

# 羰基铁粉/FeSiBCCr 复合非晶磁粉芯的性能

池 强<sup>1,2</sup>, 谢 磊<sup>1</sup>, 常 良<sup>2</sup>, 李 强<sup>1</sup>, 董亚强<sup>2</sup>

1 新疆大学物理科学与技术学院, 乌鲁木齐 830046

2 中国科学院磁性材料与器件重点实验室, 浙江省磁性材料及其应用技术重点实验室, 中国科学院宁波材料技术与工程研究所, 宁波 315201

随着 5G 时代的到来, 数量庞大的基站建设对低损耗、高频特性、大功率软磁复合磁粉芯的需求不断增长, 同时, 宽禁带半导体技术的迅速发展对电子器件的小型化、高频化、高功率密度提出了更高的要求。然而, 几乎没有软磁材料能够满足第三代宽禁带半导体的外源环境要求, 这进一步制约了下一代电子器件的发展。为了满足发展需求, 本工作通过将具有高饱和磁化强度 ( $M_s$ ) 的羰基铁粉 (Carbonyl iron powder, CIP) 与水雾化 FeSiBCCr 微细非晶粉末复合, 成功制备了综合软磁性能优异的 FeSiBCCr 复合非晶磁粉芯。研究结果表明, 与没有复合 CIP 的 FeSiBCCr 非晶磁粉芯相比, 当 CIP 含量为 20% (质量分数, 下同) 时, FeSiBCCr 复合非晶磁粉芯的  $M_s$  提高到 160 emu/g 左右, 整体提高约 6.7%; 在 100 Oe 外加直流场下, FeSiBCCr 复合非晶磁粉芯的直流偏置性能达到 72%, 提高了 10.8%; 在 0.05 T @ 100 kHz 条件下, FeSiBCCr 复合非晶磁粉芯的损耗降低至 296 mW/cm<sup>3</sup>, 整体降低 11.6%; FeSiBCCr 复合非晶磁粉芯的有效磁导率和品质因数分别提高到 47.0 和 174, 提高了 14.6% 和 9.4%。通过复合不同含量的 CIP 制备的新型 FeSiBCCr 复合非晶磁粉芯具有高的饱和磁化强度、低的损耗和良好的直流偏置特性, 有望满足高频大电流器件的需要, 在高频电磁系统中具有良好的应用前景。

关键词 复合非晶磁粉芯 羰基铁粉 饱和磁化强度 损耗 直流偏置性能

中图分类号: TB331; TB31 文献标识码: A

## Study on the Properties of Carbonyl Iron Powder/FeSiBCCr Composite Amorphous Magnetic Powder Core

CHI Qiang<sup>1,2</sup>, XIE Lei<sup>1</sup>, CHANG Liang<sup>2</sup>, LI Qiang<sup>1</sup>, DONG Ya-qiang<sup>2</sup>

1 School of Physics Science and Technology, Xinjiang University, Urumqi 830046, China

2 Key Laboratory of Magnetic Materials and Devices, Zhejiang Province Key Laboratory of Laboratory of Magnetic Materials and Application Technology, Ningbo Institute of Materials Technology and Engineering, Chinese Academy of Sciences, Ningbo 315201, China

With the advent of the 5G era, the construction of a large number of base stations has an increasing demand for low loss, high frequency characteristics and high-power soft magnetic composite magnetic powder core. Meanwhile, the rapid development of wide band-gap semiconductor technology has put forward higher requirements for the miniaturization, high-frequency and high power density of electronic devices. However, few soft magnetic materials can meet the external environment requirements of third-generation wide band-gap semiconductors, which further restricts the development of next-generation electronic devices. In order to meet the development requirements, FeSiBCCr composite amorphous magnetic powder cores with excellent comprehensive soft magnetic properties were successfully prepared by compounding water-atomized FeSiBCCr fine amorphous powder with carbonyl iron powder (CIP) with high saturation magnetization ( $M_s$ ). The results show that, compared with FeSiBCCr amorphous magnetic powder cores without composite CIP,  $M_s$  of FeSiBCCr composite amorphous magnetic powder cores increase to about 160 emu/g when the CIP content is 20% (mass fraction, the same below), and the overall improvement is about 6.7%. Under 100 Oe external DC field, the DC-bias performance of FeSiBCCr composite amorphous magnetic cores reaches 72%, which is improved by 10.8%. Under the condition of 0.05 T @ 100 kHz, the core loss of FeSiBCCr composite amorphous magnetic powder core is reduced to 296 mW/cm<sup>3</sup>, and the overall decrease is 11.6%. The effective permeability and quality factor of FeSiBCCr composite amorphous magnetic powder cores are increased to 47.0 and 174, respectively, by 14.6% and 9.4%. The new FeSiBCCr composite amorphous magnetic powder cores with the different filling contents of CIP exhibit high  $M_s$ , low core loss and good DC-bias characteristics, which are expected to meet the needs of high-frequency and high-current devices, and thus have a good application prospect in high-frequency electromagnetic systems.

