

文章编号: 1001- 2486(2007) 03- 0113- 05

# 微波铁氧体基片精密研抛技术研究\*

王贵林<sup>1</sup>, 张飞虎<sup>2</sup>

(1. 国防科技大学 机电工程与自动化学院, 湖南 长沙 410073;  
2. 哈尔滨工业大学 机械制造及自动化系, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要:** 针对微波铁氧体基片的功能要求和材料特性, 基于坐标变换法对平行式研磨、抛光加工区域的相对运动轨迹进行仿真研究, 为合理选择工艺参数提供理论依据; 通过正交化实验分析各种工艺参数对研磨效率的影响规律; 在此基础上, 采用优化组合的工艺参数进行微波铁氧体基片平行式研磨和抛光加工, 技术指标均达到或超过了使用要求。

**关键词:** 微波铁氧体; 基片; 正交化实验; 研磨; 抛光

中图分类号: TH161 文献标识码: A

## Study on Precision Lapping and Polishing Technology of Microwave Ferrite Substrates

WANG Gui lin<sup>1</sup>, ZHANG Fei hu<sup>2</sup>

(1. College of Mechatronics Engineering and Automation, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. Department of Mechanical Manufacturing and Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

**Abstract:** According to the functional requirement and material characteristic of microwave ferrite substrates, the simulation process of relative motion trace was studied in the parallel lapping and polishing area by using coordinate transformation method, and it provided the theoretic foundation for the reasonable selection of processing parameters. The influence rules of various parameters on lapping efficiency were studied with the orthogonalizing experimental method. On the basis of the above, the parallel lapping and polishing experiments of microwave ferrite substrates were completed by using the optimum combination of processing parameters, and the quality of these substrates satisfied or preponderated the requirements.

**Key words:** microwave ferrite; substrate; orthogonalizing experiments; lapping; polishing

微波铁氧体基片是人造卫星、雷达接收系统和微波通讯系统中不可缺少的小型化器件, 作为一种新型微波基片, 它可以使微波器件高度集成, 体积大大缩小, 性能大幅提高, 在未来军事和民用微波系统中具有十分重要的作用, 其质量好坏将直接影响器件性能<sup>[1-3]</sup>。微波基片精密制造技术在国外已被列入重点预研项目, 而国内还没有进行系统研究, 现有的加工工艺无法满足表面质量、面形精度和加工效率的要求。因此, 探索满足批量生产任务下微波铁氧体基片精密加工技术与工艺实施条件具有重要的现实意义。

### 1 微波铁氧体基片精密加工的工艺特征分析

微波铁氧体材料除具有微波传输的特性之外, 又呈现本身所特有的性能, 如硬度高、脆性强、气孔多、导热系数小, 属于典型的难加工材料。由于铁氧体基片越来越薄, 对加工技术的要求也越来越高, 直接采用国内外通用的陶瓷或半导体加工技术进行加工, 不但设备和环境投资巨大<sup>[4-5]</sup>, 而且铁氧体与陶瓷、半导体等材料在加工性能上存在较大差异。

应用单位对微波铁氧体基片的技术指标要求如下: 基片厚度为 0.5mm, 平面度  $\leq 15\mu\text{m}$ , 平行度  $\leq$

\* 收稿日期: 2006- 12- 15

基金项目: 中国博士后科学基金资助项目(2004035530)

作者简介: 王贵林(1974-), 男, 副教授, 博士后。

20 $\mu$ m, 表面粗糙度  $Ra \leq 0.1\mu$ m, 需要同时保证尺寸精度、平面度、上下表面的平行度和表面粗糙度等指标。由于受加工应力影响, 基片往往会发生翘曲, 一般直径越大、基片越薄, 翘曲程度也越大。据此, 选用平行式研磨来保证基片的厚度、面形精度和平行度要求, 同时去除前道磨削工序中产生的变质层; 选用平行抛光保证基片的表面粗糙度指标。

