

# 电磁感应式无线供电用软磁片研究进展

杜瑞华, 雷国莉, 王凌峰, 程 戎, 颜 冲

(中国计量大学 材料科学与工程学院, 浙江杭州 310018)

**摘 要:** 无线供电因其非接触性供电方式正越来越得到广泛应用。基于磁耦合的电磁感应式供电是目前市场开发的热点。叙述了电磁感应式供电的原理和特点。软磁片作为无线供电系统中的核心材料, 主要应用于发射端和接收端, 以增高感应磁场和屏蔽线圈干扰, 降低损耗, 提高能量传输效率。介绍了用于电磁感应式供电软磁片的性能要求、材料类型及特点、制备工艺。在此基础上, 综述了国内外无线供电用软磁片的发展概况, 最后对无线供电的应用和未来发展趋势进行了展望。

**关键词:** 无线供电; 电磁感应; 软磁片

中图分类号: TM271<sup>+</sup>.2

文献标识码: A

文章编号: 1001-3830(2020)02-0058-06

DOI: 10.19594/j.cnki.09.19701.2020.02.014

## Progress on soft magnetic sheets for wireless power system based on electromagnetic induction

DU Rui-hua, LEI Guo-li, WANG Ling-feng, CHENG Rong, YAN Chong

College of Material Science and Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China

**Abstract:** Wireless power supply is widely used because of its non-contact power supply. Electromagnetic induction power supply based on magnetic coupling is a hot spot in the market. In this paper, the mechanism and characteristics of electromagnetic induction power supply are introduced. As the core material of the wireless power supply system, soft magnetic sheets are mainly used in the transmitter and receiver to increase the induction field and shield coil interference. And the efficiency of energy transmission is improved. The performance requirements, material types and preparation technologies of soft magnetic sheets for wireless power supply are also contained. Then, the domestic and abroad development of soft magnetic sheets for wireless power supply is summarized. Finally, the application and development trend of the wireless power supply has prospected.

**Key words:** wireless power supply; electromagnetic induction; soft magnetic sheet

### 1 引言

无线电能传输(Wireless Power Transfer, WPT)是指直接通过空气介质进行电能传输的技术<sup>[1]</sup>。无线供电技术主要用于无线充电产品, 与传统的有线充电方式相比, 无线充电具有充电方便快捷、非接触等优势, 应用广泛。无线供电主要有三种工作方式: 磁场耦合式、电场耦合式、无线电波式<sup>[2-3]</sup>。其中以通过磁场耦合进行电能传输的电磁感应式(MI)与磁共振式(MR)的研究和开发最为热门, 而电磁感应式供电技术的发展最为成熟, 市场应用最为广泛。Qi标准规定其对应设备工作频率通常在 87~205 kHz,

在该频带下将发射端的能量输送到接收端, 能够获得较高的电力传输效率<sup>[4]</sup>。不同的无线供电方式, 可供电距离范围不同, 所以无线供电形式又可分为近程、中程和远程传输三大类<sup>[5]</sup>: (1)基于电磁辐射(微波或激光)的 WPT 适用于远距离输电, 如太阳能卫星与地球之间的电能传输; (2)电磁共振技术的传输距离和功率适中, 用于近场耦合的电能传输; (3)电磁感应技术传输距离短(1 mm~20 cm), 传输功率大, 一般适用于小型便携式电子设备的近场电能传输<sup>[6]</sup>。当前主流是磁耦合传输方式中的电磁感应式与磁共振式的近、中距离供电。

收稿日期: 2019-02-25 修回日期: 2019-05-20

基金项目: 浙江省公益技术应用研究资助项目(2017C37091)

