

# FeSiCr软磁合金粉综述

## Review of FeSiCr soft magnetic alloy powder

季幼章, 李红兵, 陈晖

大比特(香港)资讯出版有限公司, 广州, 510660

**摘要:** 铁硅铬粉末具有优异的防锈性能, 高饱和磁感应强度, 低损耗特性等, 广泛应用于一体成型电感。雾化法制备的铁硅铬粉末具有低的损耗和高的饱和特性, 以及良好的球形度以确保一体成型电感具有良好的绝缘可靠性。

**关键词:** 铁硅铬粉末, 软磁合金, 综述

### 1 引言

一体成型电感具有体积小、损耗低、耐大电流、稳定性高等特点, 在移动通信、电子产品、汽车电子等领域有着广泛应用。目前, 制备一体成型电感的主要材料为FeSiCr软磁合金粉末, 其具有高磁导率、中高频磁损耗低等特点。

铁硅铬粉末具有优异的防锈性能, 高饱和磁感应强度, 低损耗特性等, 广泛应用于一体成型电感。雾化法制备的铁硅铬粉末具有低的损耗和高的饱和特性, 以及良好的球形度以确保一体成型电感具有良好的绝缘可靠性。

### 2 FeSiCr合金元素成分

铁硅系合金软磁粉末以铁硅为基础, 通过优化设计, 针对高频大电流等不同应用领域开发出不同的合金粉末, 确保成型后的产品具有优异的直流偏置特性和损耗特性。

由于Cr可以提高材料的塑性, 机械强度以及在恶劣环境中的抗腐蚀能力, 通过在FeSi合金中添加Cr得到FeSiCr合金粉末制成的磁粉心, 可以在200℃有效工作, 高温下耐老化能力强。与纯铁粉相比, 由于添加了Si、Cr两种元素, FeSiCr具有不易老化, 功率损耗低, 直流叠加特性优良等特点。与同类材料相比, FeSiCr的密度和可塑性比FeSiAl好, FeSiCr磁粉心的直流叠加特性同FeNi磁粉心相当, 功耗损耗略高于FeNi磁粉心, 但是制备成本比FeNi磁粉心低很多。因此在低压大电流, 大功率密度以及高频应用场合, FeSiCr磁粉心具有重要的应用需求<sup>[1-3]</sup>。

### 3 雾化法制备FeSiCr软磁合金粉末

#### 3.1 水雾化法制备FeSiCr软磁合金粉末<sup>[4]</sup>

采用工业纯铁(纯度大于99.9%)、金属硅(纯度大于99%)和高纯铬块(纯度大于99.9%)进行合金熔炼和雾化, 合金成分见表1。

表1 铁硅铬合金粉末成分(质量分数%)

合金元素	Fe	Si	Cr	C	P	S
内容	Bal	4.0	5.0	≤ 0.02	≤ 0.03	≤ 0.03

将原料按合金成分配比在中频感应炉中进行合金熔炼, 熔化温度为1500℃, 合金熔炼过程中采用氮气作为保护性气氛, 减少合金氧化和烧损。熔化后的金属液从中间包过渡进入雾化区后, 被高压雾化水破碎成金属液滴, 并冷却凝固成粉末, 雾化后的粉末再经水粉分离, 真空干燥等处理。图1为水雾化工艺制备FeSiCr软磁合金粉末的工艺流程图。

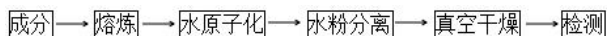


图1 水雾化工艺制备FeSiCr软磁合金粉末的工艺流程图

(1) 通过控制优化水雾化压力、水流量、合金熔炼温度等雾化工艺参数, 制备出粒度细小、氧含量低、形貌较为规则的FeSiCr合金粉末。

(2) 随着雾化压力和熔体温度的提高, 粉末粒度逐渐减小, 粉末含氧量降低, 水流量越小, 所得粉末粒度越细, 松装密度越高, 流动性越好。

(3) 最佳工艺参数为: 熔体温度 1750℃, 雾化水压 50MPa, 水流量 15.24L/min, 所制得的合金的粉末氧含量为  $1114.32 \times 10^6$ , 平均粒度 D50 为 19.01 $\mu$ m, 形貌较规则。

粒度细小, 氧含量低, 形貌规则的水雾化 FeSiCr 合金粉末, 应增加熔体温度和雾化水压力, 减小雾化水流量。

### 3.2 气雾化法制备 FeSiCr 合金软磁粉末<sup>[5]</sup>

采用真空高压惰性气体雾化法制备了 FeSiCr 合金软磁粉末, 适合的雾化参数为雾化压力 4.5MPa, 金属熔体温度为 1500℃, 导液管内径为 5mm, 通过场发射扫描电镜对粉末微观形貌进行了研究, 气雾化法制备的 FeSiCr 粉末颗粒大部分为近球形, 且粉末粒度分布比较均匀。