## 2 平行式研抛加工的相对运动轨迹分析

选用 X61 380B- 1(6B) 型平行式研抛机作为微波铁氧体基片的研磨、抛光设备, 机床外观如图 1 所示。通过上磨盘、下磨盘、太阳轮和内齿圈的组合搭配(如图 2 所示), 使基片表面与磨盘之间的相对速度、工作压力和运动轨迹合理分布。

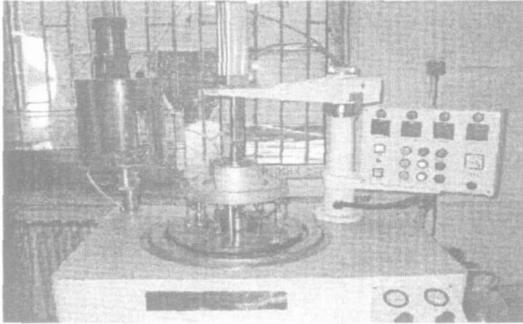


图 1 X61 380B- 1 研抛机外观

Fig. 1 Appearance of X61 380B- 1 model machine

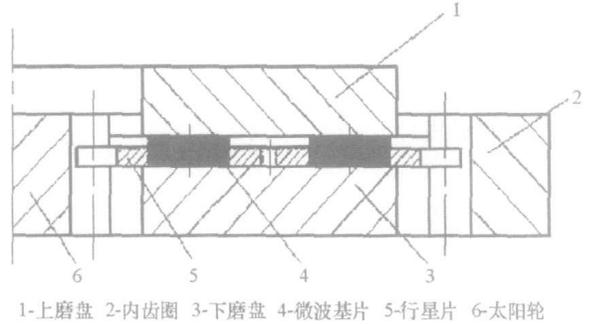


图 2 X61 380B- 1 研抛机加工区域结构

Fig. 2 Machine structure in machining area

图 3 显示了 X61 380B- 1 研抛机的运动过程,  $X_1O_1Y_1$  为固定坐标系, 太阳轮以角速度  $\omega_s$  绕  $O_1$  转动, 内齿圈以角速度  $\omega_3$  绕  $O_1$  转动;  $X_2O_2Y_2$  为与行星片固联的坐标系, 在以角速度  $\omega_H$  绕  $O_1$  公转的同时, 以角速度  $\omega_2$  绕  $O_2$  自转, 计算可知:

$$\begin{cases} \omega_H = \frac{Z_3\omega_3 + Z_S\omega_S}{Z_3 + Z_S} \\ \omega_2 = \frac{Z_3}{Z_2}(\omega_3 - \omega_H) \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $Z_S$  为太阳轮齿数,  $Z_2$  为行星片齿数,  $Z_3$  为内齿圈齿数。

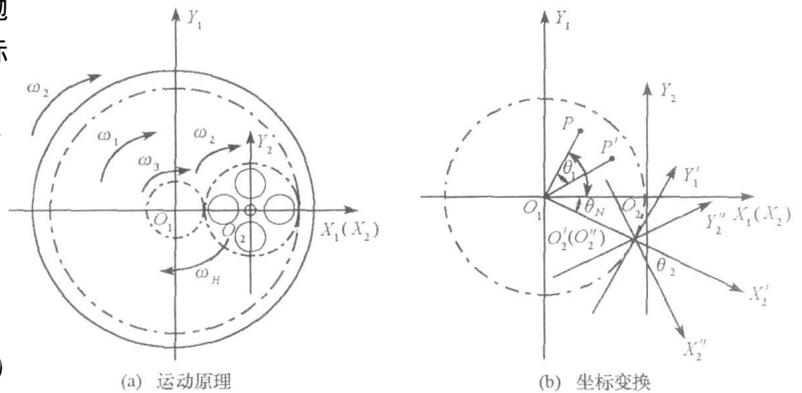


图 3 平行式研抛运动原理

Fig. 3 Motion principle of parallel lapping and polishing

采用坐标变换法, 推导出磨盘表面点  $P$  在基片坐标系下随加工时间  $t$  的相对运动轨迹  $(x_p, y_p)$  为:

