅杆的研究[J]. 应用声学, 1992, 5(5): 34-38.
- [7] 高健,晨曦. 大尺寸矩形截面幂函数复合变幅杆的研究[J]. 声学技术, 2009, 28(6): 807-810.
- [8] 刘鸿文. 材料力学[M]. 2版. 北京:高等教育出版社, 2004.
- [9] 万德安. 超声变幅杆的模态分析[J]. 机械与电子, 2004(4): 10-11.
- [10] 胡小平,黄仕彪,张云电. 圆锥形变幅杆的设计及有限元分析[J]. 机电工程, 2005, 22(2): 32-36.
- [11] 高耀东. ANSYS机械工程应用精华30例[M]. 北京:电子工业出版社, 2010.

[编辑:张翔]

(上接第1426页)

## 4 结束语

为研究谐振式高频疲劳试验机的动态特性,本研究建立了振动系统的动力学模型,并通过仿真得到了试样刚度对系统固有频率及共振振幅的影响。对试验机进行的实验测试结果与仿真结果相吻合,证明了本研究动力学模型的建立和计算方法的正确性;通过调整输入参数,可以预测试验机在不同情况下的动态特性,为试验机性能的进一步优化和控制系统的设计奠定了基础。

## 参考文献(References):

- [1] 李跃光,姬战国. 国内高频疲劳试验机的技术现状及其发展[J]. 试验技术与试验机, 2006, 46(1): 1-4.
- [2] 任中全,郭世伟,何万库. 振动系统的时频域仿真分析研究[J]. 计算机仿真, 2002, 25(1): 25-28.
- [3] 赵又群,柴山,曲庆文. 非线性转子系统动态特性分析的模态—摄动方法[J]. 机械工程学报, 2002, 38(1): 39-41.
- [4] 蔡敢为,李兆军,朱天燕. 含对称叠层复合材料构件机构

非线性动态特性分析[J]. 中国机械工程, 2008, 19(19): 2371-2375.

- [5] 王生泽. 线性时变振动系统动力学方程的一类解法[J]. 中国纺织大学学报, 1998, 24(3): 67-73.
- [6] 高红俐. PLG-100型高频疲劳试验机使用说明书[K]. 天水:天水红山试验机厂, 1982.
- [7] 邢彤,阮健,朱发明,等. 1 000 Hz高频疲劳试验系统的实验与仿真研究[J]. 液压与气动, 2010(11): 31-33.
- [8] 孙磊,姬战国,尹廷林,等. 高频疲劳试验机振动系统动力学特性分析[J]. 工程与试验, 2010, 50(2): 13-15.
- [9] MAJCHERCZAK D, DUFRENOY P. Dynamic analysis of a disc brake under frictional and thermomechanical internal loading [J]. *Archive of Applied Mechanics*, 2006, 75(8-9): 497-512.
- [10] 侯国平,王坤,叶启金. LabVIEW7. 1编程与虚拟仪器技术[M]. 北京:清华大学出版社, 2005.
- [11] CLARK C L. LabVIEW7 Digital Signal Processing and Digital Communications Microelectronics Reliability [M]. Beijing: Education Press, 2008.

[编辑:李辉]