通讯作者: 颜 冲 E-mail: 13A0505069@cjlu.edu.cn

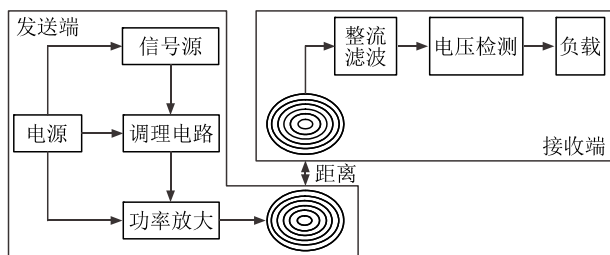


图1 电磁感应式无线充电系统原理图

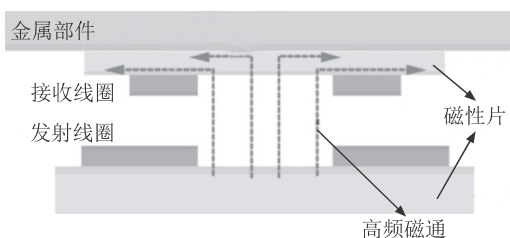


图2 电磁感应式无线充电系统中软磁片的位置

## 2 电磁感应式无线供电原理

电磁感应式无线供电系统由发射端和接收端两部分组成，如图1所示<sup>[7]</sup>。基于法拉第电磁感应原理，分离的两部分通过电磁感应耦合进行能量传输，将高频交流电流通入发射线圈时，会产生交变磁场，接收端线圈将接收到的电磁信号转变成电流从而给设备提供电能<sup>[8]</sup>。

在电磁感应式无线供电系统中，发射端和接收端都应用到了软磁片，图2示出了软磁片在无线供电系统中的位置<sup>[5]</sup>，其主要作用是增高感应磁场和屏蔽线圈干扰。在发射端和接收端线圈内部，降低电能传输效率的主要原因有铜损与铁损。由于电流流过线圈会产生损耗，导线的直流电阻越小损耗越少。而在电磁感应式无线供电系统中采用的是高频交流电流，随着频率增高，由于趋肤效应，交变电流集中在导线外，减小有效截面积，导致电阻增大，损耗增大，即产生铜损。在发射端和接收端线圈内使用的软磁片相当于变压器磁芯，若接收线圈太接近金属部件，则软磁片将无法充分发挥磁屏蔽作用，高频磁通会贯穿软磁片，产生高频涡流损耗，即铁损(磁损耗)。磁损耗不仅降低了电力传输效率，而且有可能引起异常发热，影响系统正常工作。所以希望所用软磁片的磁导率高、饱和磁通密度高，损耗低。高性能的软磁片贴装在线圈之上，汇聚来自发射线圈的高频磁通，其能够更好地“封锁”磁通，避免贯穿，提高电能传输效率，同时也可抑制噪音的产生<sup>[9-11]</sup>。

电磁感应式无线供电设备中，发射线圈与接收线圈的准确定位也非常重要，接收线圈搭载部位不

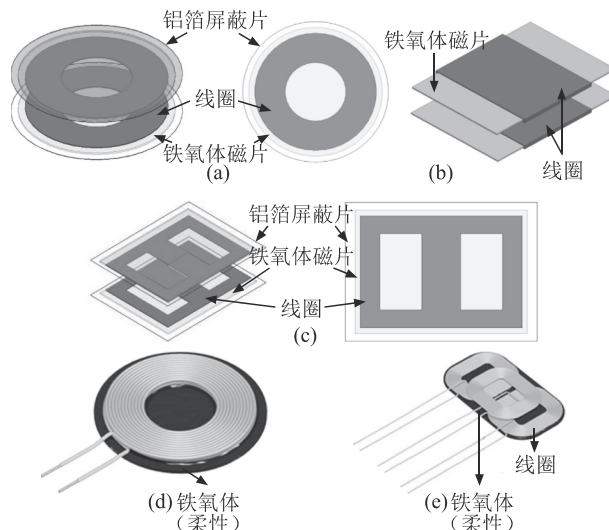


图3 电磁感应式供电的不同线圈位置方式：(a)圆形结构，(b)螺线管结构，(c)双极结构，(d)单线圈自由位置型，(e)多线圈自由位置型

同，也会引起异常发热，降低电能传输效率。根据线圈间的相互关系，电磁感应式无线供电定位方式可分为固定位置型<sup>[12]</sup>、单线圈自由位置型、多线圈自由位置型<sup>[5]</sup>三种，如图3所示。不同定位方式的工作特点和对软磁片的要求也不尽相同<sup>[13]</sup>。