Key words composite amorphous magnetic powder cores, carbonyl iron powder, saturation magnetization, core loss, DC-bias performance

### 0 引言

软磁粉芯是由磁性颗粒、绝缘介质和随机分布的分散气隙组成的一种复合材料<sup>[1-3]</sup>, 其基本组成单元是经绝缘包覆的微细磁性颗粒, 可有效隔绝颗粒间的涡流。同时, 微细尺寸的磁性颗粒基体表面几乎不发生趋肤效应<sup>[4-6]</sup>, 高频稳定性良好, 可广泛应用于开关电源、PFC 电源、高频逆变器 etc 电子元器件中<sup>[7-8]</sup>。随着电子工业的发展, 电子产品趋向微型化, 因而对磁粉芯性能的要求也有提高。非晶磁粉芯 (Amorphous magnetic powder cores, AMPCs) 作为软磁粉芯家族中的一员, 具有高电阻率、高磁导率 ( $\mu_e$ )、高品质因数 ( $Q$ )、低损

耗 ( $P_{cv}$ ) 等综合的优良磁学性能。其中, 已报道的 FeSiBCCr 非晶磁粉芯具有频率稳定性好、高频、损耗低等特点<sup>[9]</sup>。这主要是由于在 FeSiBCCr 非晶合金中, 原子长程无序排列, 与对应的晶态合金相比, 电阻率显著提高, 矫顽力降低, 降低了非晶磁粉芯的磁滞损耗。另外, 通过对非晶粉末进行绝缘包覆处理, 可以有效降低涡流损耗, 使非晶磁粉芯整体上表现出较低的损耗。但是, 唯一不足的是, FeSiBCCr 非晶粉末的饱和磁化强度仅为 140 emu/g 左右, 使相应非晶磁粉芯的直流偏置特性较差, 在 100 Oe 外加直流偏置场下, 磁导率仅有未加磁场的 50%~52%, 不利于电子元器件的小型化和高效化, 同时也限制了其在交直流叠加电路中的应用<sup>[10]</sup>。

基金项目: 国家自然科学基金 (51601205; 51771161); 宁波市“科技创新 2025”重大专项 (2018B10031); 宁波市奉化区重大科技专项 (20194FHQ010015)

This work was financially supported by the National Natural Science Foundation of China (51601205, 51771161), Ningbo Major Special Projects of the Plan "Science and Technology Innovation 2025" (2018B10031), Major Science and Technology Project of Fenghua District of Ningbo (20194FHQ010015).

✉ qli@xju.edu.cn; dongyaq@nimte.ac.cn

10023

DOI: 10.11896/cldb.20040062

© 1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

解决这类问题的关键是开发出高饱和磁化强度的非晶成分<sup>[11-14]</sup>或者从生产工艺着手,复合高饱和磁化强度的其他金属粉末<sup>[15]</sup>。但是,目前大多数研究集中在单一软磁粉末上,通过多种软磁粉末复合来制备性能优良的软磁复合磁粉芯的研究较少。近期,科研人员发现,将两种或多种合金粉末采用不同比例混合,经包覆、冷压成型和热处理后制备的复合磁粉芯拥有更加优异的综合性能<sup>[16-19]</sup>。Chang等<sup>[16]</sup>采用FeSi粉末复合FeSiBPNb非晶粉末,Zhang等<sup>[17]</sup>通过FeCo粉末复合FeSiB-NbCu非晶粉末,所制备的非晶复合磁粉芯的性能均显著提高。因此,通过非晶软磁粉末中复合其他软磁粉末来提高非晶复合磁粉芯的性能成为这个领域的研究热点之一。

为了进一步提高FeSiBCCr非晶磁粉芯的软磁性能和直流偏置特性,本工作在水雾化FeSiBCCr非晶粉末中复合不同含量的高饱和磁化强度的羰基铁粉(CIP),并系统研究了CIP含量对CIP/FeSiBCCr非晶复合磁粉芯性能的影响。

### 1 实验

采用工业纯Fe、Si、Cr和预合金Fe-B及Fe-C作为原料,在纯氩气氛中通过感应熔炼法制备FeSiBCCr母合金。将母合金重熔后,采用水雾化法制备FeSiBCCr非晶粉末,水雾化压力为60 MPa。将制备的非晶粉末通过1 000目的标准筛筛分,获得微细非晶粉末。实验中所用的羰基铁粉(CIP)是江苏天一超细金属粉末有限公司生产的球形粉末。将不同质量分数的CIP与FeSiBCCr非晶粉末混合均匀后,添加2%的环氧树脂对复合粉末进行绝缘包覆处理。随后,采用冷压法将绝缘包覆后的复合粉末压制成外径为20.3 mm、内径为12.7 mm、高度为6 mm的环形磁粉芯,所采用的压强为1 800 MPa。最后,将制备的非晶复合磁粉芯在460 °C下热处理1 h,以去除制备过程中引入的内应力和局部缺陷。

