● 试验研究 Experimental Research ●

DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2020.11.001

FeSiB、$Fe_{75}Ga_6B_{15}Nb_3Cu_1$ 和 $Fe_{73.5}Si_{7.5}Nb_3B_9Cu_1Ga_6$ 铁基磁粉芯的制备及其磁性能研究

郭 琦[1,2],邓志旺[1,2],朱乾科[1,2],陈峰华[1,2],胡 勇[1,2],张克维[1,2]

(1.太原科技大学 材料科学与工程学院,山西 太原 030024; 2.山西省磁电功能材料及其应用重点实验室,山西 太原 030024)

摘 要:采用雾化法制备 FeSiB 粉末、机械球磨法制备 $Fe_{75}Ga_6B_{15}Nb_3Cu_1$ 粉末和 $Fe_{73.5}Si_{7.5}Nb_3B_9Cu_1Ga_6$ 粉末,将这 3 种合金粉末压制成型得到磁粉芯。利用 X 射线衍射仪 (X-ray diffraction,XRD)、振动样品磁强计 (Vibrating Sample Magnetometer, VSM)和软磁交流分析仪对退火前后磁粉芯的相组成和磁性能进行检测分析。结果表明:未退火状态下 3 种粉末均发生略微晶化,矫顽力较大,饱和磁感应强度较低。随着绝缘剂包覆量的增加,退火后磁粉芯的密度、饱和磁感应强度、磁导率、磁损耗均降低,1%为最佳的绝缘剂包覆含量。而磁粉芯成型压强的增大,会导致磁粉芯的密度、饱和磁感应强度和磁导率增加,磁损耗降低,2 000 MPa 为最佳成型压强。在绝缘剂包覆量为 1%,成型压强为 2 000 MPa 时,退火后 3 种磁粉芯均发生明显的晶化且饱和磁感应强度和有效磁导率较高,磁损耗较低。其中,$Fe_{75}Ga_6B_{15}Nb_3Cu_1$ 磁粉芯的有效磁导率最高,约为 69.4,其磁损耗最低。综上所述,$Fe_{75}Ga_6B_{15}Nb_3Cu_1$ 磁粉芯磁性能较为优异,是一种理想的复合软磁材料。

关键词:磁粉芯; 磁导率; 磁损耗

中图分类号:TG139 **文献标识码**:A **文章编号**:1000-8365(2020)11-1005-06

Study on the Fe-based Magnetic Powder Cores of FeSiB, $Fe_{75}Ga_6B_{15}Nb_3Cu_1$ and $Fe_{73.5}Si_{7.5}Nb_3B_9Cu_1Ga_6$ Fe-based Core Magnetic Powders

GUO Qi[1,2], DENG Zhiwang[1,2], ZHU Qianke[1,2], CHEN Fenghua[1,2], HU Yong[1,2], ZHANG Kewei[1,2]

(1.Taiyuan University of Science & Technology, School of Materials Science and Engineering, Taiyuan 030024, China; 2. Shanxi Key Laboratory of Magnetoelectric Functional Material and Their Application, Taiyuan 030024, China)

Abstract: The three kinds of powders, which are FeSiB powders produced by atomization technology, $Fe_{75}Ga_6B_{15}Nb_3Cu_1$ powders and $Fe_{73.5}Si_{7.5}Nb_3B_9Cu_1Ga_6$ powders prepared by mechanical ball grinding method, are pressed into core magnetic powders. X-ray diffraction, Vibrating sample magnetometerand Soft magnetic communication analyzer are used to analyze phase composition and magnetic properties of unannealed and annealed core magnetic powders. The results show that the three kinds of unannealed powders, which are slightly crystallized, lower saturation magnetization, and higher coercivity. The density, saturation magnetization, magnetic permeability, and magnetic loss of the annealed core magnetic powders will reduce, while the coating amount of the insulating agent increase, and the optimal coating content of the insulating agent is 1 wt.%. The increase of the molding pressure of the core magnetic powders result in the higher density, saturation magnetization and magnetic permeability, and lower magnetic loss, 2 000 MPa is the optimal molding pressure. When the coating content of the insulating agent is 1 wt.% and the molding pressure is 2 000 MPa, the three kinds of annealed core magnetic powders, which are totally crystallized, have higher saturation magnetization, higher the effective magnetic permeability and lower the magnetic loss. The $Fe_{75}Ga_6B_{15}Nb_3Cu_1$ core magnetic powders have highesteffective permeability, which reaches 69.4 and have lowest magnetic loss. In summary, the $Fe_{75}Ga_6B_{15}Nb_3Cu_1$ core magnetic powders have excellent magnetic properties, which is an ideal novel composite soft magnetic material.

