

# 内部润滑剂对铁硅铝磁粉芯性能的影响

林晓军

(优磁(厦门)电子有限公司, 福建厦门 361000)

**摘要:** 以合成蜡粉作为内部润滑剂制备铁硅铝磁粉芯, 考察了蜡粉添加量及粒度对铁硅铝磁粉芯性能的影响。结果表明, 蜡粉会降低铁硅铝磁粉芯的生坯密度、磁导率和磁芯损耗; 蜡粉粒度越细, 则生坯密度和磁导率的降低幅度越小, 而磁芯损耗的降低幅度越大。在添加 0.4 wt% 磷酸的绝缘粉中添加 1.4 % 的 -300~+400 目蜡粉, 制得磁导率 91.5、磁芯损耗  $600 \text{ mW/cm}^3$ 、直流偏置性能为  $23.1 \text{ Oe}(@ 80 \% L)$  和  $56.2 \text{ Oe}(@ 50 \% L)$  的铁硅铝磁粉芯。

**关键词:** 铁硅铝磁粉芯; 内部润滑剂; 蜡粉; 磁导率; 磁芯损耗

中图分类号: TM271<sup>†</sup>.2

文献标识码: A

文章编号: 1001-3830(2020)01-0018-04

DOI: 10.19594/j.cnki.09.19701.2020.01.005

## Effects of internal lubricants on the properties of Fe-Si-Al magnetic powder cores

LIN Xiao-jun

*Youci (Xiamen) Electronics Co, Ltd, Xiamen 361000, China*

**Abstract:** The Fe-Si-Al magnetic powder cores were prepared by using the synthetic wax powder (hereinafter referred to as wax powder) as an internal lubricant. The effects of the wax powder content and the particle size on the properties of the Fe-Si-Al magnetic powder core were investigated. The results show that the wax powder reduces the green density, permeability and core loss of the Fe-Si-Al magnetic powder core. The finer the wax powder was, the lower the reduction of green density and the permeability were, and the greater the reduction of the core loss was. By adding 1.4 % of the -300~+400 mesh wax powder into the insulating powder A, the Fe-Si-Al magnetic powder core with permeability of 91.2, core loss of  $600 \text{ mW/cm}^3$ , DC bias  $23.1 \text{ Oe} @ 80 \% L$  and  $56.2 \text{ Oe} @ 50 \% L$  was prepared.

**Key words:** Fe-Si-Al magnetic powder core; internal lubricant; wax powder; permeability; core loss

## 1 引言

铁硅铝磁粉芯是一种以铁硅铝粉为原料, 经绝缘包覆、压制、退火等工序制备而成的具有分布式气隙的金属软磁材料, 广泛应用于开关电源电感、滤波电感、功率因数校正电感、反激式变压器和其它脉冲变压器。目前关于铁硅铝磁粉芯的研究较多集中在绝缘包覆剂的开发及包覆工艺的优化方面<sup>[1-5]</sup>, 而关于铁硅铝磁粉芯其它制备工序中所使用的外加剂的研究却较少。内部润滑剂是铁硅铝磁粉芯压制工序中常用的一类帮助脱模的外加剂, 已有研究表明, 混合硬脂酸锌和聚乙烯醇作为温压内部润滑剂会影响铁硅铝磁粉芯的性能<sup>[6]</sup>。内部润滑剂的种类很多, 其粒度、混料工艺等因素也都有可能影响

铁硅铝磁粉芯的性能。特别地, 目前尚未见到关于内部润滑剂粒度对磁粉芯性能影响的研究。本实验在铁硅铝磁粉芯制备过程中, 以合成蜡粉作为内部润滑剂, 研究了蜡粉添加量及粒度对铁硅铝磁粉芯生坯密度、磁导率和磁芯损耗的影响, 为优化铁硅铝磁粉芯制备工艺提供理论数据, 并探讨了磁导率为  $90 \pm 7.2$  的铁硅铝磁粉芯的制备。

