试验研究 Experimental Research ● DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2020.11.001

FeSiB、Fe₇₅Ga₆B₁₅Nb₃Cu₁和 Fe_{73.5}Si_{7.5}Nb₃B₉Cu₁Ga₆ 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 Fe₇₅Ga₆B₁₅Nb₃Cu₁ 粉末和 Fe₇₅Si₇₅Nb₃B₉Cu₁Ga₆ 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,2000 MPa 为最佳成型压强。在绝缘剂包覆量为 1%,成型压强为 2000 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,Fe₇₅Ga₆B₁₅Nb₃Cu₁ 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,Fe₇₅Ga₆B₁₅Nb₃Cu₁ 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

文章编号:1000-8365(2020)11-1005-06

Study on the Fe-based Magnetic Powder Cores of FeSiB, Fe₇₅Ga₆B₁₅Nb₃Cu₁ and Fe_{73.5}Si_{7.5}Nb₃B₉Cu₁Ga₆ Fe-based Core Magnetic Powders

文献标识码:A

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 $Fe_{73,5}Si_{7,3}Nb_3B_9Cu_1Ga_6$ 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 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 permeability and lower the magnetic loss. The Fe₇₅Ga_6B_{15}Nb_3Cu_1 core magnetic powders have highest effective permeability, which reaches 69.4 and have lowest magnetic loss. In summary, the Fe₇₅Ga_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

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: giguo2019@tyust.edu.cn 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^[24]。

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[57],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(20kHz 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 Fe₇₅Ga₆B₁₅Nb₃Cu₁ 粉 末 以 及 Fe_{73.5}Si_{7.5}Nb₃B₉Cu₁Ga₆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 Fe₇₅Ga₆B₁₅Nb₃Cu₁ 粉末和 Fe_{73.5}Si_{7.5}Nb₃B₉Cu₁Ga₆ 粉末。

将雾化法制备的 FeSiB 粉末、机械球磨法制备 的 Fe₇₅Ga₆B₁₅Nb₃Cu₁ 粉末和 Fe₇₃₅Si₇₅Nb₃B₉Cu₁Ga₆ 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1h,得到绝缘包覆粉末。称取 6g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1400、1600、1800、2000、2200 MPa。将压 制好的磁粉芯置于高纯氮气中,在430℃下退火1h。

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 Fe75Ga6B15Nb3Cu1 粉末以及 FensSinsNbaBoCulGa。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); Fe73.5Si7.5Nb3B9Cu1Ga6 粉末次之, 晶化相为 α-Fe (Ga,Si)^[15]; Fe₇₅Ga₆B₁₅Nb₃Cu₁ 粉末的 2θ 值最小, 晶化相为 α-Fe (Ga)^[16]。图 1(b)为 3 种粉末的磁滞回 线,从图中可以看出,FeSiB、Fe75Ga6B15Nb3Cu1及 Fe_{73.5}Si_{7.5}Nb₃B₉Cu₁Ga₆ 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、Fe75Ga6B15Nb3Cu1





及 Fe73 Si7 SNb3B9Cu1Ga6 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、Fe75Ga6B15Nb3Cu1及 Fe715Si75Nb3B9Cu1Ga6磁粉芯的密度分别为 5.22、 5.46、5.3 g·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、Fe75Ga6B15Nb3Cu1及 Fe735Si75Nb3B9Cu1Ga6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、Fe75Ga6B15Nb3Cu1及 Fe735Si75Nb3B9Cu1Ga6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]:

μ_e = [3 + (μ' - 1)(3 -3g)]/[3 + g(μ' - 1)] (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:

 $W = W_{e} + W_{h} + W_{c} = eB_{m}^{2} f^{2} + nB^{1.6} f + W_{c}$ (2)