$$\begin{cases} x_p = R_p \cos[(-\omega_1 + \omega_H + \omega_2)t + \phi] - L \cos \omega_2 t \\ y_p = R_p \sin[(-\omega_1 + \omega_H + \omega_2)t + \phi] - L \sin \omega_2 t \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $R_p$  为  $P$  点到  $O_1$  的距离,  $\phi$  为  $O_1P$  与  $O_1O_2$  的夹角,  $L$  为  $O_1, O_2$  之间的距离。

对磨盘表面不同半径处的相对运动轨迹进行仿真分析, 结果如图 4 所示。  $R_p$  分别取磨盘上与基片接触的最大半径、最小半径和平均半径,  $\omega_1 = 20r/min, t = 5min, \phi$  只与运动轨迹的初始位置有关, 对轨迹形状无影响。从图中可以看出平行式研抛加工的运动轨迹为摆线, 随着半径增大, 运动轨迹的分布范围增大、变化趋势相对平缓, 这有利于提高基片的加工质量、降低表面粗糙度。

图 5 为不同时刻  $t$  的仿真轨迹对比图, 其中  $R_p = 115mm, \phi = 0$ 。从图中可以看出, 内边缘和中心区域的轨迹分布比较集中, 外边缘的轨迹相对稀疏。随着加工时间的增加, 空白区域不断地被填充, 但理

论上有些区域始终没有轨迹线,从而导致加工过程不均匀。因此应尽量使微波基片处于环形区域的中间部位,有利于提高材料去除率和表面质量的一致性。

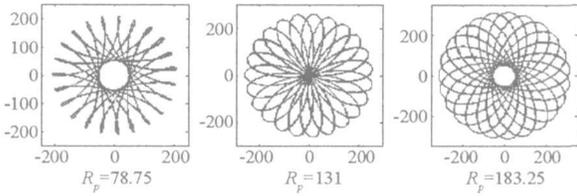


图4 磨盘表面不同半径处的相对运动轨迹

Fig. 4 Relative motion trace in various radius

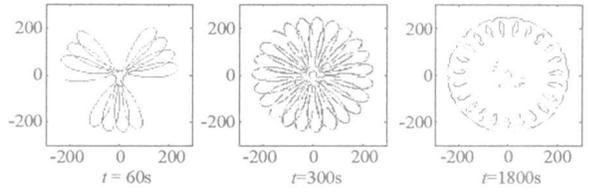


图5 不同时刻的相对运动轨迹

Fig. 5 Relative motion trace in different time

实际加工过程中,由于基片尺寸比行星片上的限位孔略小,因此基片能够在小范围内运动(取决于受力状态和基片与上下磨盘的摩擦系数),这使得相对运动轨迹的分布形式更为复杂,加工纹理更加细腻,有利于获得均匀一致的表面质量。

### 3 微波铁氧体基片平行式研磨工艺研究

平行式研磨主要是为了保证微波铁氧体基片的尺寸精度、平面度和平行度,去除前道磨削工序中产生的变质层,并使表面质量达到一定水平,为后续抛光奠定基础。

#### 3.1 工艺参数对研磨效率和表面粗糙度的影响分析

对微波铁氧体基片进行研磨加工,磨料具有滚轧和微切削作用,主要影响因素包括:研磨液浓度、工作压力、研磨速度、加工时间。下面分析它们对研磨效率和表面粗糙度的影响情况。

根据研磨机理可知,随着研磨液浓度的增大,作用在基片表面单位面积上的磨粒数增多,单个磨粒承受的压力减小,对基片表面的微切削作用减弱,表面粗糙度值在一定范围内相应降低,但所有磨粒对基片表面的整体切削量并不减小。