固定位置型是通过安装在发射线圈中心位置的永磁体磁力，吸引安装在接收线圈中央的磁性体进行定位，完成充电。该方式下的软磁片一般采用损耗小、高频屏蔽好的NiZn铁氧体。单线圈自由位置型是检测到终端设备后，通过某一驱动装置将发射线圈移动至该位置，实现电能传输，该方式耦合系数高，传输效率高。由于线圈需要移动，要求软磁片具有较高的可靠性，一般采用LTCC/LTCF流延工艺制作的柔性磁片<sup>[14]</sup>。多线圈自由位置型是将多个发射线圈进行排列，使位于所放置终端设备正下方的发射线圈进行工作，该方式可实现多台设备同时充电，充电效率高<sup>[5, 13]</sup>。

## 3 无线供电用软磁片及其制备

### 3.1 用于无线供电的软磁材料

#### 3.1.1 铁氧体软磁材料

铁氧体材料是经过高温烧结形成的磁性金属氧化物，其电阻率相对较高，磁导率范围宽，具有很好的频响特性，饱和磁通密度一般可到0.6 T，特别适合高频应用<sup>[13]</sup>。目前，铁氧体薄片主要有MnZn和NiZn材料两种，一般MnZn铁氧体适用于中低频设计，NiZn铁氧体适用于高频设计<sup>[15]</sup>。软磁铁氧体

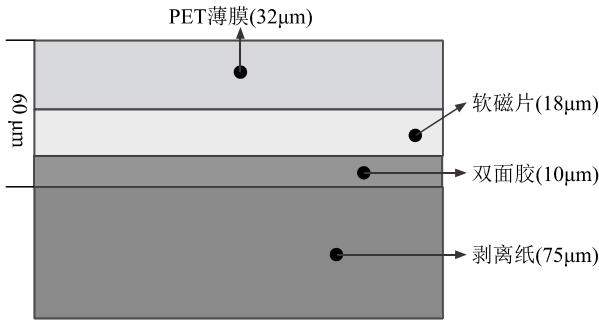


图 4 日立金属 FINEMET MS 系列软磁片的结构图

较高的磁导率、较小的矫顽力有利于增强耦合，较高的电阻率可以降低损耗，减少发热。软磁铁氧体的形状和尺寸影响着无线供电的转化效率、电磁兼容。为了防止高频磁通贯穿铁氧体软磁片，产生涡流损耗，必须要根据产品设计要求严格控制其厚度。

### 3.1.2 非晶/纳米晶软磁材料

将熔融的金属快速冷却，从而抑制其结晶，可获得原子呈长程无序排列的非晶合金材料。纳米晶软磁合金是指非晶合金经过适当的晶化退火处理后，获得了一种具有超细晶粒的材料。非晶材料具有较高的磁导率和饱和磁通密度，而纳米晶材料磁导率、饱和磁通密度、损耗等有非常优异的温度稳定性。超薄大尺寸纳米晶软磁片在充电过程中不发热，能有效保护机体。线圈与电路板一体化集成，与超薄纳米晶软磁片结合，使得产品整体超薄，易于隐藏在机体内<sup>[16-17]</sup>。

如 FINEMET 合金，与传统软磁材料随着晶粒尺寸的减小，软磁性能变差，矫顽力增大的特性相反，其矫顽力与尺寸成正比，即当晶粒尺寸降到纳米级时，可大大改善软磁性能。与 MnZn 铁氧体相比，在工作温度为 0~100 °C，保持相同性能的情况下，FINEMET 合金的体积可以减小一半，饱和磁通密度可提高 3 倍，且具有更高的磁导率。FINEMET 合金的这些特性有利于无线供电产品的轻薄化和降低损耗<sup>[18]</sup>。如图 4 是日立金属无线供电 FINEMET MS 系列软磁片的结构图<sup>[19]</sup>。

### 3.1.3 复合软磁材料(SMC)

通过对软磁粉末表面进行绝缘包覆处理，即在磁性物质中添加绝缘介质，粘合压制而成的金属磁粉心即为复合软磁材料(SMC)。主要以 FeNi、FeNiMo、FeSi、FeSiAl、铁粉等软磁粉末为软磁基质。绝缘处理后的复合软磁材料可有效提高电阻率，降低涡流损耗，抑制趋肤效应<sup>[20]</sup>。

