

FeSiCr 合金粉与羰基铁粉及其在一体成型电感中的应用对比分析

聂敏, 谈敏, 黄静, 夏胜程

(深圳顺络电子股份有限公司, 广东深圳 518110)

摘要: 采用 FeSiCr 合金粉与羰基铁粉, 通过干压成型分别制作外径 8 mm 的磁芯环和尺寸为 4 mm 的一体成型电感, 并分别对比分析了 FeSiCr 合金粉与羰基铁粉磁芯环及一体成型电感的性能。试验结果表明, FeSiCr 材料具有更高的磁导率和品质因数 Q , 且防锈性能更优异, 但直流偏置特性相对较差。

关键词: FeSiCr 合金粉; 羰基铁粉; 一体成型电感; 磁导率; 直流偏置

中图分类号: TM55

文献标识码: A

文章编号: 1001-3830(2020)02-0047-04

DOI: 10.19594/j.cnki.09.19701.2020.02.011

Comparative analysis on FeSiCr alloy powder and carbonyl iron powder and their application in molding inductors

NIE Min, TAN Min, HUANG Jing, XIA Sheng-cheng

Shenzhen Sunlord Electronics Co, Ltd, Shenzhen 518110, China

Abstract: FeSiCr alloy powders and carbonyl iron powders are used to fabricate magnetic core rings with outer diameter of 8 mm and 4 mm molding inductors by dry pressing, and their properties are compared respectively. The test results show that, compared to carbonyl iron, FeSiCr material has higher permeability and quality factor Q , and better rust-proof performance, but lower DC bias.

Key words: FeSiCr alloy powder; carbonyl iron powder; molding inductors; permeability; DC bias

1 引言

汽车电子、互联网应用产品、移动通信、智慧家庭、5G、消费电子产品等领域成为中国电子元器件市场发展源源不断的动力, 带动了电子元器件的旺盛市场需求, 也加快电子元器件更新换代的速度, 当今科学技术的发展日新月异, 产品更新换代的速度也越来越快, 对电子产品不论是性能、体积还是外观都越来越“挑剔”, 电子产品逐渐向着体积越来越小、电路密度越来越高、传输速度越来越快的方向发展, 作为电子产品的重要组成部分, 新型电子元器件正向着片式化、微型化、高频化、宽频化、高精度化、集成化和绿色环保的方向发展。目前现有传统功率电感设计、生产、制造工艺面对 IC 厂家的更高需求, 需要进一步的迭代更新。这样的发展趋势必然导致功率电感产品尺寸进一步减小的同时,

要求具备较大电流、较低功耗的特点。

一体成型电感产品多采用羰基铁粉为材料, 羰基铁粉的特点为直流叠加特性好、材料成本低, 但其磁导率较低, 制作大感值电感时需要增加线圈匝数, 导致高直流电阻 R_{DC} 、高功耗的缺陷; 一体成型电感主要应用于一些 DC 模块、工控主板、显卡、平板电脑、笔记本电脑、车载设备、分配电源系统、LED 路灯设备、通讯设备、医疗设备等。

为了应对未来市场对该类电感的需求, 本文对一体成型电感的用材进行了一些探索, 主要研究材料的磁导率、品质因数 Q 值、饱和特性、功耗等方面的性能对于一体成型电感性能的影响。

2 实验方法

2.1 粉料制作

采用羰基铁粉和 FeSiCr 两种材料进行对比; 其

收稿日期: 2019-02-25 修回日期: 2019-04-29

通讯作者: 聂敏 E-mail: min_nie@sunlordinc.com

中羰基铁粉 D_{50} 为 $6.0\ \mu\text{m}$ ，FeSiCr 粉料采用 FeSi_{3.5}Cr_{4.5}，材料粒度 D_{50} 为 $15\ \mu\text{m}$ ，FeSiCr 粉料中添加适量 D_{50} 为 $3\ \mu\text{m}$ 的同类型粉料进行级配，其中 FeSiCr 粉末级配后在氮气气氛 $600\ ^\circ\text{C}$ 下处理 2 h。将粉料与粘结剂溶液、脱模剂溶液按 92:7:1 比例混合，将粉料在研钵在中反复混合搅拌，混合完成后将粉料放入烘箱中烘干；烘干后将粉料过 80~240 目筛。将造粒后的粉料分别放入同一台干压机中，模压为外径 8 mm、内径 5 mm、高度 2 mm 磁芯环，成型压力为 300 MPa、500 MPa、700 MPa，得到磁芯环坯体后分别进行热处理。

