

# 无线充电RX端用低损耗镍锌 铁氧体材料及磁片介绍

朱晏军，聂敏，徐银辉

深圳顺络电子股份有限公司，深圳 518110

**摘要：**本文研究了无线充电RX端用低损耗镍锌铁氧体新材料以及磁片，并与传统的无线充电RX端镍锌铁氧体材料以及磁片做性能对比。要求新材料所制作的无线充电RX端铁氧体磁片磁导率 $\mu_r$ 在100kHz下为750，磁导率（虚部） $\mu''$  < 10，在50kHz&150mT下，体积功耗 $P_{cv} < 200\text{mW/cm}^3$ ，充电效率 $\eta > 85\%$ ，微观结构致密，晶粒细小均一。试验结果表明，用该新粉料生产的无线充电RX端铁氧体磁片，磁导率 $\mu_r$ 在100kHz下为762，磁导率（虚部） $\mu''$ 为7.8，在50kHz&150mT下，体积功耗 $P_{cv}$ 为 $147\text{mW/cm}^3$ ，充电效率 $\eta$ 为85.4%，而传统材料制作的无线充电RX端铁氧体磁片磁导率 $\mu_r$ 在100kHz下为725，磁导率（虚部） $\mu''$ 为11，在50kHz&150mT下，体积功耗 $P_{cv}$ 为 $521\text{mW/cm}^3$ ，充电效率 $\eta$ 为83.3%。研发的NF601新材料生产的无线充电RX端镍锌铁氧体磁片电磁性能非常好，现正在批量生产，为公司创造了良好的经济效益。

**关键词：**镍锌铁氧体材料，无线充电，铁氧体磁片，电磁性能

## 1 引言

由于电子信息产业的快速发展，电子产品不断推陈出新，且功能越来越强大，但是耗电量也随之迅速攀升。随着智能手机、数码相机以及平板电脑等便携式电子设备的广泛使用，人们对充电的要求也越来越高；尤其是智能手机，其功能强大，软件丰富，使用频率高，导致手机耗电量非常大，待机时间短，导致使用这些产品必须反复充电、携带不方便、不便及时充电、充电时有触电危险等，在实际中成了非常麻烦的事情。而且，每款电子产品几乎都附带一个与之配套特定的有线充电器，用户每更换一次电子产品基本都要废弃原来的充电器，这样不仅浪费资源还会造成环境污染。

采用无线充电设备给手机充电时，手机和无线充电设备之间没有导线连接，可以放上即充，又可以随时拿开使用，没有传统手机连接导线的限制，充电方便、灵活，并且可以同时给多个用电器充电等优势，无线充电设备越来越受到人们的关注<sup>[1]</sup>。

目前，越来越多的便携式电子设备的充电技术逐步向无尾化（非接触式充电）迈进，无线充电技术飞速发展。根据设计原理和机理的不同，无线充电的实现方式可以根据不同的应用频段可分为三类：低频是电磁感应耦合式、

中高频是电磁谐振式、更高频是电磁辐射式。以电磁感应方式充电（Qi标准）最为普遍。快速充电或大电流充电的场合，由于发射线圈和接收线圈是分离的，系统在工作时，会有漏感产生，线圈互感变小，进而转换效率变低；同时带来充电线圈和导磁材料的发热，甚至带给其它周边部件感应加热，带来致命的影响；还存在电磁辐射等问题。为了解决上述问题，需要用导磁屏蔽材料对线圈产生的磁通量进行屏蔽，在发射线圈端和接收线圈端分别加入铁氧体材料作为屏蔽材料时，可以提高线圈之间的耦合系数，进而提高传输效率，并且可以屏蔽线圈干扰、屏蔽充电磁场对终端设备的干扰，从而提高无线充电的整体性能。