We、Wh与We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·kg⁻¹, Fe₇₅Ga₆B₁₅Nb₃Cu₁ 磁粉 芯与 FerasSirsNb3B9Cu1Ga6 磁粉芯的磁损耗都较低,约 为 42.2 W·kg⁻¹ 和 48.45 W·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,Fe75Ga6B15Nb3Cu1磁粉芯 的磁性能最为优良。

图 3 (a)~ (d) 为不同成型压强对 FeSiB、 Fe₇₅Ga₆B₁₅Nb₃Cu₁及 Fe₇₃₅Si₇₅Nb₃B₉Cu₁Ga₆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





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、 Fe75Ga6B15Nb3Cu1及Fe735Si75Nb3B9Cu1Ga6磁粉芯密 度最高分别为 5.38、5.63、5.49 g·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2200 MPa时 FeSiB、Fe75Ga6B15Nb3Cu1 及 Fe73.5Si7.5Nb3B9Cu1Ga6 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2000 MPa时,FeSiB、 Fe75Ga6B15Nb3Cu1 及 Fe735Si75Nb3B9Cu1Ga6 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:

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

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 2000 MPa 增大到 2200 MPa 时磁导率出现了略微下降。这是由于成 型压强为 2200 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1800 MPa时,磁损耗达到最低, FeSiB、Fe₇₅Ga₆B₁₅Nb₃Cu₁及 Fe₇₃₅Si₇₅Nb₃B₉Cu₁Ga₆ 磁 粉芯的磁损耗分别为40.2、28.7、35.7 W·kg⁻¹。但是 当压强从1800 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,2000 MPa 对于3种磁粉芯均为最 佳成型压强,其中,Fe₇₅Ga₆B₁₅Nb₃Cu₁ 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、 Fe₇₅Ga₆B₁₅Nb₃Cu₁ 及 Fe₇₃₅Si₇₅Nb₃B₉Cu₁Ga₆ 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





《铸造技术》11/2020 郭 琦,等:FeSiB、Fe₇₅Ga₆B₁₅Nb₃Cu₁和 Fe₇₅Si₇₅Nb₃B₉Cu₁Ga₆铁基磁粉芯的制备及其磁性能研究 •1009•



图 4 退火后 磁 析心的 XRD 图 和退火后 5 种 磁 析心的 磁 带 凹线 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、Fe₇₅Ga₆B₁₅Nb₃Cu₁及 Fe_{73.5}Si_{7.5}Nb₃B₉Cu₁Ga₆磁粉芯的饱和磁感应强度为别 为1.55、1.66、1.61T,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。Fe₇₅Ga₆B₁₅Nb₃Cu₁ 磁粉芯的有效磁导率最 高,可达到 69.5,这是由于 Fe₇₅Ga₆B₁₅Nb₃Cu₁ 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}Nb₃B₉Cu₁Ga₆ 磁粉 芯的有效磁导率为 64.5,这是由于Fe_{73.5}Si_{7.5}Nb₃B₉Cu₁Ga₆ 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}Nb₃B₉Cu₁Ga₆ 次之, Fe₇₅Ga₆B₁₅Nb₃Cu₁ 磁 粉 芯 最 高,这是 因 为 Fe₇₅Ga₆B₁₅Nb₃Cu₁ 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。



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。2000 MPa 为最佳成型压强, Fe₇₅Ga₆B₁₅Nb₃Cu₁ 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2000MPa 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,Fe₇₅Ga₆B₁₅Nb₃Cu₁磁粉芯的饱和磁 感应强度为1.66T,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2000 MPa时,以机械球磨法制备的Fe₇₅Ga₆B₁₅Nb₃Cu₁ 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:

- González-Legarreta L, Andrejka F, Marcin J, et al. Magnetoimpedance effect in nanocrystalline Fe₇₃₅Cu₁Nb₃Si₁₃₅B₉ 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)Fe₂O₄ [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: 名:陕西铸造技术杂志社有限责任公司 È 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 微信扫一扫 信息快知道 E-mail: zzjs@263.net.cn 网址: www.zhuzaojishu.net