Key words: magnetic powder; magnetic power core; permeability; magnetic loss

非晶纳米晶带材是一种性能优良的软磁材料,具有良好的软磁性能和热稳定性,在高频交流电下,集肤效应会导致其交流磁导率较低,不稳定且损耗较高,故而此种材料常应用于中低频[1]。但是,随着电子技术发展,电子产品向着小型化、高频化发展,对于高频应用的需求也成了必不可少的一部分,因此,开发适用于高频的软磁材料成为当务之急[2-4]。

收稿日期:2020-09-01

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金项目(51901150);山西省高等学校科技创新项目(2019L0630);山西省自然科学基金项目(201901D111267)

作者简介:郭 琦(1988-),山西太原人,博士.研究方向:非晶纳米晶、磁电子学.电话:13269553090,E-mail: qiguo2019@tyust.edu.cn

磁粉芯是1种由合金粉末通过绝缘包覆及压制成型而得到的1种新型复合软磁材料[5-7],广泛应用于变压器、直流转换器、电子系统、扼流圈等领域[8-10]。其优势在于单个颗粒体积小且存在绝缘介质,使得材料整体电阻率小,很难产生集肤效应,并且材料磁损耗及涡流损耗较低,适合在高频(20 kHz以上)应用,磁导率稳定性较好[11-13]。在加工方面,利用粉末冶金工艺,可以将其制成各种形状。然而,磁粉芯中绝缘体会将磁性颗粒隔开,产生间隙效应,导致磁粉芯磁导率降低。为了提高磁粉芯的磁导率,使用快淬法制备的高磁矩纳米晶合金带材经过机械球磨法得到磁性颗粒,通过高磁矩颗粒间的耦合作用来提高磁粉芯的磁导率;此外,由于磁性颗粒本身的饱和磁致伸缩系数较小,畴壁位移和磁畴转动在高频磁化过程中消耗的能量降低,从而可以提高动态磁化的有效磁导率。很多科研工作者利用机械球磨法制备的非晶粉末为原料,通过压制成型得到具有优良软磁性能的磁粉芯[14]。

本文研究了以雾化法制备的FeSiB粉末、机械球磨法制备的$Fe_{75}Ga_6B_{15}Nb_3Cu_1$粉末以及$Fe_{73.5}Si_{7.5}Nb_3B_9Cu_1Ga_6$粉末为原料压制成型而得到的磁粉芯的结构和动态磁化性能。

1　试验材料与方法

本实验采用的原料分别为雾化法制备的FeSiB粉末、机械球磨法制备的$Fe_{75}Ga_6B_{15}Nb_3Cu_1$粉末和$Fe_{73.5}Si_{7.5}Nb_3B_9Cu_1Ga_6$粉末。

将雾化法制备的FeSiB粉末、机械球磨法制备的$Fe_{75}Ga_6B_{15}Nb_3Cu_1$粉末和$Fe_{73.5}Si_{7.5}Nb_3B_9Cu_1Ga_6$粉末直接进行钝化处理,在钝化过程中,将3种原料放入磷酸溶液,磷化处理10 min,再分别用去离子水和酒精清洗两遍,防止氧化。在盛有粉末的烧杯中加入粘结剂(分别将1.0%、1.5%、2.0 %粉料质量的有机硅脂按1:10的体积比与丙酮混合均匀)进行绝缘包覆,并且不断搅拌,加速丙酮挥发,在50 ℃的真空干燥箱中干燥1 h,得到绝缘包覆粉末。称取6 g左右绝缘包覆粉末,加入润滑剂(含1 %的云母)混合均匀,放入模具,在万能试验机上压制成型,成型压强分别为1 400、1 600、1 800、2 000、2 200 MPa。将压制好的磁粉芯置于高纯氮气中,在430 ℃下退火1 h。

利用X射线衍射仪(XRD)对3种粉末以及退火后的磁粉芯进行分析,利用VSM测试样品测磁滞回线。利用MATS-3000S交流B-H仪对3种粉末以及退火后的磁粉芯进行动态软磁性能测试,测试条件:B_m=50 mT,f=10~100 kHz。