目前市面上存在非晶纳米晶与铁氧体两大主流屏蔽材料，非晶纳米晶具有高磁导率和高饱和磁感的优点，但限制于叠片工艺的复杂度，其制造成本较高，目前铁氧体片仍是市场第一选择。我司具有多年从事铁氧体材料配方开发以及铁氧体磁片制造经验，铁氧体磁片制造成本在行业内较有竞争力，开发无线充电 RX 端用的铁氧体片有利于提高我司整体模组的竞争力。

镍锌铁氧体材料拥有很大的电阻率，烧结时可以在空气中进行，且烧结温度比较低，工艺较为简单。因此，可以制备出具有较高的磁导率、较低的损耗和较高的饱和磁

通密度的镍锌铁氧体，将其应用到无线充电设备中，起到提高充电性能的作用，本论文正是基于此而研究的。

## 2 实验部分

### 2.1 配方的设计

#### ①制备浆料<sup>[2], [3]</sup>

铁氧体原粉的制备。铁氧体原粉包括氧化铁、氧化镍、氧化铜和氧化锌等，设计了无线充电用铁氧体材料配方。

将氧化铁、氧化镍、氧化铜、氧化锌按照各自的组分进行混合球磨，在850℃预烧成铁氧体原粉，然后将铁氧体原粉放在砂磨机中砂磨，并同时按照配方进行添加小料，将粒度控制在D50为 $1.0 \pm 0.2 \mu\text{m}$ 即可。在此粒度下，铁氧体原粉的活性好，可进行有效烧结，进而晶粒生长得更均匀，起始磁导率会升高。低频时，功率损耗主要由磁滞损耗构成，而磁滞损耗系数与 $\mu_i$ 的三次方成反比，材料的功率损耗会降低。

#### ②制备铁氧体磁片

分别将我司研发的NF601新粉料和传统粉料采用干法流延技术制备磁片，然后分别进行烧结，烧结温度为960℃/2h，得到烧结后的磁片。

### 2.2 磁片电磁性能测试

采用排水法测量样品的烧结密度；采用E4991A+16454A射频阻抗分析仪测量样品电感量 $L_s$ 及品质因数 $Q$ ，测试频率为10kHz~100MHz，再由电感量 $L_s$ 计算磁导率 $\mu_i$ ；采用VEGA 3 EPH扫描电子显微镜观察样品表面和截面形貌；采用日本岩崎IWATSU/SY-8218磁滞分析仪测试材料的饱和磁通密度 $B_m$ 与功率损耗 $P_{cv}$ 。

## 3 结果与分析

### 3.1 烧结温度对材料密度的影响

用研发的新材料NF601压制磁环进行性能判定，为了比较起见，这里首先给出未烧结磁环的密度 $\rho$ 为3.34g/cm<sup>3</sup>，磁环密度与烧结温度的关系如图1所示。

可以看出，镍锌铁氧体的烧结密度随着烧结温度的提升，先增大后略减小。由于在材料中添加了专用的烧结助剂，其熔点较低，在固相反应时呈液态，起到了加速离子扩散、促进材料烧结的作用，样品的孔隙不断减少，致密化程度

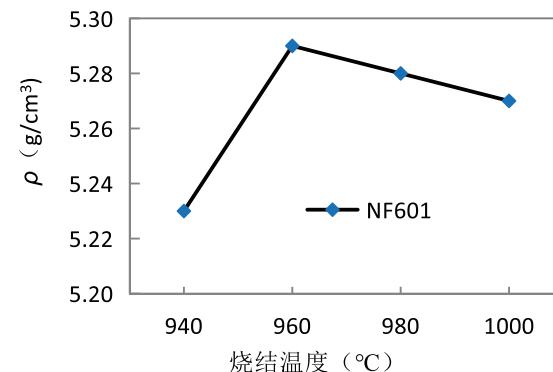


图1 不同烧结温度温度磁环密度图

提高。其后，随着烧结温度的提升，在烧结温度为960℃时，密度 $\rho$ 为5.29g/cm<sup>3</sup>，达到峰值。然而，当烧结温度进一步升高时，会使材料的晶粒生长过快，导致晶粒内部产生大量气孔而无法排出，最终致使材料密度变小。