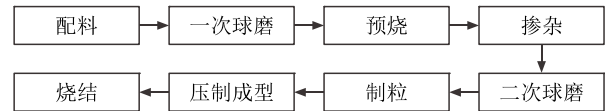


图 5 陶瓷工艺制备软磁铁氧体流程<sup>[24]</sup>

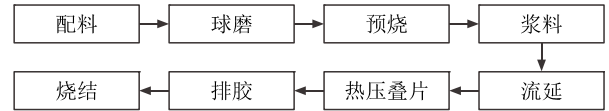


图 6 流延法制备铁氧体软磁片的工艺流程<sup>[27]</sup>

复合柔性软磁片则是利用软磁粉末与橡胶等高分子聚合物复合得到的复合软磁材料，不易受永磁定位磁体的影响，适用于磁体定位方式下的无线充电器。使用具有高扁平化的薄片状软磁合金制备复合柔性磁片可以提高磁导率<sup>[21]</sup>。通过扁平化处理得到的性能优良的磁性微粉，再用聚合物将具有大纵横比且厚度为趋肤深度左右的扁平状金属磁性粉末隔离开，容易制得成本低廉的柔性磁片，并易实现工业化生产<sup>[22]</sup>。

### 3.2 无线供电用软磁片的制备

对于烧结铁氧体，可通过传统的陶瓷制备工艺，对铁氧体粉料进行压制成型，随后进行烧结，得到烧结坯体，通过切削的方法控制其厚度<sup>[23]</sup>。软磁铁氧体材料的制备工艺对最终磁性能起着决定性的作用。这种制备方法简单，应用广泛，适合大规模批量生产。图 5 是采用氧化物陶瓷工艺制备软磁铁氧体的流程<sup>[24]</sup>。

随着对无线供电用软磁片的要求越来越高，流延法制备铁氧体磁片的应用越来越广泛，特别适合厚度极薄的软磁片。流延法又称刮刀法、带式法，是一套用于生产陶瓷基片和薄片的完备成型技术。根据产品要求，按照一定的比例在软磁粉料添加溶剂、分散剂、粘合剂、增塑剂等成分，配制成便于流延的浆料。在流延机上，混合浆料在基板的作用下变成压力流和拖曳流的结合，刮刀和基板之间的间隙可以控制流延膜的厚度，以便制成磁片<sup>[25-26]</sup>。利用流延工艺制作软磁片极大程度地提高了无线充电整体性能，有利于无线设备的轻薄化，提高充电效率。图 6 示出了流延法制备铁氧体磁片的工艺流程<sup>[27]</sup>。

## 4 国内外无线供电用软磁片研究进展

随着信息技术的不断发展，基于无线供电技术

的软磁材料广泛应用于多种无线供电设备中，全球各大软磁材料制造商对无线供电发射端和接收端用软磁片进行了深入的研发。

在软磁铁氧体的研发方面，TDK 公司一直处于国际领先地位，该公司开发出了适用于不同设备形状的超小型输电及接收线圈用软磁片。这些软磁片不仅可以用于无线供电产品，还可以用于噪音抑制。日本 TOKIN 公司是另一家国际领先的磁性材料公司，其推出的 FLEX 系列软磁片采用微米级的超薄磁性金属箔在同一方向上相互重叠，其磁导率较高，

即使在磁性片较薄的情况下也能很好地抑制噪音，且频率适用范围广，可从 MHz 频带到 GHz 频带。表 1 所示是 TDK<sup>[28]</sup>和 TOKIN<sup>[29]</sup>公司部分软磁片的特性参数。

FINEMET 是由日立金属公司在世界上首次推出的纳米晶软磁合金材料，使用 FINEMET 材料处理的层压板得到的软磁片噪音小，损耗低，已广泛应用于各种移动设备的无线充电器中。表 2 是日立金属公司用于无线供电的 FINEMET 纳米晶软磁片<sup>[18]</sup>的特性参数。