采用扫描电镜观察磁芯环断面结构，采用 WK3260B 精密分析仪测量绕线磁芯环电感量 L_s 及品质因数 Q (用直径 0.4 mm 的漆包铜线绕磁芯环 26 匝，留 15 mm 尾线，以便引出测试)，测试频率为 100 kHz，再由电感量 L_s 按下式计算磁导率 μ_i ：

$$\mu_i = \frac{L_s l_c}{4\pi N^2 A_e} \quad (1)$$

其中 L_s 为电感(采用 WK3260B 型测试仪器在 1 V/100 kHz 条件下测得)， l_c 为磁路长度， N 为线圈的匝数， A_e 为磁路的有效截面积。制得的磁芯环分别使用 SY-8218 型 B-H 分析仪，在磁感应强度 B 为 100 mT，频率分别为 100 kHz、500 kHz、1 MHz，温度分别为 $25\ ^\circ\text{C}$ 和 $100\ ^\circ\text{C}$ 条件下，测试磁芯环的体积功耗。采用布鲁克 VEGA3 扫描电子显微镜观察对应材料压制磁芯环的微观结构。

2.2 电感制作

分别利用羰基铁粉和 FeSiCr 两种材料制作电感量相同的 R47 电感进行对比分析。采用 WK3260B 精密分析仪测量无直流偏置和 10 A 直流偏置下的电感量，测试条件 100 kHz/1 V，测试温度 $25\ ^\circ\text{C}$ 、 $100\ ^\circ\text{C}$ 、 $125\ ^\circ\text{C}$ ，计算出偏置后电感量变化 X 。制得一体成型电感在盐雾试验箱内经过 48 h 的盐雾(温度 $35\ ^\circ\text{C}$ ，氯化钠浓度 5%)试验后，确认外观变化情况，验证产品的耐候性。

3 结果与分析

3.1 磁导率

两种材料在不同的压制压力下的磁芯环磁导率如图 1 所示；羰基铁粉和 FeSiCr 粉末微观形貌如图 2 所示。羰基铁粉和 FeSiCr 粉料的磁芯环磁导率随着压制压强的增大而增大，当压制压力达到 500 MPa