增大研磨压力,微切削作用和滚轧作用加强,材料去除率增大,研磨效率提高。但压力增加到一定值时,由于磨粒破碎,接触面积增加,实际接触点的工作压力不成正比增加,研磨效率的提高并不明显。此外,增大研磨压力将导致表面粗糙度变差,因此研磨压力不宜过大。

研磨速度是指基片表面与磨盘之间的相对运动速度,研磨速度增大,单位时间内磨粒与基片的作用距离增加,材料去除率变大,研磨效率提高。但速度过高时,由于离心力作用,部分研磨液会甩出工作区,研磨运动的平稳性降低,从而影响加工精度。

从研磨的最终效果来看,加工时间对材料去除率和表面粗糙度的影响并不大。研磨初始阶段主要是去除前道磨削工序中留下的微小凸出部分,此时接触面较小,单位面积上承受的加工压力较大,因此去除率较大;随着时间推移,去除率趋于恒定。由于前道工序的影响,研磨初始阶段的表面粗糙度较大,当加工到一定时间后,表面粗糙度逐步趋于稳定。

#### 3.2 研磨效率的正交化实验分析

为了量化各主要工艺参数的影响,我们采用正交化实验方法分析研磨压力、主轴转速和加工时间对研磨效率的影响,实验条件见表1,考察因素和水平见表2,实验结果见表3。

表1 研磨实验条件

Tab. 1 Experimental conditions in lapping process

| 研磨方法 |      | 研 具  |       | 磨 料    |    | 研磨液      |         |
|------|------|------|-------|--------|----|----------|---------|
| 加工方式 | 运动方式 | 材料   | 形状    | 种类     | 粒度 | 种类       | 浓度      |
| 平行研磨 | 行星运动 | 球墨铸铁 | 平面、开槽 | 绿色 SiC | W7 | 洁净水+ 防锈剂 | 体积比 1:5 |

表2 实验因素/水平

Tab. 2 Experimental factors and levels

| 因素          | 1水平 | 2水平 | 3水平  |
|-------------|-----|-----|------|
| 研磨压力(N)     | 8.5 | 17  | 22.5 |
| 主轴转速(r/min) | 10  | 20  | 40   |
| 加工时间(min)   | 20  | 30  | 10   |

表3 实验设计方案及材料去除率

Tab. 3 Experiment design scheme and removal rate

| 序号 | $F_1$ | $F_2$ | 空列 | $F_3$ | 去除率( $\mu\text{m}/\text{min}$ ) |
|----|-------|-------|----|-------|---------------------------------|
| 1  | 1     | 1     | 1  | 1     | 0.84                            |
| 2  | 1     | 2     | 2  | 2     | 1.48                            |
| 3  | 1     | 3     | 3  | 3     | 2.61                            |
| 4  | 2     | 1     | 2  | 3     | 1.26                            |
| 5  | 2     | 2     | 3  | 1     | 1.75                            |
| 6  | 2     | 3     | 1  | 2     | 3.03                            |
| 7  | 3     | 1     | 3  | 2     | 1.40                            |
| 8  | 3     | 2     | 1  | 3     | 2.71                            |
| 9  | 3     | 3     | 2  | 1     | 4.02                            |

根据数据处理结果可得出如下结论: $F_1$ (研磨压力)、 $F_2$ (主轴转速)因素效应比较显著, $F_3$ (加工时间)不显著。以材料去除率为目标的最佳组合为:因素1取3水平,因素2取3水平,因素3任意取。加工后采用原子力显微镜进行检测,微波铁氧体基片表面粗糙度 $Ra < 0.2\mu\text{m}$ ,微观形貌见图6所示,测量结果见图7所示。