### 3.2 烧结温度对材料电磁性能的影响

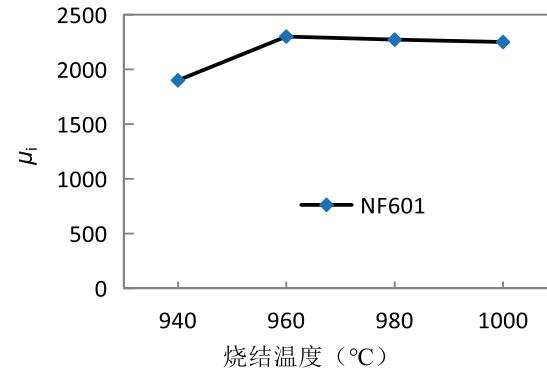


图2 不同烧结温度磁环的 $\mu_r-T$ 图

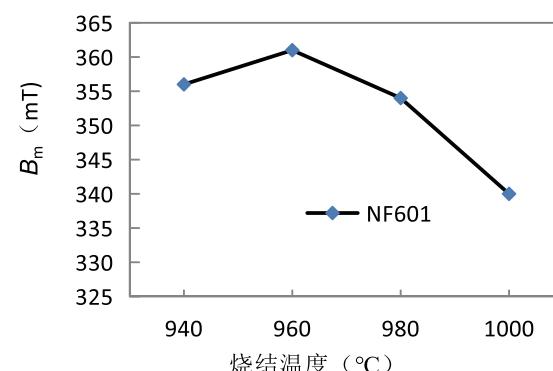


图3 不同烧结温度磁环的 $B_m-T$ 图

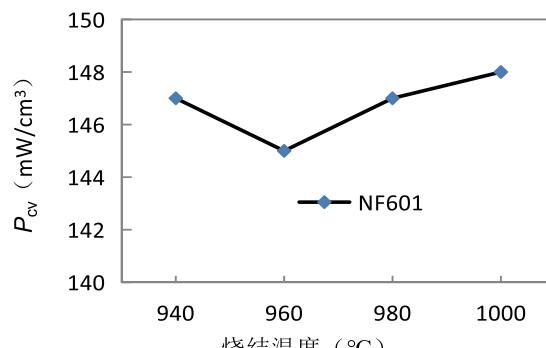


图 4 不同烧结温度磁环的  $P_{cv}$ -T 图

用研发的新材料 NF601 压制磁环进行电磁性能判定，材料的磁导率  $\mu_i$  与烧结温度  $T$  的关系如图 2 所示，材料的饱和磁通密度  $B_m$  与烧结温度  $T$  的关系如图 3 所示，材料的功率损耗  $P_{cv}$  与烧结温度  $T$  的关系如图 4 所示。

从图 2 明显可知，随着烧结温度的提升，固相反应越完全，这就使起始磁导率  $\mu_i$  上升。当烧结温度过高时，材料的晶粒生长过快，导致晶粒内部产生大量气孔而无法排出，最终致使材料性能恶化，磁导率  $\mu_i$  下降。

观察图 3 可知，随着烧结温度的提升，材料的  $B_m$  先增大后减小。这主要因为材料的  $B_m$  与密度紧密相连，由

于使用的专用烧结助剂具有比较低的熔点，在固相反应时呈液态。如果烧结温度适宜，样品更致密化，材料密度会变大；上面分析过，当烧结温度过高时，会使材料的晶粒生长过快，导致晶粒内部产生大量气孔而无法排出，最终致使材料密度变小。所以随着烧结温度的提升， $B_s$  先增大后减小。