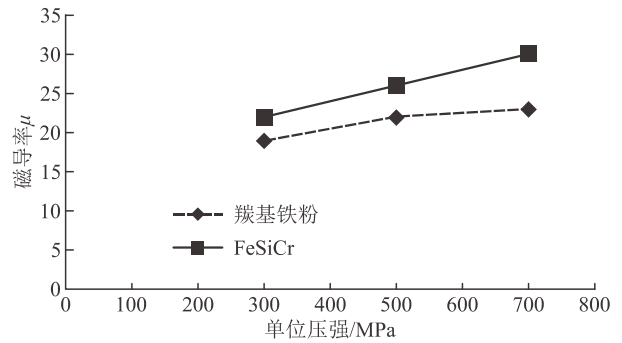


图 1 FeSiCr 和羰基铁粉磁芯环磁导率随压制压力的变化

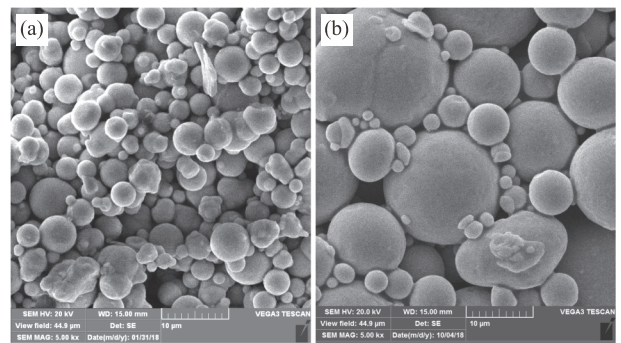


图 2 粉末微观形貌：(a) 羰基铁粉，(b) FeSiCr 粉末

后，羰基铁粉的磁导率曲线基本平行于压强轴，FeSiCr 的磁导率曲线仍然在上升。软磁材料的磁导率与密度成正比，羰基铁粉在 500 MPa 前材料密度提升明显且已填充空隙为主，材料磁导率显著提升，500 MPa 后材料主要发生塑性变形，材料密度未发生显著变化。FeSiCr 材料可能因采用级配后细粉通过位移重排填充大颗粒间的间隙，所以在 500 MPa 后依旧呈现上升趋势。材料的磁导率与压力的变化关系，可以由成型压力引起的材料内部的分布气隙改变以及粉末绝缘的改变得到解释，成型压力升高，材料密度增高，从而减小内部的分布气隙，而材料的磁导率与其内部分布气隙有密切关系，气隙越大，磁导率越小^[1]。如图 2 所示，FeSiCr 材料的粒度在 $10\ \mu\text{m}$ 左右，且内部有小颗粒填充内部空隙，颗粒间的空隙少；羰基铁粉的粒度在 $6\ \mu\text{m}$ 左右，颗粒均匀，颗粒间有大量的空隙存在。FeSiCr 材料的磁导率显著高于羰基铁粉，主要可能是一方面 FeSiCr 材料的粒度较大，比表面积越小，界面越少，磁粉间的空隙越少，磁粉心的密度就越高，磁导率也越高^[2]。另一方面 FeSiCr 材料经过大小颗粒配比后，粉末的填充体积增大，粉末颗粒间间隙减小，空隙对于畴壁运动的不可逆移动的阻碍作用减小，更有利于畴壁的运动，因而有效磁导率提高^[3]。

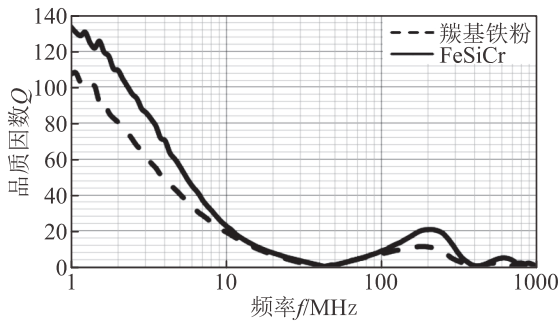


图3 磁芯环的 Q - f 曲线

3.2 Q 值的频谱特性

两种粉料压制的磁芯环的 Q 值与频率 f 的关系如图 3 所示。频谱的测试范围为 1 MHz~1 GHz, 测试电性参数 Q , 通过频谱曲线的对比可以看出, FeSiCr 样品的品质因数高于羰基铁粉; Q 值越高, 其储能与耗能比值越高, 材料储能特性越好。 Q 值的影响因素有二, 其一是 FeSiCr 材料的磁导率高, L 值大; 且涡流损耗与电阻率成反比, 涡流损耗越低进而 Q 值越大^[4]。 FeSiCr 材料随着 Si 元素含量提高, 材料电阻率也随之提高, 从而降低材料在高频下的损耗, 从而有较高的 Q 值; Cr 元素在一定条件下于颗粒表面形成绝缘层进一步提升材料的绝缘从而降低高频下的涡流损耗, 而羰基材料内部晶粒间无绝缘, 在颗粒外表面包覆有绝缘层, 效果较 FeSiCr 材料差, 但随着涡流损耗的降低磁滞损耗也有一定幅度的上升, 磁滞损耗对于 Q 值的影响较小。其二, FeSiCr 材料在使用前经过退火处理。经过退火处理后, 材料的结构更加紧密, 内应力得到释放, 从而促进磁畴转动, 且退火温度越高, 应力释放越充分, 品质因数 Q 值越大^[5]。

3.3 直流偏置特性

在 1 V/100 kHz 测试条件下, 采用 WK3260B 电性测试仪器对磁芯环进行饱和和特性测试, 磁芯环的电感值随电流的变化如图 4 所示, 可知 FeSiCr 磁芯环在电流叠加为 12 A 时, 电感下降了 26.7%, 羰基铁粉电感的电感量下降了 16.96%, 因器件的直流偏置性能主要由材料的饱和磁化强度 M_s 以及材料中的气隙率决定。其中材料的饱和磁化强度 M_s 主要由材料的成分和密度决定^[6], 材料的气隙率主要由材料的成型密度决定。 FeSiCr 材料中的 Si 和 Cr 是非磁性相, 相对于羰基铁粉的饱和磁化强度 M_s 低, 且 FeSiCr 材料电感中气隙率要低于羰基铁粉电感, 因此在一定的成分和密度下羰基铁粉电感的直流偏置性能要