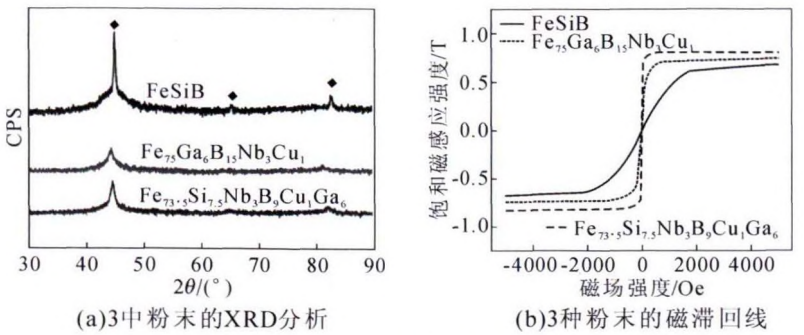
2　试验结果及讨论

2.1　原料粉末分析

图1(a)为3种粉末的XRD图,表明3种粉末发生略微晶化,其中,FeSiB粉末的XRD图谱呈现出漫散峰,但是在45°左右有1个尖峰出现,表明其不是完全非晶状态,这是由于在雾化法制备FeSiB粉末过程中,冷却速率较慢导致粉末部分晶化;而对于机械球磨法制备的$Fe_{75}Ga_6B_{15}Nb_3Cu_1$粉末以及$Fe_{73.5}Si_{7.5}Nb_3B_9Cu_1Ga_6$粉末,其XRD图谱在45°附近的峰整体呈现锐化趋势,表明粉末出现略微晶化的状态,这是由于球磨过程中钢珠与带材相互碰撞摩擦,使局部温度升高,导致非晶带材中原子从无序化逐渐向有序化过度,材料结构由非晶态向晶态转变。此外,从图中XRD晶化相的峰值位置可知,FeSiB粉末中的晶化相峰值位置的2θ值最大,晶化相为α-Fe (Si);$Fe_{73.5}Si_{7.5}Nb_3B_9Cu_1Ga_6$粉末次之,晶化相为$\alpha$-Fe (Ga,Si)[15];$Fe_{75}Ga_6B_{15}Nb_3Cu_1$粉末的2$\theta$值最小,晶化相为$\alpha$-Fe (Ga)[16]。图1(b)为3种粉末的磁滞回线,从图中可以看出,FeSiB、$Fe_{75}Ga_6B_{15}Nb_3Cu_1$及$Fe_{73.5}Si_{7.5}Nb_3B_9Cu_1Ga_6$粉末的矫顽力分别为2.1、0.9、1.3 Oe,饱和磁感应强度为别为0.67、0.81、0.74 T,均较低。

2.2　磁粉芯性能分析

图2(a)-(d)为退火后FeSiB、$Fe_{75}Ga_6B_{15}Nb_3Cu_1$



(a)3中粉末的XRD分析　(b)3种粉末的磁滞回线

图1 粉末原料XRD分析和3种粉末的磁滞回线

Fig.1 XRD curves of powders and Hysteresis loop for the three kinds of powder

及 $Fe_{73.5}Si_{7.5}Nb_3B_9Cu_1Ga_6$ 磁粉芯在成型压强为 1 400 MPa,测试频率为 60 kHz,测试磁场为 50 mT 时,其密度、饱和磁感应强度、有效磁导率和磁损耗随绝缘剂包覆含量的变化。图 2(a)表明随着绝缘包覆剂含量的增加,3 种磁粉芯的密度均发生下降,这是因为包覆剂的成分是有机硅脂,其密度远远低于粉末,包覆剂含量增加会导致磁粉芯密度降低,在包覆剂含量为 1%时,FeSiB、$Fe_{75}Ga_6B_{15}Nb_3Cu_1$ 及 $Fe_{73.5}Si_{7.5}Nb_3B_9Cu_1Ga_6$ 磁粉芯的密度分别为 5.22、5.46 、5.3 $g\cdot cm^{-3}$。图 3(b)表明随着包覆剂含量的增加,3 种磁粉芯的饱和磁感应强度均降低。包覆剂含量增加导致单位体积内磁粉芯的含量减少,通过磁粉芯的磁通量减小,因此饱和磁感应强度降低,在包覆剂含量为 1%时,FeSiB、$Fe_{75}Ga_6B_{15}Nb_3Cu_1$ 及 $Fe_{73.5}Si_{7.5}Nb_3B_9Cu_1Ga_6$ 磁粉芯的饱和磁感应强度分别为 1.34、1.40、1.43 T。图 2(c)表明随着包覆剂含量的增加,有效磁导率降低,FeSiB、$Fe_{75}Ga_6B_{15}Nb_3Cu_1$ 及 $Fe_{73.5}Si_{7.5}Nb_3B_9Cu_1Ga_6$ 磁粉芯的有效磁导率分别从 46.7、62.9 和 57.8 降低至 38.8、54 和 49.8。根据磁粉芯的经验公式[9]:

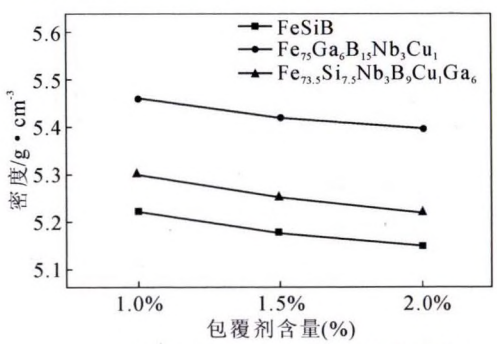
$$\mu_e=[3+(\mu'-1)(3-3g)]/[3+g(\mu'-1)] \quad (1)$$