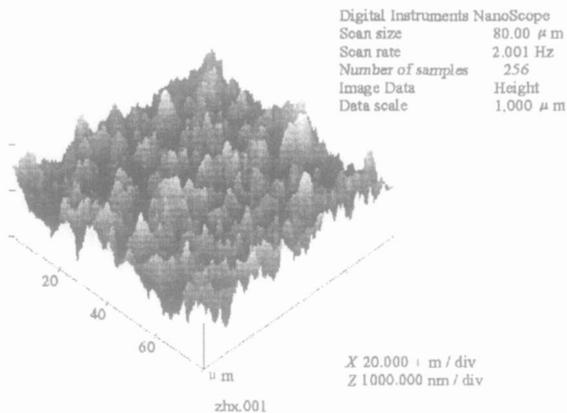


图6 微波铁氧体基片研磨后的微观形貌  
Fig. 6 Microscopic pattern of substrates after lapping

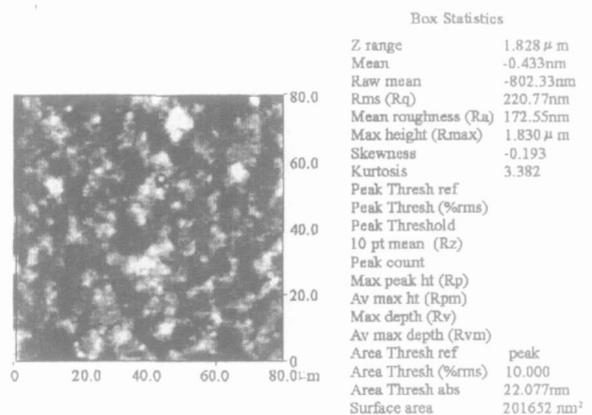


图7 研磨后的粗糙度测量结果  
Fig. 7 Measure result of roughness after lapping

## 4 微波铁氧体基片抛光工艺研究

抛光作为微波铁氧体基片加工的最后道工序,主要用于降低表面粗糙度值,达到要求的技术指标。

### 4.1 工艺参数对抛光过程的影响分析

抛光液浓度、工作压力、主轴转速及加工时间对微波铁氧体基片表面粗糙度和加工效率的影响规律与研磨过程大致相同,不同之处是基片的面形精度将随着抛光量和工作压力增加而变差,最终趋于常值。

抛光过程中对微波铁氧体基片面形精度有极大影响的“塌边”现象,是由抛光盘弹性变形引起的抛光区压力分布不均匀造成的:抛光初期,基片边缘受到的抛光盘阻力较中间大,因此边缘部位的材料去除量相对大一些;到了抛光后期,基片已经“塌边”,表面各点所受的抛光盘阻力趋于一致,抛光量基本相等。如果使用弹性抛光盘,工件的“塌边”几乎不可避免,增大抛光盘的刚性可在一定程度上减轻“塌边”

现象。因此在微波铁氧体基片抛光过程中,应尽量选用较薄或弹性模量较大的抛光布。

## 4.2 基片表面抛光质量的实验研究

通过正交化实验进行分析,发现在对微波铁氧体基片抛光表面质量的影响因素中,抛光时间、工作压力比较明显,而抛光液浓度不明显。

抛光实验还表明,当工艺参数在一定范围内变化时,可以控制微波铁氧体基片的表面粗糙度  $Ra < 0.04\mu\text{m}$ ,其微观形貌见图8(加工条件:机床转速为  $16\text{r}/\text{min}$ ,抛光压力为  $49\text{N}$ ,抛光时间为  $90\text{min}$ ,抛光液为 W2 绿色 SiC 微粉+水+防锈剂,体积浓度为  $30\%$ ),测量结果见图9。从图中可看出,虽然表面粗糙度已经达到了要求的性能指标,但进一步提高却有相当难度,这是因为铁氧体基片是烧结成形材料,具有较多的微观缺陷,材质均匀性较差,限制了表面质量的进一步提高。