采用德国Bruker公司的D8 Advance X射线衍射仪(XRD)来分析FeSiBCCr粉末和CIP粉末的相组成特征。采用德国ZEISS公司的EVO18型号扫描电子显微镜(SEM)观察

CIP和FeSiBCCr粉末的尺寸及形貌。利用美国Microtrac公司的S3500 specoal干湿两用微米级激光粒度仪分析CIP和FeSiBCCr粉末的粒度分布特征。采用美国Lakeshore公司的Lakeshore 7400型振动样品磁强计(VSM)测试样品的饱和磁化强度( $M_s$ )。根据样品的质量和尺寸计算其几何密度。用美国Agilent 4294A型阻抗分析仪测量样品在1 kHz~10 MHz之间的磁导率和品质因数。采用2335A型宽频分析仪测试样品在0.05 T 25 kHz、50 kHz、75 kHz和100 kHz条件下的损耗。采用TH 2828A型宽频LCR分析仪测试样品的直流偏置特性。

### 2 结果与分析

#### 2.1 FeSiBCCr非晶粉末和CIP的微观结构、表面形貌以及粒度分布

图1为水雾化FeSiBCCr非晶粉末和羰基铁粉的XRD图。从图1可以看到,采用水雾化法制备的FeSiBCCr微细粉末的XRD图显示出宽的漫散射峰,没有明显的晶化峰,呈现出典型的非晶结构特征。CIP的XRD图表现出尖锐的晶化峰,晶面指数分别为(110)、(200)和(211),是典型的 $\alpha$ -Fe的特征峰。

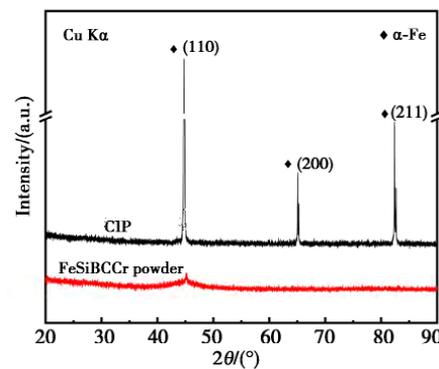


图1 水雾化FeSiBCCr非晶粉末和羰基铁粉的XRD图  
Fig.1 XRD patterns of the water-atomized FeSiBCCr amorphous powder and CIP powder

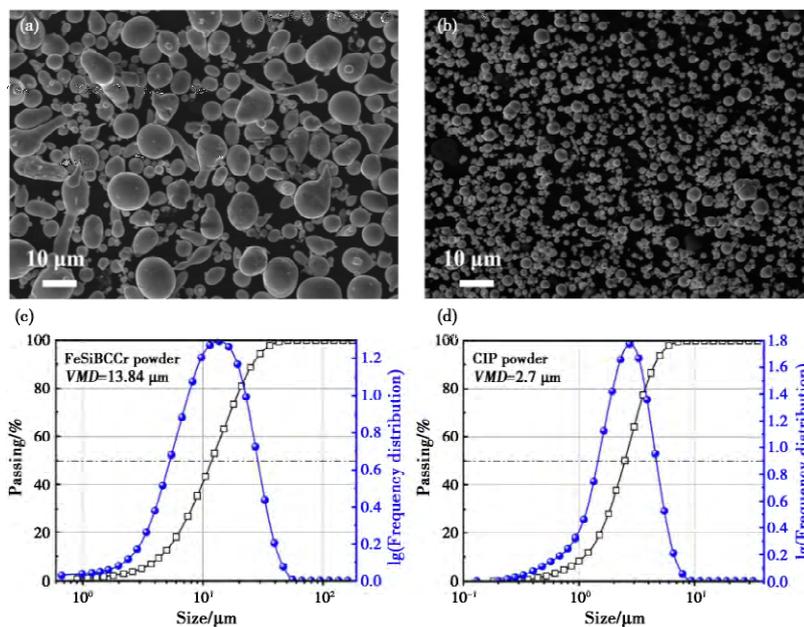


图2 (a) FeSiBCCr原始非晶粉末和(b) CIP的表面形貌;(c,d)分别是对应的粉末粒度分布情况  
Fig.2 The surface morphology of (a) FeSiBCCr raw amorphous powders and (b) CIP alloy powders; (c,d) show the size distribution of corresponding powders