## 2 实验

### 2.1 原料

铁硅铝粉, 含 Fe 85 %、Si 9.5 %、Al 5.5 %, 其粒度分布见表 1, 微观形貌呈带有棱角的不规则形状, 如图 1 所示, 是典型的破碎铁硅铝。合成蜡粉, 原粒度为 -150 目, 将其筛分出 -150~+200 目、-200~

收稿日期: 2018-11-02 修回日期: 2019-01-20

通讯作者: 林晓军 E-mail: jun3606@163.com

表1 铁硅铝粉粒度分布

| 筛分粒度分布 |            |            |            |       | 中位粒度<br>$D_{50}$   |
|--------|------------|------------|------------|-------|--------------------|
| +150目  | -150~+200目 | -200~+300目 | -300~+400目 | -400目 |                    |
| 0.04%  | 8.62%      | 48.24%     | 20.7%      | 22.4% | 65.9 $\mu\text{m}$ |

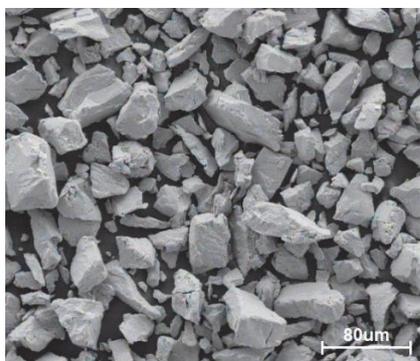


图1 铁硅铝粉形貌

+250目、-250目~+300目、-300~+400目四种粒度级别。自制磷酸药水。

## 2.2 绝缘粉末制备

取三份铁硅铝粉，分别加入 0.4 wt%、1.7 wt% 和 3.2 wt% 磷酸药水进行反应，以在颗粒表面包覆一层磷酸盐绝缘层，加热搅拌至干燥，制得绝缘粉，分别编号 A、C 和 B。磷酸盐绝缘层可以阻隔颗粒间的涡流，降低磁粉芯涡流损耗，改善交流性能。有研究表明<sup>[7]</sup>，铁硅铝表面的磷酸盐层厚度随磷酸药水上用量的增加而变厚。

在 A 和 B 中分别添加不同粒度级别的蜡粉，并在混料机上混合均匀。图 2 是添加原-150 目蜡粉后，绝缘粉松装密度随混料时间的变化。由图可见，混料开始后，A 和 B 的松装密度均先随混料时间的延长而下降，至 15 min 后二者的松装密度趋于不变，表明混料 15 min 后，蜡粉和绝缘粉混合均匀。

## 2.3 磁粉芯制备

在 1800 MPa 下压制外径 26.9 mm、内径 14.7

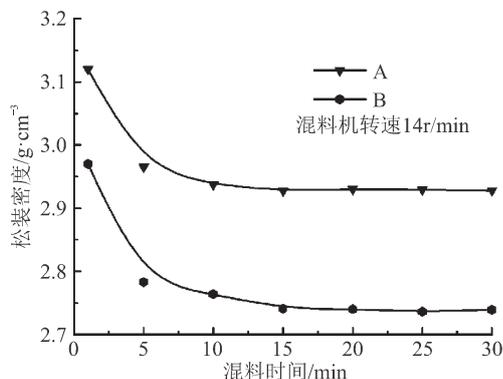


图2 添加 2 wt% 蜡粉的样品混料时间和松装密度的关系

mm 和高度 11.2 mm 的磁粉芯样品，并在 650 °C 氮气保护下退火 30 min。

## 2.4 测试

利用阿基米德排水法测试压制后的生坯密度；用 HP4284ALCR 测试仪测量磁粉芯样品在行业内经常使用的 100 kHz 频率下的电感和直流偏置性能，并由下式计算出磁粉芯的磁导率：

$$\mu_e = \frac{L \cdot l_e}{N^2 \cdot \mu_0 \cdot A_e} \quad (1)$$

式中， $L$  为电感(H)， $l_e$  为有效磁路长度(m)， $N$  为匝数， $A_e$  为有效截面积(m<sup>2</sup>)， $\mu_0$  为真空磁导率。用 WT3000 功率分析仪测量磁粉芯样品的磁芯损耗。