## 4 FeSiCr 软磁粉末表面绝缘包覆

### 4.1 磷化处理工艺<sup>[6]</sup>

研究了磷化处理工艺对 FeSiCr 合金磁粉性能的影响。结果显示: 随着磷酸浓度的增加, 合金磁粉的功率损耗先减小后增加, 磷酸浓度为 1.5wt% 时合金磁粉具有最低的功率损耗, 提高磷酸浓度可以提高合金磁粉的直流叠加特性以及截止频率, 但其密度、磁导率、饱和磁化强度、品质因数将会下降; 增加磷化温度将会降低合金磁粉的密度、功率损耗特性、磁导率、饱和磁化强度以及品质因数, 但增加磷化温度却可以提高 FeSiCr 合金磁粉的截止频率和直流叠加特性; 磷化时间为 1h 时合金磁粉功率损耗最低, 增加磷化时间会降低合金磁粉密度、磁导率、饱和磁化强度和品质因数, 提高其截止频率以及直流叠加特性。

### 4.2 采用 SiO<sub>2</sub> 对 FeSiCr 磁粉进行包覆<sup>[6, 7]</sup>

首先对 FeSiCr 金属粉末经 0.9% 磷酸磷化处理, 然后对其采用 SiO<sub>2</sub> 进行包覆。

利用正硅酸乙酯包覆液的水解反应, 对 FeSiCr 合金粉末进行表面绝缘处理及制备磁粉样品, 在 FeSiCr 合金粉末表面原位生成 SiO<sub>2</sub> 绝缘包覆层, 通过调节正硅酸乙酯的含量, 可以控制 FeSiCr 合金粉末表面 SiO<sub>2</sub> 绝缘层的厚度。并测试了合金磁粉样品的性能参数。结果表明, 经过处理后的磁粉表面形成了均匀的氧化物绝缘层。磁粉样品具有优异的表面电阻率, 良好的磁导率以及高频特性。

随着包覆液用量的增加, 磁粉样品在相同频率下的磁导率降低, 但品质因数却会增大。由此可见, 对合金粉末表面包覆适当的硅氧化物层, 既可提高合金粉末的表面电阻率, 同时也可以提高 FeSiCr 合金磁粉的电性能。

采用 SiO<sub>2</sub> 对 FeSiCr 磁粉进行包覆, 提高 SiO<sub>2</sub> 的含量可以提高磁粉电阻率、截止频率以及直流叠加特性, 但会使磁粉密度、磁导率、饱和磁化强度和品质因数下降的结果; 实验还显示, 对磁粉磷化处理后再进行 SiO<sub>2</sub> 包覆所制备的合金磁粉心, 其功率损耗特性、截止频率以及直流叠加特性优于仅经过磷化处理或者仅包覆 SiO<sub>2</sub> 制得的 FeSiCr 磁粉心, 但其密度、磁导率、饱和磁化强度和品质因数变差。

## 5 FeSiCr 合金磁粉压制成型<sup>[8]</sup>

在对合金粉进行绝缘包覆后要对粉料进行成型, 而成型主要是通过压制来完成的。坯体的压制密度与成型压力有很大的联系。压坯致密化主要是通过颗粒的填充来实现的, 一般来说, 成型压力愈大, 颗粒填充越充分, 压坯的空隙越少。压坯的致密度越高, 磁粉所占比例增大, 磁粉心的磁导率越大, 磁感应强度也得到提高, 但是压力的增加会使得晶体内产生更多的位错等缺陷和内应力, 晶体内位错密度增大, 点阵畸变变大, 应力场增加, 使得畴壁移动阻力加大, 磁畴的转动变得困难, 导致矫顽力增大。

成型压力为 7MPa 时磁粉心具有较好的功率损耗特性, 增加磁粉心的成型压力可以提高磁粉心的磁导率、品质因数、饱和磁化强度, 但会引起磁粉心直流叠加特性以及截止频率的降低。

随着成型压力的增大, 粉末有效磁导率增大, 磁粉芯损耗减小。但是成型压力不能过大, 否则会破坏粉末绝缘层, 使损耗增大, 恶化磁粉芯的性能。

## 6 FeSiCr 合金磁粉的热处理<sup>[9]</sup>

热处理是影响金属磁粉心磁性能很重要的因素, 一方面, 热处理可以提高磁粉心的机械强度; 另一方面磁粉心在压制过程中残留很大的微观内应力和位错等缺陷, 这会针扎畴壁, 阻碍畴壁的移动, 增大了矫顽力和磁滞损耗。同时降低磁导率, 而通过适当的热处理在一定程度上可以