图 2a、b 分别为水雾化 FeSiBCCr 非晶粉末和 CIP 的 SEM 照片。从图 2a 中可以看出,FeSiBCCr 微细非晶粉末表面整洁光滑,有较高的球型度,粒径分布较为均匀,但是仍然有部分纺锤形的颗粒存在,这将影响复合磁粉芯的压实密度。从图 2b 可以看到,CIP 的球型度明显更高,且表面光滑,粒度分布较为集中。两种粉末均没有尖锐的棱角,这为后续的绝缘处理、冷压成型以及高致密度的复合磁粉芯的制备提供了保障<sup>[20]</sup>。图 2c、d 分别是 FeSiBCCr 非晶粉末和 CIP 的粒径分布,可以明显看到,FeSiBCCr 粉末粒径分布较为均匀,其频度分布完全符合正态分布,粉末平均粒径  $VMD$  为  $13.84\ \mu\text{m}$ 。而 CIP 的粒径分布较为集中,频度分布也符合正态分布,粉末平均粒径仅有  $2.70\ \mu\text{m}$ 。在磁粉芯的冷压成型过程中,粒径细小的 CIP 颗粒可以填充到粒径较大的 FeSiBCCr 非晶粉

末的间隙中,可有效提高非晶复合磁粉芯的致密度,有利于提高磁粉芯的饱和磁化强度和磁导率<sup>[21-22]</sup>。

### 2.2 CIP/FeSiBCCr 复合非晶磁粉芯的性能分析

图 3 为复合不同含量 CIP 的 CIP/FeSiBCCr 非晶复合磁粉芯的磁化曲线。当 CIP 的含量为 100% 时,磁粉芯的  $M_s$  达到最大值,为  $202\ \text{emu/g}$ 。而未复合 CIP 时,FeSiBCCr 非晶磁粉芯的  $M_s$  仅为  $150\ \text{emu/g}$ 。因此,随着 CIP 含量的增加,非晶复合磁粉芯的  $M_s$  呈单调递增趋势。当 CIP 的含量从 0% 提高到 50% 时,复合磁粉芯的  $M_s$  由  $150\ \text{emu/g}$  增加到  $177\ \text{emu/g}$ 。同样,如预期的一样,复合磁粉芯的密度也表现出相同的趋势,具体见表 1。复合磁粉芯密度的提高主要归功于 CIP 含量的增加使得磁粉芯内部的分布式气隙减小以及 CIP 自身具有较大的密度。

表 1 不同含量 CIP 对应的非晶复合磁粉芯的软磁性能

Table 1 The soft magnetic properties of AMPCs with different content of CIP powder

CIP content/wt%	Density/( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	$M_s$ /( $\text{emu/g}$ )	$\mu_e$	$Q$	$P_{ev}$ at 100 kHz, 50 mT/( $\text{mW}/\text{cm}^3$ )	DC/%
0	5.87	150	41.7	159	335	65
10	6.20	155	46.0	167	303	68
20	6.40	160	47.0	174	296	72
30	6.50	163	46.2	163	305	76
40	6.59	171	45.0	162	318	79
50	6.73	177	44.8	160	332	82
100	6.77	202	31.0	134	539	95

图 3 左下角的插图显示了不同 CIP 含量的非晶复合磁粉芯的矫顽力。随着 CIP 含量的增加,非晶复合磁粉芯的矫顽力逐渐增加,这导致其磁滞损耗升高,不利于降低磁粉芯的损耗。因此,为了获得性能优异的 CIP/FeSiBCCr 非晶复合磁粉芯,应控制 CIP 的含量。

磁粉芯的磁导率在 2 MHz 范围内保持恒定,说明其频率稳定性优异,同时也表明复合粉末颗粒的绝缘包覆效果良好,因为当粉末颗粒间绝缘介质遭到破损后,其磁导率会明显下降<sup>[25]</sup>。

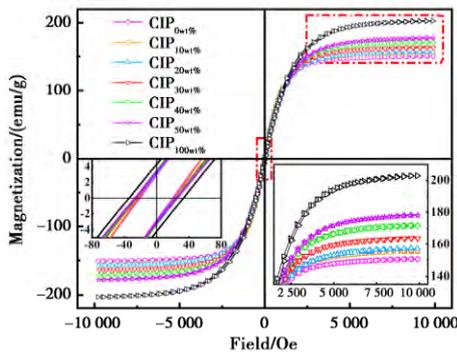


图 3 不同 CIP 含量的非晶复合磁粉芯的磁化曲线(电子版为彩图)