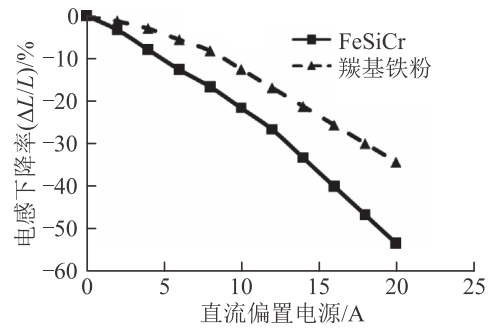


图4 两种磁芯环电感量随叠加直流的变化

优于 FeSiCr 材料的电感。

3.4 功耗

两种磁芯环的体积功耗如图 5 所示。对比发现 100 kHz 下 FeSiCr 磁芯环的体积功耗相比羰基铁粉磁芯环的下降了 60%; 因为材料的损耗主要由磁滞损耗和涡流损耗构成。磁滞损耗主要取决于材料的内部结构和成分, 而涡流损耗主要取决于材料的电阻率和粒径, 且与电阻率的大小成反比^[7]。羰基铁粉材料的主要成份为 Fe, 材料电阻率低, 所以其功耗高; FeSiCr 材料因内部有 Si 的存在故材料电阻率大, 且含有 Cr 会在表面形成氧化膜进一步提升材料的电阻率, 涡流损耗随之降低。

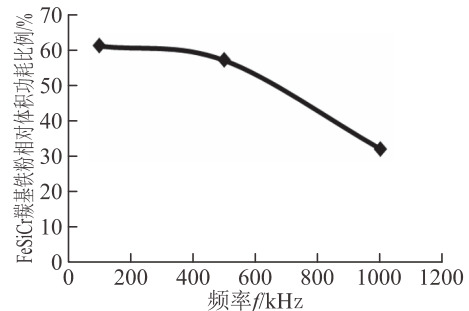


图5 FeSiCr 磁芯环/羰基铁粉磁芯环的相对功耗下降率

3.5 电感基本性能

FeSiCr 合金和羰基铁粉一体成型电感的性能对比如表 1 所示。可以看出 FeSiCr 合金一体成型电感材料的磁导率高所以需要的线圈匝数更少, 电感的直流电阻 R_{DC} 越低。 而一体成型电感材料的直流偏置性能取决于材料的饱和磁化强度 M_s , 而 FeSiCr 合金材料的饱和磁化强度 M_s 要低于羰基铁粉, 因此体现在一体成型电感上的直流偏置性能也较差。

表 1 FeSiCr 和羰基铁粉一体成型电感(4020R47)性能对比

材料	电感值/ μ H	R_{DC} /m Ω (典型值)	饱和电流/A(典型值)
FeSiCr 合金	0.48	20	8
羰基铁粉	0.43	25	10

3.6 电感盐雾试验

FeSiCr 材料和羰基铁粉材料制作的一体成型电感 48 h 的盐雾(温度 35 ℃, 氯化钠浓度 5 %)试验后的外观如图 6 所示。可以明显看出 48 h 后羰基铁粉电感表面有明显的铁锈产生, 而 FeSiCr 电感未发现

明显的锈迹, 主要原因是羰基铁粉表面主要以磷化层为主, 磷化层一般呈现多孔状态, 在严酷条件下耐腐蚀能力有限^[8], 而 FeSiCr 材料中的 Cr 元素在特定条件下会在表面富积氧化铬膜层, 在盐雾试验后外观没有变化。

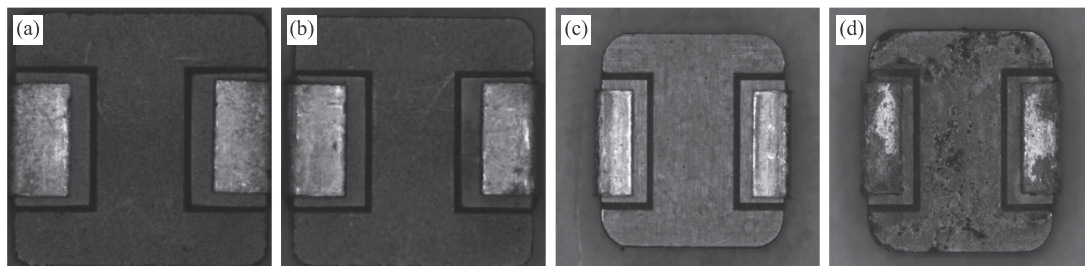


图 7 盐雾试验后器件外观: (a) FeSiCr 器件, 试验前; (b) FeSiCr 器件, 试验后; (c) 羰基铁器件, 试验前; (d) 羰基铁器件, 试验后