式中,μ' 是磁粉磁导率,g 为包覆剂含量,由公式(1)可知,磁粉芯的有效磁导率与包覆剂的含量成反比,包覆剂添加量越多磁导率越低。图 2(d)可以看出,随着包覆剂含量的增加,磁粉芯的磁损耗会下降。根据公式:

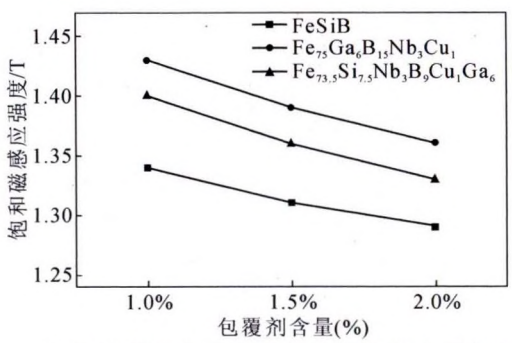
$$W=W_e+W_h+W_c=eB_m^2f^2+nB^{1.6}f+W_c \quad (2)$$

W_e、W_h 与 W_c 分别表示涡流损耗、磁滞损耗与剩余损耗,e 为涡流损耗系数,n 为磁滞损耗系数,f 为频率。磁粉芯损耗主要由磁滞损耗、涡流损耗和剩余损耗组成,而影响磁粉芯磁损耗值的因素有矫顽力、电阻率与粉末颗粒尺寸等。随着包覆剂含量的增加,磁粉芯中非磁物质含量增加,磁性物质相对含量降低,导致颗粒间磁交换作用降低使得矫顽力增大,从而导致磁滞损耗增加。而绝缘包覆剂能有效隔离粉末的直接接触,增加电阻率,从而减小涡流损耗。对于传统的铁芯,在中高频范围内,涡流损耗起着主导作用,磁滞损耗的影响较小,剩余损耗可忽略,所以,磁粉芯的磁损耗会随包覆剂含量增多而减小,但是降幅较低。在绝缘剂包覆量为 1%时,FeSiB 磁粉芯磁损耗最高为 55.7 $W\cdot kg^{-1}$,$Fe_{75}Ga_6B_{15}Nb_3Cu_1$ 磁粉芯与 $Fe_{735}Si_{75}Nb_3B_9Cu_1Ga_6$ 磁粉芯的磁损耗都较低,约为 42.2 $W\cdot kg^{-1}$ 和 48.45 $W\cdot kg^{-1}$。综上所述,绝缘剂包覆量 1%时,3 种磁粉芯的磁导率、磁损耗、饱和磁感应强度、密度均较高,其中,$Fe_{75}Ga_6B_{15}Nb_3Cu_1$ 磁粉芯的磁性能最为优良。

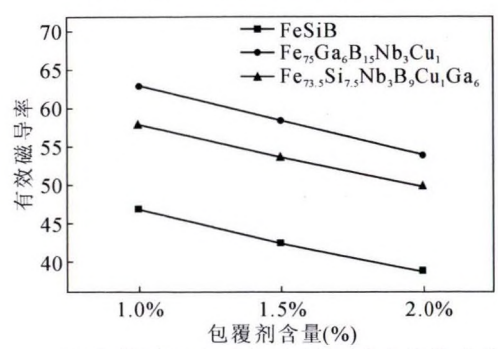
图 3 (a)~ (d) 为不同成型压强对 FeSiB、$Fe_{75}Ga_6B_{15}Nb_3Cu_1$ 及 $Fe_{73.5}Si_{7.5}Nb_3B_9Cu_1Ga_6$ 磁粉芯密度和软磁性能的影响,其中绝缘剂包覆量为 1%,测试磁场 50 mT,频率为 60 kHz。图 3(a)表明,随着压