表 1 TDK 和 TOKIN 公司无线供电用软磁片特性参数

Manufactures	Type of materials	$\mu'$	$\mu''$	$A/\text{mm}^2$	$d/\text{mm}$	$T_c/^\circ\text{C}$
TDK (13.56 MHz)	IBF15	150	5	125×125	0.1, 0.18	-40~85
	IFL04	45	1.3	10 <sup>5</sup> ×300	5.0×10 <sup>-2</sup> , 0.1	
TOKIN (3MHz)	High permeability type	FX5	150	240×240 240×5×10 <sup>4</sup>	2.5×10 <sup>-2</sup> , 5.0×10 <sup>-2</sup> , 7.5×10 <sup>-2</sup>	-40~105
		EFX6	160	240×240	0.1, 0.2, 0.3	
	GHz band high performance type	FG1	25	240×240 240×5×10 <sup>4</sup>	2.5×10 <sup>-2</sup> , 5×10 <sup>-2</sup> , 7.5×10 <sup>-2</sup>	
		EFG2	35	240×240	0.1, 0.2, 0.3	
	UL94 V-0 flame retardant type	EFA	60	240×240	5.0×10 <sup>-2</sup>	
				240×5×10 <sup>4</sup>		
		FF1	100	240×3×10 <sup>4</sup> 240×2×10 <sup>4</sup>	0.2 0.3	

表 2 日立金属公司无线供电用 FINEMET 纳米晶软磁片特性参数

Materials	$\mu/10^3$		$B_s/\text{T}$	$H_c/A \cdot \text{m}^{-1}$	$P_{cv}/\text{kW} \cdot \text{m}^{-3}$	$T_c/^\circ\text{C}$	$\rho/\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	$d/\mu\text{m}$
	1 kHz	100kHz						
FINEMET	FT-3H	30	5	0.6	600	~570	7.3	18
	FT-3M	70	15	2.5	300			
	FT-3L	23	17	0.6	250			
	FT-3S	100	20	1.5	300			

横店东磁<sup>[30]</sup>和天通<sup>[31]</sup>公司是国内软磁铁氧体研发和生产的龙头企业，代表国内软磁铁氧体研发和生产的最高水平。两家公司都推出了用于无线供电和噪音抑制的软磁片。部分产品的性能参数如表 3 所示。

安泰科技公司是国内最早从事非晶/纳米晶软磁合金研发和生产的公司。该公司采用纳米晶材料制备出了具有手机无线充电功能的 NW 多工位无线充电器(NW-Pad)<sup>[32]</sup>和 NW 无线充电接收贴(NW-R2)<sup>[33]</sup>，其转换率分别超过了 80%和 75%。此外该公司的 MD@

表 3 东磁(DMEGC)和天通(TDG)公司铁氧体软磁片的典型特性参数

Manufactures	Type of materials	$\mu'$	$\mu''$	$A/\text{mm}^2$	$d/\text{mm}$	$T_c/^\circ\text{C}$
DMEGC	NS series (13.56MHz)	NS100	100±10 %	≥35	200×300	0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5
		NS50	50±10 %	≥10	200×2×10 <sup>4</sup>	0.1, 0.2
	FS series (150kHz)	FS500	500±20 %	<20	115×115	0.08-0.3
		FS700	700±20 %	<20		
TDG (13.56MHz)	TRF160	130±20 %	1.5	60×60	8.0×10 <sup>-2</sup> , 0.10, 0.14, 0.19, 0.26	-40~85
	TRF180	150±20 %	2.5	120×60		
	TRF220	170±20 %	3.5			

表 4 安泰科技公司无线供电用软磁片性能参数

材料类型	总厚度/ $\mu\text{m}$	铁氧体厚度/ $\mu\text{m}$	粘结剂厚度/ $\mu\text{m}$	$A/\text{mm}^2$
MDWA065050	65±5	50	5	
MDWA100085	100±10	85	5	
MDWA125110	125±15	110	5	80×100
MDWA160145	160±15	145	5	120×150
MDWA185170	185±20	170	5	120×210
MDWA210195	210±20	195	5	
MDWN035020	35±5	20	5	
MDWN060045	60±5	45	5	
MDWN085070	85±10	70	5	45×60
MDWN110095	110±10	95	5	55×70
MDWN135120	135±15	12	5	55×140
MDWN160145	160±15	145	5	