由于材料功率损耗  $P_{cv}$  与起始磁导率三次方成反比，所以随着烧结温度的不断提升，磁导率  $\mu_i$  先上升后降低，如图 4 所示，材料功率损耗  $P_{cv}$  的变化与起始磁导率的变化相反。

烧结温度影响材料的微观结构，根据 H.Rikukawa 模型<sup>[4]</sup>，起始磁导率与气孔率、晶界厚度成反比，与晶粒尺寸成正比。烧结温度较低时，固相反应和烧结致密化不能完全进行，造成晶界厚、均匀性差、气孔较多，因而起始磁导率较低。随着烧结温度的升高，晶粒逐渐长大，晶界变薄，气孔减少，晶粒趋于均匀，气孔呈球形，烧结密度趋于最大，晶界附近的内应力减小，畴壁移动阻力减小，故磁导率提高。烧结温度过高时，虽然晶粒继续长大，但也会出现晶粒异常长大，形成另相，导致磁导率下降。

### 3.3 基本电磁性能

用研发的新材料 NF601 和传统材料进行性能对比，

表1. 基本电磁性能

测试项目		单位	传统粉料	NF601	测试设备	备注
基 本 电 磁 性 能	成分	—	NiZn	NiZn	能谱仪、 荧光光谱仪	—
	密度 $\rho$	$g/cm^3$	5.2	5.3	重量天平	—
	居里温度 $T_c$	°C	>80	>100	快速温变箱 +ZM2371	—
	磁片磁导率 (实部) $\mu'$ (谐振腔法)	100kHz 300kHz 500kHz 1MHz 3MHz	—	725 736 746 784 597	762 765 779 829 686	E4991A+16454A 谐振腔法测试所采用磁环为外径 * 内径 * 高度 = 18.1mm*8.1mm* 0.1mm (5pcs 叠加测试)
	磁片磁导率 (虚部) $\mu''$ (谐振腔法)	100kHz 300kHz 500kHz 1MHz 3MHz	—	11 14 23 99 316	7.8 9.5 10.1 49.1 299	射频阻抗分析仪 (100kHz~3MHz)
I W A T S U S Y - 8 2 1 8	电阻率 $\rho$	$\Omega \cdot m$	$10^6$	$10^6$	IWATSU SY-8218 型磁滞回线仪	采用磁环为外径 * 内径 * 高度 = 12.7mm*7.9mm*3mm
	饱和磁通密度 $B_m$	25°C	mT	267		
	剩磁 $B_r$	25°C	mT	132		
	矫顽力 $H_c$	25°C	A/m	37		
	体积功耗 $P_{cv}$	50kHz& 150mT	$mW/cm^3$	521		
		25°C		147		

两种粉料以及所制作的磁片基本电磁性能如表 1 所示。

从上表可知，我司研发的 NF601 铁氧体粉料生产的磁片与传统材料生产的磁片性能相比，具有高磁导率、高饱和磁通密度、低功耗、烧结效率高等。我司铁氧体粉料的饱和磁通密度  $B_m$  可以达到 360mT，而传统铁氧体粉料的饱和磁通密度  $B_m$  在 270mT 以内；我司铁氧体粉料的功耗在 200mW/cm<sup>3</sup> 以内，而传统铁氧体粉料的功耗 500mW/cm<sup>3</sup> 以上；我司的磁片在 960℃ 低温烧结，磁片磁导率稳定在 +/-10%，并且可实现多片叠烧，传统材料生产的磁片只能单片烧结，否则粘片变形。

### 3.4 温度特性分析

各取上述两种粉料制作的磁环，测试  $\mu_i$  与温度  $T$  的关系。用  $\phi 0.40\text{mm}$  的铜线绕磁环 20 圈，留有尾线长度为 1m，以便引出测试。测试条件：电感量 100kHz/1V；测试温度：-55℃、-40℃、-20℃、0℃、20℃、-25℃、40℃、60℃、80℃、100℃、120℃、140℃、160℃、180℃，如图 5 和图 6 所示。