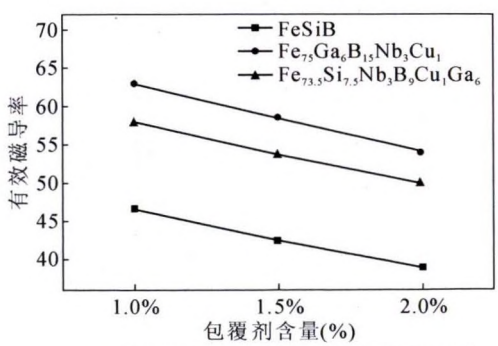
(a)密度随绝缘剂包覆含量的变化



(b)饱和磁感应强度随绝缘剂包覆含量的变化



(c)有效磁导率随绝缘剂包覆含量的变化



(d) 磁损耗随绝缘剂包覆含量的变化

图 2 磁粉芯的密度、饱和磁感应强度、有效磁导率和磁损耗随绝缘剂包覆含量的变化

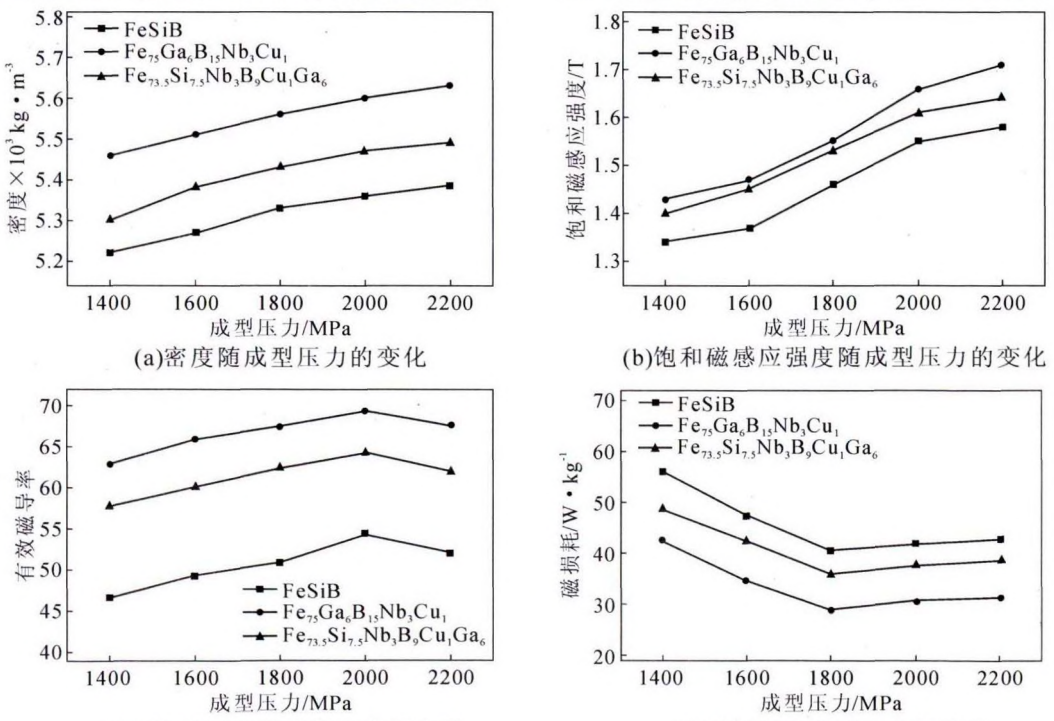
Fig.2 Variation of density, effect permeability, saturation magnetic induction intensity, magnetic loss of magnetic power core with coating content of insulating agent

强从 1 400 MPa 增加到 2 200 MPa，磁粉芯内部结合更紧密，间隙减小，3 种磁粉芯密度均增加。随着压强的增加，密度的增幅逐渐放缓，FeSiB、$Fe_{75}Ga_6B_{15}Nb_3Cu_1$ 及 $Fe_{73.5}Si_{7.5}Nb_3B_9Cu_1Ga_6$ 磁粉芯密度最高分别为 5.38、5.63、5.49 $g\cdot cm^{-3}$。图 3(b)表明随着压强增大，磁粉芯饱和磁感应强度增大，这是因为磁粉芯内部的空隙随压强增大而减小，单位体积内磁粉芯的含量增加，故通过磁粉芯的磁通量增大，饱和磁感应强度增大。在压强为 2 200 MPa 时 FeSiB、$Fe_{75}Ga_6B_{15}Nb_3Cu_1$ 及 $Fe_{73.5}Si_{7.5}Nb_3B_9Cu_1Ga_6$ 磁粉芯的饱和磁感应强度分别为 1.58、1.71、1.64 T。图 3(c)表明随压强增大，磁粉芯有效磁导率整体呈增大的趋势，当成型压强为 2 000 MPa 时，FeSiB、$Fe_{75}Ga_6B_{15}Nb_3Cu_1$ 及 $Fe_{73.5}Si_{7.5}Nb_3B_9Cu_1Ga_6$ 磁粉芯的磁导率分别为 54.5、69.4 和 64.4，根据非磁性边界颗粒模型公式：

