

Advances in Preparation Technology of Iron-Based Soft Magnetic Composite Materials

Fa-chang Li¹, Yi Li^{1,2}, Cheng-chang Jia¹, Xue-quan Liu²

¹School of Materials Science and Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing, China

²Central Iron & Steel Research Institute, Beijing, China

Email: lifachang2009@yahoo.cn

Abstract: The unique properties of Iron-based soft magnetic composite materials (IPSMC) include three-dimensional isotropic ferromagnetic behavior, high magnetic permeability, low eddy current loss, relatively low core loss at medium and high frequencies, et al. IPSMC have expanded applications on variously electrical motors with complex shapes or operating at high frequencies in the future. The progress of preparation technology in recent years was reviewed in this paper. The research of insulated iron powder processing was introduced especially, and the future study trends of IPSMC were discussed and developed.

Keywords: Iron-based; Soft magnetic composites; Organic coating; Inorganic coating

铁基软磁复合材料的制备工艺研究进展

李发长¹, 李一^{1,2}, 贾成厂¹, 柳学全²

¹北京科技大学材料科学与工程学院, 北京, 中国, 100083

²钢铁研究总院, 北京, 中国, 100081

Email: lifachang2009@yahoo.cn

摘要: 铁基软磁复合材料具有三维各向同性铁磁性能、磁导率高、涡流损耗低和中高频铁损小等特点, 在各类复杂形状电机和高频电机领域有广阔的应用前景。本文综述了近年 IPSMC 材料的工艺研究, 重点介绍了铁粉表面绝缘化处理的研究现状, 并对 IPSMC 材料的发展方向进行了讨论和展望。

关键词: 铁基; 软磁复合材料; 有机包覆; 无机包覆

1 引言

¹软磁复合材料(SMC)是一种以磁性粉末颗粒为原料, 在颗粒表面包覆绝缘介质层后, 再采用粉末冶金工艺将粉体压制所需形状, 并通过热处理而得到的软磁材料。其中铁基软磁复合材料(IPSMC)是通过在铁粉表面包覆绝缘介质层而制得的应用最为广泛的软磁复合材料。IPSMC 材料具有较好的各向同性软磁性能、较高的电阻率、较低的涡流损耗、易于加工等特点, 可用于 kHz-MHz 频率范围的高频交流器件、宽带窄带射频变压器以及异形电机和高频变频电机等场合, 有广阔的应用前景。

IPSMC 材料的制备包括原料铁粉的筛选与预处理、绝缘层的包覆、压制成型工艺和后期热处理工艺等, 目前国内外已对相关因素进行了许多研究。

2 制备工艺研究进展

2.1 原料铁粉预处理

当原料铁粉中存在杂质时, 这些杂质粒子会在 SMC 材料中成为钉扎点, 阻碍磁畴的运动, 使材料的矫顽力增大, 磁损耗增加。刘颖等^[1]对 IPSMC 材料中铁粉纯度、粉末包覆工艺对软磁材料性能的影响进行了研究, 发现铁粉纯度、杂质元素种类、颗粒粒径分布等因素将直接影响粉末压坯密度, 并最终影响材料性能。亦有研究表明^[2], 对铁粉进行球磨和热处理退火后, 材料磁损耗会降低。并且, 铁粉经两次球磨和退火后的损耗比一次处理后的更低。

2.2 铁粉绝缘化处理

纯铁粉颗粒表面包覆一层很薄的绝缘膜, 高频环境中, 绝缘膜能显著降低材料的涡流损耗; 低频环境下,

基金项目: 国家科技支撑计划资助项目(2009BAE74B03)

绝缘膜作用不是那么显著,但也能减小涡流损耗带来的影响。通常根据包覆剂的种类,将铁粉绝缘化处理分为有机包覆和无机包覆。

2.2.1 有机包覆

采用有机树脂包覆粉末颗粒时,非磁性绝缘介质会降低粉末磁导率;为了保证材料具有良好的磁导率,要求包覆层厚度越薄、铁粉含量越高越好。但是随着绝缘介质含量的增加,绝缘层厚度增加,电阻率增大,材料的涡流损耗会降低。所以,必须选择合适的绝缘介质添加量。