## 3 结果与讨论

### 3.1 蜡粉添加量对压坯密度的影响

图 3 是分别添加四种不同粒度级别的蜡粉时，样品 A 和 B 的压坯密度随蜡粉添加量的变化。由图可见，在无添加蜡粉时，A 和 B 的压坯密度最高，分别为 5.76 g/cm<sup>3</sup> 和 5.74 g/cm<sup>3</sup>。添加蜡粉后，压坯密度均随蜡粉添加量的增加而降低。这是由于随着蜡粉添加量的增加，颗粒表面蜡膜厚度增大，导致压坯密度降低。通常地，压制过程中，铁硅铝颗粒通过受压重排和塑性变形，来实现压坯致密化<sup>[8]</sup>。有研究<sup>[6]</sup>报道少量润滑剂可使压坯密度增大，但在本实

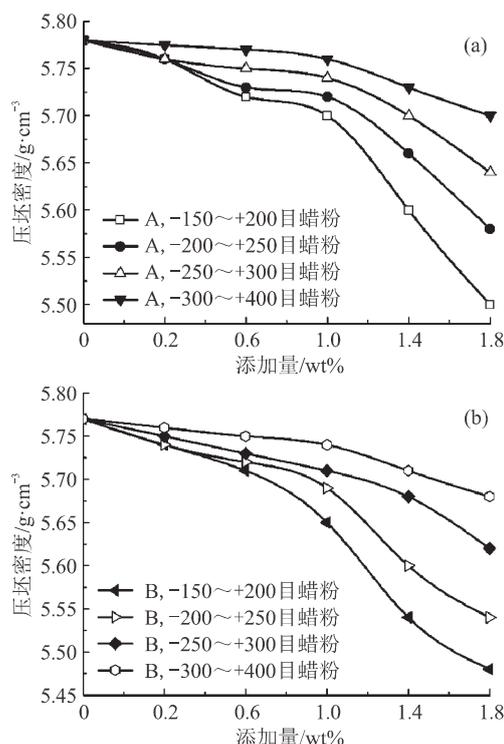


图3 蜡粉对压坯密度的影响：(a)样品 A，(b)样品 B

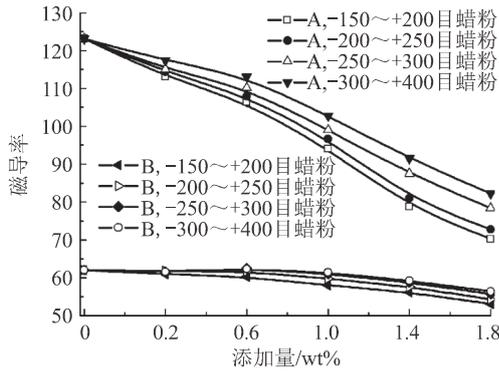


图 4 蜡粉添加量对磁导率的影响

验中未有发现，其原因可能在于蜡粉容易粘附在铁硅铝颗粒间而起“搭桥”作用，不利于铁硅铝颗粒的重排及致密化。

蜡粉的粒度也是影响压坯密度的重要因素。由图 3 可见，添加等量蜡粉时，蜡粉粒度越细，则压坯密度越高。细蜡粉颗粒更容易填充在大的铁硅铝颗粒间，对颗粒重排的空间位阻作用较小，有利于形成相对较高的压坯密度。