$$\mu_{eff}=D\mu_i/(D+\delta\mu_i) \tag{3}$$

式中，μ_{eff} 表示磁粉芯实测的磁导率；μ_i 表示磁粉颗粒的磁导率；δ 表示颗粒间距；D 表示磁粉颗粒直径。由公式(3)可知随着压强增大，颗粒间距减小，故磁粉芯的磁导率增大。当压强从 2 000 MPa 增大到 2 200 MPa 时磁导率出现了略微下降。这是由于成型压强为 2 200 MPa 时，磁粉芯内应力较大，退火无法完全去除内应力，导致了有效磁导率的下降。图 3(d)表明随着压强增大，磁粉芯的磁损耗总体呈下降趋势，这是因为压强增大导致磁粉芯致密度增大，粉末颗粒间空隙减小，粉末颗粒的磁矩与颗粒之间的磁交换作用增强，使磁粉芯矫顽力减小，导致磁滞损耗降低，与此同时，压强增大导致粉末颗粒绝缘包覆层较为致密，增强了磁粉芯的绝缘效果，导致涡流损耗降低。当压强在 1 800 MPa 时，磁损耗达到最低，FeSiB、$Fe_{75}Ga_6B_{15}Nb_3Cu_1$ 及 $Fe_{73.5}Si_{7.5}Nb_3B_9Cu_1Ga_6$ 磁粉芯的磁损耗分别为 40.2、28.7、35.7 $W\cdot kg^{-1}$。但是当压强从 1 800 MPa 继续上升时，磁粉芯的磁损耗出现略微上升，这是由于压强过高时会导致绝缘层破裂，磁粉的直接接触会使涡流损耗增加。同时压强的增大也会使残余内应力急剧上升，导致磁滞损耗上升。综上所述，2 000 MPa 对于 3 种磁粉芯均为最佳成型压强，其中，$Fe_{75}Ga_6B_{15}Nb_3Cu_1$ 磁粉芯综合软磁性能最好。

图 4(a)为绝缘剂包覆量为 1%，成型压强为 2 000 MPa 时，3 种磁粉芯退火后的 XRD 图，表明 3 种磁粉芯均已晶化。FeSiB 磁粉芯颗粒小，析出的晶体尺寸小，晶化体积分数小；而机械球磨法制备的磁粉芯颗粒较大，析出的晶粒尺寸较大，晶化体积分数大。图 4(b)为绝缘剂包覆量 1%，成型压强 2 000 MPa 时，3 种磁粉芯的磁滞回线，可以看出退火后 FeSiB、$Fe_{75}Ga_6B_{15}Nb_3Cu_1$ 及 $Fe_{73.5}Si_{7.5}Nb_3B_9Cu_1Ga_6$ 磁粉芯的矫顽力分别为 0.7、0.2、0.5 Oe，与粉末相比，3 种磁粉芯的矫顽力有明显下降，这是由于退火释放了磁

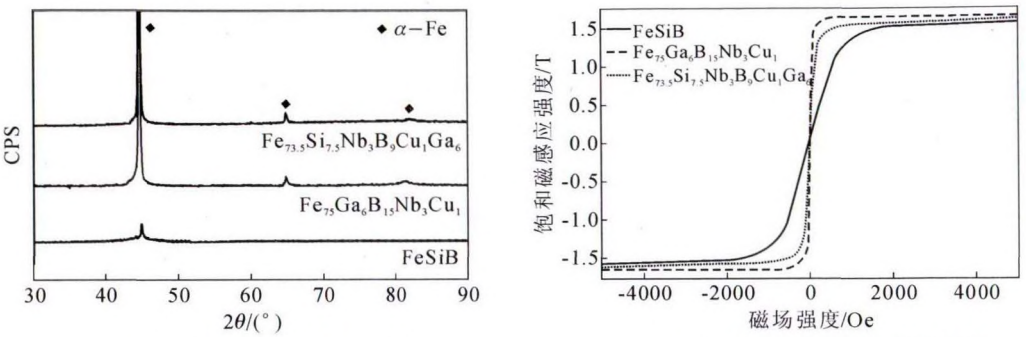


(a)密度随成型压力的变化　(b)饱和磁感应强度随成型压力的变化

(c)有效磁导率随成型压力的变化　(d)磁损耗随成型压力的变化

图 3 磁粉芯的密度、饱和磁感应强度、有效磁导率和磁损耗随成型压力的变化

Fig.3 Variation of density, effect permeability, saturation magnetic induction intensity, magnetic loss of magnetic power core with forming pressure



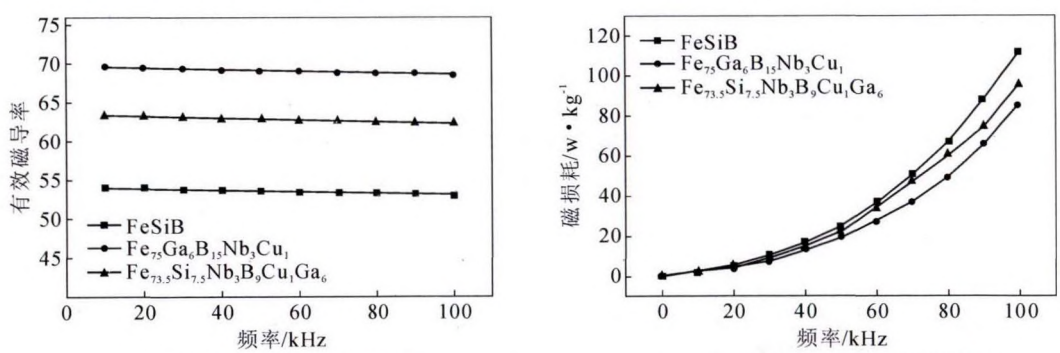
(a)退火后磁粉芯的XRD分析 (b)退火后3种磁粉芯的磁滞回线

图 4 退火后磁粉芯的 XRD 图和退火后 3 种磁粉芯的磁滞回线

Fig.4 XRD patterns and Hysteresis loops of three types of annealed magnetic power cores