Fig.3 Hysteresis loops of AMPCs with different CIP contents

图 4 为不同 CIP 含量的 CIP/FeSiBCCr 非晶复合磁粉芯磁导率随频率的变化规律,可以发现,在相同频率条件下,随着 CIP 含量的增加,复合磁粉芯的磁导率呈现出先增加后减小的趋势。在 CIP 含量为 20% 时,复合磁粉芯的磁导率达到峰值 47.0。一般来说,磁导率取决于样品的密度、气隙以及内部缺陷<sup>[23]</sup>。当 CIP 含量为 0%~20% 时,磁导率的增加应该归因于复合磁粉芯密度的增加;而当 CIP 含量大于 20% 时,复合磁粉芯的磁导率下降可能是由于复合磁粉芯的气隙以及内部缺陷增加。这可能归因于大量超细 CIP 表面缺陷的引入<sup>[24]</sup>。虽然当 CIP 含量大于 20% 时复合磁粉芯的密度有所增加,但是不起主导作用。另外,随着频率的增加,复合

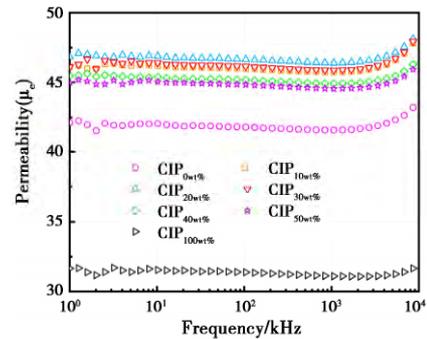


图 4 不同 CIP 含量的非晶复合磁粉芯磁导率随频率的变化规律(电子版为彩图)

Fig.4 Frequency dependence of the permeability of the AMPCs with different CIP contents

品质因数( $Q$ )是反映软磁材料在交变磁化过程中储能和能耗性能的重要物理量,在工程应用和物理研究中,品质因数是用来表征谐振器中心频率带宽的一个无量纲参数。图 5 给出了不同 CIP 含量的非晶复合磁粉芯品质因数随频率变化的关系。随着频率的增加,各样品的品质因数均呈现出先增加后减小的趋势。对于 CIP 含量为 0%~50% 的非晶复合磁粉芯,其品质因数均在 1 MHz 附近时达到峰值,说明其高频性能稳定,综合性能优异。随着 CIP 含量的增加,非晶复合磁粉芯的品质因数峰值先升高到最大值 174(20% CIP),随后下降至 134(100% CIP)。另外,研究表明,与未复合 CIP 的 FeSiBCCr 非晶磁粉芯相比,复合 CIP 后,磁粉芯的

品质因数均有向高频方向移动的趋势,这进一步反映出复合 CIP 有利于磁粉芯在高频条件下拥有更好的软磁性能。在高频条件下,品质因数反映的是磁粉芯的能耗大小。由  $Q = 1/P_{cv} \times \mu_i$  可知<sup>[26-27]</sup>,品质因数越大,复合磁粉芯在高频条件下的损耗越小,其中  $P_{cv}$  为复合粉芯的损耗,  $\mu_i$  为粉芯的初始磁导率。因此笔者可以推断出,复合 CIP 含量为 20% 的复合磁粉芯的损耗具有最低值。

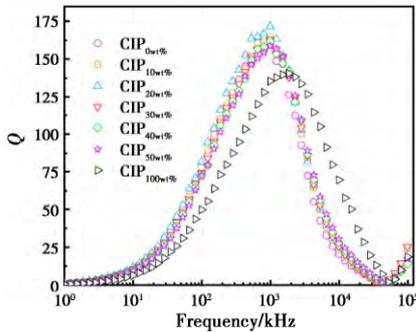


图 5 不同 CIP 含量的非晶复合磁粉芯的品质因数随频率变化的关系 (电子版为彩图)

Fig.5 Frequency dependence of the quality factor for the AMPCs with different CIP contents

图 6 显示了不同 CIP 含量的非晶复合磁粉芯损耗 ( $P_{cv}$ ) 随频率变化的规律。从图 6 可以发现,复合磁粉芯的损耗随着频率的增加呈递增趋势。这说明在交变磁场下,频率越高,自身电阻会使得复合磁粉芯的能量损失越来越高,尤其在高频下更为明显。此外,在同一频率下,复合磁粉芯的损耗随着 CIP 含量的增加先降低随后快速升高,当 CIP 含量为 20% 时,在 0.05 T@100 kHz 条件下,复合磁粉芯的损耗最低,仅为 296 mW/cm<sup>3</sup>。当 CIP 含量小于 20% 时,随着 CIP 含量的增加,复合磁粉芯的损耗呈现出降低的趋势。这主要是由于随着超细 CIP 颗粒含量的增加,非晶复合磁粉芯的整体粉末平均粒径减小,颗粒内部形成涡流的路径变小,导致总体损耗降低<sup>[28]</sup>。但是,当 CIP 含量增加到 50% 时,虽然小颗粒尺寸铁粉的含量增加,复合磁粉芯的涡流损耗降低,但是在较低频率下,由于复合粉末内部缺陷增加,其矫顽力增大,磁滞损耗也增大<sup>[29]</sup>,这一结论在复合粉末的磁滞回线(图 3)中已经得到印证。当 CIP 含量为 100% 时,复合磁粉芯的损耗恶化最为严重,达到最大值。因此,过量 CIP 的复合虽然会进一步提高磁粉芯的饱和磁化强度,但损耗会显著提高。为