### 3.2 蜡粉添加量对磁粉芯磁导率的影响

图 4 是分别添加四种不同粒度级别的蜡粉时，由 A 和 B 所制得磁粉芯的磁导率随蜡粉添加量的变化。由图可见，在无添加蜡粉时，A 和 B 所制得磁粉芯磁导率分别为 123.2 和 62.0。与 B 相比，A 的磷酸药水用量较少，磷酸盐绝缘层较薄，因此制得的磁粉芯磁导率较高<sup>[9]</sup>。添加蜡粉后，A 和 B 所制得磁粉芯磁导率随着蜡粉添加量的增加而下降，且蜡粉越粗，该降幅越大。蜡粉的引入会降低磁粉芯密度，增大磁粉芯分布气隙，使磁粉芯磁导率下降，所添加蜡粉粒度越粗，则气隙越大，因此磁导率降幅越大<sup>[10]</sup>。由图 4 可见，当添加 1.8% 的 -150~+200 目蜡粉时，A 和 B 所制得磁粉芯磁导率分别从无添加蜡粉时的 123.2 和 62.0 下降至 70.2 和 53.1，对应下降幅度分别为 43.2% 和 14.4%；而当添加 1.8% 的 -300~+400 目蜡粉时，A 和 B 所制得磁粉芯的磁导率分别从无添加蜡粉时的 123.2 和 62.0 下降至 82.3 和 56.4，对应下降幅度分别为 33.2% 和 9.0%。

A 和 B 所制磁粉芯的磁导率受蜡粉影响的程度不同。由图 4 可见，添加相同粒度级别的蜡粉时，随添加量的增加，由 A 所制磁粉芯磁导率的下降幅度大于 B。由 A 所制得磁粉芯内部的磷酸盐绝缘层较薄，气隙较小，因此少量蜡粉所引入的气隙也足以使磁导率发生较大幅度下降。

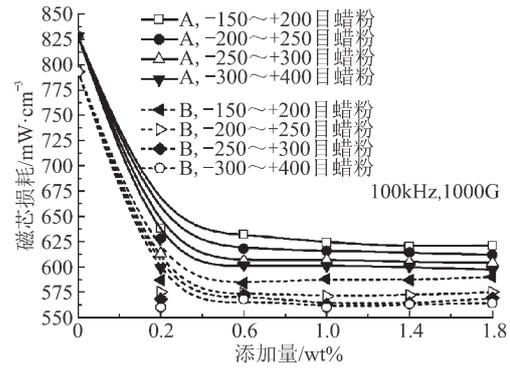


图 5 蜡粉添加量对磁芯损耗的影响

### 3.3 蜡粉添加量对磁芯损耗的影响

铁硅铝蜡粉芯的磁芯损耗主要由涡流损耗和磁滞损耗两部分组成，涡流损耗主要受电阻率和颗粒尺寸等因素影响，而磁滞损耗主要由颗粒形状、内应力等因素决定<sup>[11-12]</sup>。

图 5 是分别添加四种不同粒度级别的蜡粉时，由 A 和 B 所制磁粉芯的损耗随蜡粉添加量的变化。由图 5 可见，无添加蜡粉时，对应 A 和 B 的磁芯损耗分别为 828 mW/cm<sup>3</sup> 和 793 mW/cm<sup>3</sup>；添加蜡粉后，对应 A 和 B 的磁粉芯损耗均降低。其原因有三方面：一是蜡粉增大了磁粉芯电阻率，导致涡流损耗下降<sup>[6]</sup>；二是蜡粉在铁硅铝颗粒表面起润滑保护作用，防止磷酸盐绝缘层在压制脱模时遭受破坏，而绝缘层的损伤会大幅增大涡流损耗<sup>[13-15]</sup>；三是蜡粉有助于压制压力的传递，可减少铁硅铝颗粒内部应力和位错的产生，降低磁滞损耗<sup>[16]</sup>。添加蜡粉可作为降低磁芯损耗的一种手段，然而，蜡粉降低磁芯损耗的效果是有限的。图 5 还表明，添加相同粒度级别蜡粉时，随着添加量的增加，两个样品的损耗趋于不变。在实验中还发现，当添加量在 2% 以上时，磁粉芯的强度大大降低，磁粉芯表面出现粉化。因此，蜡粉添加量不宜过大。

