

Investigation of Fe-Si-Al Magnetic Powder Core

Fa-zeng Lian¹, Qing-da Li², Yu-lan Chen³, Jun-hua You⁴, Jian Tang¹, Min Yu¹, Xing-guo Li¹

¹Key Laboratory for Anisotropy and Texture of Materials, Ministry of Education, Northeastern University, Shenyang, China, 110004

²College of Engineering, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing, China, 163319

³Meizhou Magnetic Material Factory, Meizhou, China, 514031

⁴School of Materials Science and Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang, China, 110870

Email address: lianfazeng@yahoo.com.cn

Abstract: The Fe-Si-Al magnetic powder core has been successfully fabricated by compression molding method. Effects of insulating material, bond material and their addition content on permeability, core loss, quality factor Q and strength were investigated. The results show that in 1.0% bond material and 3.5% insulating material, permeability of magnetic core is 125, radial crushing strength (RCS) 19.24MPa, core loss 80mw/cm³ and quality factor Q 41 at 50kHz and 0.05T.

Keywords: FeSiAl; magnetic powder core; core loss; magnetic properties

铁硅铝磁粉芯研究

连法增¹, 李庆达², 陈玉兰³, 尤俊华⁴, 唐坚¹, 于敏¹, 李兴国¹

¹东北大学材料各向异性与织构教育部重点实验室, 材料研究所, 沈阳, 中国, 110004

²黑龙江八一农垦大学, 工程学院, 大庆, 中国, 163319

³梅州磁性材料厂, 梅州, 中国, 514031

⁴沈阳工业大学材料科学与工程学院, 沈阳, 中国, 110870

Email: lianfazeng@yahoo.com.cn

摘要: 采用模压成型制备了 FeSiAl 磁粉芯。研究了粘结剂和绝缘剂及其添加量等对其磁导率、磁损耗、品质因数 Q 值及压溃强度的影响规律。结果表明, 当绝缘剂含量为 1.0%, 粘结剂含量为 3.5% 时, 在 50kHz, 0.05T 时的性能达到: 磁粉芯磁导率达到 125, 磁粉芯的压溃强度可达到 19.24Mpa, 损耗不高于 80mw/cm³, 品质因数为 41。

关键词: FeSiAl; 磁粉芯; 损耗; 磁性

1 引言

随着科学技术的飞速发展和社会现代化, 对各科技领域的发展提出了更高的要求。电子产品朝着高精度、高灵敏度和大容量、小型化的方向发展。软磁磁粉芯主要是制作各种高性能电感元件应用于各领域。纵观国内外关于制备金属磁粉芯的报道^[1-6], FeSiAl 磁粉芯由于其具有突出的性价比优点, 所以其应用领域

得到进一步扩展, 这就要求 FeSiAl 磁粉芯具有高性能、高成品率、高稳定性及高的样品一致性。

为了提高 FeSiAl 磁粉芯的性能, 本文研究制备工艺及绝缘剂、粘结剂等对磁粉芯性能的影响及性能变化机制。

2 实验方法

FeSiAl 合金成分(wt%): 9-10Si、5-6Al、Fe 余。样品制备工艺流程为: 粉末制备→粉末预退火→表面钝化处理→筛分→混料(与润滑剂、粘结剂、绝缘剂)→模压成型→磁性热处理→磁性测试→压溃强度测试。

粘结剂选择树脂, 绝缘剂选择云母, 添加适量的润滑剂; 混合后的粉末装入模具, 压成 $\Phi 26.9 \times \Phi 14.7 \times 11.2$ mm 圆环, 为了消除粉末在粉碎和

基金项目: 广东省教育部产学研专项基金资助项目(2006D90404027); 教育部创新团队发展计划项目资助(IRT0713)

通讯作者: 连法增

作者简介: 连法增 (1945-), 男, 河北魏县人, 教授, 博士生导师, 主要从事磁性材料及应用研究。

压制成型时的内应力，增强绝缘粘结作用，改善磁粉芯的电磁特性和提高磁粉芯的机械强度，毛坯磁粉芯进行 660℃x1h 热处理。

利用扫描电镜 (JSM-6360LV)、B-H 分析仪 (IWATSU SY-8232) 和万能材料试验机 (YG028A) 检测样品的结构、形貌、磁性能及力学性能。