常用的有机包覆剂有环氧树脂、丙烯酸、聚酯、环氧树脂-聚酯混合物等。H.Shokrollahi 等^[3]将有机环氧树脂包覆铁粉制成了 IPSMC 材料,发现当环氧树脂含量为 3wt%时得到的样品具有可接受的磁导率实部和最小的磁导率虚部。E.Bayramli 等^[4]的研究显示,有机物含量不宜过高,过高的有机物含量不仅显著降低材料的磁导率,并且对降低材料的磁损耗也不利。另外,有研究表明硅烷等偶联剂的添加能使 IPSMC 材料的性能有所提高。A.H.Taghvaei 等^[5]还研究了硅烷偶联剂对酚醛树脂包覆钝化铁粉制得的 SMC 材料的影响,发现氨基硅烷在 PH=8 时与酚醛树脂发生反应,通过偶联作用,能更好的润湿铁粉表面,生成均匀包覆的绝缘层,进而使材料的磁导率虚部得到了降低,实部变化不明显。

2.2.2 无机包覆

为了提高 IPSMC 材料热处理温度来消除压制时的残余应力,以无机氧化物为包覆材料逐渐成为研究的重点。无机物包覆主要包括硅包覆、无机酸盐包覆及氧化物包覆等。硅包覆采用的包覆剂为硅或 SiO_2 粉末颗粒,要求包覆剂粉末粒度要远远小于铁粉颗粒,包覆剂的制备成本较高。无机酸盐包覆法主要是将铁粉置于配置好的无机酸(重铬酸、磷酸等)溶液中浸泡或加热搅拌等,然后烘干得到包覆铁粉。刘菲菲^[6]等利用化学处理法在铁粉表面生成无机磷酸盐包覆层,并对包覆层的成分和热稳定性进行了初步研究,发现绝缘层在 600°C 具有热稳定性,但由于晶化反应材料电阻率明显降低。氧化包覆类似于磷化处理,在粉末表面形成一层氧化物如 Fe_2O_3 、 Fe_3O_4 等,从而提高材料的电阻率。浙江舟山弘生集团有限公司以水雾化铁粉为原料,采用适量强氧化剂与去离子水配制成绝缘包覆溶液,通过调整工艺参数在粉末颗粒表层一种金属氧化物,生产出了高频铁粉磁芯^[7]。最新的研究是 A.H.Taghvaei 等^[8]采用溶胶凝胶法制备了 MgO 绝缘层包覆铁粉 SMC 材料,在 600°C 热

处理后,矫顽力测试表明材料应力得到了很好的释放,磁滞损耗降低了。相比商用的 SOMALOYTM 样品, MgO 绝缘层有更好的耐热性,相同频率下有更低的涡流损耗,软磁性能更优。

2.3 压制成型

磁粉芯不需经过高温烧结过程,因此压制成型过程显得尤为重要。一般来说,压力愈大,压坯的密度越高,磁粉芯的磁导率越大。为了提高磁粉芯的密度,通常采用自动动态成型法、热压成型、温压、高速压制等先进的粉末冶金成型工艺^[9]。温压技术是近几年来比较热门的一项压制成型技术,很适合于 IPSMC 材料的压制成型,能够使材料密度提高且均匀,同时降低残余应力,从而磁性能得到显著提高。

温压技术中,使用较低的加热温度使加入粉末中的特殊润滑剂软化或熔化,从而使粉末颗粒与模壁之间以及粉末颗粒之间的摩擦大大降低,粉末颗粒的重排进一步提高了压坯密度。日本日立粉末金属公司采用温压和模壁润滑工艺制作的一种引擎喷射器定子用粉芯获得了日本粉末冶金协会颁发的工艺发展奖,这种粉芯具有优异的磁性能、高的强度、化学稳定性和良好的绝热性能。通过对模壁润滑装备进行改装,可使粉芯密度达到 $7.61\text{g}/\text{cm}^3$ 或更高,并可实现大规模生产^[10]。

为减小压制成型时金属粉末颗粒间的摩擦和金属粉末颗粒对阴模型腔壁与芯棒的摩擦,在金属粉末中都添加一定量的固体润滑剂,诸如硬脂酸锌、硬脂酸、酰胺蜡、白蜡、Kenolube(白蜡和硬脂酸锌混合物)等。润滑剂对金属粉末混合粉的松装密度与流速、压制成型后的脱模力、生压坯的密度与强度、压坯的尺寸变化和物理-力学性能等都有一定影响。因此,合理选择润滑剂的种类及确定润滑剂用量也是相当重要的。