由图 5 还可发现，在同一种绝缘粉中加入等量的四种粒度级别的蜡粉时，蜡粉越细，则磁芯损耗越低。如当添加 1.8% 的 -150~+200 目蜡粉时，A 和 B 的磁芯损耗分别从无添加蜡粉时的 828 mW/cm<sup>3</sup> 和 793 mW/cm<sup>3</sup> 下降至 621 mW/cm<sup>3</sup> 和 590 mW/cm<sup>3</sup>，对应下降幅度分别为 25.0% 和 25.6%；而当添加 1.8% 的 -300~+400 目蜡粉时，A 和 B 的磁芯损耗已降至 597 mW/cm<sup>3</sup> 和 564 mW/cm<sup>3</sup>，对应下降幅度分别高达 27.9% 和 28.9%。因此，蜡粉粒度是影响磁芯损耗的重要因素，在本实验中，添加 -300~+400 目蜡粉

磁芯损耗最低。

### 3.5 $\mu 90 \pm 7.2$ 规格磁粉芯的制备

市售铁硅铝磁粉芯的磁导率有  $125 \pm 10$ 、 $90 \pm 7.2$ 、 $75 \pm 4.8$ 、 $60 \pm 4.8$ 、 $40 \pm 3.2$ 、 $26 \pm 2.08$  和  $14 \pm 1.12$  七种规格。一般而言，磁粉芯的磁导率越低，则其内部绝缘层越厚，所需要的磷酸药水用量越多，生产成本越高。然而，本实验通过在磷酸药水用量较少的绝缘粉中添加适当目数的蜡粉后，同样可以制得性能优良的低磁导率磁粉芯。无添加蜡粉时，对应 A 的磁粉芯磁导率为 123.2，属于  $125 \pm 10$  规格；对应 C 的磁粉芯磁导率经测试为 91.7，属于  $90 \pm 7.2$  规格。在 A 中添加 1.4% 的 -300~+400 目蜡粉后，所制磁粉芯的磁导率从无添加蜡粉时的 123.2 降至 91.5 (即  $90 \pm 7.2$  规格)，经测试，该磁粉芯磁芯损耗仅为  $600 \text{ mW/cm}^3$ ，直流偏置性能良好，当磁导率下降 80%，所对应外加直流偏置磁场为 23.1 Oe；而当磁导率下降 50%，所对应外加直流偏置磁场为 56.2 Oe，如表 2 所示。与直接用磷酸药水用量较大的 C 粉所制备的  $90 \pm 7.2$  规格磁粉芯的性能相比，二者的直流偏置性能相接近，但该添加蜡粉后的 A 所制磁粉芯的磁芯损耗更低。

表 2 对应磁导率规格  $90 \pm 7.2$  的磁粉芯的性能

| 绝缘粉 | 磁导率  | 磁芯损耗/ $\text{mW} \cdot \text{cm}^{-3}$<br>(100 kHz, 1000 G) | 直流偏置/Oe<br>@ 80 %L | 直流偏置<br>@ 50 %L |
|-----|------|---|--------------------|-----------------|
| A   | 91.2 | 600   | 23.1               | 56.2            |
| C   | 91.7 | 811   | 23.1               | 56.0            |

注：A：添加 1.4% 的 -300~+400 目蜡粉；C：未添加蜡粉

## 4 结论

内部润滑剂的添加量及粒度会影响铁硅铝磁粉芯性能。蜡粉的引入会使铁硅铝磁粉芯的生坯密度、磁导率和磁芯损耗下降。在同一种绝缘粉中添加等量的蜡粉时，蜡粉粒度越细，则生坯密度和磁导率的降幅越小，磁芯损耗的降幅越大。在等量的相同粒度蜡粉添加下，磷酸药水用量少的绝缘粉所制得磁粉芯的磁导率下降幅度较大。添加蜡粉有助于制备低损耗的低磁导率铁硅铝磁粉芯。

## 参考文献：

[1] Fan X A, Wang J, Wu Z Y, et al. Core-shell structured FeSiAl/SiO<sub>2</sub> particles and Fe<sub>3</sub>Si/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> soft magnetic composite cores with tunable insulating layer thicknesses [J]. *Maters Sci Eng: B*, 2015, 201: 79-86.