3 结果与讨论

3.1 粘结剂对磁粉芯性能的影响

图 1 示出硅酮树脂粘结的磁粉芯断口扫描电镜照片。粘结剂、磁粉和绝缘剂具有较好的亲和性，粘结绝缘剂很好的包裹着磁粉，并将磁粉粘结在一起，形成了海岛结构。

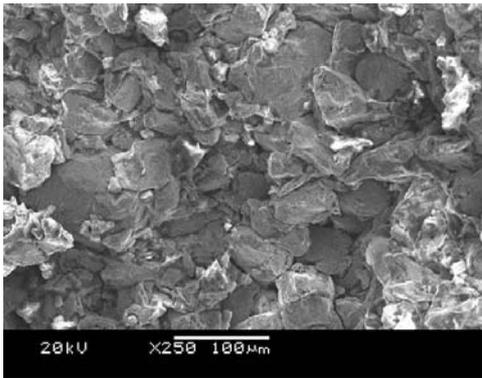


Figure 1. SEM image of magnetic core with resin bond

图 1. 硅酮树脂粘结磁粉芯扫描电镜照片

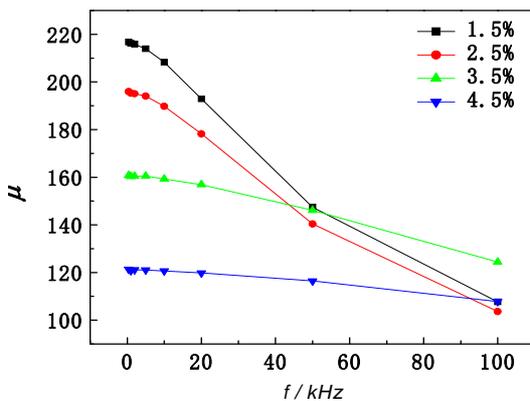


Figure 2. Variation of permeability μ with frequency

图 2. 磁粉芯磁导率与频率的关系

图2为磁粉芯样品磁导率随频率的变化。总的看

来，随着频率升高，样品的磁导率降低。当粘结剂含量为 1.5%，2.5% 时，磁导率较高，但随着频率升高磁导率急剧下降；当粘结剂含量增加到 3.5%，4.5% 时，样品磁导率降低，但频率特性有所提高，磁导率随着频率的升高下降缓慢。当粘结剂含量为 1.5%，2.5%，3.5% 时，样品在 50kHz 时的磁导率为 140~150 之间，当粘结剂含量增加到 4.5% 时，磁导率下降到 116。

粘结剂的添加量在一定程度上影响磁粉芯的频率特性，特别是磁粉芯的高频性能。粘结剂添加量的增多可以增大磁粉颗粒与绝缘剂的有效接触面积，有利于形成更加致密的磁体，从而有效阻隔磁粉颗粒间的涡流损耗。但粘结剂加入量过多时，磁粉芯内非磁性物质比例增大，严重降低了磁粉芯的磁导率。

图3 给出了损耗随频率的变化规律。磁粉芯粘结剂添加量 (wt%): 1.5、2.5、3.5 和 4.5。由图3可以看出，样品损耗随着频率的升高而逐渐增大。在较低频率下 (<20kHz) 磁粉芯的损耗基本变化不大，当频率大于 20kHz 时，随着粘结剂含量增加，磁粉芯损耗明显降低。

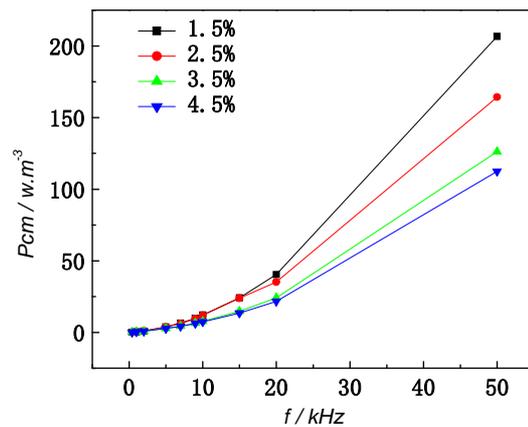


Figure 3. Variation of magnetic core loss P_{cm} with frequency

图3. 磁粉芯损耗与频率的关系

图4为磁粉芯强度随粘结剂含量的变化。从图中可以看到，随着粘结剂含量的增大，磁粉芯的强度增大，当粘结剂含量为 3.5% 时，强度达最大值 28.5MPa；当粘结剂含量大于 3.5% 时，随着粘结剂含量增加，强度降低；这是因为粘结剂的流动性较差，添加量过多时，在粘结过程中长链分子难以在大面积范围形成网状结构联接，反而对提高磁粉芯强度不利。