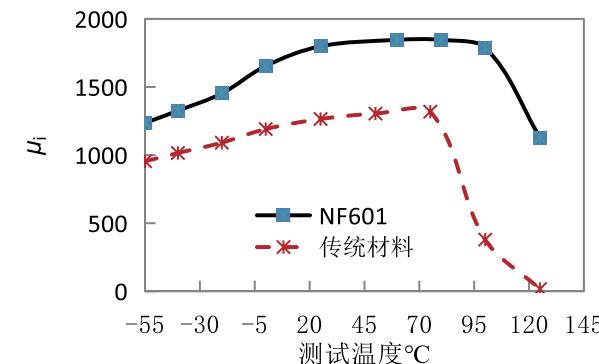


图 5 不同测试温度磁环的  $\mu_i-T$  图

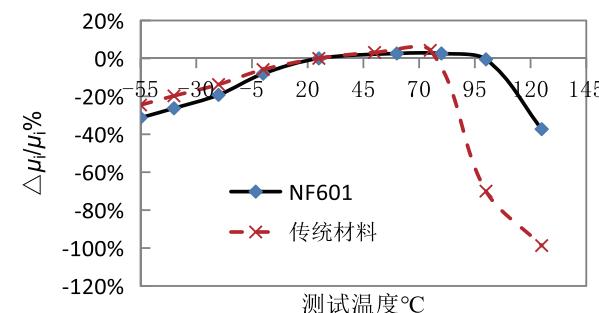


图 6 不同测试温度磁环的  $\Delta\mu/\mu\%-T$  图

从图 5 和图 6 中的温度特性上看，我司 NF601 的居里温度  $T_c$  较传统材料高 10℃ 以上，磁导率下降率更低，能在更高的温度下稳定工作。

### 3.5 磁片 SEM 分析

两种粉料所制备的磁片，其截面形貌的 SEM 观测结果如图 7 所示。

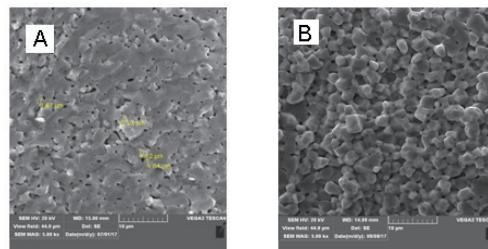


图 7 两种粉料做成的磁片断面的 SEM 照片

图 7 为两种磁片样品的截面微观结构，其中 A 为传统材料，B 为自研的 NF601 新材料。从图片的晶粒结构看，NF601 新材料所做的磁片烧结后空隙很少，出现致密化、晶粒细小均一；而传统材料空隙较多，晶粒相对大一些，并呈现片状化，我司的 NF601 新材料更有利于磁片裂片，对电磁性能影响较小。

### 3.6 磁片频谱特性

对传统粉料和 NF601 新材料所制作的磁片进行频谱分析，如图 8 所示。

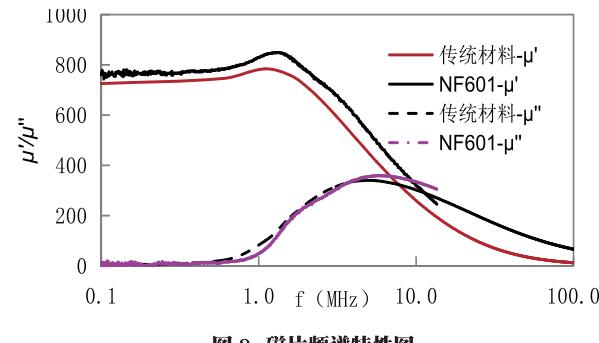


图 8 磁片频谱特性图

从频谱图上看，NF601 材料所制作的无线充电 RX 端铁氧体磁片，在低频下磁片的磁导率  $\mu_i$  要高于传统材料，而磁片磁导率（虚部） $\mu''$  要低于传统材料，体积功耗  $P_{cv}$  相对较小，更有利充效率  $\eta$  的提升。