- [2] Liu D, Wu C, Yan M. Investigation on sol-gel Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and hybrid phosphate-alumina insulation coatings for FeSiAl soft magnetic composites [J]. *J Maters Scie*, 2015, 50(20): 6559-6566.
- [3] Huang M Q, Wu C, Jiang Y Z, et al. Evolution of phosphate coatings during high-temperature annealing and its influence on the Fe and FeSiAl soft magnetic composites[J]. *J Alloys Compds*, 2015, 644: 124-130.
- [4] Wu C, Gao X W, Zhao G L, et al. Two growth mechanisms in one-step fabrication of the oxide matrix for FeSiAl soft magnetic composites [J]. *J Magn Magn Mater*, 2018, 452: 114-119.
- [5] Li J, Peng X L, Yang Y T, Ge H L. Preparation and characterization of MnZn/FeSiAl soft magnetic composites [J]. *J Magn Magn Mater*, 2017, 426: 132-136.
- [6] 叶倡华, 黄钧声, 李强, 等. 润滑剂对温压 FeSiAl 磁粉芯性能的影响[J]. *粉末冶金材料科学与工程*, 2016, 21(5): 783-788.
- [7] 林坤, 熊亚东, 严密, 等. 铁硅铝磁粉芯的绝缘包覆研究[J]. *稀有金属材料与工程*, 2014, 5: 1262-1265.
- [8] 叶途明. 粉末冶金材料的温压行为及其致密化机理研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2007.
- [9] Kim Y B, Jang D H, Seok H K, et al. Fabrication of Fe-Si-B based amorphous powder cores by cold pressing and their magnetic properties [J]. *Maters Sci Eng: A*, 2007, 449-451: 389-393.
- [10] 任英磊, 凌子坚, 尤俊华, 等. 绝缘包覆工艺对 Fe<sub>78</sub>Si<sub>9</sub>B<sub>13</sub> 非晶磁粉芯磁性影响研究[J]. *功能材料*, 2012, 43(2): 244-246.
- [11] Lefebvrea L P, Pelletiera S, Gélinas C. Effect of electrical resistivity on core losses in soft magnetic iron powder materials [J]. *J Magn Magn Mater*, 1997, 176(2-3): 93-96.
- [12] 李庆达, 连法增, 尤俊华, 等. 降低软磁铁硅铝磁粉芯损耗的研究[J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2009, 30(6): 837-840.
- [13] Ueno T, Tsuruta H, Saito T, et al. Practical and potential applications of soft magnetic powder cores with superior magnetic properties [J]. *Sci Tech Rev*, 2016.04, B2: 9-14.
- [14] Taghvaei A H, Shokrollahi H, Janghorban K. Structural studies, magnetic properties and loss separation in iron-phenolicsilane soft magnetic composites [J]. *Maters Des*, 2010, 31(1): 142-148.
- [15] Taghvaei A H, Shokrollahi H, Ebrahimi A, et al. Soft magnetic composites of iron-phenolic and the influence of silane coupling agent on the magnetic properties [J]. *Mater Chem Phys*, 2009, 116(1): 247-253.
- [16] Hemmati I, Hosseini H, Miraghaei S. Effect of processing parameters on electrical, mechanical and magnetic properties of iron-resin soft magnetic composite [J]. *Powder Metall*, 2007, 50(1): 86-90.

**作者简介：**林晓军，男，硕士，多年从事软磁粉芯材料的生产及技术研发工作。