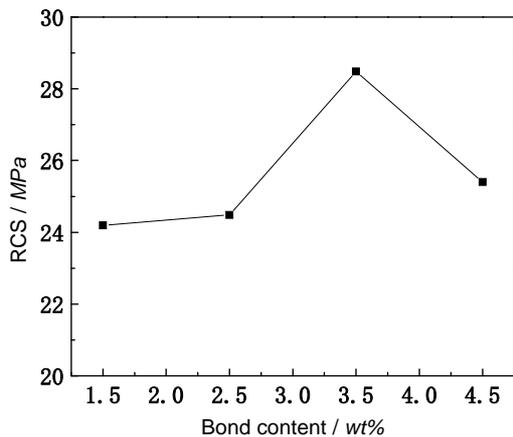


Figure 4. variation of radial crushing strength (RCS) with bond content

图 4 压溃强度随硅酮树脂添加量的变化

3.2 绝缘剂对磁粉芯性能的影响

3.2.1 绝缘剂对磁导率的影响

一般来说，金属磁粉芯是否有相当高的频率稳定性，这都与包覆好坏有直接联系。因为磁粉芯的磁导率

$$\mu = \frac{3 + (\mu' - 1)(3 - 3g)}{3 + g(\mu' - 1)}$$

式中 μ' ----- 磁粉磁导率

g ----- 绝缘介质所占的百分比

当 $\mu' \gg 1$ 时，3-1 式可简化为

$$\mu \propto \frac{3}{g} - 3$$

磁粉芯的磁导率与绝缘剂的百分比成反比，即绝缘剂所占体积越大， μ 越低。一般磁性材料的磁导率总要随着磁场和温度的变化而变化。但制成磁粉芯后，磁导率能在很宽的磁场和温度范围内保持恒定值，如图 5 所示，这是磁粉芯的突出优点。

图 5 为绝缘剂含量不同时磁粉芯磁导率随频率的变化。绝缘剂添加量 (wt%) : 0.7、1.0、1.5、和 2.0。从图中可以看到，磁导率随频率的升高变化较小，具有恒导磁特性；随着云母含量的添加，磁粉芯的磁导率下降，但其频率特性稍有提高。当云母含量超过 1.0%

时，磁导率下降明显。可见，绝缘剂的添加量对磁粉芯的磁导率有很大影响，随着云母含量的增加，磁粉芯中非磁性物质的相对含量增大，磁芯密度减小，导致了磁导率的降低。因此，合适的添加量对磁导率很大的影响，由以上分析中可知，添加 1.0% 的云母，可以保证磁粉芯在获得优良的恒导磁性的同时仍具有较高的磁导率。

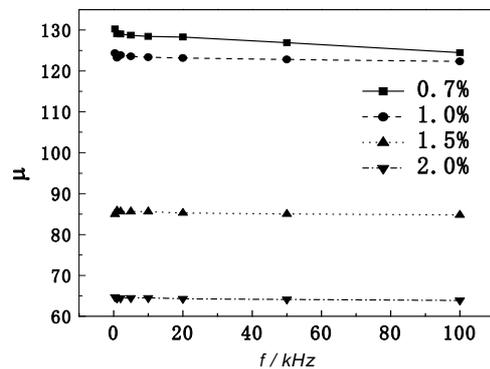


Figure 5. Variation of permeability μ with frequency

图 5. 磁粉芯磁导率随频率的变化

3.2.2 绝缘剂对损耗的影响

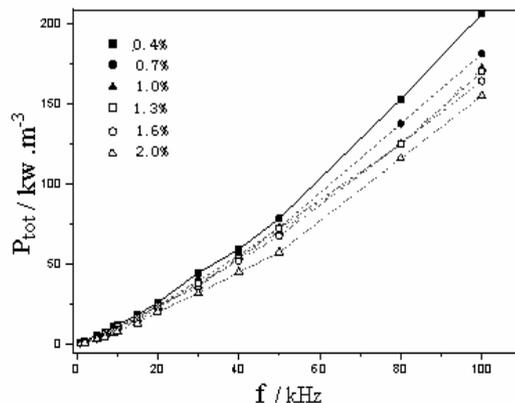


Figure 6. Frequency dependence of the Loss for samples with different insulating material content

图 6. 不同绝缘剂添加量的磁粉芯损耗随频率的变化曲线

磁粉芯主要应用在交变磁场下，其损耗由磁滞损耗和涡流损耗组成。在高频阶段，磁粉芯的损耗主要是由涡流损耗，所以降低磁粉芯的涡流损耗是制备低损耗磁粉芯的必要条件。磁粉芯的涡流损耗主要来自于两方面：金属粉末内部的涡流损耗；金属粉末之间的涡流损耗。为减少金属粉末间的涡流损耗，我们将金

属粉末表面均匀包覆绝缘层，以隔离金属粉末的直接接触。图 6 示出磁粉芯的损耗随着频率的变化，这与公式 $P_{tot}=P_e+P_h= Cd^2B^2f^2/r+ nB^{1.6}f$ 描述的损耗随频率的变化机制一致。