W 系列软磁片采用具有优异软磁特性的非晶、纳米晶带材制备,有效降低损耗以及对周围环境的电磁干扰。主要应用于消费电子、新能源领域的产品无线供电。表 4 示出了安泰科技部分软磁片的性能<sup>[34]</sup>。

## 5 无线供电的应用

随着信息技术的发展和进步,以及全球对无线供电设备的深入研发,基于无线供电技术的设备其应用领域和市场不断扩大,市场前景非常广阔。

在新能源领域,汪义旺等人<sup>[35]</sup>将太阳能光伏发电与无线供电技术相结合,在充电距离为 7 mm 时的充电效率可达 72.9%。Wi-Charge 公司设计的无线充电产品,将接收器嵌入设备或连接到现有的充电端口,功率发射器同时自动识别和对多个设备充电,接收器中的光伏电池将光转换为电能。此类无线充电技术利用聚焦的红外线在几米处提供充足的能量,且安全可靠,获得了 FDA 认证<sup>[36-37]</sup>。

在交通运输领域无线供电技术主要应用于轨道机车和电动汽车的充电装置中。利用电磁感应原理设计的高速列车无线供电用装置,发射线圈铺设在两根铁轨之间,在 5 cm 的传输距离下,以 82.7% 的传输效率传送 818 kW 的功率<sup>[38]</sup>。同济大学利用磁耦合谐振原理设计了电动汽车的无线供电用装置,在 20 cm 的传输距离下,以 95% 的效率传输 3 kW 的功率<sup>[39]</sup>。韩国快捷半导体公司基于同样的研究,传输效率达到了 96.56%<sup>[40]</sup>。WiTricity 公司的高效能电动汽车充电系统的可扩展充电功率从 3.6 到 11 kW,能满足各种车辆的需求,从具有小容量电池组的混合动力汽车(PHEV)到具有高容量、远距离电池组的电动汽车(EV),全面覆盖<sup>[41]</sup>。

在医学领域的应用主要集中在生物医学植入设备领域,它最初用于为人造心脏提供动力,自此一直被广泛用于植入性装置<sup>[42-44]</sup>。通过体外与体内两个线圈之间的电磁耦合进行能量传输,主要有经皮能量传输和直接能量传输。无论是电磁感应式还是磁耦合谐振式,都要求植入体内的接收端尽可能小型化。

在军事领域,各军事强国在无线供电技术领域展开了广泛研究。由 WiTricity 公司展开研究的军用无线供电领域包括高科技军用系统的无线充电系统、基站对空中、陆地和水下无人设备的无线充电系统和多目标随遇接入无线充电系统等。其传输距离、传输效率和安全性等的不断改善,大大解决了信息化作中高能耗问题,数字化士兵和武器装备的持续作战和机动能力得到极大的提高<sup>[45-46]</sup>。

## 6 结语

无线供电因其非接触、方便快捷的优点必将得到广泛应用。其中基于磁场耦合的电磁感应式供电目前应用最为广泛,尤其适合小型、近距离供电产品。该供电方式在供电设备的发射端和接收端都要用到软磁片。这些软磁片不但要求材料的磁导率高、饱和磁通密度大、损耗低,还要求磁片的厚度薄,机械强度高。这无疑对材料研究者提出了更大的挑战。