4 结论

(1) 羰基铁粉的粒度较小, 磁粉间的空隙较多, 颗粒表面电阻率小, 材料的磁导率较低, 对应的电感器电感值较小, Q 值较小, 损耗较高, 直流偏置特性较好, 防锈性能较差。

(2) FeSiCr 材料的粒度较大, 磁粉间的空隙较少, 颗粒表面电阻率高, 材料的磁导率较高, 对应的电感器电感值较高, Q 值较高, 损耗较低, 直流偏置特性较差, 防锈性能较好。

参考文献:

[1] 王贺. FeSiAl 磁粉芯制备及性能研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2008.

[2] 金丹, 孙可为, 姚燕燕, 等. 铁硅铝磁粉芯磁导率的研究[J]. 热加工工艺, 2011, 40(14): 87-88.

[3] 魏鼎, 刘善宜, 祝家贵, 等. 铁硅铝粉末制备及配比对磁粉芯性能的影响[J]. 磁性材料及器件, 2014, 45(3): 29-31.

[4] 金丹, 孙可为, 田晓珍, 等. 制备工艺对铁硅铝磁粉芯品质因数的影响[J]. 热加工工艺, 2011, 40(10): 104.

[5] 李水泉. FeSiAl 磁粉芯的制备及性能研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2014.

[6] 赵定武. FeSiAl 磁粉 Cr/Mn 合金化及其表面处理工艺和磁粉芯性能研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2015.

[7] 刘昌砥, 王鲜, 冯则坤, 等. Fe-Cr-Si-B 非晶磁粉芯的制备与磁性能研究[J]. 电子元件与材料, 2010, 29(11): 45-47.

[8] 周元康, 彭子梅. 磷化层高温耐腐蚀的研究[J]. 材料保护, 2004, 37(4): 40-41.

[9] 王贺. FeSiAl 磁粉芯制备及性能研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2008.

[10] Kundrata J, Barić A. Comparison of electrical and electromagnetic properties of a planar inductor[C]//Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO), 2015 38th International Convention on. IEEE, 2015: 83-86.

[11] 金丹, 孙可为, 田晓珍, 等. 制备工艺对铁硅铝磁粉芯品质因数的影响[J]. 热加工工艺, 2011, 40(10): 104.

[12] 李水泉. FeSiAl 磁粉芯的制备及性能研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2014.

[13] 赵定武. FeSiAl 磁粉 Cr/Mn 合金化及其表面处理工艺和磁粉芯性能研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2015.

[14] 刘昌砥, 王鲜, 冯则坤, 等. Fe-Cr-Si-B 非晶磁粉芯的制备与磁性能研究[J]. 电子元件与材料, 2010, 29(11): 45-47.

[15] 周元康, 彭子梅. 磷化层高温耐腐蚀的研究[J]. 材料保护, 2004, 37(4): 40-41.

作者简介: 聂 敏(1980-), 男, 湖南省邵阳市人, 工学硕士, 高级工程师, 2005 年 12 月毕业于日本国立丰桥技术科学大学生工学系, 主要从事高性能电子陶瓷材料的研发及管理工作。

[11] 任重, 谭秋林, 蔡婷, 等. 基于氧化铝陶瓷的耐高温平面螺旋电感的制备及测试[J]. 电子元件与材料, 2014, 33(10): 55-58.

[12] 陈雪芳, 程东方, 杨文荣. 硅衬底 CMOS 射频集成电路中金属厚度对平面螺旋电感 Q 值的影响[J]. 上海大学学报(自然科学版), 2005, 11(5): 455-459.

[13] Ammouri A, Salah W B, Khachroumi S, et al. Development of a physically-based planar inductors VHDL-AMS model for integrated power converter design [J]. Euro Phys J-App Phys, 2014, 66(2): ?-?.

[14] Ammouri A, Belloumi H, Salah T B, et al. Experimental analysis of planar spiral inductors[C]//Electrical Sciences and Technologies in Maghreb (CISTEM), 2014 International Conference on. IEEE, 2014: 1-5.

作者简介: 李秀山(1986-), 男, 山西静乐人, 博士, 研究方向为电子元件。

(上接 38 页)