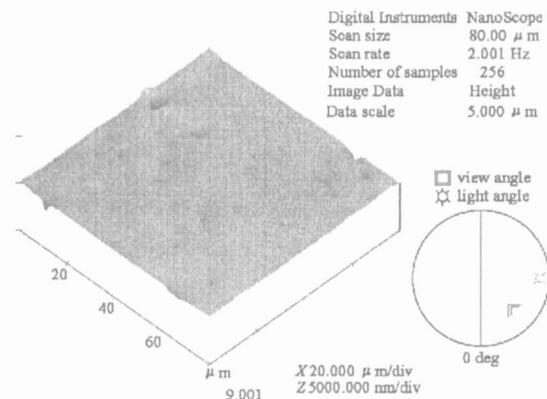


图8 抛光后微波铁氧体基片的微观形貌

Fig.8 Microscopic pattern of substrates after polishing

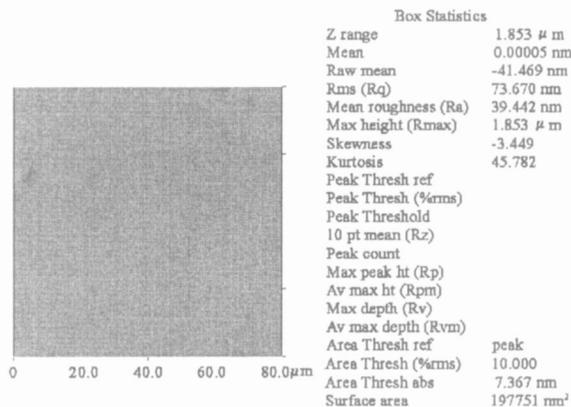


图9 抛光后微波铁氧体基片粗糙度测量结果

Fig.9 Measure result of roughness after polishing

## 4.3 微波铁氧体基片抛光后的技术指标

根据应用单位的要求,采用优化的工艺参数组合,微波铁氧体基片经过切片、ELID 高效深切磨削、平行式研磨和抛光加工后,技术指标为:平面度  $\leq 0.2\mu\text{m}$ ,平行度  $\leq 0.5\mu\text{m}$ ,表面粗糙度  $Ra \leq 0.04\mu\text{m}$ ,均超过了预期研究目标。

## 5 结论

微波铁氧体基片属于典型的难加工材料,本文针对其功能要求和材料特性,分析了基片加工的工艺特征;基于平行式研抛机床的运动特点,采用坐标变换法对加工过程中基片表面和磨盘上任意点的相对运动轨迹进行仿真分析,为优化工艺参数提供了理论依据;通过正交化实验方法研究了不同工艺参数对研磨效率的影响规律,得到各因素与水平之间的最佳组合;采用优化的工艺参数进行微波铁氧体基片加工,达到了要求的技术指标,提高了生产效率。

平行式研磨、抛光工艺与 ELID 磨削技术结合起来,能够形成微波铁氧体基片精密高效的批量生产能力。这将明显改善铁氧体小型化器件和微波集成电路的质量,对于提高生产效率和成品率、降低成本、改变我国磁材加工行业档次低、质量差的现状具有重要意义。这种工艺路线具有一定的通用性,能够用于其他硬脆材料零件的精密和超精密加工。

## 参考文献:

- [1] Horvath M P. Microwave Application of Soft Ferrites[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2000(215): 171- 183.
- [2] Schloemann E. Advances in Ferrite Microwave Materials and Devices[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2000(209): 15- 20.
- [3] 唐敏. 片式磁性元件的技术发展状况[J]. 电子产品世界, 2003(6): 83- 85.
- [4] Zhou L B, Hiroshi E. One-step Minor Finishing System for Electronic Magnetic and Optical Substrates[J]. Journal of the Society of Grinding Engineers, 2001, 45(6): 34- 38.
- [5] Liu Y L, Zhang K L, Wang F, et al. Investigation on the Final Polishing Technique of Silicon Substrate in ULSI[J]. Microelectronic Engineering, 2003(66): 438- 444.