## 参考文献:

- [1] Tesla N. The transmission of electrical energy without wires as a means for furthering peace[J]. *Electrical World and Engineer.*, 1905, (5): 21-24.
- [2] 张茂春,王进华,石亚伟. 无线电能传输技术综述[J]. *重庆工商大学学报(自然科学版)*, 2009, 26(5): 486-487.
- [3] 曹玲玲,陈乾宏,任小永. 电动汽车高效率无线充电技术的研究进展[J]. *电工技术学报*, 2012, 27(8): 1-13.
- [4] 寇宏,卓兰. 无线电能传输技术及 Qi 标准[J]. *信息技术与标准化*, 2018, (3): 51-52.
- [5] TDK Product Tech Notes [EB/OL]. [2018-12-29]. <https://product.tdk.com/info/en/products/wireless-charge/technote/tpo/index.html>.
- [6] 许佳辉,张瑞标,邵峰. 软磁材料开发应用新热点[J]. *磁性材料及器件*, 2014, 45(3): 68-80.
- [7] 刘刚,郑青玉,王德钊. 一种基于电磁感应的无线充电方法[J]. *北京信息科技大学学报*, 2013, 28(2): 51-54.
- [8] 张家乐,廖刚,王凡,等. 基于电磁感应的无线充电研究[J]. *实验科学与技术*, 2013, 11(6): 191-193.