2.4 粉芯热处理

热处理对磁粉芯的主要作用是一方面可以提高磁粉芯的强度,另一方面则可以消除成形时磁粉芯内应力以提高磁导率。一般的说,热处理温度、时间、气氛和冷速等,对磁粉芯性能都有影响,特别是热处理温度的影响更为显著。温度升高,内应力消除和晶粒长大,磁导率增加,但是由于绝缘介质的分解及绝缘薄膜的破坏,会使涡流损耗增加,品质因数降低,性能迅速恶化。因此,需要在矛盾的因素中选择最佳热处理工艺条件。

H. Shokrollahi 等^[2]研究了高温磁场退火对 3wt%环氧树脂包覆铁粉 SMC 材料电磁性能的影响。低频下

(<10 kHz), 经加热磁场退火后损耗低于磁场退火和普通退火, 高温磁场退火后的磁损耗比低温磁场退火后的要低; 但是在高频下(>10 kHz)情况相反。

3 展望

IPSMC 材料除了具有磁导率高、矫顽力低和饱和磁感应强度高外, 还具有三维各向同性和低涡流损耗等特性, 在高频交流器件、异形电机和变频电机等领域具有越来越广泛的应用。随着相关研究工作的进展, 铁粉绝缘化处理的方法不断增多, 绝缘膜质量不断提高, 加上快速压制、温压等先进粉末冶金技术的融入, SMC 材料的性能得到不断提升。其未来的发展方向主要有: (1)不断优化铁粉的制备工艺, 得到纯度更高的原料铁粉; 引入高活性碳基铁粉来制备宽粒度分布的 IPSMC 材料; (2)铁粉表面磷化处理等无机绝缘层与树脂有机绝缘层的结合制备多层包覆膜, 同时引入硅烷等偶联剂通过交联处理得到更高质量的绝缘层; (3)不同润滑剂和粘结剂的组成与配比研究, 制备高性能 IPSMC 材料成形助剂; (4)先进粉末冶金工艺在成型工艺中的应用和后期热处理退火工艺的研究。

References (参考文献)

- [1] Ying Liu, Baker A P. Research on Iron Powder Purity and Processing Conditions for Soft Magnetic Composites[J]. *Development and Application of Materials*, 2007, 22(5): 36-39 (Ch).
- [2] Shokrollahi H, Janghorban K. Different annealing treatments for improvement of magnetic and electrical properties of soft magnetic composites[J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2007, 317(1-2): 61-67.
- [3] Shokrollahi H, Janghorban K, Mazaleyrat F, et al. Investigation of magnetic properties, residual stress and densification in compacted iron powder specimens coated with polyepoxy[J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2009, 114(2-3): 588-594.
- [4] Bayramli E, Golgelioglu O, Ertan H B. Powder metal development for electrical motor applications[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2005, 161: 83-88.
- [5] 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]. *Materials Chemistry and Physics*, 2009, 116(1): 247-253.
- [6] Feifei Liu, Baker A P, Lvqian Weng, et al. Study of Phosphate Coatings for Fe Based Soft Magnetic Composites[J]. *Development and Application of Materials*, 2007, 22(5): 11-15(Ch). 刘菲菲, Baker A P, 翁履谦, 等. 铁粉基软磁复合材料绝缘包覆层的研究[J]. *材料开发与应用*, 2007, 22(5): 11-15.
- [7] Yanghui Shu, Yifei Ren, Yong Yu, et al. Investigation of the Process to High-frequency Fabricate Iron Cores[J]. *Aerospace Manufacturing Technology*, 2005, 2(1): 10-15(Ch). 舒阳会, 任伊飞, 俞永, 等. 高频纯铁粉磁芯的工艺研究[J]. *航天制造技术*, 2005, 2(1): 10-15.
- [8] Taghvaei A H, Ebrahimi A, Ghaffari M, et al. Magnetic properties of iron-based soft magnetic composites with MgO coating obtained by sol-gel method[J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2010, 322(7): 808-813.
- [9] Taghvaei A H, Shokrollahi H, Janghorban K. Properties of iron-based soft magnetic composite with iron phosphate-silane insulation coating[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2009, 481(1-2): 681-686.
- [10] Kjeldsteen P. 2003 JPMA award development prize[J]. *Powder Metallurgy*, 2003, 46(4): 291-293.