### 3.7 分析与讨论

研发的 NF601 新材料生产的无线充电 RX 端铁氧体磁片性能好于传统材料，主要有以下几个方面的贡献：

- (1) 在原材料选择方面， $\text{Fe}_2\text{O}_3$  和其它原材料均采用高纯材料，尽量避免杂质的引入，保证了原材料的品质。
- (2) 在配方方面，经过大量实验，找到专用助烧剂，微观结构致密、晶粒细小均一。同时还对配方进行监控，每批料都进行成分测试，如出现偏差，进行补偿。
- (3) 在工艺制作方面，每批料都进行粒度测试，使粒度控制在规定的范围内，保证材料的烧结活性。

### 3.8 转换效率测试

电磁感应耦合式无线充电技术主要利用了变压器理论和电磁感应定律。发射端采用市电供电，交流电通过发射端线圈（相当于变压器初级线圈），将电能转化为磁场，其可通过空气传播，接收端线圈（相当于变压器次级线圈）接收到磁场后，由于电磁感应，在接收端会产生电流，进而达到两端的功率传输。



图 9 无线充电 RX 接收线圈产品

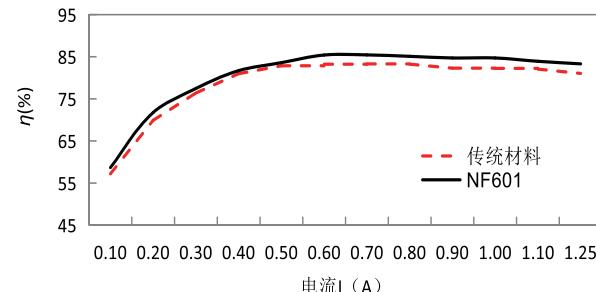


图 10 两种磁片转化效率图

本文采用线径 0.085mm 的铜线 13 股并排绕 13 圈，内径为 18.80mm，外径为 48.25mm。做成的线圈贴在厚度为 0.14mm 的磁片上，做成无线充电 RX 端接收线圈产品，产品外径为 52mm，产品总厚度为 0.25mm，如图 9 所示。

将发射线圈与接收线圈相隔 5.4mm，两线圈中心重合，紧贴，以胶纸固定测试。设置  $V_{in}=12V$ ,  $V_{out}=12V$ ，转换效率测试数据如表 2 和图 10 所示。

从上表和图中可以看出，NF601 材料所做的磁片，在同样条件下转换效率要高于传统材料。

### 4 结论

通过前面的实验，可以得出以下结论：

研发的 NF601 新材料的电磁性能和转换效率要优于传统材料，目前正在大批量生产无线充电 RX 端铁氧体磁片，正在为公司创造了良好的经济效益。

表2. 转换效率数据

$I_{out}$ (A)	传统材料	NF601 新材料
0.10	57.21	58.69
0.20	69.91	71.76
0.30	76.39	77.47
0.40	80.98	81.70
0.50	82.86	83.60
0.60	83.23	85.41
0.70	83.30	85.44
0.80	83.24	85.10
0.90	82.29	84.71
1.00	82.24	84.71
1.10	82.06	83.92
1.25	81.04	83.31

### 参考文献

- [1] 李东月, 等. 用于无线充电中的 NiCuZn 铁氧体屏蔽材料的研究. 成都: 电子科技大学, 2015.
- [2] 陈宗淇, 王光信, 徐桂英, 等. 胶体与界面化学. 北京: 高等教育出版社, 2001.9.
- [3] 朱晏军, 周勋, 周小军, 谈敏, 等. 一种用于铁氧体粉体喷雾造粒的浆料及其制备方法 [P]. 中国专利: 104387090A, 2015-03-04.
- [4] 严密, 彭晓领. 磁学基础与磁性材料 [M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2006.