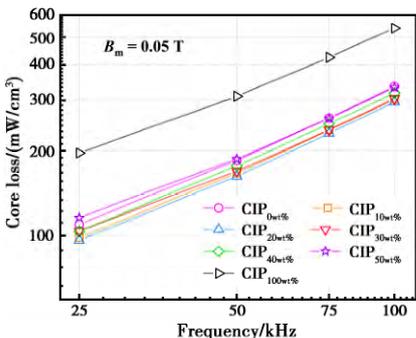


图 6 不同 CIP 含量的非晶复合磁粉芯的总体损耗随频率的变化关系

Fig.6 Frequency dependence of the core loss for the AMPCs with different CIP contents

了获得优异的综合软磁性能,应将 CIP 的添加量控制在 20% 以内。

图 7 显示了不同 CIP 含量的非晶复合磁粉芯磁导率变化百分比随直流偏置场的变化关系。从图 7 可以看出,随着 CIP 含量的增加,在同一直流偏置场下,复合磁粉芯的直流偏置性能逐渐提高。当直流偏置场为 100 Oe 时,随着 CIP 含量从 0% 增加到 50%,复合磁粉芯的直流偏置性能从最低值 65% 增加到 82%,说明复合 CIP 对提高非晶磁粉芯的直流偏置性能具有显著效果,这主要归因于 CIP 的不断填充使得复合磁粉芯的密度和  $M_s$  增加。同时,磁粉芯内部均匀的气隙数量大幅度增加,使得磁粉芯不易磁化到饱和状态,从而使直流偏置性能得到大幅度提高<sup>[30]</sup>。另外,直流偏置性能与磁化强度的变化  $\Delta B$  有很大关系,由  $\Delta B = B_s - B_r$  可知,  $B_s$  越大,  $\Delta B$  越大,这里  $B_s$ 、 $B_r$  分别为饱和磁感应强度和剩余磁感应强度<sup>[10, 31]</sup>。因此,由表 1 和图 3 可以确定,直流偏置性能的改善还归因于随 CIP 含量的增加,复合磁粉芯的饱和磁感应

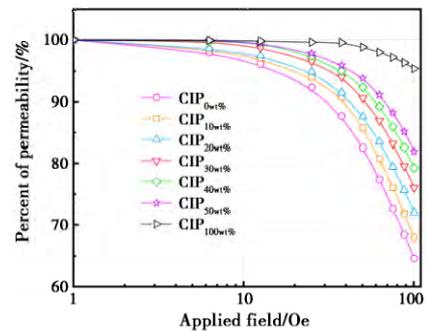


图 7 不同 CIP 含量的非晶复合磁粉芯的磁导率变化百分比随直流偏置场的变化关系 (电子版为彩图)

Fig.7 Variation of the percentage of permeability with DC bias field for the AMPCs with different CIP contents

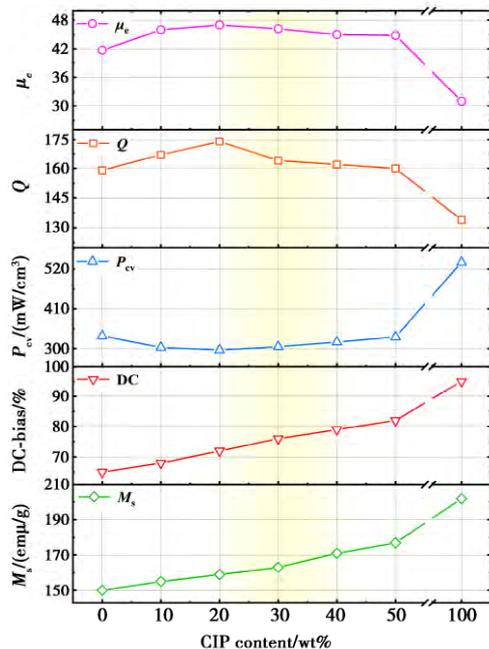


图 8 非晶复合磁粉芯的磁导率、质量因数、损耗、直流偏置和饱和磁化强度随 CIP 含量变化的规律

Fig.8 Permeability, quality factors, core loss, DC-bias and saturation magnetization of AMPCs as the function of the content of CIP

强度增加。结果表明,在非晶磁粉芯中复合一定量的 CIP,有利于提高直流偏置场下磁粉芯的磁导率,这意味着磁粉芯的直流偏置性能提高,使其在大的偏置场下更加不易达到饱和状态,有利于其在大电流工作环境下使用。