- [9] Nakao F, Matsuo Y, Kitaoka M, et al. Ferrite core couplers for inductive chargers[C]//Proceedings of Power Conversion Conference, Japan, 2002: 850-854.
- [10] 杜成虎. 5 W 无线充电器用柔性隔磁片的制备及软件仿真研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2014. 1-67.
- [11] 林中冲, 林叶红, 彭希虹, 等. 铁氧体隔磁片在电磁感应式无线充电系统中的影响研究[J]. 福建师范大学学报, 2017, 32(5): 20-23.
- [12] Bi Z, Kan T, Mi C C, et al. A review of wireless power transfer for electric vehicles: prospects to enhance sustainable mobility [J]. Applied Energy, 2016, 179: 413-425.
- [13] 董生玉, 杜成虎, 孙蒋平, 等. 无线充电用软磁铁氧体材料[J]. 磁性材料及器件, 2012, 43(6): 58-60.
- [14] 万飞, 张继松. 浅谈无线充电技术及磁性材料在其中的应用[J]. 磁性材料及器件, 2014, 45(3): 73-74.
- [15] 刘富伟. MnZn 铁氧体磁片及其在无线充电系统中的应用研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2016. 1-70.
- [16] 姚可夫, 施凌翔, 陈双琴. 铁基软磁非晶/纳米晶合金研究进展及应用前景[J]. 物理学报, 2018, 67(1): (016101-1)-(016101-6).
- [17] 李智勇, 陈孝文, 张德芬. 非晶纳米晶软磁材料的发展及应用[J]. 金属功能材料, 2007, 14(4): 28-31.
- [18] Hitachi. Nanocrystalline Soft Magnetic Material FINEMET®[EB/OL]. (2016-4)[2018-12-29]. <http://www.hitachi-metals.co.jp/products/elec/tel/pdf/hl-fm-9-h.pdf>.
- [19] Hitachi Products [EB/OL]. [2018-12-29]. <http://www.hitachi-metals.co.jp/e/products/elec/tel/pdf/fine-met-sheet.pdf>.
- [20] 张瑞标, 朱小辉, 杜成虎, 等. 金属磁粉心的研究与发展[J]. 磁性材料及器件, 2011, 42(3): 1-3.
- [21] Zhou P H, Deng L J, Xie J L, et al. Effects of particle morphology and crystal structure on the microwave properties of flake-like nanocrystalline Fe<sub>2</sub>Co<sub>3</sub> particles [J]. J Alloys Compds, 2008, 448: 303-307.
- [22] 冯则坤, 李海华, 何华辉. 扁平金属磁性微粉的工艺与抗电磁干扰特性[J]. 磁性材料及器件, 2001, 32(4): 41-44.
- [23] 陈达谦, 陈磊. 精细陶瓷制备工艺与发展[J]. 陶瓷, 2002, (6): 9-13.
- [24] 李拓. MnZn 软磁铁氧体材料的制备[D]. 赣州: 江西理工大学, 2010. 1-51.
- [25] 徐雷. 流延法制备黑色氧化铝陶瓷基板工艺及其性能研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2006. 1-47.
- [26] 王科, 丘泰. 铁氧体基片流延成型工艺的研究进展[J]. 电子元件与材料, 2011, 30(1): 79-82.
- [27] 陈丹. 高旋磁性 NiCuZn 铁氧体流延厚膜研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2016. 1-70.
- [28] TDK Product Catalog [EB/OL]. [2018-12-29]. [https://product.tdk.com/info/zh/products/noise\\_magnet-sheet/noise\\_magnet-sheet/charge-nfc-low/catalog.html](https://product.tdk.com/info/zh/products/noise_magnet-sheet/noise_magnet-sheet/charge-nfc-low/catalog.html).
- [29] TOKIN Products Catalogs [EB/OL]. [2018-12-29]. [https://www.tokin.com/english/product/pdf\\_dl/flex.pdf](https://www.tokin.com/english/product/pdf_dl/flex.pdf).
- [30] DMEGC Product [EB/OL]. [2018-12-29]. [https://fericor.com/products/flexible\\_ferrite\\_sheet/fs\\_series/fs\\_for\\_wireless\\_charging/](https://fericor.com/products/flexible_ferrite_sheet/fs_series/fs_for_wireless_charging/).
- [31] TDG Products [EB/OL]. [2018-12-29]. <http://tdgcore.com/products.aspx?Typeld=27&Fld=3:27:3>.
- [32] AT&M Products [EB/OL]. [2018-12-29]. <http://www.atmcn.com/cpyfw/cpdh/fjnmjdc/fjnmjfm/fejningfmqj/2016/1214/3444.html>.
- [33] AT&M Products [EB/OL]. [2018-12-29]. <http://www.atmcn.com/cpyfw/cpdh/fjnmjdc/fjnmjfm/fejningfmqj/2016/1214/3461.html>.
- [34] AT&M Products [EB/OL]. [2018-12-29]. <http://www.atmcn.com/cpyfw/cpdh/fjnmjdc/fjnmjfm/fejningfmqj/2016/0326/3151.html>.
- [35] 汪义旺, 张波, 张帅. 基于太阳能供电的无线充电应用研究[J]. 电力电子技术, 2015, 49(10): 23-37.
- [36] 李杏, 杜哲益. 无线充电技术及其应用[J]. 集成电路应用, 2016, 33(12): 60-62.
- [37] WI-CHARGE Product Category [EB/OL]. [2018-12-29]. [http://www.wi-charge.com/product\\_category/oem-ready-embedded-wireless-power-modules/](http://www.wi-charge.com/product_category/oem-ready-embedded-wireless-power-modules/).
- [38] Kim J H, Lee B S, Lee J H, et al. Development of 1-MW Inductive power transfer system for a high-speed train [J]. IEEE Trans Ind Electron, 2015, 62( 10) : 6242-6250.
- [39] Wang Z, Wei X, Dai H. Design and Control of a 3 kW Wireless Power Transfer System for Electric Vehicles [J]. Energies, 2016, 9(1): 1-18.
- [40] Moon S C, Moon G W. Wireless power transfer system with an asymmetric four-coil resonator for electric vehicle battery chargers [J]. IEEE Trans Power Electron, 2016, 31(10): 6844-6854.
- [41] WiTricity Products [EB/OL]. [2018-12-29]. <http://witricity.com/products/automotive/>.
- [42] Jegadeesan R, Nag S, Agarwal K. Enabling Wireless powering and telemetry for peripheral nerve implants [J]. IEEE Biomed Health Inform, 2015, 19(3):958-969.
- [43] Yakovlev A, Jang J, Pivonka D, et al. An 11μW sub-pJ/bit reconfigurable transceiver for mm-sized wireless implants [J]. IEEE Trans Biomed Circuits Sys, 2013, 10(1): 1-4.
- [44] Ibrahim A, Meng M, Kiani M. A comprehensive comparative study on inductive and ultrasonic wireless power transmission to biomedical implants[J]. IEEE Sensors Journal, 2018, 18(9): 3813-3826.
- [45] 何川, 龚跃玲, 高帅. 无线能量传输技术在军事领域的应用[J]. 信息通讯, 2016, (2): 14-16.
- [46] Muhs J. Alleviating the battlefield battery burden with wireless power [J]. Military Embedded Systems, 2013, (11): 28-31.

作者简介: 杜瑞华(1997—), 女, 河南周口人, 学士, 研究方向为软磁材料及器件。