消除这些不利影响。

热处理工艺主要包括烧结温度,保温时间,烧结气氛和冷却因素的选择。热处理温度对金属磁粉心磁性能的影响尤为显著。

以水雾化法制备的 FeSiCr 合金粉末为原料,经绝缘包覆后进行压制不同温度热处理制备磁环和磁条样品,考察了热处理温度对其性能的影响。

研究发现,随着热处理温度的升高,FeSiCr 合金材料的磁导率和饱和性能呈现先升高后下降的变化。800℃和 1000℃热处理 FeSiCr 合金材料分别获得最大磁导率和最佳绝缘性能,当热处理温度达到 1200℃时材料磁导率显著下降。随着热处理温度升高磁件强度升高,在热处理过程中由于铬(Cr)原子的扩散氧化作用而获得致密的(Fe, Cr)<sub>x</sub>O<sub>y</sub>的氧化膜,在而 Si 元素基本没有发生扩散。

随着热处理温度的增大,粉末有效磁导率增大,磁粉芯损耗减小。但是温度不能过大,否则会破坏粉末绝缘层,使损耗增大,恶化磁粉芯的性能。

### 参考文献

[1] 吴琛, 严密. 金属软磁复合材料研究进展. 中国材料进展, 第 37 卷, 第 8 期, 2018 年 8 月, 582~589

- [2] 陶龙旭, 何俊彦, 张怀武, 仲智勇. 一体化成型电感铁粉心软磁复合材料研究进展. 磁性材料及器件, Vo43, No1, 2012 年 2 月, 1~5
- [3] 张凯, 王征, 张义, 魏荣飞, 兰文中, 余中, 傅贻. SiO<sub>2</sub> 包覆对 FeSiCr 磁粉心性能的影响. 磁性材料及器件, 第 49 卷第 2 期, 2018 年 3 月, 52~55
- [4] 张昊, 胡强, 张少的明, 盛艳伟, 赵新明, 贺会军. 水雾化法制备 FeSiCr 软磁合金粉末研究. 材料导报: 研究篇, 2018 年 10 月 (B), 第 32 卷第 10 期, 3590~3594
- [5] 李兆波, 刘杰. 气雾化法制备 FeSiCr 合金软磁粉末及其形貌分析. 世界有色金属, 2017 年第 14 期, 7 月下, 9~10
- [6] 魏荣飞. Fe-Si-Cr 磁粉表面改性工艺研究. 硕士学位论文, 北京有色金属研究院, 2018 年
- [7] 王东, 吴猛雄, 乐砥柱, 王上衡, 朱建华. 铁硅铬合金磁粉表面包覆及其对磁粉芯性能的影响. 磁性材料及器件, 2019 年 03 期, 22~24 页
- [8] 张瑞标, 朱上辉, 杜成虎, 柏海明, 许佳辉. 金属磁粉心的研究与发展. 磁性材料与器件, Vo42 No3, 2011 年 6 月, 03 期, 1~3, 33 页
- [9] 方萌, 谈敏, 聂敏. 热处理温度对 FeSiCr 软磁合金材料性能的影响. 磁性材料及器件, 第 49 卷, 第 1 期, 2019 年 1 月, 51~54

### 上接171页

略有变化);低温时导磁率较低,虽然 0.55T 左右饱和,但最佳工作点在 0.4T (和 T10 变化不大)。

T16 12K 的  $\mu$ -B 曲线,高温时导磁率相对较高,高温在 0.4T 饱和,但最佳工作点在 0.15T (T10 在 0.1T,略有变化);低温时导磁率较低,虽然 0.55T 左右饱和,但最佳工作点在 0.4T (和 T10 变化不大)。

结论:

T10 和 T16 的 PC40、12K 对比,其变化基本一致,所以基本上可以确定在 T10 总结完的结论的准确性。

(1) PC40 和 12K 材质使用时侧重点不一样,在高低温下,虽然 PC40 抗饱和能力也有所下降,但是远没有 12K 下降的严重,PC40 约下降 20% 左右,但 12K 下降 70-80% 左右,如果高温一定要使用 12K,建议在最高不超过 40℃ 的环境下使用,同时电流工作范围控制在常温下的 60%。

(2) 当然如果客户要求一次电流范围相对较小,可以控制在 0.1T 以内,即常温工作电流的 20-30%,那么在高温环境下反倒是 12K 材料占优,因为其在高温环境下导磁率变化较小。

(3) 在低温下,由于两种材料抗饱和能力相差不大,但是 12K 材料的磁导率远优于 PC40,所以在低温条件下,12K 材料可以优先使用。

(4) 在没有客户特别定制的要求时:

① 12K 材料的优点是导磁率高,但不确定性较大,建议工作温度设定在 40℃ 至 -50℃,同时将饱和点设定在常温饱和点的 60%。

② PC40 材料建议工作温度在 60℃ 至 -40℃,同时将饱和点设定在常温饱和点的 80%。

③ 如果客户有特别定制要求时,可以根据本文的曲线来严加选择。