粉芯的内应力，使得磁畴壁反向迁移的阻碍减小，导致了矫顽力下降。FeSiB、$Fe_{75}Ga_6B_{15}Nb_3Cu_1$ 及 $Fe_{73.5}Si_{7.5}Nb_3B_9Cu_1Ga_6$ 磁粉芯的饱和磁感应强度为别为 1.55、1.66、1.61 T，这是因为退火过程中磁粉芯的晶化过程产生了析出相，导致了饱和磁感应强度的增加。

图 5(a)(b)分别为绝缘剂包覆量 1%，成型压强 2 000 MPa 时，3 种磁粉芯退火后它们的有效磁导率和磁损耗，测试磁场为 50 mT。由图 5(a)可知，3 种磁粉芯的磁导率在 10~100 kHz 频率内浮动较小，稳定性较好。$Fe_{75}Ga_6B_{15}Nb_3Cu_1$ 磁粉芯的有效磁导率最高，可达到 69.5，这是由于 $Fe_{75}Ga_6B_{15}Nb_3Cu_1$ 磁粉芯退火后，析出了大量的 α-Fe (Ga)相提高了粉末颗粒的磁矩与颗粒之间的磁交换作用；而 FeSiB 磁粉芯的有效磁导率最低，为 54.5；$Fe_{73.5}Si_{7.5}Nb_3B_9Cu_1Ga_6$ 磁粉芯的有效磁导率为 64.5，这是由于 $Fe_{73.5}Si_{7.5}Nb_3B_9Cu_1Ga_6$ 磁粉芯析出的 α-Fe (Ga, Si)相以及 FeSiB 磁粉芯析出相 α-Fe (Si)对于粉末颗粒的磁矩以及颗粒之间的磁交换作用无明显提高，因而磁导率较低。图 6(b)中可以看出，三种磁粉芯经退火后，内应力释放，磁损耗较低。其中，FeSiB 磁粉芯的磁损耗最高，这是由于 FeSiB 磁粉芯密度较低，单位体积内磁性物质相对含量低，导致颗粒间磁交换作用低，使得矫顽力增大，磁滞损耗增大；$Fe_{73.5}Si_{7.5}Nb_3B_9Cu_1Ga_6$ 次之，$Fe_{75}Ga_6B_{15}Nb_3Cu_1$ 磁粉芯最高，这是因为 $Fe_{75}Ga_6B_{15}Nb_3Cu_1$ 磁粉芯退火后，析出了大量的 α-Fe (Ga)相提高了粉末颗粒的磁矩与颗粒之间的磁交换作用，矫顽力减小，磁滞损耗减小。



(a)有效磁导率随频率的变化 (b)磁损耗随频率的变化

图 5 退火后磁粉芯有效磁导率和磁损耗随频率的变化

Fig.5 Variation of effect permeability, magnetic loss of magnetic power core with frequency for annealed magnetic power cores

3 结论

(1)随着绝缘剂包覆量的增加，磁粉芯的密度、饱和磁感应强度、磁导率、磁损耗均降低。其中，绝缘剂包覆量为 1%时，3 种磁粉芯的磁导率、磁损耗、饱和磁感应强度和密度均较高。

(2)随着磁粉芯成型压强的增大，磁粉芯的密度和饱和磁感应强度均会增加，磁导率先降后升，磁损耗先升后降。2 000 MPa 为最佳成型压强，$Fe_{75}Ga_6B_{15}Nb_3Cu_1$ 磁粉芯具有较高的磁导率和饱和磁感应强度，以及较低的磁损耗，具有较为良好的磁性能。

(3)在绝缘剂包覆量为 1%，成型压强为 2 000 MPa 时，退火后的 3 种磁粉芯均发生明显晶化，饱和磁感应强度较高。有效磁导率均升高，稳定性较好，磁损耗均降低。其中，$Fe_{75}Ga_6B_{15}Nb_3Cu_1$ 磁粉芯的饱和磁感应强度为 1.66 T，有效磁导率较高，可达 69.4，磁损耗也较低。

综上所述，绝缘剂包覆量为1%，成型压强为2 000 MPa时，以机械球磨法制备的$Fe_{75}Ga_6B_{15}Nb_3Cu_1$磁粉芯磁性能较为优异，是1种理想的复合软磁材料。

参考文献：

[1] González-Legarreta L, Andrejka F, Marcin J, et al. Magnetoimpedance effect in nanocrystalline $Fe_{73.5}Cu_1Nb_3Si_{13.5}B_9$ single-layer and bilayer ribbons [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2016, 688: 94-100.