图 8 是非晶复合磁粉芯的磁导率、品质因数、损耗、直流偏置和饱和磁化强度等性能随 CIP 含量变化的规律。结合表 1 可知,不同 CIP 含量的复合磁粉芯的密度、饱和磁化强度以及直流偏置特性均为单调递增趋势,说明 CIP 填充含量越高,复合磁粉芯的性能越好。然而,复合磁粉芯的有效磁导率、品质因数以及损耗并不随 CIP 含量呈单调变化,均在 CIP 填充量为 20% 时表现出最佳的软磁性能。因此,通过平衡各项性能指标,笔者认为,CIP 的最佳复合含量为 20% 时非晶复合磁粉芯的综合软磁性能最佳。

### 3 结论

(1) 与未复合 CIP 相比,CIP/FeSiBCr 复合非晶磁粉芯的  $M_s$  和直流偏置性能分别为 160 emu/g、72% (100 Oe),分别提高了 6.7% 和 10.8%。

(2) 与未复合 CIP 相比,CIP/FeSiBCr 复合非晶磁粉芯的  $Q$  和  $P_{cv}$  分别为 174、296 mW/cm<sup>3</sup> (0.05 T@100 kHz),分别提高了 9.4%、11.6%。

(3) 在 2 MHz 范围内,CIP/FeSiBCr 复合非晶磁粉芯的  $\mu_e$  保持恒定值 47.0,显示了良好的高频稳定性。

(4) 随着 CIP 含量的增加,CIP/FeSiBCr 复合磁粉芯的  $M_s$ 、直流偏置性能以及密度均呈单调递增趋势。结果表明,复合 CIP 不仅能提高磁粉芯的直流偏置特性和  $M_s$ ,还可以进一步改善其他软磁性能,有助于实现器件的小型化和高效化,具有良好的应用前景。

### 参考文献

- 1 Taghvaei H, Shokrollahi H, Janghorban K, et al. *Materials & Design*, 2009, 30, 3989.
- 2 Shokrollahi H, Janghorban K. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2007, 317, 61.
- 3 Taghvaei A H, Shokrollahi H, Janghorban K. *Materials & Design*, 2010, 31, 142.
- 4 Zeng Z Y, Li Y M, He H, et al. *Materials Science & Engineering of Powder Metallurgy*, 2011, 16, 124.
- 5 Pošković E, Ferraris L, Franchini F, et al. *AIP Advance*, 2019, 9, 035224.
- 6 Xie X X, Lyu J W, Jin Z W, et al. *Thermal Spray Technology*, 2014, 6 (4), 71 (in Chinese).



**Qiang Chi** received his B. E. degree in materials science and engineering from the Taiyuan University of Science and Technology in 2017. He is currently pursuing his M. E. degree at the School of Physical Science and Technology, Xinjiang University, and a project student of Ningbo Institute of Materials Technology and Engineering, Chinese Academy of Sciences, under the supervision of Prof. Qiang Li and Senior Engineer Yaqiang Dong. His research has focused on amorphous nanocrystalline soft magnetic powder cores.

池强 2017 年 6 月毕业于太原科技大学,获得工学学士学位。现为新疆大学物理科学与技术学院硕士研究生,并在中国科学院宁波材料技术与工程研究所作课题生,在李强教授和董亚强高级工程师的指导下进行研究。目前主要研究领域为非晶纳米晶软磁粉芯。