3.2.3 绝缘剂对品质因数的影响

品质因数是衡量磁粉芯性能好坏的综合参数，品质因数越大磁粉芯的磁导率越高，损耗越低。图 7 显示了磁粉芯的复数磁导率随绝缘剂添加量 (wt%) 的变化曲线，如图所示随着绝缘剂添加量的增加，磁粉芯的复数磁导率的实数部分逐渐减小，同时虚数部分也逐渐减小趋势。这是因为绝缘剂的添加量增加，导致磁粉芯的磁性物质添加量减小，密度减小，从而导致 μ' 减小。与此同时，随着绝缘剂添加量的增加，磁粉芯的涡流损耗降低，进而导致了 μ'' 的降低。 μ' 和 μ'' 共同决定了磁粉芯的品质因数。

图 8 示出了磁粉芯的品质因数随绝缘剂添加量 (wt%) 的变化。由图可知，随着绝缘剂添加量的增加，磁粉芯的品质因数逐渐增大，由 0.4% 时的 35 增加到 2.0% 时的 73。这主要是绝缘剂添加量增大导致了磁粉芯的损耗减小，进而导致其品质因数增加。但是，当绝缘剂的添加量大于 1.2% 时磁粉芯的磁导率 μ' 的值发生了大幅度的降低，在 2.0% 出降低到 64，这将不利于 FeSiAl 磁粉芯的应用。所以综合来看当绝缘剂的添加量为 1.0%，此时磁导率为 125 左右，品质因数为 41，磁粉芯的综合性能较好。

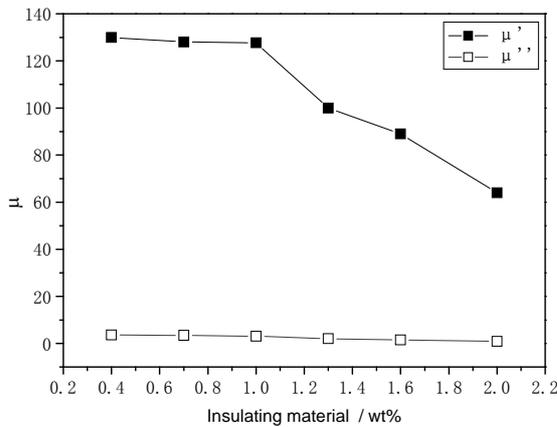


Fig 7 Variation of plural permeability μ with different insulating material content

图 7 磁粉芯的复数磁导率随绝缘剂添加量的变化曲线

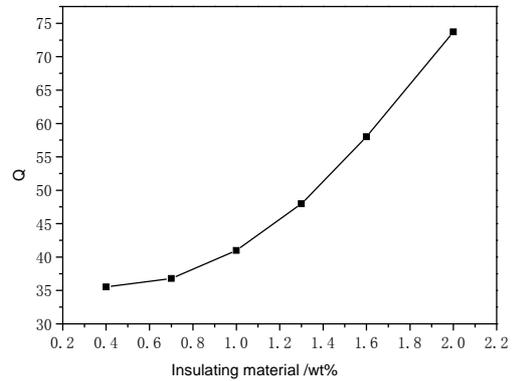


Figure 8. Variation of quality factor Q with different insulating material content

图 8. 磁粉芯的品质因数随绝缘剂添加量的变化

4 结论

- (1) 绝缘剂的添加可提高磁粉芯的恒导磁特性；随着绝缘剂含量的增加，磁粉芯磁导率降低，但频率特性提高；
- (2) 磁粉芯损耗随频率的增加而增大；相同频率下，绝缘剂含量越多，损耗越低；增加绝缘剂含量有助于降低高频涡流损耗；
- (3) 当绝缘剂含量为 1.0%，硅酮树脂含量为 3.5% 时，在 50kHz, 0.05T 时的性能为：磁粉芯磁导率达到 125，磁粉芯的压溃强度可达到 19.24Mpa，损耗不高于 80mw/cm³，品质因数为 41。

References (参考文献)

- [1] R. Nowosielski, J. I. Wyslowski, I. Wnuk I, et al. [J]. J Mater Process Tech, 2006, 175: 324-329.
- [2] J. Slama, A. Gruskova, L. Keszegh, et al. [J]. IEEE Trans Magn, 1994, 30: 1101-1103.
- [3] Hong-zhong Wang, Jian-hong Yi, Yuan-dong Peng, et al. [J]. Powders Metallurgy, 2007, 17: 1-4.
王红忠, 易建红, 彭元东, 等. [J]. 粉末冶金工业, 2007, 17: 1-4.
- [4] Gui-qin Wang [J]. Industry of Powders Metallurgy, 1998, 8: 26-29.
汪贵琴, [J]. 粉末冶金工业, 1998, 8: 26-29.
- [5] Qing-da Li, Fa-zeng Lian, Jun-hua You, et al. [J]. J of Functional Materials, 2009, 40: 369-371.
李庆达, 连法增, 尤俊华 等. [J]. 功能材料, 2009, 40: 369-371.
- [6] X G Li, A. Chiba, S. Takahashi. [J]. Magn Magn Mater, 1997, 170:339-345.