[2] Krings A, Boglietti A, Cavagnino A, et al. Soft Magnetic Material Status and Trends in Electric Machines [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(3): 2405-2414.

[3] Ohta M, Yoshizawa Y. Recent progress in high Bs Fe-based nanocrystalline soft magnetic alloys [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2011, 44(6): 1-6.

[4] Leary A M, Ohodnicki P R, Mchenry M E. Soft Magnetic Materials in High-Frequency, High-Power Conversion Applications [J]. JOM, 2012, 64(7): 772-781.

[5] Guo J J, Dong Y Q, Man Q K, et al. Fabrication of FeSiBPNb amorphous powder cores with high DC-bias and excellent soft magnetic properties [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2016, 401: 432-435.

[6] 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]. Materials Science and Engineering: A, 2007, 449-451: 389-93.

[7] Xie D Z, Lin K H, Lin S T. Effects of processed parameters on the magnetic performance of a powder magnetic core [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2014, 353: 34-40.

[8] Otsuka I, Kadomura T, Ishiyama K, et al. Magnetic Properties of Fe-Based Amorphous Powder Cores With High Magnetic Flux Density [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2009, 45 (10): 4294-4297.

[9] Yagi M, Endo I, Otsuka I, et al. Magnetic properties of Fe-based amorphous powder cores produced by a hot-pressing method [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2000, 215-216: 284-287.

[10] Wang X Y, Lu C W, Guo F, et al. New Fe-based amorphous compound powder cores with superior DC-bias properties and low loss characteristics [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2012, 324(18): 2727-2730.

[11] Liu H J, Su H L, Geng W B, et al. Effect of Particle Size Distribution on the Magnetic Properties of Fe-Si-Al Powder Core [J]. Journal of Superconductivity and Novel Magnetism, 2015, 29 (2): 463-468.

[12] Peng Y D, Yi Y, Li L Y, et al. Fe-based soft magnetic composites coated with NiZn ferrite prepared by a co-precipitation method [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2017, 428: 148-153.

[13] Li X L, Dong Y Q, Liu M, et al. New Fe-based amorphous soft magnetic composites with significant enhancement of magnetic properties by compositing with nano- $(NiZn)Fe_2O_4$ [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 696: 1323-1328.

[14] Alvarez K L, Baghbaderani H A, Martí n J M, et al. Novel Fe-based amorphous and nanocrystalline powder cores for high-frequency power conversion [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2020, 501: 1-9.

[15] Zhu Q K, Chen Z, Zhang S L, et al. Improving soft magnetic properties in FINEMET-like alloys with Ga addition [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2019, 487: 1-6.

[16] Zhu Q K, Chen Z, Zhang S L, et al. Crystallization progress and soft magnetic properties of FeGaBNbCu alloys [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2019, 475: 88-92.

2021年《铸造技术》杂志征订启事

《铸造技术》杂志，月刊，1979年创刊，中国铸造协会会刊，被20余家数据库收录。中国标准刊号：ISSN1000-8365/CN61-1134/TG，国内外公开发行，国内邮发代号：52-64，国外发行号：M855。

报道范围：报道国内外铸造领域的先进科技成果、实用工艺技术、生产管理经验以及铸造行业发展动态。内容涵盖铸造成型工艺和铸造材料研究，并兼顾其他金属材料成型方法。

主要栏目：试验研究、工艺技术、生产技术、装备技术、特种铸造、实用成型技术、材料改性、应力控制与理化测试技术、今日铸造、企业精英人物专访等。

发行对象：国内外铸造企业，科研院所，高等学校，铸造原辅材料厂商，设备、仪器厂商，铸件采购商等。

广告范围：刊登铸造设备、熔炼设备、环保设备、铸造原辅材料、检测仪器以及铸件生产、热处理设备、科研成果转让等相关信息。

订阅方式及价格：

请从当地邮局订阅，也可以直接从铸造技术杂志社订阅。全年12期，每期定价25元，平寄全年300元（含邮费），挂号全年336元，快递全年420元。

海外：每期定价25美元，全年300美元。

银行汇款：

户　名：陕西铸造技术杂志社有限责任公司

账　号：3700 0235 0920 0091 309

开户行：中国工商银行西安市互助路支行

邮购地址：陕西省西安市碑林区友谊西路127号西北工业大学凝固楼301室

联系人：李巧凤　电话/传真：13991824906

网址：www.zhuzaojishu.net　E-mail: zzjs@263.net.cn

微信扫一扫 信息快知道