- 7 Cui Y F, Zhou J, Xiao Y D, et al. *Materials Reports A: Review Papers*, 2010, 24 (1), 27 (in Chinese).
- 8 Li X T, Zhou S X, Kuang C J, et al. *Materials Reports*, 2018, 32(S2), 122 (in Chinese).
- 9 Zhou B, Chi Q, Dong Y Q, et al. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2020, 494, 165827.
- 10 Wang X Y, Lu C W, Guo F, et al. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2012, 324, 2727.
- 11 Wang A D, Zhao C L, Men H, et al. *Journal of Alloys and Compounds*, 2015, 630, 209.
- 12 Wang F, Inoue A, Han Y, et al. *Journal of Alloys and Compounds*, 2017, 723, 376.
- 13 Dong C, Inoue A, Wang X H, et al. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2018, 500, 173.
- 14 Wang F, Inoue A, Han Y, et al. *Journal of Alloys and Compounds*, 2017, 711, 132.
- 15 Chang L, Zhang Y Q, Dong Y Q, et al. *SN Applied Sciences*, 2019, 1, 902.
- 16 Chang C T, Guo J J, Li Q, et al. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, 788, 1177.
- 17 Zhang Y Q, Chi Q, Chang L, et al. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2020, 507, 166840.
- 18 Périco E A, Nakahara S, Pittini-Yamada Y, et al. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2011, 323, 1938.
- 19 Chen S F, Chen C Y, Cheng C S. *Journal of Alloys and Compounds*, 2015, 644, 17.
- 20 Shokrollahi H, Janghorban K. *Materials Science and Engineering: B*, 2006, 134, 41.
- 21 Suzuki T, Sharma P, Jiang L, et al. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2018, 54, 2801705.
- 22 Li T Y, Ding W T, Geng W B, et al. *Materials Reports*, 2018, 32(S1), 124 (in Chinese).
- 23 Li W C, Cai H W, Kang Y, et al. *Acta Materialia*, 2019, 167, 267.
- 24 Schubert D W, Werner S, Hahn I, et al. *Composites Science and Technology*, 2019, 177, 26.
- 25 Bai R R, Zhu Z H, Zhao H, et al. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2017, 433, 285.
- 26 Wang R W, Liu J, Wang Z, et al. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2012, 358, 200.
- 27 Manivel R M, Ponpandian N, Majumdar B, et al. *Materials Science and Engineering A*, 2001, 304, 1062.
- 28 Shen T D, Harms U, Schwarz R B. *Journal of Metastable and Nanocrystalline Materials*, 2002, 13, 441.
- 29 Li Q D, Guo J Y, Hu J, et al. *Materials Reports B: Research Papers*, 2017, 31(8), 26 (in Chinese).
- 30 Liu D, Chen X P, Ying Y, et al. *Ceramics International*, 2016, 42, 9152.
- 31 Li T, Dong Y Q, Liu L, et al. *Intermetallics*, 2018, 102, 101.

(责任编辑 杨 霞)



**Qiang Li** obtained his Ph.D. degree from the Chinese University of Hong Kong (CUHK). He has been teaching at Xinjiang University since 2005, and is currently a professor and doctoral supervisor of the Xinjiang University. In 2011—2012, he worked as a postdoctoral fellow at KNU (Kyungpook National University) in South Korea. He has published more than 50 academic journal papers, his team's research interests are the magnetothermal effect of metallic glass in the transition group metal base block, effect of preparation cooling rate on properties of amorphous Fe base block alloys, preparation and characterization of bulk amorphous alloys without vitrified forming elements, bulk magnetic nano-alloys were prepared by metastable liquid phase separation, preparation and characterization of ferromagnetic bulk amorphous alloys and so on. He presi-

ded over 5 scientific research projects of National Natural Science Foundation of China and won the second prize of Science and Technology Progress of autonomous region in 2017, ranking first. He has trained 1 doctor, over 40 masters and over 100 undergraduates.

李强, 新疆大学教授, 博士研究生导师。2002年香港中文大学博士毕业, 2005年在新疆大学任教至今, 其中2011—2012年在韩国庆北国立大学作博士后。在国内外学术期刊上发表学术论文50余篇, 其团队主要研究方向包括: 过渡族金属基块体金属玻璃磁热效应的研究; 制备冷速对Fe基块体非晶态合金性能的影响; 不添加玻璃化形成元素块体非晶合金的制备及性能表征; 通过亚稳液相分离机制制备块体磁性纳米合金; 铁基磁性块体非晶态合金的制备及性能表征。主持国家自然科学基金科研项目5项。获2017年度自治区科技进步二等奖一项, 排名第一。已培养博士1名、硕士40余名、本科生百余名。



Yaqiang Dong is a senior engineer and currently master supervisor of Ningbo Institute of Materials Technology and Engineering, Chinese Academy of Sciences. He has published more than 50 journal papers in internationally renowned academic journals, and has applied for 24 national invention patents, among which 6 have been authorized. The main research directions include: preparation technology of fine metal powder, preparation and application of amorphous nanocrystalline soft magnetic composites, development and application of amorphous nanocrystalline soft magnetic materials. As project director, he is in charge of the Youth Fund of the National Natural Science Foundation of China, the Science and Technology Service Network Plan, the Ningbo Major Special Projects of the Plan "Science and Technology Innovation 2025" and the Ningbo Municipal Nature Science Foundation. More than 10 postgraduate students have been trained together.

董亚强, 中国科学院宁波材料技术与工程研究所高级工程师, 硕士研究生导师。在国际知名学术期刊上发表SCI论文50余篇, 申报国家发明专利24项, 其中6项已授权。主要研究方向包括: 微细金属粉末制备技术; 非晶纳米晶软磁复合材料的制备及应用; 非晶纳米晶软磁材料的开发及应用。作为项目负责人, 主持国家自然科学基金青年基金、中科院科技网络服务计划项目(STS项目)、宁波市科技创新2025重大专项和宁波市自然科学基金等项目。已共同培养硕士研究生10余名。